

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

TESE DE DOUTORADO

**SECAGEM COMBINADA (CONVECTIVA E
MICRO-ONDAS) DE SÓLIDOS
ESFEROIDAIS PROLATOS: MODELAGEM,
SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO**

EDNA GOMES DA SILVA

CAMPINA GRANDE-PB

2016

EDNA GOMES DA SILVA

**SECAGEM COMBINADA (CONVECTIVA E
MICRO-ONDAS) DE SÓLIDOS
ESFEROIDAIS PROLATOS: MODELAGEM,
SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande como requisito final à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos, área de concentração em Desenvolvimento de processos.

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

Campina Grande – PB
2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586s Silva, Edna Gomes da.
Secagem combinada (convectiva e micro-ondas) de sólidos esferoidais prolatos: modelagem, simulação e experimentação / Edna Gomes da Silva. – Campina Grande, 2016.
150 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima.

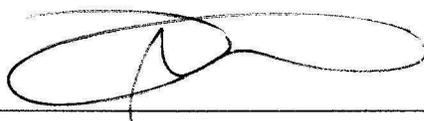
Referências.

1. Secagem Combinada – Conectiva e Micro-ondas. 2. Sólido Esferoidal Prolato. 3. Arroz. 4. Transferência de Calor e Massa. 5. Simulação. 6. Volumes Finitos. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 66.047.41(043)

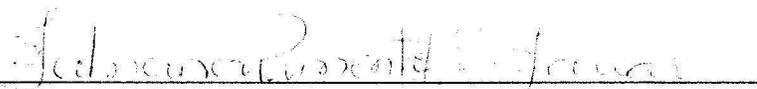
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
EDNA GOMES DA SILVA, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE.

Tese de Doutorado aprovada em 19/08/2016.



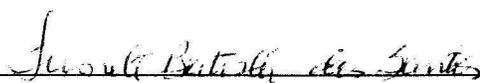
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (UFCG)

Orientador



Profa. Dra. Fabiana Pimentel Macedo de Farias (UFCG)

Examinador externo



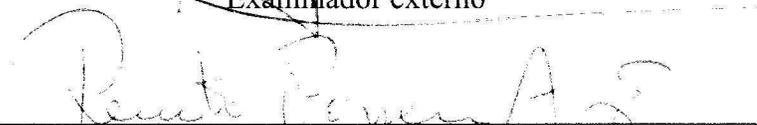
Profa. Dra. Ivonete Batista dos Santos (UEPB)

Examinador externo



Prof. Dr. Laercio Gomes de Oliveira (UFCG)

Examinador externo



Eng. Dr. Renato Fonseca Aragão (UFCG)

Examinador externo

Campina Grande, agosto de 2016
PB - Brasil

DEDICATÓRIA

À minha mãe Celina Gomes da Silva (*in memoriam*), aos meus irmãos Luiz, Genício, Vera Lúcia e Suellen Vieira, aos meus sobrinhos Camila e Sérgio e, com amor e carinho, ao meu amado filho Diego Arley Gomes da Silva.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o todo poderoso, por ter me concedido coragem e perseverança durante o curso.

Ao meu orientador professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela valiosa orientação, dedicação e incentivo para a realização deste trabalho de pesquisa.

À coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, na pessoa do prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto pelo apoio e atenção durante a realização deste trabalho.

Aos docentes do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, os quais demonstraram sua competência nos ensinamentos necessários à minha profissionalização.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Dra. Fabiana Pimentel Macedo Farias, Dra. Ivonete Batista dos Santos, Dr. Laércio Gomes de Oliveira e Dr. Renato Fonseca Aragão por terem disponibilizado seu precioso tempo na avaliação deste trabalho e pelas relevantes contribuições apresentadas.

Aos colegas de doutorado Verônica Pinto, Célia Maria Franco, Evaldo Marcos, Veralúcia, Cidrônia, Valneide, José Vieira, João Paulo, Rodrigo, Anderson, Vanessa, Valdeiza, Daniela Passos, Alysso Daniel, Antônio Nunes, Daniel, Antônio Gadelha, Morgana, Tony Herbert, Flávia, Wilma e Hallyson pelo convívio e apoio durante estes intensos anos de estudo.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

“Se os fatos não se encaixam na teoria, modifique os fatos”.

Albert Einstein

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Micro-ondas	5
2.1.1	Fundamentos	5
2.1.2	Interação material/micro-ondas	7
2.2	Secagem por micro-ondas	9
2.2.1	Conceitos fundamentais e uso	9
2.2.2	Fatores considerados na secagem por micro-ondas	12
2.2.2.1	Aquecimento por micro-ondas	12
2.2.2.2	Efeitos da geometria e da composição do material a ser seco	13
2.2.2.3	Efeito da massa do material	14
2.2.2.4	Potências de forno de micro-ondas	14
2.2.2.5	Propriedades dielétricas	16
2.2.3	Modelos de transferência de calor e massa na secagem por micro-ondas	18
2.2.3.1	Modelos empíricos	20
2.2.3.2	Modelos difusivos	23
2.2.3.3	Modelos de transferência de calor e massa acoplados	24
2.2.3.3.1	Modelo de Luikov	28
2.2.3.3.2	Método de Whitaker	29

2.2.3.3.3 Método de Philip e de Vries	31
3 Metodologia	32
3.1 Experimental	32
3.1.1 Material e equipamentos	32
3.1.2 Método experimental	34
3.1.2.1 Secagem	34
3.1.3 Parâmetros auxiliares e dados de secagem	37
3.1.4 Tratamento estatístico dos dados experimentais	40
3.2 Teórica	41
3.2.1 Modelo matemático	41
3.2.1.1 Equação de difusão no sistema de coordenadas cartesianas	41
3.2.1.2 Equação de difusão no sistema de coordenadas esferoidal prolato	45
3.2.2 Solução numérica das equações de difusão de calor e massa para um esferoide prolato	57
3.2.2.1 Formulação geral	57
3.2.2.2 Discretização das equações governantes para volumes internos	59
3.2.2.3 Discretização para os volumes de fronteira	64
3.2.2.4 Discretização para os volumes de simetria	70
3.2.3 Solução do sistema de equações	75
3.2.4 Casos estudados	75
3.2.4.1 Refinamento de malha e passo de tempo	75
3.2.4.2 Validação do modelo e metodologia	76
3.2.4.3 Simulação com um material arbitrário	77
3.2.4.4 Simulação com grãos de arroz em casca	79
4 Resultados e discussão	83
4.1 Experimental	83
4.1.1 Perda de massa dos grãos de arroz durante a secagem	83
4.1.2 Aquecimento dos grãos de arroz durante a secagem	91

4.1.3 Avaliação da qualidade dos grãos de arroz antes e pós secagem	93
4.2 Teórico	95
4.2.1 Refinamento de malha e tempo	95
4.2.2 Validação do modelo e Metodologia	98
4.2.3 Casos simulados: Aplicação a material arbitrário	101
4.2.3.1 Secagem por micro-ondas e convecção na superfície	101
4.2.4 Casos simulados: Aplicação a grãos de arroz em casca	114
4.2.4.1 Ajuste do modelo empírico aos dados experimentais	114
4.2.4.2 Estimativa dos coeficientes de difusão e de transferência de massa convectivo com o modelo de Fick	117
5 Conclusões e sugestões para futuros trabalhos	128
5.1 Conclusões	128
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	129
Referências Bibliográficas	130
Apêndice A	147

RESUMO

SILVA, Edna Gomes da, Secagem Combinada (Convectiva e Micro-ondas) de Sólidos Esferoidais Prolatos: Modelagem, Simulação e Experimentação, Campina Grande, Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 150p. Tese (Doutorado).

Este trabalho tem como objetivo estudar teórico e experimentalmente a secagem combinada (convectiva e micro-ondas) de sólidos esferoidais prolatos. Um modelo matemático bidimensional transiente em coordenadas esferoidais prolatas foi desenvolvido para prever a transferência de calor e massa e simular a distribuição do teor de umidade e da temperatura no interior do sólido, considerando condição de contorno convectiva na superfície, termo de geração de calor por onda eletromagnética e ao longo do processo, propriedades termo físicas e volume constantes. O método dos volumes finitos foi utilizado para a solução numérica das equações governantes, usando uma malha regular. Para validação da metodologia teórica foram realizados experimentos de secagem por micro-ondas com grãos de arroz em casca in natura (variedade BRSMG Conai) para três níveis de potências absorvidas: 0,192; 0,491 e 0,694 W. Resultados do efeito da razão de aspecto do sólido, números de Biot de transferência de massa e de calor, densidade de potência e fator de atenuação da onda eletromagnética sobre a cinética de secagem e aquecimento, e distribuições de temperatura e teor de umidade no interior do sólido são apresentados e analisados. A comparação entre os dados teóricos e experimentais do teor de umidade e da temperatura dos grãos de arroz em casca resultou num bom ajuste e possibilitou a estimativa dos coeficientes de difusão de massa e de transferência de massa e calor convectivos. Verificou-se que, o aumento na potência absorvida proporcionou menor tempo de secagem e maior temperatura superficial do grão de arroz, e que os coeficientes de transporte de calor e de massa preditos tendem a aumentar com o aumento da potência aplicada.

Palavras-chave: Micro-ondas. Secagem. Sólido esferoidal prolato. Arroz. Transferência de calor e massa. Simulação. Volumes finitos.

ABSTRACT

SILVA, Edna Gomes da, Combined Drying (Convective and Microwave) of Prolate Spheroidal Solids: Modeling, Simulation and Experimentation, Campina Grande: Postgraduate in Process Engineering, Federal University of Campina Grande, 2016. 150p. Thesis ph. D.

This work aims to study theoretical and experimentally the combined drying (convective and microwave) of prolate spheroidal solids. A transient two-dimensional mathematical model in prolate spheroidal coordinates it was developed to predict the heat and mass transfer and simulate the moisture content and temperature distributions inside the solid considering convective boundary condition at the surface, microwave heat generation term, thermo physical properties and volume constants. The finite volume method was used for the numerical solution of the governing equations, using a regular grid. To validate the theoretical methodology microwave drying experiments were carried out with rice grains in fresh bark (variety BRSMG Conai) in three levels of absorbed power: 0.192; 0.491 and 0.694 W. Results of the effect of the solid aspect ratio, Biot numbers of mass and heat transfer, power density and attenuation factor of the electromagnetic wave on the drying and heating kinetics, and temperature and moisture content distributions within the solid are presented and analyzed. The comparison between theoretical and experimental data of moisture content and temperature of the rice grain resulted in a good fit and estimative at the mass diffusion coefficient and convective heat and mass transfer coefficients. It was found that the increase in absorbed power provided shorter drying time and higher surface temperature of the rice grain, and that the predicted heat and mass transport coefficients tend to increase with increased power applied.

Keywords: Microwave. Drying. Prolate spheroidal solid. Rice. Heat and mass transfer. Simulation. Finite volumes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Direção do campo elétrico, do campo magnético e da propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo ou no espaço livre	6
Figura 2.2	Espectro eletromagnético.	6
Figura 2.3	Interação do material com a micro-onda.	8
Figura 3.1	Grãos de arroz em casca, in natura (variedade BRSMG Conai).	33
Figura 3.2	Medições das dimensões (comprimento, largura e espessura) dos grãos.	35
Figura 3.3	Amostra antes da secagem com forno de micro-ondas.	36
Figura 3.4	Medição da massa inicial da Amostra.	36
Figura 3.5	Medição da temperatura inicial da Amostra.	36
Figura 3.6	Amostra posicionada no forno de micro-ondas para início da secagem.	37
Figura 3.7	Comparação da forma do grão de arroz em casca com o elipsoide de revolução e o esferoide prolato.	39
Figura 3.8	Características de um esferoide prolato sólido.	46
Figura 3.9	Esquema representativo do sistema de coordenadas esferoidal prolato.	48
Figura 3.10	Vetor posição da micro-onda incidente no interior do esferoide prolato.	55
Figura 3.11	Configuração numérica do problema físico.	58
Figura 3.12	Ponto na superfície do corpo.	64
Figura 3.13	Esquema mostrando a posição da interface i entre os pontos P e E.	70
Figura 3.14	Ponto de simetria na face $\eta = 0$.	71
Figura 3.15	Ponto de simetria na face $\eta = 1$.	72
Figura 3.16	Ponto de simetria na face $\xi = 1$.	73

Figura 4.1	Cinética de secagem de grãos de arroz por micro-ondas na potência de 0,192 W.	85
Figura 4.2	Cinética de secagem de grãos de arroz por micro-ondas na potência de 0,491 W.	85
Figura 4.3	Cinética de secagem de grãos de arroz por micro-ondas na potência de 0,694 W.	86
Figura 4.4	Efeito da potência nominal absorvida sobre o teor de umidade dos grãos de arroz.	87
Figura 4.5	Taxa de secagem de grãos de arroz por micro-ondas com potência de 0,192 W.	87
Figura 4.6	Taxa de secagem de grãos de arroz por micro-ondas com potência de 0,491 W.	88
Figura 4.7	Taxa de secagem de grãos de arroz por micro-ondas com potência de 0,694 W.	88
Figura 4.8	Teor de umidade médio adimensional da amostra 1 ($P_{n1} = 0,192$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.	89
Figura 4.9	Teor de umidade médio adimensional da amostra 2 ($P_{n2} = 0,491$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.	89
Figura 4.10	Teor de umidade médio adimensional da amostra 3 ($P_{n3} = 0,694$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.	90
Figura 4.11	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional obtidos para as amostras 1, 2 e 3, em função do tempo de secagem com micro-ondas.	90
Figura 4.12	Temperatura na superfície dos grãos da amostra 1 ($P_{n1} = 0,192$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.	91
Figura 4.13	Temperatura na superfície dos grãos da amostra 2 ($P_{n2} = 0,491$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.	92
Figura 4.14	Temperatura na superfície dos grãos da amostra 3 ($P_{n3} = 0,694$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.	92
Figura 4.15	Comparação entre as temperaturas medidas na superfície dos grãos obtidas para as amostras 1, 2 e 3 em função do tempo de secagem com micro-ondas	93
Figura 4.16	Grãos de arroz em casca antes do processo de secagem por micro-ondas	93
Figura 4.17	Grãos de arroz em casca das amostras 1, 2 e 3 após processo de secagem por micro-ondas	94

Figura 4.18	Teor de umidade médio em função do tempo para $\Delta t = 1,0$ s e diferentes padrões de malhas.	95
Figura 4.19	Teor de umidade médio em função do tempo para um padrão de malha de 20×20 pontos nodais e diferentes passos de tempo.	96
Figura 4.20	Malhas numéricas no plano físico para elipsoides com diferentes razões de aspecto.	97
Figura 4.21	Malha numérica no plano computacional para um elipsoide com razão de aspecto $L_2/L_1 = 1,001$	98
Figura 4.22	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional em função dos tempos preditos no modelo e os reportados da literatura para uma secagem convectiva.	99
Figura 4.23	Comportamento adimensional da temperatura numa esfera com temperatura na superfície igual a zero e produção de calor constante.	100
Figura 4.24	Comportamento adimensional da temperatura numa esfera com temperatura na superfície igual a zero e taxa de calor variável.	101
Figura 4.25	Teor de umidade médio em função do tempo para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	102
Figura 4.26	Temperatura média em função do tempo para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	102
Figura 4.27	Teor de umidade no eixo y ($z = 0$) em $t = 1000$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	103
Figura 4.28	Teor de umidade no eixo y ($z = 0$) em $t = 4000$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	103
Figura 4.29	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 10$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	104
Figura 4.30	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 100$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	105
Figura 4.31	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 300$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	105
Figura 4.32	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 500$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	106
Figura 4.33	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 1000$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).	106
Figura 4.34	Comportamento transiente do teor de umidade médio do sólido esferoidal prolato com razão de aspecto (2,0), diferentes números de Biot (de massa) e $P_0 = 10^3$ W/m ³ .	107

Figura 4.35	Comportamento transiente da temperatura média de um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto (2,0), diferentes números de Biot (de calor) e $P_0 = 10^3 \text{ W/m}^3$.	107
Figura 4.36	Teor de umidade no eixo y ($z = 0$) em $t = 1000 \text{ s}$ para um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), diferentes números de Biot (de massa) e densidade de potência de 10^3 W/m^3 .	108
Figura 4.37	Teor de umidade no eixo y ($z = 0$) em $t = 6000 \text{ s}$ para um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), diferentes números de Biot (de massa) e densidade de potência de 10^3 W/m^3 .	109
Figura 4.38	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 300 \text{ s}$ para um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), diferentes números de Biot (de calor) e densidade de potência de 10^3 W/m^3 .	110
Figura 4.39	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 1000 \text{ s}$ para um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto), diferentes números de Biot (de calor) e densidade de potência de 10^3 W/m^3 .	110
Figura 4.40	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 4000 \text{ s}$ para um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), diferentes números de Biot (de calor) e densidade de potência de 10^3 W/m^3 .	111
Figura 4.41	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 300 \text{ s}$ para um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), diferentes densidades de potências (P_0) e $Bi_c = 5,0$.	111
Figura 4.42	Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 6000 \text{ s}$ para um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), diferentes densidades de potências (P_0) e $Bi_c = 5,0$.	112
Figura 4.43	Comportamento transiente da temperatura média de um sólido esferooidal prolato, para diferentes fatores de atenuação (Ψ) e densidade de potência de 10^6 W/m^3 .	113
Figura 4.44	Comportamento transiente da distribuição de temperatura de um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), para diferentes fatores de atenuação (Ψ), densidade de potência 10^6 W/m^3 e $t = 600 \text{ s}$.	113
Figura 4.45	Comportamento transiente da distribuição de temperatura de um sólido esferooidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), para diferentes fatores de atenuação (Ψ), densidade de potência 10^6 W/m^3 e $t = 900 \text{ s}$.	114
Figura 4.46	Comparação entre as cinéticas de secagem dos grãos de arroz em casca experimental e predita pelo modelo empírico para $P_{n1} = 0,192 \text{ W}$.	116
Figura 4.47	Comparação entre as cinéticas de secagem dos grãos de arroz em casca experimental e predita pelo modelo empírico para $P_{n2} = 0,491 \text{ W}$.	116
Figura 4.48	Comparação entre as cinéticas de secagem dos grãos de arroz em casca experimental e predita pelo modelo empírico para $P_{n3} = 0,694 \text{ W}$.	117

Figura 4.49	Comparação entre os teores de umidade médio do grão de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental em função do tempo de secagem (Equilíbrio na superfície e potência nominal de 0,192 W).	119
Figura 4.50	Comparação entre os teores de umidade médio do grão de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental em função do tempo de secagem (Equilíbrio na superfície e potência nominal de 0,491 W).	119
Figura 4.51	Comparação entre os teores de umidade médio do grão de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Equilíbrio na superfície e potência nominal de 0,694 W).	120
Figura 4.52	Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz em casca (Modelo de equilíbrio) para a secagem com potência nominal de 0,192 W.	120
Figura 4.53	Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz em casca (Modelo de equilíbrio) para a secagem com potência nominal de 0,491 W.	121
Figura 4.54	Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz em casca (Modelo de equilíbrio) para a secagem com potência nominal de 0,694 W.	121
Figura 4.55	Comparação entre as temperaturas médias preditas e experimentais em função do tempo de secagem dos grãos de arroz para o teste 1.	122
Figura 4.56	Comparação entre as temperaturas médias preditas e experimentais em função do tempo de secagem dos grãos de arroz para o teste 2.	123
Figura 4.57	Comparação entre os teores de umidade médio dos grãos de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Convecção na superfície e potência nominal de 0,192 W).	124
Figura 4.58	Comparação entre os teores de umidade médio dos grãos de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Convecção na superfície e potência nominal de 0,491 W).	124
Figura 4.59	Comparação entre os teores de umidade médio dos grãos de arroz em casca predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Convecção na superfície e potência nominal de 0,694 W).	125
Figura 4.60	Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz (Modelo de equilíbrio) com potência nominal absorvida de 0,192 W.	125
Figura 4.61	Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz (Modelo de equilíbrio) com potência nominal absorvida de 0,491 W.	126
Figura 4.62	Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz (Modelo de equilíbrio) com potência nominal absorvida de 0,694 W.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Porcentagem dos valores médios da água retirada dos grãos de milho em forno de micro-ondas sob ação de quatro diferentes potências e após 45 s.	16
Tabela 2.2	Equações preditas para as propriedades dielétricas de diferentes materiais com suas respectivas referências bibliográficas.	18
Tabela 2.3	Modelos de transferência de calor e massa para a secagem por micro-ondas.	19
Tabela 2.4	Diferentes modelos empíricos reportados na literatura.	22
Tabela 3.1	Dados arbitrários e da literatura utilizados na confecção da malha.	76
Tabela 3.2	Casos simulados na pesquisa para o aquecimento por micro-ondas.	78
Tabela 4.1	Potências absorvidas, parâmetros de secagem e tempo total de secagem	84
Tabela 4.2	Número total, dados dimensionais, volume total e área superficial total dos grãos de arroz em casca antes da secagem por micro-ondas.	84
Tabela 4.3	Resumo do teor de umidade médio (b. s.) para três padrões de malha.	95
Tabela 4.4	Parâmetros estatísticos do modelo empírico proposto após ajustes aos dados experimentais da secagem.	115
Tabela 4.5	Valores do coeficiente de transporte estimado pelo modelo de Fick (Equilíbrio) e erro quadrático médio para cada teste de secagem de grão de arroz.	118
Tabela 4.6	Valores do coeficiente de transporte estimado pelo modelo de Fick (Equilíbrio) e erro quadrático médio para dois testes de secagem de grãos de arroz em casca.	122
Tabela 4.7	Valores do coeficiente de difusão (D) com coeficiente de massa (h_m) finito.	123

NOMENCLATURA

Letras Latinas

a', b', c', d', e', f'	Coeficientes da Equação (3.40 a – f)	[-]
A, B, C	Dimensão do grão de arroz	[mm]
A_0, A_p, A_N, A_S, A_W	Constantes	[-]
c	Velocidade da luz	[m/s]
c_p	Calor específico	[J/kgK]
a_{ij}	Coeficientes nas Equações (2.13) - (2.15)	[-]
Bi	Número de Biot	[-]
Bi_c	Número de Biot (de calor)	[-]
Bi_m	Número de Biot (de massa)	[-]
d	Diâmetro da esfera	[m]
D	Coeficiente de difusão	[m ² /s]
D_p	Profundidade de penetração	[m]
dM/dt	Taxa de secagem	[(kg/kg)/min]
E	Intensidade do campo elétrico local	[V/m]
ERMQ	Erro quadrático médio do teor de umidade	[(kg/kg) ²]
e, w, s, n	Faces dos pontos nodais	[-]
f	Fronteira ou superfície do sólido	[-]
f	Frequência de oscilação	[Hz]
ω	Frequência angular	[rad/s]
\hat{f}_i	Fator de interpolação	[-]
Fo	Número de Fourier	[-]

Fo_c	Número de Fourier de calor	[-]
Fo_m	Número de Fourier de massa	[-]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h_c	Coefficiente de transferência de calor convectivo	[W/m ² K]
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água livre	[J/kg]
h_m	Coefficiente de transferência de massa convectivo	[m/s]
i, j	Posição do ponto nodal na malha	[-]
J	Jacobiano da transformação	[-]
K_{ij}	Coefficientes das Equações (2.13) a (2.15)	[-]
K_T	Condutividade térmica	[W/mK]
L	Comprimento focal	[m]
L_1, L_2	Dimensões do esferoide prolato	[m]
M	Teor de umidade (base seca ou base úmida)	[kg/kg]
m	Massa	[kg]
M^*	Razão de umidade	[-]
\dot{M}	Geração de massa por unidade de volume	[(kg/kg)/m ³]
\dot{M}''	Fluxo de umidade por unidade de área	[(kg/kg)/m ²]
\bar{M}^*	Razão de umidade média	[-]
\bar{M}	Teor de umidade médio	[kg/kg]
M_0	Teor de umidade inicial	[kg/kg]
M_{eq}	Teor de umidade de equilíbrio em base seca	[kg/kg]
P	Pressão total	[Pa]
P	Densidade de potência	[W/m ³]
P^ϕ	Termo de pressão	[Pa]
P_0	Densidade de potência incidente	[W/m ³]
P_n	Potência nominal absorvida	[W]
\dot{Q}	Geração interna de calor	[W/m ³]
\dot{q}''	Fluxo de calor por unidade de área irradiada	[J/sm ²]
S_M	Termo fonte de massa	[(kg/kg)/m ³]
S_T	Termo fonte do calor	[W/m ³]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura	[K]
T	Temperatura	[°C]

\bar{T}	Temperatura média	[K]
$\hat{U}, \hat{V}, \hat{W}$	Coefficientes métricos	[-]
u, v, w	Componentes do vetor velocidade	[m/s]
UR	Umidade relativa	[%]
V	Volume	[m ³]
v	Velocidade	[m/s]
x, y, z	Coordenadas cartesianas	[m]

Letras Gregas

α	Difusividade térmica	[m ² /s]
ρ_s	Densidade aparente do grão	[g/cm ³]
ρ_p	Densidade do produto	[g/cm ³]
λ_0	Comprimento de onda no espaço livre	[m]
ϵ_r	Permissividade relativa	[-]
ϵ_0	Permissividade do espaço livre	[F/m]
ϵ'	Constante dielétrica	[-]
ϵ''	Fator de perda relativa	[-]
ϵ_r''	Fator de perda relativa	[-]
ϕ	Porosidade	[-]
Φ''	Fluxo de massa por unidade de área irradiada	[(kg/kg)/m ²]
Φ	Função	[-]
Γ^Φ, Γ	Propriedade do material	[-]
μ, ϕ, ω	Coordenadas esferoidais prolatas	[-]
η	Coordenada angular ($\perp x$)	[-]
ξ	Coordenada radial	[-]
ζ	Coordenada angular ($\perp z$)	[-]
ξ_0, η_0, ζ_0	Valores constantes das coordenadas esferoidais	[-]
δ, Δ	Variação	[-]
∇	Gradiente	[-]
Ψ	Fator de atenuação	[1/m]

Superescritos

+	Tempo posterior
*	Adimensional
o	Anterior

Subscritos

ξ, η, ζ	Direção perpendicular ao fluxo
abs	Absoluta
c	Calor
eq	Equilíbrio
e, w, n, s	Faces dos pontos nodais
ef	Efetiva
f	Final; Fronteira
inc	incidente
m	Massa
n	Nominal
0	Inicial
pro	Prolato
s	Superfície
w	Água

Abreviações

Efic	Eficiência	[%]
exp	Função exponencial	
FCC	Comissão Federal de Comunicação	
LIR	Lei Internacional de Rádio	
Num	Numérico	
MVF	Método de volumes finitos	
tan	Tangente	
b.s.	Base seca	
b.u.	Base úmida	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, secagem por micro-ondas tem ganho popularidade como método de secagem alternativo para uma grande variedade de alimentos e produtos agrícolas. A principal vantagem da aplicação de micro-ondas é a aceleração destes processos, com redução no tempo de secagem. Além disso, danos sensoriais e nutricionais causados por longo tempo de exposição ou aumento excessivo da temperatura na superfície do alimento podem ser evitados. Outra vantagem deste processo é a possibilidade de evitar o endurecimento do alimento devido a uma secagem mais homogênea e com menores gradientes de umidade e temperatura no interior dos materiais.

A secagem por micro-ondas baseia-se unicamente no modo de aquecimento volumétrico realizado por radiação eletromagnética nas frequências variando de 915 MHz a 2.450 MHz. A rapidez na secagem por micro-ondas proporciona melhoria na qualidade final do produto alimentício, tornando-a uma tecnologia promissora na desidratação ou secagem de alimentos e de outros produtos biológicos. A secagem por micro-ondas tem sido usada para secar cenoura (PRABHANJAN et al, 1995); semente de arroz inteira e moída (LUZ et al., 1998); banana (MASKAN, 2000); Kiwi (MASKAN, 2001); maçã (ANDRÉS et al., 2004); amêndoa de noz macadâmio (SILVA et al., 2007); tomate (CELEN e KAHVECI, 2013), entre outras. A necessidade da melhoria na concepção e otimização do processo de secagem por micro-ondas

levaram os pesquisadores a desenvolverem técnicas de simulação em computador para prever a distribuição da temperatura e da umidade do produto durante a secagem. Todos os trabalhos estão restritos a sólidos em forma de placa, cilindro e esferas. Contudo, na prática, os materiais têm formato diferente como, por exemplo, uva, arroz, banana, etc., que tem forma similar a sólidos esferoidais prolatos.

No geral, verificou-se uma lacuna de modelos matemáticos confiáveis para prever o padrão de aquecimento, da umidade e da distribuição de vapor durante o processo de secagem com base nas propriedades dielétricas, distribuição de água, densidade e mudanças na estrutura, e na composição dos alimentos, bem como a influência da geometria, do tamanho do produto e dos fenômenos que causam variações dimensionais durante o processo de secagem.

Diante do exposto, a motivação desta pesquisa justifica-se em virtude da inexistência de trabalhos desenvolvidos com modelagem matemática sobre a transferência de calor e/ou massa no processo de secagem por micro-ondas de produtos higroscópicos porosos com geometria complexa (esferoide prolato).

Assim sendo, o objetivo geral desta pesquisa é estudar teórico e experimentalmente a secagem combinada (convectiva e micro-ondas) de sólidos esferoidais prolatos.

Como objetivos específicos para o desenvolvimento desta pesquisa pode-se citar:

- apresentar um modelo matemático para descrever o processo de transferência de calor e massa na secagem combinada (convectiva e micro-ondas) de produtos higroscópicos porosos, considerando o sólido como um elipsoide de revolução;
- apresentar a solução numérica das equações governantes usando o método dos volumes finitos, para discretização dos termos do modelo matemático;
- simular a distribuição de temperatura e teor de umidade no interior do sólido e apresentar suas respectivas cinéticas de aquecimento e secagem;
- validar o modelo proposto, comparando os resultados aqui obtidos com os dados teóricos e analíticos do teor de umidade e temperatura reportados na literatura para várias condições de operação;

- avaliar a influência de alguns parâmetros, envolvidos nos processos de transferência de calor e massa, tais como: número de Fourier, número de Biot de massa e calor, densidade de potência aplicada, forma do corpo e fator de atenuação;
- realizar experimentos da secagem de arroz em casca, in natura (variedade BRSMG Conai) por micro-ondas em diferentes condições experimentais;
- comparar os resultados teóricos e experimentais, para várias condições do processo e estimar os coeficientes de transporte.

De um modo geral, o estudo proposto aborda diversos aspectos que diferenciam dos trabalhos existentes na literatura, os quais estão listados a seguir:

- combina secagem convencional (ar quente) com secagem por micro-ondas;
- incorpora os efeitos da direção da micro-onda incidente;
- incorpora efeitos bidimensionais;
- acopla os fenômenos de transferência de calor e massa no sólido;
- aplica no estudo para uma geometria complexa (elipsoide de revolução);
- utiliza o Software Mathematica® como uma ferramenta de trabalho;
- analisa qualitativamente a estrutura do produto antes e após o processo de secagem.

Para facilitar a organização do texto, o assunto foi dividido em 5 capítulos, que descrevem a abordagem, os testes realizados e as soluções obtidas, como segue:

Neste Capítulo foi feita uma introdução. E, por fim os objetivos: geral e específico foram destacados.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos temas abordados na tese, tais como: conceitos fundamentais de micro-ondas e sua interação com os materiais, considerações gerais da secagem por micro-ondas como vantagens e desvantagens, e finalmente, os modelos matemáticos aplicados a secagem por micro-ondas e secagem combinada (convectiva e micro-ondas).

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia experimental, onde reporta-se os materiais utilizados nos experimentos, seus respectivos procedimentos e o processo de secagem. Na metodologia teórica, aborda-se a modelagem matemática, as considerações adotadas para o

modelo de transferência de calor e massa, incluindo o termo fonte (micro-ondas), bem como as condições iniciais e de contorno. Toda a formulação matemática está escrita em coordenadas esferoidais prolatas.

No Capítulo 4, os resultados obtidos experimentalmente e numericamente são discutidos e avaliados. Dados analíticos e numéricos obtidos da literatura são utilizados para comparação e validação do modelo proposto. Dados experimentais e preditos da secagem de grãos de arroz são utilizados para avaliação da temperatura e umidade do produto durante o processo de secagem.

Finalmente, no Capítulo 5 listam-se as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Micro-ondas

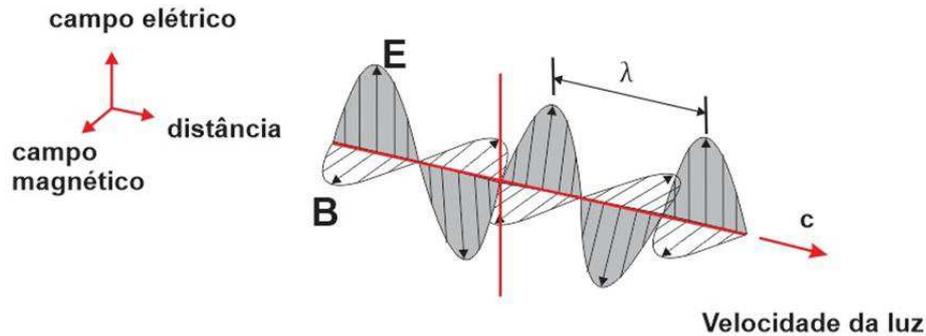
2.1.1 Fundamentos

Micro-ondas, ou ondas de alta frequência, são ondas eletromagnéticas não ionizantes que pertencem a faixa do espectro eletromagnético com comprimento de onda na faixa entre 1 mm e 1 m, correspondente a variação de frequência de 300 MHz a 300 GHz.

Essas ondas são utilizadas na localização de aviões e de barcos, na telefonia móvel e na indústria alimentícia através das tarefas de descongelamento, têmpera, liofilização, panificação, secagem, aquecimento e reaquecimento.

As ondas eletromagnéticas propagam-se com velocidade próxima da velocidade da luz, com comprimento de onda (λ), frequência de oscilação (f), sendo constituídas por componentes do campo elétrico e do campo magnético variáveis, que oscilam de forma transversal em relação à direção de transferência de energia eletromagnética, conforme se encontra esquematizado na Figura 2.1.

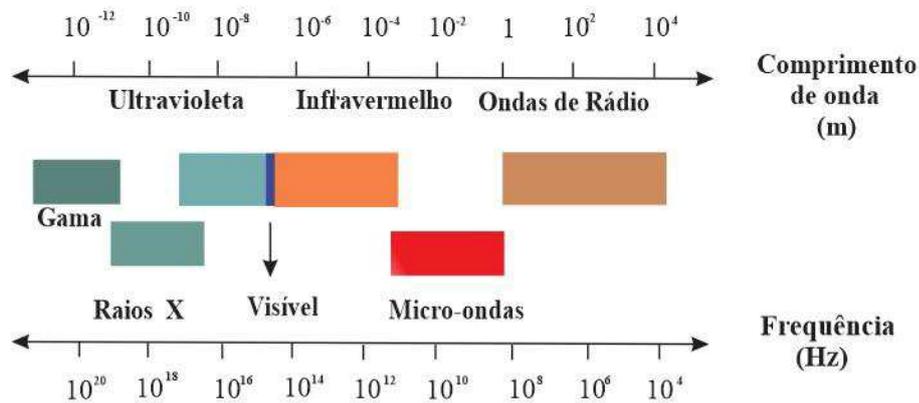
Figura 2.1 – Direção do campo elétrico, do campo magnético e da propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo ou no espaço livre.



Fonte: Adaptado de Marsaioli Junior (2010).

O espectro eletromagnético é definido como conjunto de ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos de onda e frequências. As micro-ondas estão localizadas entre a região do infravermelho e as ondas de rádio conforme ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Sanseverino (2002).

De acordo com a Comissão Federal de Comunicações e as Leis Internacionais de Rádio, os quatro valores de frequências de oscilação: 915 ± 25 ; 2.450 ± 13 ; 5.800 ± 74 e 22.125 ± 125 dados em MHz foram autorizados para utilização nos fornos de micro-ondas industrial, científico e doméstico. Os fornos de micro-ondas comerciais fabricados para uso doméstico ou para laboratórios utilizam micro-ondas com frequência de 2.450 MHz. O forno de micro-ondas doméstico ou analítico gera potência numa faixa entre 600 e 700 W, porém alguns

equipamentos mais modernos podem gerar uma potência de até 1.100 W (MAGALHÃES et al., 2003).

Segundo Meredith (1998), o valor aproximado de 1,22 m para o comprimento de onda (λ) do espaço livre foi obtido através da equação:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 2.1$$

onde a velocidade da luz no vácuo ou espaço livre (c) e a frequência de oscilação (f) são dadas respectivamente, por: $3,0 \times 10^8$ m/s e 2.450 MHz.

De acordo com Barboza et al. (2001), as micro-ondas são geradas por uma válvula denominada magnetron, que compõe o forno de micro-ondas. Após serem geradas, elas são propagadas em linha reta ao longo do guia de ondas, denominado modo dominante. As ondas geradas são levadas até a cavidade do forno, onde o material se encontra para ser aquecido. Para não danificar o magnetron, uma pequena quantidade de micro-ondas geradas é absorvida pelas paredes metálicas do forno e a maior parte da energia é refletida e dissipada num dispositivo, denominado *dummy load* (carga fictícia). O magnetron é regulado para atuar sobre moléculas de água, provocando as vibrações.

2.1.2 Interação material/micro-ondas

As ondas eletromagnéticas do tipo micro-ondas, tal como a luz visível, podem ser transmitidas, refletidas ou absorvidas dependendo do material exposto. Segundo relatos de Menezes et al. (2007), quanto a sua interação com a energia de micro-ondas incidente, os materiais podem ser classificados em três categorias, a saber (Figura 2.3):

- a) Materiais transparentes: São aqueles com baixa perda dielétrica, os quais permitem a passagem de micro-ondas com dissipação de energia irrelevante. Ex: vidros, plástico, cerâmica, entre outros.

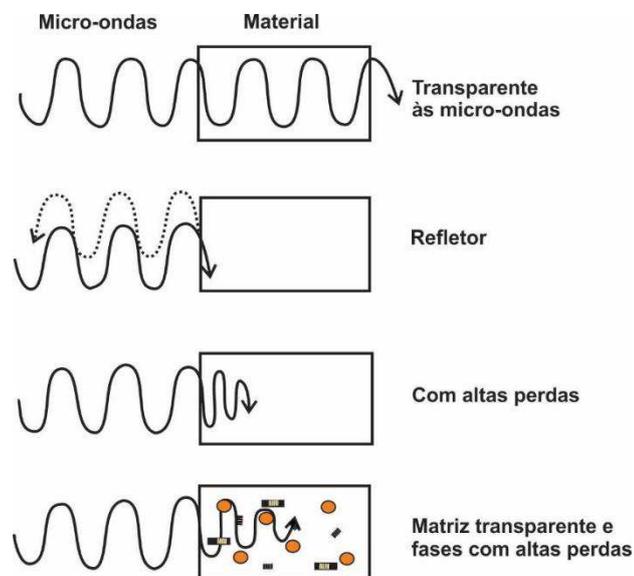
- b) Materiais refletores: São aqueles com elétrons livres tipicamente condutores, os quais não permitem que as ondas eletromagnéticas passem através deles. Ex: metais.

c) Materiais de absorção:

c.1) Materiais de alta perda dielétrica: São aqueles que absorvem rapidamente a energia eletromagnética, convertendo-a em calor e possuem também elevada permissividade dielétrica, favorecendo bastante sua dissipação. Ex: frutas, vegetais, entre outros.

c.2) Materiais de absorção mista: São aqueles, onde a matriz é um isolante ou seja, com baixa perda dielétrica, e a fase dispersa é formada por materiais de alta perda dielétrica. Ex: compósitos.

Figura 2.3 – Interação do material com as micro-ondas.



Fonte: Menezes et al. (2007).

Um sistema de aplicação de energia de micro-ondas é composto basicamente por componentes de geração da energia em uma determinada frequência e de condução da mesma para um aplicador ou cavidade, no qual a potência pode ser dissipada no produto ao ser aquecido (PEREIRA FILHO, 1999).

Segundo Zhao et al. (2011), materiais dielétricos que possuem em sua composição moléculas polares com alta permissividade, como água, absorvem significativamente a energia de micro-ondas produzindo rotação dipolar, gerando atrito e elevando rapidamente a

temperatura, enquanto Hansson e Antti (2008) relatam que outras moléculas polares existentes na composição do material dielétrico também podem ser afetadas pela radiação de micro-ondas porém de maneira menos significativa que a água.

2.2 Secagem por micro-ondas

2.2.1 Conceitos fundamentais e uso

A energia de micro-ondas é absorvida pelo material através de dois mecanismos: condução iônica e rotação dipolar. Metaxas e Meredith (1983) relatam que, em processos de secagem de materiais em forno de micro-ondas, o principal fenômeno responsável pelo aquecimento e conseqüentemente pela remoção da água é a rotação dipolar. Antes de descrever este fenômeno, é necessário lembrar que a molécula de água, apesar de possuir carga elétrica total nula, apresenta-se como um dipolo elétrico, pois o centro de gravidade das cargas positivas não coincide com o das cargas negativas. Diz-se que a molécula de água é polar e, sob a ação de um campo elétrico externo, esse mesmo dipolo tende a girar, orientando-se na direção do campo. A rotação do dipolo encontra resistência, o que resulta em dissipação de energia eletromagnética do campo sob a forma de calor, com o conseqüente aumento de temperatura.

O processo de secagem por micro-ondas tem sido considerado como um método alternativo de secagem na obtenção de produtos secos de alta qualidade, como frutas, vegetais e grãos. Como principais vantagens da secagem por micro-ondas pode-se citar: elevada taxa de secagem, economia de energia e menor tempo de secagem, ocasionando melhor qualidade do produto de acordo com relatos da literatura (HAGHI e AMANIFARD, 2008; SOYSAL, 2005; ZHANG et al., 2006; DUNAEVA e MANTUROV, 2010). Outras vantagens, citadas por Park e Antonio (2006), na secagem por micro-ondas, incluem:

- alta eficiência energética que pode ser alcançada no período de velocidade decrescente;
- acúmulo de umidade na superfície do material e o fenômeno de bolhas líquidas que evita o endurecimento do mesmo;
- redução no processo de armazenamento e capacidade de reidratação do produto seco;
- melhora na qualidade final do produto seco, ou seja, maior retenção do aroma, cor, hidratação e maior porosidade.

A energia eletromagnética na faixa de 915 a 2.450 MHz pode ser absorvida e convertida em calor por materiais que contêm água ou outras substâncias como: carbono e produtos orgânicos (KHRAISHEH et al., 1997; MASKAN, 2000). Uma vez que as ondas podem penetrar diretamente no interior do material, o aquecimento é volumétrico e proporciona um aquecimento rápido e uniforme ao longo de todo o produto. A rápida absorção de energia pelas moléculas de água provoca a rápida evaporação da água, ocasionando uma maior taxa de secagem dos alimentos. Os produtos secos por micro-ondas apresentaram os melhores resultados quanto as características de reidratação (PRABHANJAN et al., 1995).

Bingol et al. (2008) relatam que a capacidade de penetração da radiação de micro-ondas nos materiais dielétricos pode conduzir ao aquecimento controlado e preciso, proporcionando melhorias e aceleração no processo de secagem dos mesmos.

O aquecimento de alimentos com uso de micro-ondas é um fenômeno promissor e o sucesso destas aplicações, depende da compreensão da interação entre as micro-ondas e os alimentos e, da capacidade de prever e proporcionar um padrão de aquecimento desejado nos alimentos utilizando aplicações específicas (TANG et al., 2002).

O aquecimento volumétrico de energia de micro-ondas pode criar uma película de água sobre a superfície devido à menor temperatura do ar ambiente que envolve o produto e, quando tratada inadequadamente, pode levar a condução elétrica da superfície danificando o produto (ZHANG e DATTA, 2001).

Senise (1985) relata que no processo de secagem por micro-ondas ocorre uma rápida elevação de temperatura (aquecimento volumétrico) no interior do produto em virtude dos mecanismos de polarização iônica e rotação dipolar. Já no processo de aquecimento convencional, a energia é transferida através da superfície dos alimentos, tendo penetração de calor da superfície para o interior do produto, proporcionando um longo período no tempo de secagem. Isto equivale a uma das maiores desvantagens no uso do processo convencional em relação ao processo de secagem por micro-ondas de produtos biológicos.

Durante o processo de secagem por micro-ondas, a curva de secagem pode ser representada em três períodos: período de aquecimento, período de taxa de secagem constante e período de taxa de secagem decrescente (METAXAS e MEREDITH, 1983). No segundo

período, a energia é gasta para evaporação da umidade interna da amostra a uma taxa constante e a curva de secagem é representada por uma linha reta com inclinação dependente da potência alimentada pelas micro-ondas, ocorrendo de forma semelhante com a secagem convectiva (MONZÓ-CABRERA et al., 2000).

De acordo com a literatura, o processo de secagem por micro-ondas foi aplicado em vários produtos agrícolas, como: raízes de ginseng Americana (REN e CHEN, 1998), arroz (LUZ et al., 1998), milho (VALENTINI et al., 1998), banana (MASKAN, 2000), cogumelo (TORRINGA et al., 2001), kiwi (MASKAN, 2001), laranja (DIAZ et al., 2003), pêra (FUMAGALLI, 2003), grão de trigo (MONKS et al., 2003), maçã (ANDRES et al., 2004), salsa (SOYSAL, 2005), cenoura (WANG e Xi, 2005), batata (SRIKIATDEN e ROBERT, 2006), uvas (BINGOL et al., 2008), tomates (RIBEIRO, 2013) entre outros.

Gorakhpurwalla et al. (1975), Click e Baker, (1980) e Kraszewski et al. (1991) realizaram estudos com o objetivo de estabelecer metodologias para determinação da transferência de massa de grãos através da energia gerada por micro-ondas, que propicia a obtenção de resultados em menor tempo quando comparado com o método de estufa. Entretanto, por se tratar de radiação de alta frequência, no processo de secagem com forno de micro-ondas é observada uma rápida elevação da temperatura nas amostras, podendo ocorrer incineração. Este processo de incineração da amostra é indesejável, pois, neste caso, outras substâncias como amido, gorduras e proteínas são removidas, implicando em fonte de erro para o método. Portanto, recomenda-se determinar o tempo máximo de exposição da amostra e a radiação para diversas potências do forno de micro-ondas (CASADA et al., 1983).

Carvalho (2005) relata que a frequência de radiação mais utilizada em fornos de micro-ondas domésticos é de 2.450 MHz, por ter baixa energia e o comprimento de onda ser compatível com o tamanho do forno. Já os fornos de micro-ondas industriais operam com frequências de 13,56 MHz, 24,12 MHz e 896 MHz, e destaca ainda que a frequência de radiação do forno de micro-ondas não deve ser igual a frequência de oscilação das moléculas de água, uma vez que estas seriam totalmente absorvidas nas primeiras camadas dos alimentos e assim a parte mais interna do alimento não poderia ser penetrada. Por conseguinte, a frequência escolhida deve ser um meio termo, de modo que ocorra penetração nas primeiras camadas e nas demais camadas do alimento durante o processo de aquecimento em forno de micro-ondas doméstico.

Segundo Feng et al. (2012), a secagem de alimentos por micro-ondas, baseia-se no único modo de aquecimento volumétrico realizado por radiação eletromagnética nas frequências de 915 MHz e 2.450 MHz. A rapidez no processo de secagem por micro-ondas proporciona melhoria na qualidade final do produto alimentício e torna esta tecnologia promissora na secagem de alimentos. A necessidade de busca de melhorias na concepção e otimização do processo de secagem por micro-ondas levaram ao desenvolvimento de técnicas de simulação em computador para prever a distribuição da temperatura e da umidade do produto durante a secagem.

A aplicação de micro-ondas na secagem fornece ao material uma operação sem contato direto com a fonte de calor, possibilitando uma operação mais sanitária, com risco mínimo de contaminação e, sobretudo, preservando a estrutura física que garante a viscosidade necessária na aplicação deste produto. Esta visão de secagem por micro-ondas é ressaltada por Oomah et al. (1998) e por Cabral et al. (2007).

Luz et al. (1998) utilizaram o método de secagem em estufa (método oficial) e com forno de micro-ondas para determinação da umidade de sementes de arroz inteiras e moídas. Após utilização destes métodos, eles observaram que a determinação da umidade das sementes de arroz inteiras e moídas, com forno de micro-ondas apresentou resultados bastante rápido em comparação com o método oficial de secagem em estufa. Utilizando 3 níveis de umidade (13, 15 e 19 %), uma potência aplicada de 210 W e o forno de micro-ondas, foi possível obter a umidade de sementes de arroz inteiras em 60 min e quando moídas, esse tempo foi de 40 min. Estes resultados permitiram concluir, que a obtenção do teor de umidade de sementes de arroz medidos com forno de micro-ondas é um método de secagem alternativo devido a sua rapidez.

A eficiência na redução do tempo de secagem está relacionada com a combinação de várias técnicas de secagem como, por exemplo, secagem convectiva combinada com micro-ondas e secagem com infravermelho, secagem convectiva combinada com micro-ondas, entre outras (KOWALSKI e PAWLOWSKI, 2011).

2.2.2 Fatores considerados na secagem por micro-ondas

2.2.2.1 Aquecimento por micro-ondas

O aquecimento de materiais por meio de energia de micro-ondas tem tido grande destaque industrial, uma vez que este processo apresenta uma série de vantagens frente aos métodos convencionais de aquecimento.

No aquecimento convencional, a energia é transmitida ao produto por condução, convecção e radiação a partir da superfície de contato com a fonte de calor, enquanto que no aquecimento por micro-ondas, a energia é diretamente transferida da fonte para as moléculas dos materiais, onde ocorre a transformação da energia eletromagnética em calor (MAJETICH e HICKS, 1995).

O fenômeno de aquecimento por micro-ondas é também conhecido como aquecimento dielétrico, uma vez que a principal característica dos materiais dielétricos é absorver melhor a radiação por micro-ondas. Diante da aplicação de um campo elétrico externo, os materiais dielétricos apresentam baixa corrente por condução e além disso, suas moléculas e átomos possuem um movimento do tipo dipolar.

Tang e Resurreccion Jr. (2007) relatam que a forma da cavidade do forno de micro-ondas, as propriedades físicas e a geometria do produto determinam a distribuição dos campos de micro-ondas no forno e no interior do produto durante o processo de aquecimento por micro-ondas.

Feng et al. (2012) relatam sobre alguns fatores que contribuem para não uniformidade do aquecimento por micro-ondas. As micro-ondas tem comportamento semelhante ao da luz, podendo ser refletidas e transmitidas quando atingir o material. Devido a geometria do material, as micro-ondas transmitidas podem atingir diferentes regiões do mesmo. A potência das micro-ondas decai quando penetra no produto, e por isto a superfície recebe mais energia do que o interior do produto, ficando a superfície superaquecida.

2.2.2.2 Efeitos da geometria e da composição do material a ser seco

Laguerre et al. (1999) relatam que a composição dos alimentos influencia na forma de como eles serão aquecidos no forno de micro-ondas. Os alimentos pertencem a classe de materiais, cuja interação com a ondas eletromagnéticas expressa remoção de calor. A remoção se dá através de dois meios: o meio com perda por condução, no qual contém cargas livres

(metal) ou íons (soluções com sal), que, por oscilação, sofrem aquecimento, e os meios complexos, tendo como exemplo os produtos biológicos, nos quais a remoção de calor ocorre principalmente devido a perdas dielétricas nas moléculas polares (álcool e água) e uma pequena parte do calor pode ser gerado por oscilação.

Almeida et al. (2010) ressaltam a importância da escolha da geometria de um alimento quanto a distribuição interna de calor, a qual pode influenciar na capacidade de penetração das micro-ondas, na taxa de aquecimento e na sua uniformidade. Produtos com geometria irregular são sujeitos a um aquecimento não uniforme devido às suas espessuras diferentes. Quanto mais próxima a espessura for do comprimento de onda, mais alta será a temperatura. Deste modo, alimentos com geometria esférica ou cilíndrica aquecem mais uniformemente do que aqueles com uma forma retangular. Obviamente esta afirmação é dependente das dimensões de cada uma destas geometrias.

Liu et al. (2013) relatam sobre os efeitos da energia de micro-ondas na distribuição de temperatura em materiais com geometria cilíndrica e com geometria retangular. Para a geometria retangular, os cantos sobre a superfície superior da amostra tendem a ser mais facilmente aquecida do que as bordas, enquanto o centro e partes inferiores tendem a permanecer bastante frio. Já nos materiais com geometria cilíndrica, os efeitos da energia de micro-ondas, praticamente não existem, em virtude da baixa profundidade de penetração devido ao tamanho do cilindro.

2.2.2.3 Efeito da massa do material

Existe uma relação direta entre a massa e a quantidade de energia de micro-ondas que estar sendo absorvida. Esta energia deve ser aplicada até se chegar ao aquecimento desejado ou uniforme. O forno de micro-ondas doméstico fornece um aquecimento uniforme, através do movimento do produto pelo campo de micro-ondas. Cada equipamento é programado para receber uma massa crítica de cerca de 250 mL de água e potência máxima de 1 kW, uma vez que massas de cargas inferiores poderão danificar o magnetron e prejudicar a eficiência do equipamento (ALMEIDA et al., 2010).

2.2.2.4 Potências do forno de micro-ondas

A potência que se gera em um forno de micro-ondas do tipo doméstico ou analítico cobre a faixa de 600 até 700 W, porém alguns equipamentos mais modernos operam com uma potência de até 1100 W, segundo relatos de Pereira Filho (1999).

Segundo Rosa (2010), a calibração da potência fornecida pelo forno de micro-ondas é uma etapa importante na realização de processos de secagem. Assumindo que toda potência fornecida pelo forno de micro-ondas é transformada em energia térmica na água, pode-se determinar a potência de micro-ondas absorvida através da razão entre o calor volumétrico absorvido pelo material e o tempo de aquecimento, como segue:

$$P = \frac{mc_p\Delta T}{t} \quad (2.2)$$

onde P é a potência de micro-ondas absorvida pela amostra; m é a massa; c_p é o calor específico da água; ΔT é a diferença de temperatura e t é o tempo de aquecimento. Geralmente, P é comparado com a potência nominal do forno de micro-ondas para verificar sua eficiência.

Segundo Al-Duri e McIntyre (1992), a diminuição no tempo de secagem por micro-ondas é decorrente do aumento da potência do forno de micro-ondas aplicada sobre o produto. Isto ocorre devido ao fornecimento de energia adicional ao sistema, pela rápida penetração de calor e pela expulsão forçada dos gases.

Venkatachalapathy e Raghavan (1998) relatam que, na secagem por micro-ondas de mirtilo (*Vaccinium Myrtillus*), a taxa de secagem do material apresentou grande dependência da potência de micro-ondas aplicada sobre a amostra. Durante o processo de secagem por micro-ondas ocorreu uma redução substancial no tempo de secagem, cerca de 50 a 67 % para as potências de 0,1 e 0,2 Wg^{-1} , respectivamente, em comparação com o tempo do processo de secagem convectiva com temperatura de 45°C e velocidade do ar de secagem de 2 ms^{-1} .

Valentini et al. (1998) utilizaram estufa e forno de micro-ondas para comparar a porcentagem de água retirada de grãos de milho para diferentes teores de umidade. Os valores médios do percentual de água retirada das amostras de grãos de milho estão representados na Tabela 2.1. Esta Tabela, demonstra que ocorreu uma variação da porcentagem de água retirada, em virtude da potência empregada e do teor de umidade ou seja, quanto maior o teor de umidade

e a potência aplicada, maior a porcentagem de água retirada do produto pela ação das micro-ondas. Isso ocorre porque grãos mais úmidos apresentam maior quantidade de água livre, sendo mais facilmente removida do produto. Além disso, a quantidade de energia de micro-ondas absorvida por um material está diretamente relacionada à quantidade de água, promovendo a elevação da temperatura e conseqüentemente a evaporação da água (BROOKER et al., 1974).

Tabela 2.1 – Porcentagem dos valores médios da água retirada dos grãos de milho em forno de micro-ondas sob ação de quatro diferentes potências e após 45 s.

Umidade em estufa (% b. u.)	Porcentagem de água retirada dos grãos de milho			
	420 W	490 W	560 W	630 W
7,30	0,25	0,37	0,51	0,58
12,48	0,67	0,82	1,04	1,32
14,41	1,10	1,10	1,42	1,62
17,39	1,36	1,63	1,85	2,11
22,28	1,97	2,21	2,55	2,93

Fonte: Valentini et al. (1998).

De acordo com Alves (2002), é possível realizar rapidamente a secagem de produtos agrícolas em forno de micro-ondas desde que a espessura da camada, a uniformidade da radiação no interior da cavidade do forno, a potência emitida e a potência absorvida sejam conhecidas.

As taxas de secagem do macarrão, do leite desnatado e da cafeína em pó apresentaram crescimento com o aumento da potência do forno de micro-ondas, devido às mudanças ocorridas nas propriedades dielétricas destes alimentos conforme relatos de Al-Duri e McIntyre (1992) e Fumagalli (2003).

2.2.2.5 Propriedades dielétricas

As propriedades dielétricas dos materiais são responsáveis pela geração do comportamento da taxa de aquecimento dos materiais alimentícios durante o processo de aquecimento, uma vez que estas descrevem a interação entre a energia de micro-ondas e o material que está sendo aquecido (ROSA, 2010).

As propriedades dielétricas dos materiais são regidas pelas seguintes equações:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.3)$$

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.4)$$

onde ε_r é a permissividade complexa relativa; ε' é a constante dielétrica; ε'' é o fator de perda dielétrica do material; j é a constante do complexo e $\tan(\delta)$ é a tangente de perda dielétrica.

A constante dielétrica (ε') indica a medida da capacidade do material armazenar energia elétrica por unidade de volume. O fator de perda dielétrica (ε'') indica a capacidade do material de dissipar energia elétrica sob a forma de calor, enquanto que, a tangente de perda dielétrica ou fator de dissipação $\tan(\delta)$, indica a capacidade que o material tem de, ao ser penetrado por um campo elétrico, dissipar essa energia em forma de calor. Materiais com alto valor de perda dielétrica absorvem rapidamente a energia de micro-ondas e materiais com baixo valor de perda são transparentes.

Barboza et al. (2001) relatam que a dissipação de energia, responsável pela produção de calor, varia com a temperatura e com a frequência de micro-onda utilizada no forno. E, que a utilização de uma frequência de acordo com a frequência de relaxação dielétrica, não impedirá a ocorrência de baixa penetração das ondas eletromagnéticas no material em virtude da baixa produção de calor ocorrer para uma determinada substância ou material. A relaxação dielétrica ocorre quando o campo magnético deixa de ser aplicado e as moléculas tendem a voltar ao estado de desalinhamento, enquanto a penetração da radiação eletromagnética é inversamente proporcional a sua frequência.

Lima et al. (2016) relatam que alguns parâmetros como: teor de umidade, densidade, temperatura, frequência, condutividade elétrica, calor específico e profundidade de penetração podem afetar as propriedades dielétricas durante o processo de aquecimento por micro-ondas. Segundo estes autores, como o valor da constante dielétrica da água é relativamente alto e a secagem é decorrente da remoção de água ou do solvente do material. É interessante observar que, durante o processo de secagem, ocorre um decréscimo no fator de perda dielétrica e assim o aquecimento do material é menor.

A Tabela 2.2 resume várias equações para a constante dielétrica e o fator de perda dielétrica como função do teor de umidade (M), da temperatura (T) e da densidade (ρ) para alguns materiais. Nas equações, T é dado em °C, M é dado em (%) e ρ é dado em (kg/m³).

Tabela 2.2 – Equações previstas para as propriedades dielétricas de diferentes materiais com suas respectivas referências bibliográficas.

Equação	Material	Faixa de operação	Fonte
$\epsilon' = 81,79 - 0,299T$	Batata	32,61 – 94,03°C	Pandit e Prasad (2003)
$\epsilon'' = 22,6 - 0,378T + 0,00293T^2$		70,78 – 201,43°C	
$\epsilon' = 117,6 - 0,026T + 1,8M - 0,073\rho$	Batata e		Jia et al. (2003)
$\epsilon'' = 12,2 + 0,0014T + 0,096M + 0,0039\rho$	cenoura		
$\epsilon' = 2,14 - 0,104T + 0,808M$	Uva	25 – 60°C	Bingol et al. (2008)
$\epsilon'' = 3,09 - 0,0638T + 0,213M$			
$\epsilon' = 71,06 - 0,052T - 0,00083T^2$	Pera	10 – 90°C	Arballo et al. (2010)
$\epsilon'' = 20,95 - 0,25T + 0,0014T^2$		20 – 100°C	
$\epsilon' = 0,158M + 1,74$	Banana, maçã e kiwi	M < 21%	Kristiawan et al. (2011)
$\epsilon'' = 0,0332M + 0,0154$			

Fonte: Lima et al. (2016)

2.2.3 Modelos de transferência de calor e massa na secagem por micro-ondas

Problemas associados com a utilização de energia de micro-ondas, incluindo aquecimento não uniforme têm atraído atenção dos pesquisadores (ZHOU et al. 1995). Assim foram desenvolvidos muitos trabalhos, os quais consideraram os seguintes objetivos: conseguir uma distribuição uniforme de temperatura, após o aquecimento por micro-ondas (RYYNÄNEN e OHLSSON, 1996; SAKAI et al. 2005; WÄPPLING-RAAHOLT et al. 2006), e minimizar o entendimento dos fenômenos que causam aquecimento desigual (FLEISCHMAN, 1996). Neste sentido, o uso da modelagem matemática para prever a não uniformidade do aquecimento por micro-ondas tende a ser um dos melhores métodos para este tipo de investigação.

Saltiel e Datta (1999), Budd e Hill (2011), Chen e Tang (2011) e Knoerzer et al. (2011), relatam sobre trabalhos de simulação que estão sendo publicados para diminuir os esforços de

investigação no aquecimento por micro-ondas, com ênfase na geração de calor, transferência de calor, aquecimento e acoplamento do campo eletromagnético com micro-ondas.

Liu et al. (2013) desenvolveram um código computacional com base no método de elementos finitos para prever as distribuições de temperatura em amostras de alimentos com formas retangulares e cilíndricas durante o aquecimento por micro-ondas. As temperaturas das amostras foram previstas por acoplamento eletromagnético e pela análise de transferência de calor. Ocorreu boa concordância entre as temperaturas previstas e as temperaturas medidas experimentalmente.

No processo de secagem por micro-ondas, a classificação dos modelos matemáticos básicos de transferência de calor e massa estão representados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Modelos de transferência de calor e massa para a secagem por micro-ondas.

Modelo	Exemplo	Parâmetros físicos e de transporte necessários na simulação
Modelo empírico	Modelo de Page	k e n são constantes.
	Modelo exponencial	k é constante.
Modelo de difusão (modelo da transferência de massa)	Segunda lei de Fick	Difusividade efetiva (D)
Modelos de transferência de calor e massa	Segunda lei de Fick	Difusividade efetiva (D)
Modelo físico contínuo	Modelo de Luikov	Coefficientes fenomenológicos
Modelo em meio poroso	Modelo de Whitaker	Propriedades: físicas e térmicas da água, do vapor e do ar e propriedades porosas.
Modelo em meios porosos insaturados	Modelo de Philip e De Vries	Propriedades físicas, térmicas e de transporte para o meio.
Modelo termo-hidro-mecânico	Modelo de Kowalski	Propriedades físicas, térmicas e de transporte para o meio.

Fonte: Feng et al. (2012).

Estes modelos teóricos possibilitam aos cientistas e engenheiros estudar o comportamento de um produto alimentício, no que diz respeito à umidade e a distribuição de temperatura durante a secagem, e facilitam a análise dos parâmetros característicos do processo de secagem. A maioria destes modelos foram aplicados a um tipo específico de secagem e condições de secagem específicas aplicadas a cada produto. Antes de aplicar o resultado da simulação proposta, testes de validação destes modelos foram realizados, para em seguida otimizar o processo de secagem.

Sanga et al. (2002) utilizaram a técnica de elementos finitos para resolver numericamente a equação acoplada de transporte de calor e massa com condições de contorno apropriada para materiais não homogêneos sob ação de energia convectiva e por micro-ondas. Fizeram uso de amostras de cenoura na forma cilíndrica incorporada com teflon para os níveis de densidade de potência (0,25 W/g, 0,30 W/g e 0,40 W/g) e ar de secagem na temperatura de 45°C numa velocidade de 1,0 m/s. Eles compararam os resultados da temperatura e da umidade preditos com os dados obtidos experimentalmente, havendo boa concordância. O encolhimento do produto foi considerado na formulação matemática.

Segundo Feng et al. (2012), o processo de secagem por micro-ondas envolve simultaneamente transferência de calor, massa e momento seguido de geração de calor volumétrico. O calor gerado internamente no produto produz um gradiente de pressão total para o gás e isto distingue a secagem por micro-ondas de outros métodos de secagem. Além disso, produz também um gradiente de temperatura positivo ao contrário do calor que é fornecido à superfície do produto. A estimativa de geração de calor interno é um desafio para os pesquisadores por causa das alterações apresentadas nas propriedades dielétricas, na umidade, na temperatura, na porosidade e na composição do produto. As micro-ondas incidentes podem vir a decrescer, focalizar e sobrepor-se. Isto dificultará ainda mais o cálculo do termo fonte nas equações de transferência de calor. Deve-se ter cuidado na análise das características de transferência de calor e massa na secagem por micro-ondas.

2.2.3.1 Modelos empíricos

Modelos empíricos são simples, de fácil aplicação e muito utilizados para descrever curvas de secagem com obtenção de parâmetros cinéticos. Os modelos mais comumente usados

empiricamente são os de Page (1949) e o modelo exponencial de Lewis. A equação de Page pode ser escrita como:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^n) \quad (2.5)$$

Já o modelo exponencial de Lewis (1921), o qual consiste na proporcionalidade entre a taxa de secagem e o teor de água livre é uma analogia da lei de resfriamento de Newton representada pela equação:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (2.6)$$

onde MR é a razão de umidade ou teor de umidade adimensional, M é o teor de umidade em função do tempo, M_0 é o teor de umidade no tempo $t = 0$, M_e é o teor de umidade no equilíbrio e os parâmetros (k e n) são constantes obtidas por comparação com dados experimentais para os dois modelos.

Tulasidas et al. (1993) e Prabhanjan et al. (1995) utilizaram a Equação (2.5) para analisar a secagem por micro-ondas de uvas e trigo, respectivamente, enquanto que, Soysal (2004) usou esta mesma equação para descrever a cinética de secagem em camada fina de folhas de salsa. McMinn (2006) avaliou as características de secagem de pós-lactose pela equação de Page, juntamente com nove outros modelos empíricos. Giri e Prasad (2007) apresentaram análise de secagem por micro-ondas a vácuo para cogumelo de botão (*Agaricus bisporus*) e observaram que o modelo empírico de Page descrevia adequadamente os dados apresentados no processo de secagem estudado.

Prakash et al. (2004) utilizou a Equação (2.6) proposta por Lewis na secagem de cenoura em leite fluidizado e em micro-ondas, obtendo melhores resultados do que na secagem de cenoura ao sol. Eles utilizaram três diferentes temperaturas e potências durante os processos de secagem.

Zhengfu et al. (2006) utilizaram dez modelos matemáticos empíricos para avaliação com dados experimentais e os resultados mostraram ser o modelo de Page, o mais adequado para

prevê a transferência de umidade da polpa de maçã seca e pré-secada. Os dez modelos empíricos utilizados com suas respectivas equações e referências estão listados na Tabela 2.4 a seguir:

Tabela 2.4: Diferentes modelos empíricos reportados na literatura.

Modelo	Equação	Referência
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce (1985)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
Page modificado	$MR = \exp(-kt)^n$	White et al. (1981)
Henderson e Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson e Pabis (1961)
Logarítmico	$MR = a \exp((-kt) + c)$	Togrul e Pehlivan (2002)
Modelo de dois termos	$MR = a^* \exp(-k_0 t) + b^* \exp(-k_1 t)$	Henderson (1974)
Aproximação de difusão	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)^* \exp(-k^* a^* t)$	Yaldiz et al. (2001)
Wang e Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh (1978)
Difusão simplificada de Fick	$MR = a \exp(-c (t/L^2))$	Diamante e Munro (1991)
Equação de Page modificada II	$MR = a \exp(-c (t/L^2)^n)$	Diamante e Munro (1991)

Fonte: Zhengfu et al. (2006).

Feng et al. (2012) relatam que Adu et al. (1994), Skansi et al. (1995), Drouzas et al. (1999), Sutar e Prasad (2007) e Dadali e Özbek (2008) utilizaram a equação (2.5), como método especial em estudos de secagem por micro-ondas de camada fina para uma variedade de produtos biológicos. Enquanto Andrés et al. (2004) propuseram um modelo empírico para estimar a taxa de secagem de cilindros de maçãs previamente tratadas por desidratação osmótica em quatro períodos distintos de secagem por micro-ondas combinada com ar quente.

Técnicas de regressão são frequentemente utilizadas para ajustar os modelos empíricos correlacionando os valores dos parâmetros de secagem como teor de umidade, densidade de potência de micro-ondas, frequência de micro-ondas e fluxo de ar, geralmente aplicados a materiais com geometria simples.

2.2.3.2 Modelos difusivos

A migração de umidade em um meio poroso pode ser acionada por um gradiente de concentração para líquido e por um gradiente de pressão parcial para o vapor.

A equação governante para o transporte de umidade é dada pela segunda lei de Fick. Uma vez que esta estabelece a difusão de umidade em termos do gradiente de concentração no sólido, tem-se uma Equação na forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{div} (D \text{ grad } M) \quad (2.7)$$

onde D é a difusividade efetiva de umidade.

Em geral, a Equação (2.7) pode ser resolvida analiticamente, considerando as seguintes hipóteses simplificadoras: difusividade efetiva de umidade constante; encolhimento desprezível e taxa de transferência de massa suficiente para alcançar a superfície, de modo que o teor de umidade pode atingir o equilíbrio com o ar de secagem, em qualquer momento durante a secagem. Crank (1975) apresentou soluções analíticas da Equação (2.7) para diversas geometrias e condições de fronteira.

Para uma esfera, a solução da Equação (2.7) tem a seguinte forma:

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{4\pi^2 D t}{d^2}\right) \quad (2.8)$$

onde \bar{M} é o teor de umidade médio no tempo, d é o diâmetro da esfera, M_e é o teor de umidade médio no equilíbrio, M_0 é o teor de umidade médio inicial no material, n é o número de repetições e t é o tempo de secagem.

Segundo relatos de Feng et al. (2012), a difusividade efetiva de umidade (D) foi utilizada na Equação (2.7) com os seguintes objetivos: correlacionar D com alterações de umidade (TONG e LUND, 1990); relacionar D com a temperatura através de uma equação do tipo Arrhenius (SHARMA e PRASAD, 2004); estimar a difusividade efetiva de umidade para diferentes materiais com testes simples de secagem (DADALI et al., 2007) e investigar os efeitos da potência das micro-ondas sobre a difusividade efetiva de umidade do broto de bambu (BAL et al., 2010).

O modelo de difusão tem sido bastante utilizado para estudos de secagem por micro-ondas de produtos agrícolas e alimentícios. O primeiro termo da solução da segunda lei de Fick, dada pela Equação (2.8) foi utilizado para simular a secagem de fava por Ptaszniak et al. (1990). Os quinze primeiros termos da série infinita, da Equação (2.8) foram utilizados por Shivhare et al. (1993) para modelar a secagem por micro-ondas de soja observando-se uma boa concordância com os resultados experimentais. Um estudo semelhante para a secagem de batata com micro-ondas foi realizado por Bouraoui et al. (1994). Adu e Otten (1996) utilizaram o coeficiente de difusão (D) da Equação (2.7) variável numa simulação de secagem por micro-ondas de feijão branco. Goksu et al. (2005) aplicaram a segunda lei de difusão de Fick, e usaram a série infinita da Equação (2.8) para obter a difusividade efetiva de umidade na secagem por micro-ondas assistida por leito fluidizado de palitos de macarrão.

Therdthai e Zhou (2009) utilizaram os modelos de Page, de Lewis e de Fick na secagem por micro-ondas a vácuo, combinada com a secagem de ar quente para descrever a cinética de secagem de hortelã (*Mentha cordifolia Opiz ex Fresen*). Na secagem por ar quente, as temperaturas de 60 e 70°C foram analisadas e na secagem por micro-ondas a vácuo foram aplicadas três densidades de potências: 8,0; 9,6 e 11,2 Wg⁻¹ e pressão de 13,33 Pa. A secagem por micro-ondas, apresentou uma redução de 85 a 90 % no tempo de secagem.

2.2.3.3 Modelos de transferência de calor e massa acoplados

O transporte simultâneo de calor e massa ocorre durante o processo de secagem por micro-ondas através do calor gerado internamente ao longo do produto alimentício e da transferência de umidade do interior para a superfície do produto. Uma análise numérica com diferentes modelos de transferência de calor e massa na secagem por micro-ondas podem ser utilizados para auxiliar na operação de criação e de otimização (FENG et al., 2012).

Conforme mostrado na Tabela 2.3, os métodos representativos que têm sido propostos, para analisar os processos de secagem usando modelos de transferência de calor e massa incluem:

- abordagem termodinâmica de processos irreversíveis proposta por Luikov (1964);
- teoria dos meios porosos insaturados estabelecida por Philip e de Vries (1957);
- técnica de volume médio desenvolvida por Whitaker (1977).

Vários pesquisadores utilizaram abordagens simplificadas de modelos de transferência de calor e massa na análise de secagem por micro-ondas, dentre os quais destacam-se:

Melendez et al. (1989) desenvolveram um modelo de transferência de calor e massa utilizando o método de curva característica de secagem. Este modelo resolve simultaneamente as equações de balanço de massa e energia para o ar, para as regiões úmidas e para os sólidos secos.

Lu et al. (1998) e (1999) desenvolveram um Modelo simplificado de transferência de calor e massa considerando tanto o transporte de líquido como o de vapor. Nestes trabalhos foram analisadas a secagem por micro-ondas de alimentos fatiados e esféricos. Uma análise cuidadosa foi conduzida para estimar a geração de energia de micro-ondas no interior do produto. O modelo foi validado através de experimentos e um bom resultado foi alcançado.

Grolmes e Bergman (1990) propuseram um modelo de secagem por micro-ondas para caracterizar a secagem de material não higroscópico. Eles usaram um método balanceado para gerar as equações diferenciais que regem o modelo e observaram três regimes de secagem. Inicialmente, o material foi aquecido por convecção, sendo dielectricamente seguido por um regime de transição, e finalmente, o material foi aquecido dielectricamente por convecção arrefecida.

No modelo de transferência de calor e massa, proposto por Tang et al. (2002), para simular a secagem de cubo de maçã, utilizou-se micro-ondas assistida com leite de jorro. A equação governante para transferência de calor e massa foi simplificada usando técnica de escala e resolvida numericamente pelo método de diferenças finitas. A análise numérica predita

e os efeitos da temperatura foram confirmados com os resultados experimentais, de onde ocorreu uma boa concordância.

Feng (2002) desenvolveu um modelo matemático simples de transferência de calor e massa, para simular a cinética de secagem assistida por ar quente em leito fluidizado. Na simplificação do modelo foram considerados aquecimento uniforme durante a secagem em virtude da agitação pneumática devido a fluidificação do leito, encolhimento negligenciável e o transporte de umidade controlado por difusão. Para a equação da energia considerou a massa e o efeito de acoplamento de transferência de calor por convecção forçada enquanto, a equação de umidade teve como base o modelo de difusão simples. As equações resultantes foram resolvidas usando o método implícito de diferenças finitas. A curva da umidade, obtida através da simulação computacional para temperatura de 70°C e densidade de potência de 4,7 Wg⁻¹ apresentou razoável precisão.

McMinn et al. (2003) apresentaram um modelo unidimensional de difusão de umidade para descrever a secagem de uma placa infinita ou de um cilindro. Uma solução simplificada do modelo usando duas constantes em função do número de Biot foi utilizada para prever as curvas de secagem da umidade em função do tempo.

Boldor et al. (2005) ressaltam que modelos teóricos para distribuição de temperatura e umidade durante a secagem de materiais com micro-ondas, incluindo alimentos, têm sido extensivamente estudados (Lyons et al., 1972; Wei et al., 1985; Ramaswamy e Pillet-Will, 1992; Khraisheh et al., 1997; Lu et al., 1999; Ni et al., 1999). Outros métodos empíricos foram utilizados por Khraisheh et al. (1995) e Khraisheh et al. (2000) para a perda de umidade durante o processo de secagem por micro-ondas. A maioria destes modelos foram desenvolvidos para aplicação em cavidade multi-mode, as quais são totalmente revestidas em material condutor e operam na frequência de 2.450 MHz.

Bingol et al. (2008) propuseram um modelo matemático para aplicação da equação unidimensional de transferência de calor em coordenadas cilíndricas, na secagem por micro-ondas assistida por convecção de uvas tratadas previamente. As uvas foram consideradas como cilindro infinito. A solução geral simplificada da segunda lei de difusão de Fick, foi utilizada para descrever as curvas de secagem das uvas com tratamento e sem tratamento. A temperatura experimental no centro das uvas foi modelada usando uma equação do calor unidimensional, a

qual foi simulada usando a caixa de ferramentas do software Matlab para equação diferencial parcial do tipo parabólica. Os resultados obtidos no período inicial do aquecimento mostraram que a diferença máxima entre os valores experimentais e os valores preditos da temperatura foram de 4°C. Foi observado também que o mergulho das frutas em oleato de etila a 2% e solução de bicarbonato de potássio não produziu mudanças na taxa de secagem ao passo que, no vapor de estiolamento, houve redução significativa no tempo de secagem. Uma boa concordância da temperatura prevista utilizando o modelo de transferência de calor proposto com os dados experimentais foi apresentada, indicando que o modelo de transferência de calor pode ser utilizado para a previsão da temperatura das uvas na secagem por micro-ondas assistida por secagem convectiva. Entre os modelos semi-teóricos propostos para a transferência de massa, a equação de Midilli foi a que melhor descreveu as curvas de secagem por micro-ondas assistida por secagem convectiva das uvas.

Arballo et al. (2010) apresentaram um modelo matemático, para estudar a transferência de calor e massa de alimentos cujas propriedades físicas podem variar com a composição, estrutura e temperatura. A geração de calor interno criado, devido a transformação de energia eletromagnética, foi determinada através da lei de Lambert, dada pela equação:

$$P = P_0 \exp [-2\Psi(L-X)] \quad (2.9)$$

onde P_0 é a potência incidente na superfície; Ψ é o fator de atenuação dado em função de ϵ'' (fator de perda dielétrica) e de ϵ' (constante dielétrica); L é a metade da espessura da placa e X é a distância desde a superfície até o centro da placa.

O fator de atenuação é dado pela equação:

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \epsilon' \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda da radiação incidente e $\tan(\delta) = (\epsilon''/\epsilon')$. Das Equações (2.9) e (2.10) observa-se que, a onda eletromagnética decai mais rapidamente com sua potência ao longo da onda transmitida quando o fator de atenuação (Ψ) é grande.

2.2.3.3.1 Modelo de Luikov

Este modelo é considerado basicamente como um modelo fenomenológico e Wang et al. (1999) o classificou como um método objetivo e simétrico.

O método de análise e o modelo foram aplicados por Bajza (1997) na análise de transferência de calor e massa durante a secagem por micro-ondas de couro curtido. As equações unidimensionais de acoplamento para a transferência de calor e massa são dadas por:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = K_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_M \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \rho \Delta h \frac{\partial M}{\partial t} + \dot{Q} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_M \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.12)$$

onde ρ é a densidade, c_p é o calor específico, K_T é a condutividade térmica, K_M é o coeficiente de transferência de calor devido ao gradiente de umidade induzida, Δh é o calor latente, D_M é a difusividade da umidade, e D_T é o coeficiente de transferência de umidade devido ao gradiente de temperatura induzida. A fonte de calor (\dot{Q}) pode ser calculada com base na equação da geração de calor em qualquer ponto do material, cuja forma pode ser expressa como:

$$P = (5,56 \times 10^{-4}) f \varepsilon'' E^2 \quad (2.13)$$

onde P é a energia de micro-ondas convertida em energia térmica por unidade de volume, f é a frequência, ε'' é o fator de perda relativo (adimensional) e E é a intensidade do campo elétrico local. O modelo foi validado com experimentos em diferentes condições e um bom resultado foi alcançado de acordo com o previsto pelo modelo.

Jun et al. (1999) propuseram um modelo semelhante para transporte unidimensional em coordenadas esféricas. A previsão do modelo concordou bem com os resultados experimentais da secagem de maçãs inteiras.

No modelo de Luikov, alguns parâmetros não estão diretamente relacionados com os fenômenos físicos e, portanto, é difícil avaliá-los. Nas Equações (2.11) e (2.12) apresentadas

por Bajza (1997), a umidade induzida pelo gradiente de transferência de calor, o coeficiente (K_M) da temperatura induzida devido ao gradiente de transferência de umidade e o coeficiente (D_T) não tem significado físico claro, e os seus valores não foram mencionados no artigo. No modelo apresentado por Jun et al. (1999), o calor correspondente e os coeficientes de transporte de massa não foram bem definidos.

2.2.3.3.2 Método de Whitaker

Segundo Bories (1991) e Plumb (2000), os fenômenos físicos em meios porosos são geralmente descritos por equações "macroscópicas", válidas em uma escala de comprimento chamado de volume elementar representativo (REV). Com base neste conceito foi proposto pela primeira vez o método de Whitaker (1977). Este método tem sido amplamente utilizado na análise de transferência de calor e massa durante a secagem. Whitaker fez uma rigorosa derivação nas equações de secagem regulando-as por meio de uma técnica de nivelamento de volume. A grande vantagem deste método é que o significado físico deste modelo está bem definido, os pressupostos são claros, e o mais importante, os parâmetros de transporte estão bem definidos e mensuráveis. Muitos modelos de secagem utilizaram o conceito de Whitaker para volume médio, sem passar pelo processo de longa derivação e complicações para obtenção das equações diferenciais parciais, conforme Moyne e Perre (1991).

Wei et al. (1985) realizaram os primeiros estudos com secagem por micro-ondas usando o conceito de Whitaker para volume médio e desenvolveram modelos para meios porosos não higroscópicos, onde observaram um aumento tanto na fração do volume do líquido como na direção da densidade do ar na superfície da amostra. A pressão máxima atingida no interior da amostra ficou quase próxima a pressão atmosférica.

Jolly e Turner (1989) utilizando o conceito de Whitaker para volume médio, relataram que existe uma significativa influência no tamanho da amostra sobre a temperatura prevista e sobre os perfis de umidade. Até então, a importância do gradiente de pressão do gás na secagem por micro-ondas não tinha sido totalmente reconhecida.

O modelo de secagem por micro-ondas apresentado por Turner e Jolly (1991), considerava a variação da temperatura, pressão, umidade e distribuição de potência. Eles

observaram a grande dificuldade, em desconsiderar o efeito da pressão do gás no relato do fenômeno físico de "bombeamento de água" durante o processo de secagem e introduziram uma terceira equação de transporte na equação de pressão total do gás. Desde então, a importância da força motriz adicional devido ao gradiente de pressão gasosa no aquecimento por micro-ondas tem sido considerada em estudos de secagem por micro-ondas.

Torrington et al. (1996) utilizaram uma equação de vapor no lugar da equação de pressão total do gás para analisar a secagem de produtos alimentícios enquanto que, Constant et al. (1996) desenvolveram um modelo de transferência de calor e massa acoplado para análise da secagem por micro-ondas de betão leve (corpo capilar poroso) levando-se em conta os efeitos da umidade, temperatura e gradiente de pressão total nas equações do modelo.

Turner et al. (1998) estenderam o modelo reportado por Turner e Jolly (1991) para meios porosos higroscópicos e propuseram uma formulação, dada por:

$$a_{M1} \frac{\partial M}{\partial t} + a_{T1} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K_{g1} \left[K_{M1} \frac{\partial M}{\partial z} + K_{T1} \frac{\partial T}{\partial z} + K_{P1} \frac{\partial P_g}{\partial z} + K_{g1} \right] \quad (2.14)$$

$$a_{M2} \frac{\partial M}{\partial t} + a_{T2} \frac{\partial T}{\partial t} + a_{P2} \frac{\partial P_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{M2} \frac{\partial M}{\partial z} + K_{T2} \frac{\partial T}{\partial z} + K_{P2} \frac{\partial P_g}{\partial z} + K_{g2} \right] + \Phi \quad (2.15)$$

$$a_{M3} \frac{\partial M}{\partial t} + a_{T3} \frac{\partial T}{\partial t} + a_{P3} \frac{\partial P_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{M3} \frac{\partial M}{\partial z} + K_{T3} \frac{\partial T}{\partial z} + K_{P3} \frac{\partial P_g}{\partial z} + K_{g3} \right] \quad (2.16)$$

onde a_{ij} e K_{ij} são, respectivamente, a capacidade e os coeficientes cinéticos. O índice $i = M, T, P_g$ e g representa M (umidade), T (temperatura), P_g (pressão total do gás) e g (gravidade) enquanto o índice $j = 1, 2$ e 3 representa as três Equações, e Φ é o termo fonte da potência de micro-ondas.

Chen et al. (2001) aplicaram um modelo de transferência de calor e massa acoplado para estudar o comportamento da secagem de partículas esféricas em um campo de micro-ondas, considerando o fluxo capilar de água com a lei de Darcy e um fluxo difusivo de vapor com a lei de Fick.

Segundo Feng e Weiss (2008), não existe uma análise abrangente de secagem por micro-ondas para meios porosos higroscópicos de materiais agrícolas e de alimentos. É importante destacar que os materiais, considerados higroscópicos foram utilizados apenas nos modelos de transferência de calor e massa.

2.2.3.3.3 Método de Philip e de Vries

Na teoria de Philip e de Vries (1957) o potencial total para transporte de umidade consiste em dois componentes: potencial de temperatura e potencial de capilaridade.

Lian et al. (1997) desenvolveram um modelo com base na formulação bidimensional da teoria de Philip e de Vries (1957) para simular a secagem de uma amostra na cavidade do forno de micro-ondas. Eles substituíram os potenciais pelo teor de umidade e temperatura. As equações de transferência de calor e massa foram obtidas. Consideraram uma distribuição uniforme de energia de micro-ondas na superfície da amostra e utilizaram a lei de Lambert para calcular o valor do decaimento das micro-ondas dentro da amostra. Os teores de umidade médios obtidos no experimento concordaram com os previstos pelo modelo.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Experimental

Os experimentos de secagem de grãos de arroz em casca in natura (variedade BRSMG Conai) com uso de micro-ondas e estufa foram desenvolvidos no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

3.1.1 Material e equipamentos

A matéria-prima sob análise neste trabalho é o grão de arroz em casca in natura (variedade BRSMG Conai) oriundo do assentamento Florestan Fernandes, situado na cidade de Goiana, Pernambuco, Brasil. Para realização dos experimentos foram utilizados cerca de 32 g de grãos de arroz. A variedade BRSMG Conai foi obtida do cruzamento entre as variedades BRS Confiança e Aimoré pela Embrapa Arroz e Feijão de Goiás, em 1998. Este cruzamento proporcionou transformar duas variedades numa única variedade com as características: precocidade (Aymoré), grão longo fino (Confiança), resistência ao acamamento, maior tolerância a seca e maior produtividade de grãos (SOARES et al., 2005).

Após a colheita, o arroz foi armazenado e imediatamente transportado em saco hermético até a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), para realização dos experimentos e análises posteriores. A Figura 3.1 ilustra os grãos de arroz em casca in natura (variedade BRSMG Conai) após a colheita.

Figura 3.1 – Grãos de arroz em casca, in natura (variedade BRSMG Conai).



Fonte: Silva (2016)

Os seguintes equipamentos e o recipiente, foram utilizados para determinação dos parâmetros de secagem obtidos durante o processo:

a) Paquímetro digital da marca Méssen, com precisão de 0,01 mm. Usado na medição das dimensões dos grãos de arroz (comprimento, espessura e largura);

b) Balança eletrônica digital Marte, modelo AL 500 com precisão de 0,001 g. Utilizada nas pesagens das amostras de grãos de arroz em casca;

c) Forno de micro-ondas doméstico, marca Electrolux, modelo MEP37, com as seguintes características: capacidade 27 L, tecla de potência, tecla de peso/porção, altura 283 × largura 486 × profundidade 405 mm, tensão 220 V, corrente elétrica 6,5 A, eficiência 54%, frequência de micro-ondas 2450 MHz e frequência 60 Hz. Utilizado no aquecimento e secagem das três amostras de grãos de arroz.

d) Estufa com circulação mecânica, fabricação FANEM, modelo 320E com controlador geral de temperatura. Usada a 105°C por 24 horas para determinação da matéria seca dos grãos de arroz;

e) Termômetro infravermelho, modelo TI-890, com mira laser e escala de 50 à 1000°C. Utilizado nas medições da temperatura superficial do grão de arroz;

f) Termo higrômetro, modelo HT-208, fabricado pela ICEL, Manaus. Utilizado para obtenção da temperatura ambiente e umidade relativa do ambiente durante o processo de secagem;

g) Placa de Petri de vidro com diâmetro 60×15 mm, fabricada pela pyrex e utilizada como recipiente para as amostras.

3.1.2 Método experimental

3.1.2.1 Secagem

O processo de secagem por micro-ondas foi realizado para três experimentos utilizando-se aproximadamente 10 g de grãos de arroz para cada amostra, placa de Petri e ajustes de tempo para três níveis de potências (10, 20 e 30%) no forno de micro-ondas previamente estabelecidos. Os três níveis de potências nominais absorvidas foram obtidos experimentalmente utilizando água destilada (Apêndice A) e assumem os valores: 62,7 W, 146,3 W e 229,9 W. O processo de secagem para cada amostra foi realizado em separado.

Na preparação das amostras foram realizadas as seguintes etapas: medições das dimensões (comprimento, largura e espessura) dos grãos de arroz; determinação da massa da placa de Petri e da amostra (placa de Petri + grãos); medição da temperatura superficial da amostra e posicionamento da amostra no centro do prato giratório do forno.

Após estas etapas fecha-se a porta do forno e ajusta-se a potência e o tempo, previamente estabelecido, dando início ao processo de secagem. Finalizado o tempo, coleta-se os dados referentes as medições da temperatura na superfície dos grãos e da massa da amostra. Este procedimento foi realizado, para diferentes intervalos de tempo previamente definidos. Para amostra 1, foram realizadas 20 repetições, em intervalo de tempo de 1,0 min, 10 repetições em intervalos de 5 min e posteriormente, repetições em intervalos de 10 min. O processo de secagem foi finalizado, quando a massa da amostra apresentou dois valores idênticos, indicando estabilidade e por consequência o final da evaporação.

Atingido o equilíbrio, colocou-se a amostra na estufa com circulação mecânica, previamente ajustada em 105°C e por 24 horas para obtenção da matéria seca. Em seguida,

realizou-se as medições da massa e da temperatura na superfície dos grãos. Foi registrado também a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.

Para as demais amostras, um procedimento de preparação experimental semelhante foi realizado considerando apenas diferenças no intervalo de tempo entre as pesagens, nível de potência e o tempo final de secagem.

Os dados referentes ao procedimento experimental, foram digitalizados numa planilha do Microsoft Office Excel® 2013 para obtenção dos teores de umidade médio, razão de umidade, temperatura na superfície do grão e massa seca, entre outras. O Apêndice A ilustra o procedimento experimental para obtenção dos dados referentes a potência absorvida pela água em Watts. No caso dos grãos, para potência absorvida pela amostra considerou-se a razão entre a potência nominal absorvida pela água destilada (Apêndice A) e o número de grãos de cada amostra. Em relação a matéria seca das Amostras, dividiu-se o valor experimental medido pelo número total de grãos de cada Amostra. A Tabela 4.1 (Capítulo 4) apresenta um resumo destes dados.

As Figuras 3.2 a 3.6 ilustram as etapas iniciais, realizadas na preparação da Amostras de grãos de arroz para o processo de secagem com forno de micro-ondas doméstico.

Figura 3.2 – Medições das dimensões (comprimento, largura e espessura) dos grãos.



Figura 3.3 – Amostra antes da secagem com forno de micro-ondas.



Figura 3.4 - Medição da massa inicial da amostra.

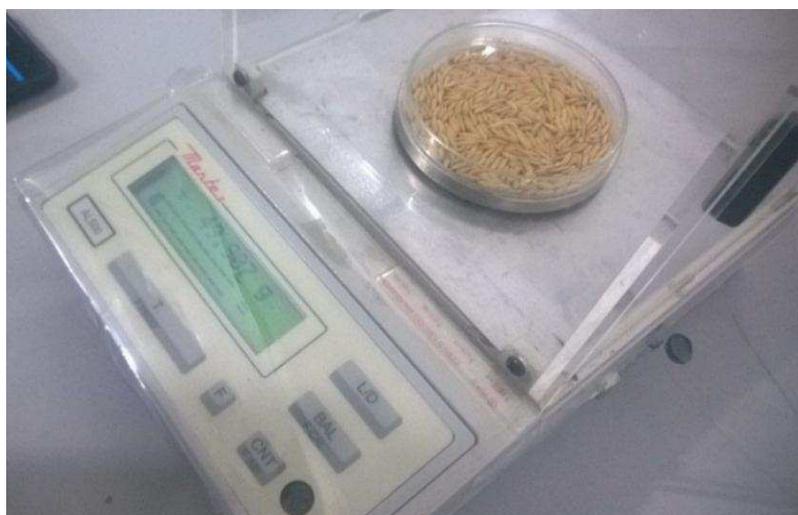


Figura 3.5 - Medição da temperatura inicial da amostra.



Figura 3.6 - Amostra posicionada no forno de micro-ondas para início da secagem.



3.1.3 Parâmetros auxiliares e dados de secagem

Após o término do processo de secagem das amostras de grãos de arroz foi necessário realizar cálculos complementares para obtenção dos parâmetros que serão utilizados na cinética de secagem. Os parâmetros discriminados a seguir são importantes para obtenção dos resultados e discussão (Capítulo 4) desta pesquisa.

❖ Massa de água

O cálculo da quantidade de água ($m_{\text{água}}$) da amostra de grãos de arroz, no tempo de medição, foi feito com base no valor da massa inicial (m_0) da amostra e na massa dos grãos seco (m_s), da seguinte forma:

$$m_{\text{água}} = m_0 - m_s \quad (3.1)$$

❖ Teor de umidade em base úmida (b.u.)

O cálculo do teor de umidade em base úmida ($M_{(b.u.)}$) dos grãos de arroz em casca, no tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água ($m_{\text{água}}$) e da massa ($m = m_{\text{água}} + m_s$) dos grãos úmidos, da seguinte forma:

$$M_{(b.u.)} = \frac{m_{\text{água}}}{(m_{\text{água}} + m_s)} \quad (3.2)$$

❖ **Teor de umidade em base seca (b.s.)**

O cálculo do teor de umidade em base seca ($M_{(b.s.)}$) da amostra em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água dos grãos de arroz ($m_{\text{água}}$) e da massa seca (m_s) dos grãos de arroz, da seguinte forma:

$$M_{(b.s.)} = \frac{m_{\text{água}}}{m_s} \quad (3.3)$$

❖ **Teor de umidade adimensional em base seca (b.s.)**

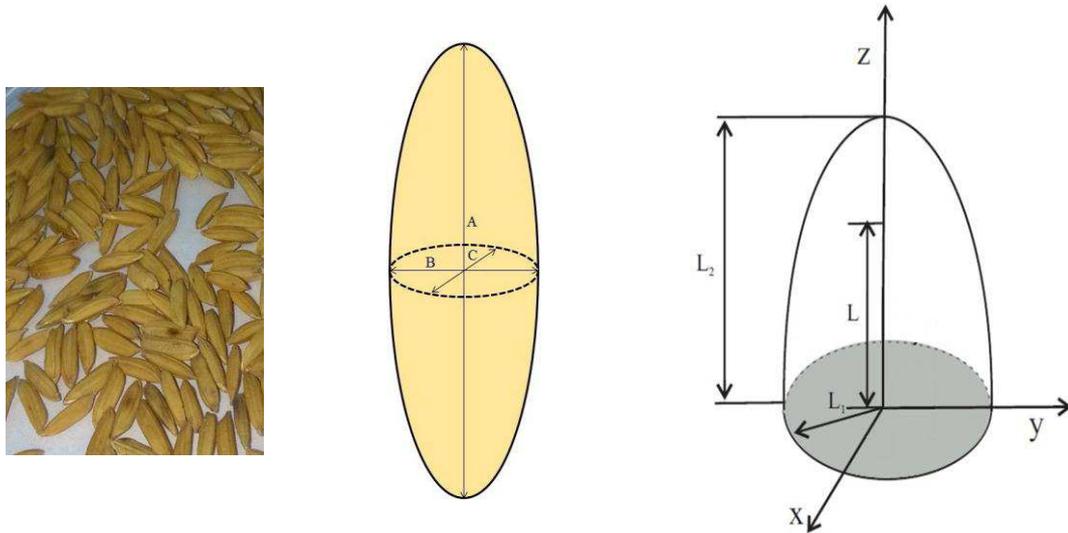
O cálculo do teor de umidade médio adimensional (\bar{M}^*), da amostra de grãos de arroz no tempo de medição, foi feito com base no valor do teor de umidade médio (\bar{M}), do teor de umidade médio inicial (\bar{M}_0) e do teor de umidade médio no equilíbrio (\bar{M}_e) em base seca, da seguinte forma:

$$\bar{M}^* = \frac{\bar{M} - \bar{M}_e}{\bar{M}_0 - \bar{M}_e} \quad (3.4)$$

❖ **Volume total e área superficial total do esferoide prolato**

Nesta pesquisa, o grão de arroz em casca foi considerado como um elipsoide de revolução que gira em torno do seu eixo maior. A Figura 3.7 (a), (b) e (c) ilustra uma comparação entre as geometrias do grão de arroz, do elipsoide de revolução e do esferoide prolato. Para determinação do volume e da área superficial total realizou-se medições das dimensões de comprimento ou eixo maior (A), da largura ou eixo médio (B) e da largura ou eixo menor (C) de 36 grãos de arroz antes da secagem para cada amostra. Após digitalização dos valores medidos, efetuou-se a média aritmética de (A) e de (B + C). Por fim, dividindo-se o resultado por 2 obteve-se os valores dos semieixos maior e menor do esferoide prolato, denominados respectivamente, por L_2 e L_1 . Estes dados estão ilustrados na Tabela 4.2 (Capítulo 4).

Figura 3.7- Comparação da forma do grão de arroz em casca com o elipsoide de revolução e o esferoide prolato.



(a) Grãos de arroz em casca (b) Elipsoide de revolução (c) Esferoide prolato

Para obtenção do volume total do esferoide prolato, considerou-se a Equação, a seguir:

$$V_t = \frac{4\pi}{3} (L_2)(L_1)^2 \quad (3.5)$$

E segundo, Pólya e Szegő (1945) a área superficial total para o esferoide prolato é dada por:

$$S_t = 2\pi (L_1)_t (L_2)_t \left\{ \frac{(L_1)_t}{(L_2)_t} + \frac{\arcsen \left[\sqrt{1 - \left[\left(\frac{(L_1)_t}{(L_2)_t} \right)^2} \right]} \right]}{\sqrt{1 - \left[\left(\frac{(L_1)_t}{(L_2)_t} \right)^2} \right]}} \right\} \quad (3.6)$$

O esferoide prolato apresenta as seguintes especificidades:

$$L = \sqrt{L_2^2 - L_1^2} ; L_2 > L_1 \quad (3.7)$$

3.1.4 Tratamento estatístico dos dados experimentais

O modelo empírico de Henderson e Pabis (1961), dado na Equação (3.8) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais do teor de umidade médio das três amostras de grãos de arroz em casca in natura (variedade BRSMG Conai) obtidos no processo de secagem por micro-ondas, cujas potências nominais absorvidas são, respectivamente, 0,192, 0,491 e 0,694 W.

$$\bar{M}^* = A \exp(-Kt) \quad (3.8)$$

onde:

\bar{M}^* = Teor de umidade médio adimensional (b.s.);

t = tempo de secagem (min);

A e K são constantes.

Para estimação dos parâmetros utilizou-se o método dos mínimos quadrados, o qual consiste em otimizar matematicamente o melhor ajuste para um conjunto de dados que minimize a soma dos quadrados dos resíduos entre o valor estimado e os dados experimentais.

O método dos mínimos quadrados pode ser linear, quando se consegue resolver as equações de um problema usando recurso da álgebra linear e não-lineares quando não se consegue resolvê-las.

No Software Grapher[®] foram obtidos os valores numéricos das constantes (A e K), a soma dos quadrados dos resíduos (SQE) e o coeficiente de determinação (R^2). Estes resultados serão apresentados e analisados posteriormente no Capítulo 4 (Tabela 4.5).

O coeficiente de determinação (R^2), o qual consiste na medição da qualidade do modelo em relação a sua habilidade para estimativa correta dos valores da variável resposta, foi obtido através da expressão abaixo a qual já vem implementada no Software em uso.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.9)$$

onde:

x_i = i-ésimo valor observado da variável independente x ;

\bar{x} = valor médio da série x_i ;

y_i = i-ésimo valor observado da variável dependente y ;

\bar{y} = valor médio da série y_i ;

n = número de elementos de cada série x_i e y_i .

Para a soma dos quadrados dos resíduos, tem-se a expressão:

$$\text{SQR} = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.10)$$

onde e_i são os erros.

Quando a função de ajuste, reproduz bem todos os pontos dos experimentos, o valor do coeficiente de determinação deve estar próximo de 1 ou de 100%. Já a soma dos quadrados dos resíduos deve apresentar um valor mínimo (DRAPER e SMITH, 1998).

3.2 Teórica

Problemas físicos relacionados ao transporte transiente e simultâneo de momento linear, massa e energia apresentam alto nível de complexidade. Obter uma solução analítica para problemas dessa natureza, quando se consegue, exige um tratamento matemático de alta complexidade. Principalmente quando a modelagem matemática contempla termos não lineares. Dessa forma, uma solução numérica pode ser de grande valia na interpretação do problema físico.

3.2.1 Modelo matemático

3.2.1.1 Equação de difusão no sistema de coordenadas cartesianas

As seguintes considerações foram adotadas para o desenvolvimento do modelo

matemático de transferência de calor e massa no sólido:

- o sólido é homogêneo e com propriedades termo físicas constantes ou variáveis durante o processo;
- a temperatura e o teor de umidade no interior do sólido são uniformes no início do processo;
- as dimensões do sólido permanecem constante e as variáveis dimensionais são desconsideradas;
- não há efeito de capilaridade;
- no interior do sólido ocorre os fenômenos de difusão e evaporação;
- na superfície do sólido ocorre os fenômenos de convecção, evaporação e aquecimento do vapor;
- o efeito da transferência de calor sobre a transferência de massa é desprezível;
- não existe geração de massa;
- a geometria do sólido é arbitrária, do tipo esferoidal prolata;

A equação geral de transporte, em regime transiente para uma variável genérica Φ , na forma infinitesimal simplificada para um volume elementar em qualquer sistema de coordenadas é dada por:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (3.11)$$

Em que Φ é a variável dependente de interesse; S^Φ é o termo fonte; e t é o tempo.

Na Equação (3.11), o primeiro termo representa o termo acumulativo ou transiente. O segundo termo, indica a variação da grandeza na unidade de tempo dentro do volume de controle por difusão (termo difusivo). O terceiro termo, indica a taxa de geração da grandeza dentro do material (termo fonte).

Para completar a formulação matemática, as seguintes condições inicial e de contorno podem ser usadas:

$$\Phi = \Phi_0, \text{ em } t = 0 \quad (3.12)$$

$$-\Gamma^\Phi \nabla \Phi|_s = h(\Phi - \Phi_e)|_s + S^\Phi \text{ em } t > 0 \quad (3.13)$$

onde h representa o coeficiente de transferência convectiva, Φ_e é o valor prescrito da grandeza de interesse na condição de equilíbrio ($t \rightarrow \infty$), e S^Φ é o termo que incorpora os efeitos físicos (por exemplo, evaporação da água) que ocorrem na superfície do sólido.

a) Transferência de massa

Para descrever a transferência de massa por difusão no interior do sólido, utilizou-se a 2ª Lei de Fick.

Como não existe geração de massa ($S_M = 0$), então a equação de difusão de massa (2ª lei de Fick), em coordenadas cartesianas, obtida da Equação (3.11) é dada a seguir:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (3.14)$$

onde foram realizadas as substituições: $\lambda = \rho$; $\Gamma^\Phi = \rho D$; $\Phi = M$, sendo ρ a densidade do sólido seco, D o coeficiente de difusão de massa e M , o teor de umidade em base seca.

As condições inicial e de contorno assumem, respectivamente, as formas:

$$M = M_0 \text{ em } t = 0 \quad (3.15)$$

$$-D \nabla M|_s = h_m(M - M_e)|_s \quad (3.16)$$

onde s representa a superfície do material.

b) Transferência de calor

Para descrever a transferência de calor no interior do sólido utilizou-se a Lei de Fourier.

Fazendo as substituições: $\lambda = \rho c_p$; $\Gamma^\Phi = K_T$; $\Phi = T$; $h = h_c$ e considerando a geração interna de calor devido a energia de micro-ondas fornecida, a Equação (3.11) pode ser escrita na forma:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \quad (3.17)$$

Em que c_p é o calor específico, K_T é a condutividade térmica, T é a temperatura, \dot{Q} é a geração de calor volumétrico.

As condições inicial e de contorno assumem, respectivamente as formas:

$$T = T_0 \text{ em } t = 0 \quad (3.18)$$

$$-K_T \nabla T|_s = h_c(T_{eq} - T)|_s \quad (3.19)$$

De acordo com Lima et al. (2016), uma equação que tem sido reportada na literatura para a potência absorvida e convertida em calor durante a irradiação por micro-ondas pode ser expressa como:

$$\dot{Q} = P_0 \left(\frac{M(\vec{r}, t)}{M_0} \right) \varepsilon_r''(M, T) \exp(-2\Psi \vec{r} \cdot \vec{n}) \quad (3.20)$$

onde P_0 é a potência incidente sobre a superfície do produto (parâmetro a ser determinado experimentalmente), $M(\vec{r}, t)$ é o teor de umidade do material, M_0 é o teor de umidade inicial, \vec{r} é o vetor posição da micro-onda dentro do material, \vec{n} é o vetor unitário normal a superfície, ε_r'' representa o fator de perda dielétrica relativa ao ar e Ψ é o fator de atenuação.

A profundidade de penetração (D_p), expressa na Equação (3.21) é definida como a distância na qual a potência é atenuada de $(1/e) = (1/2,7183) = 0,37 = 37\%$ do seu valor na superfície do material.

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi} \left[\varepsilon' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{-1/2} \quad (3.21)$$

em que:

$$\tan(\delta) = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}. \quad (3.22)$$

Assim, o fator de atenuação é dado por:

$$\Psi = \frac{1}{D_p}. \quad (3.23)$$

3.2.1.2 Equação de difusão no sistema de coordenadas esferoidal prolato

A maioria dos problemas físicos apresentam condições de contorno, cujos valores da função ou de sua derivada são especificados por curvas ou superfícies e aplicadas para estas geometrias, tais como placas, cilindros e esferas. A escolha particular do sistema de coordenadas deve ser motivada pela forma geométrica do corpo em estudo e resulta numa melhor adequação e validação dos resultados obtidos. Neste sentido, como o sistema de coordenadas cartesianas não é adequado para representar o problema em questão (sólido poroso úmido com forma de um elipsoide de revolução), é conveniente viabilizar a interligação de novos sistemas de coordenadas que possam descrever a fronteira do domínio em estudo.

O sistema de coordenadas esferoidal prolato foi o que melhor se adequou a forma dos elipsoides de revolução. Um elipsoide de revolução, cujo eixo de revolução é maior do que o outro eixo (Figura 3.8) é dito esferoide prolato, e quando o eixo de revolução é menor, o esferoide é chamado oblato.

As relações entre os sistemas de coordenadas cartesianas (x, y, z) e o esferoidal prolato (elíptico) (μ, ϕ, ω) são reportadas da literatura (HAJI-SHEIKH e SPARROU, 1966; MAGNUS et al., 1966; HAPPEL e BRENNER, 1991; LIMA, 1999), sendo dadas como segue:

$$x = L \sinh \mu \sin \phi \cos \omega \quad (3.24)$$

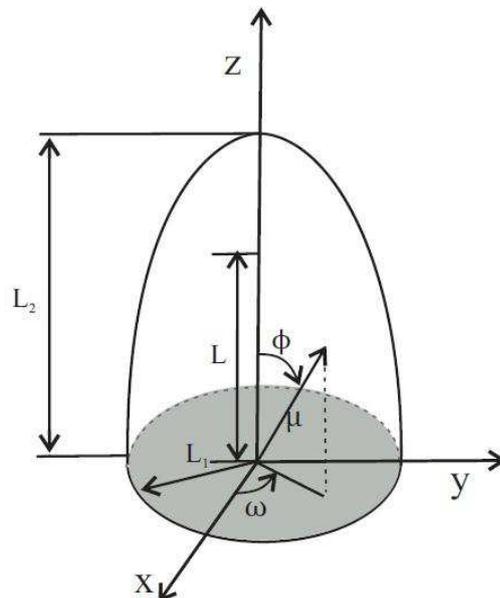
$$y = L \sinh \mu \sin \phi \sin \omega \quad (3.25)$$

$$z = L \cosh \mu \cos \phi \quad (3.26)$$

Na Figura 3.8 o comprimento focal é dado como $L = (L_2^2 - L_1^2)^{\frac{1}{2}}$, onde L_1 e L_2 são os semieixos menor e maior da elipse, respectivamente. Pode-se perceber, na Figura 3.8, as seguintes características: o esferoide é uma esfera, quando $L_2 \rightarrow L_1$; o esferoide é chamado oblato, quando $L_2 < L_1$ e o esferoide é dito prolato, quando $L_2 > L_1$.

De acordo com Lima (1999), quando a razão de aspecto $L_2/L_1 \rightarrow 1,00$, a forma do corpo se aproxima de uma esfera e o ponto focal (L) tende para o centro do sólido. Já quando a razão $L_2/L_1 \rightarrow \infty$, o ponto focal se desloca para a superfície do corpo e a forma do corpo tende para um cilindro circular (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Características de um esferoide prolato sólido.



Fonte: Adaptado de Lima, 1999.

Para obtenção da expressão da equação de difusão no sistema de coordenadas esferoidal prolato, leva-se em consideração as seguintes variáveis:

$$\xi = \cosh \mu \quad (3.27)$$

$$\eta = \cos \phi \quad (3.28)$$

$$\zeta = \cos \omega \quad (3.29)$$

Substituindo estas variáveis nas Equações (3.24), (3.25) e (3.26) e usando-se as relações trigonométricas:

$$\text{sen}^2 \phi + \text{cos}^2 \phi = 1 \quad (3.30)$$

$$\text{cosh}^2 \mu - \text{sinh}^2 \mu = 1 \quad (3.31)$$

Obtém-se as relações entre o sistema de coordenadas cartesianas e o sistema de coordenadas esferoidal prolato (MAGNUS et al., 1966):

$$x = L \sqrt{(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} \zeta \quad (3.32)$$

$$y = L \sqrt{(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} \sqrt{(1 - \zeta^2)} \quad (3.33)$$

$$z = L \xi \eta \quad (3.34)$$

No sistema esferoidal prolato representado na Figura 3.9, o domínio das variáveis: ξ , η e ζ (em termos de ω) é dado por:

$$1 \leq \xi \leq L_2/L \quad (3.35)$$

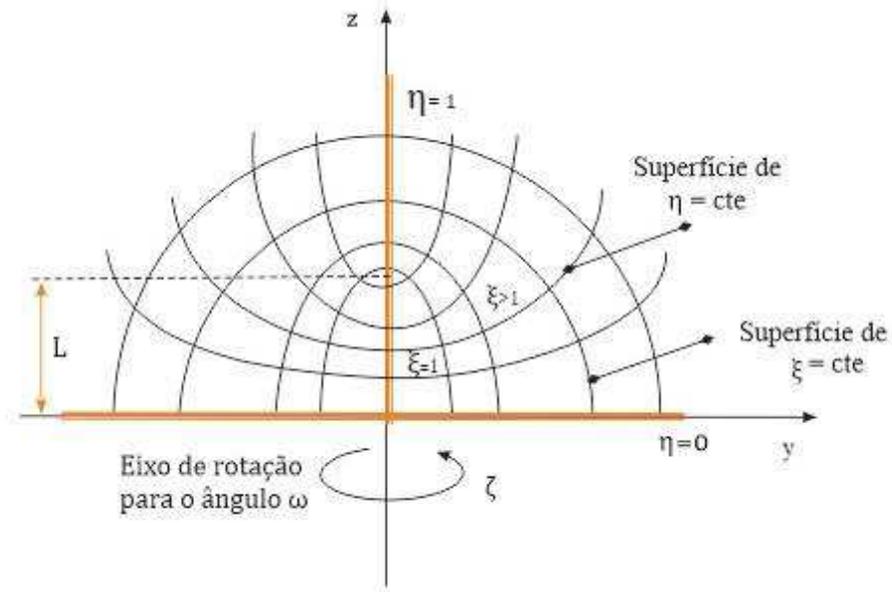
$$0 \leq \eta \leq 1 \quad (3.36)$$

$$0 \leq \omega \leq 2\pi \quad (3.37)$$

Lima (1999) apresenta uma descrição sobre o sistema de coordenadas esferoidais prolatas (Figura 3.9). Neste sistema, as superfícies $\xi = \xi_0$ são constantes; $\xi_0 > 1$, são elipsoides de revolução com focos alongados em torno do eixo z ; a superfície $\xi = 1$ é a linha reta que une a origem ($z = 0$) e o ponto focal ($z = L$); as superfícies $\eta = \eta_0$ (constante); $\eta_0 < 1$, são hiperboloides de duas capas, com um cone assintótico que é gerado por linhas que passam pela

origem e estão inclinadas com um ângulo $\phi = \cos^{-1} \eta$ em relação ao eixo z; a superfície $\eta = 1$ é parte do eixo $z > L$; as superfícies $\omega = \omega_0$ (constante) são planos que passam pelo eixo z e são perpendiculares ao plano x y, formando um ângulo ω com o eixo x.

Figura 3.9 – Esquema representativo do sistema de coordenadas esferoidal prolato.



Fonte: Lima (1999)

Para obtenção das equações de difusão (2ª Lei de Fick) e de condução (Lei de Fourier) no sistema de coordenadas esferoidal prolato, levou-se em consideração a metodologia apresentada por Maliska (2004).

No caso tridimensional, as equações de conservação para uma variável genérica Φ tem a seguinte forma, quando escritas no sistema de coordenadas curvilíneas (MALISKA, 2004):

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\lambda \Phi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} (\lambda u \Phi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\lambda v \Phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\lambda w \Phi) &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\alpha_{11} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + \alpha_{12} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} + \alpha_{13} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right) + \\
 + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\alpha_{21} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + \alpha_{22} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} + \alpha_{23} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\alpha_{31} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + \alpha_{32} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} + \alpha_{33} J \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right) + \\
 - P^{\Phi} + \frac{S}{J} & \tag{3.38}
 \end{aligned}$$

onde P^Φ é o termo da pressão quando as equações forem de quantidade de movimento, S é o termo fonte e J é o jacobiano da transformação, obtido a partir da relação a seguir:

$$J^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{vmatrix} \quad (3.39)$$

onde x , y e z correspondem às relações dadas pelas Equações (3.32), (3.33) e (3.34).

Os coeficientes α_{ij} são calculados pelas expressões dadas a seguir:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= \frac{a'}{J^2}; & \alpha_{22} &= \frac{b'}{J^2}; & \alpha_{33} &= \frac{c'}{J^2}; \\ \alpha_{12} = \alpha_{21} &= \frac{d'}{J^2}; & \alpha_{12} = \alpha_{21} &= \frac{e'}{J^2}; & \alpha_{12} = \alpha_{21} &= \frac{f'}{J^2} \end{aligned} \quad (3.40 \text{ a-f})$$

onde:

$$a' = \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial z}\right)^2 \quad (3.41)$$

$$b' = \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial z}\right)^2 \quad (3.42)$$

$$c' = \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z}\right)^2 \quad (3.43)$$

$$d' = \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial \xi}{\partial z} \frac{\partial \eta}{\partial z}\right) \quad (3.44)$$

$$e' = \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z} \frac{\partial \xi}{\partial z}\right) \quad (3.45)$$

$$f' = \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial z} \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \quad (3.46)$$

Os termos que contém α_{ij} com $i \neq j$, são os termos oriundos da não ortogonalidade da malha. Assim, se faz necessário a verificação da ortogonalidade do sistema de coordenadas esferoidal prolato e as condições necessárias e suficientes para que esta ortogonalidade ocorra (MACROBERT e SNEDDON, 1967).

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) + \left(\frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (3.47)$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial x}{\partial \zeta} \right) + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \zeta} \right) + \left(\frac{\partial z}{\partial \eta} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \right) = 0 \quad (3.48)$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \zeta} \frac{\partial x}{\partial \xi} \right) + \left(\frac{\partial y}{\partial \zeta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \right) + \left(\frac{\partial z}{\partial \zeta} \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) = 0 \quad (3.49)$$

A verificação destas equações mostra que os coeficientes α_{ij} com $i \neq j$ são iguais a zero, ou seja:

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = 0 \quad \alpha_{13} = \alpha_{31} = 0 \quad \alpha_{32} = \alpha_{23} = 0 \quad (3.50 \text{ a - c})$$

Assim, usando a condição do problema ser puramente difusivo e com o termo de geração nulo, a equação geral de conservação (3.35), para a variável Φ , reduz-se a forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\lambda \Phi}{J} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\alpha_{11} J \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\alpha_{22} J \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\alpha_{33} J \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right) + \frac{S}{J} \quad (3.51)$$

Com uso das Equações (3.32), (3.33) e (3.34), o jacobiano da transformação (J) e os coeficientes (α_{ij}) para $i = j$, são obtidos através das Equações (3.39) e (3.40 a - f), respectivamente, sendo o resultado dado a seguir:

$$J^{-1} = \frac{L^3 (\xi^2 - \eta^2)}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \quad (3.52)$$

$$\alpha_{11} = \frac{L^4(\xi^2 - 1)(\xi^2 - \eta^2)}{(1 - \zeta^2)}; \quad (3.53)$$

$$\alpha_{22} = \frac{L^4(1 - \eta^2)(\xi^2 - \eta^2)}{(1 - \zeta^2)} \quad (3.54)$$

$$\alpha_{33} = \frac{L^4(\xi^2 - \eta^2)^2}{(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} \quad (3.55)$$

A substituição das expressões dadas nas Equações (3.52) a (3.55), na Equação (3.51), e com uma reorganização dos termos, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = & \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((\xi^2 - 1)\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) \right] + \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left((1 - \eta^2)\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) \right] + \\ & + \left[\frac{(1 - \zeta^2)^{1/2}}{L^2(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\sqrt{1 - \zeta^2} \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right) \right] + S \end{aligned} \quad (3.56)$$

A Figura 3.8 demonstra a existência de uma simetria em torno do eixo z, de forma que $\frac{\partial}{\partial \omega} = 0$ e $\frac{\partial}{\partial \zeta} = 0$. Em consequência, o penúltimo termo do lado direito da Equação (3.57) se anula e a equação de difusão de Φ transformada para o caso 2D será dado por:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((\xi^2 - 1)\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) \right] + \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left((1 - \eta^2)\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) \right] + S \quad (3.57)$$

Magnus et al. (1966), Brodkey (1967) e Kreyszig (1988), apresentaram relações matemáticas para calcular algumas variáveis de interesse na modelagem, tais como: volume diferencial do sólido, áreas de transferência de massa e calor e o gradiente de Φ no novo sistema de coordenadas. Estas variáveis podem ser obtidas como segue:

a) Volume diferencial do sólido

$$dV = \frac{1}{\widehat{U}\widehat{V}\widehat{W}} d\xi d\eta d\zeta \quad (3.58)$$

b) Área diferencial de fluxo de Φ :

$$dS_{\xi} = \frac{1}{\widehat{V}\widehat{W}} d\eta d\zeta \quad (3.59)$$

$$dS_{\eta} = \frac{1}{\widehat{W}\widehat{U}} d\zeta d\xi \quad (3.60)$$

$$dS_{\zeta} = \frac{1}{\widehat{U}\widehat{V}} d\xi d\eta \quad (3.61)$$

c) Gradiente de Φ

$$\nabla\Phi = \left(\widehat{U} \frac{\partial\Phi}{\partial\xi}; \widehat{V} \frac{\partial\Phi}{\partial\eta}; \widehat{W} \frac{\partial\Phi}{\partial\zeta} \right) \quad (3.62)$$

Os coeficientes métricos \widehat{U} , \widehat{V} e \widehat{W} , cujo produto resulta no jacobiano da transformação (J), são dados por:

$$\frac{1}{\widehat{U}^2} = \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \xi} \right)^2 \quad (3.63)$$

$$\frac{1}{\widehat{V}^2} = \left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \eta} \right)^2 \quad (3.64)$$

$$\frac{1}{\widehat{W}^2} = \left(\frac{\partial x}{\partial \zeta} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \zeta} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \zeta} \right)^2 \quad (3.65)$$

Com a substituição devida e reorganizando as equações o volume diferencial do sólido, as áreas diferenciais de fluxo e o Gradiente de Φ são dados respectivamente por:

$$dV = \frac{L^3(\xi^2 - \eta^2)}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} d\xi d\eta d\zeta \quad (3.66)$$

$$dS_\xi = \frac{L^2 \sqrt{(\xi^2 - \eta^2)} \sqrt{(\xi^2 - 1)}}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} d\eta d\zeta \quad (3.67)$$

$$dS_\eta = \frac{L^2 \left(\sqrt{(\xi^2 - \eta^2)} \right) \left(\sqrt{(1-\eta^2)} \right)}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} d\xi d\zeta \quad (3.68)$$

$$dS_\zeta = \frac{L^2 (\xi^2 - \eta^2)}{\sqrt{(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)}} d\xi d\eta \quad (3.69)$$

$$\nabla\Phi = \left(\frac{1}{L} \frac{\sqrt{(\xi^2 - 1)}}{\sqrt{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial\Phi}{\partial\xi} ; \frac{1}{L} \frac{\sqrt{(1-\eta^2)}}{\sqrt{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial\Phi}{\partial\eta} ; \frac{1}{L} \frac{\sqrt{(1-\zeta^2)}}{\sqrt{(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)}} \frac{\partial\Phi}{\partial\zeta} \right) \quad (3.70)$$

Baseando-se na metodologia apresentada para modelos difusivos, podem-se escrever as equações de transferência de massa e calor na seguinte forma:

a) Transferência de massa

Para a transferência de massa, desde que a densidade volumétrica do sólido seco (ρ_s) é constante, $\Gamma^\Phi = \rho_s D$, $\Phi = M$ (teor de umidade do corpo) e $S_M = 0$ (termo de geração de massa), a Equação (3.57), pode ser escrita na forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial\xi} \left((\xi^2 - 1)D \frac{\partial M}{\partial\xi} \right) \right] + \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial\eta} \left((1 - \eta^2)D \frac{\partial M}{\partial\eta} \right) \right] \quad (3.71)$$

Uma vez que esta equação é de primeira ordem no tempo e de segunda ordem na posição, sua solução requer que exista no mínimo uma condição inicial e quatro condições de contorno. Assim, além das condições dadas nas Equações (3.15) e (3.16), acrescentam-se:

$$\frac{\partial M}{\partial \eta}(\xi, \eta = 0, t) = 0 \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \eta}(\xi, \eta = 1, t) = 0 \quad (3.73)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \xi}(\xi = 1, \eta, t) = 0 \quad (3.74)$$

as quais correspondem à condição inicial ($t = 0$) e as condições de fronteira ($\xi = L_2/L$) e de simetria ($\eta = 0, \eta = 1$ e $\xi = 1$).

b) Transferência de calor

Procedimento análogo foi realizado, para a equação de energia, quando foi substituindo λ por $\rho c_p T$, Γ^Φ por K_T e Φ por T . Neste caso, a equação de condução de calor pode ser escrita na forma:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((\xi^2 - 1) K_T \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \right] + \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left((1 - \eta^2) K_T \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \right] + S_T \quad (3.75)$$

Usando procedimento análogo ao usado para transferência de massa, pode-se escrever para calor, além das condições impostas nas equações (3.19) e (3.20):

$$\frac{\partial T(\xi, \eta = 0, t)}{\partial \eta} = 0 \quad (3.76)$$

$$\frac{\partial T(\xi, \eta = 1, t)}{\partial \eta} = 0 \quad (3.77)$$

$$\frac{\partial T(\xi = 1, \eta, t)}{\partial \xi} = 0 \quad (3.78)$$

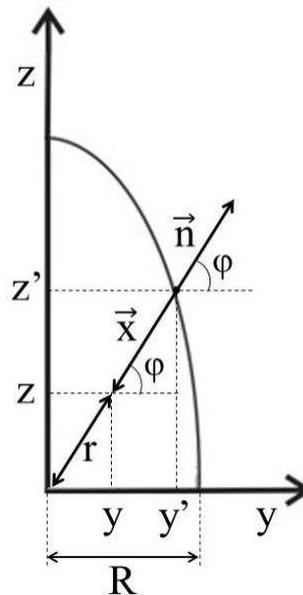
Sabe-se que em regime transiente, o valor médio de Φ (calor ou massa) no interior do sólido é função do espaço e do tempo. Logo, pode-se encontrar o teor de umidade médio e temperatura média para o sólido através das equações seguintes (WHITAKER, 1980):

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_v M dV \quad (3.79)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{V} \int_v T dV \quad (3.80)$$

A Figura 3.10 ilustra os componentes inicial e final do vetor posição (\vec{x}) da micro-onda incidente no interior do material, o ângulo direcional (φ) da mesma para o modelo proposto neste trabalho, e um vetor unitário normal à superfície do esferoide prolato (\vec{n}).

Figura 3.10 – Vetor posição da micro-onda incidente no interior do esferoide prolato.



Da Figura 3.10 é fácil observar que:

$$\vec{x} = (y'-y)\hat{i} + (z'-z)\hat{j} \quad (3.81)$$

$$\vec{n} = (\cos \varphi)\hat{i} + (\sin \varphi)\hat{j} \quad (3.82)$$

De tal forma que,

$$\vec{x} \cdot \vec{n} = \sqrt{(y' - y)^2 + (z' - z)^2} \quad (3.83)$$

onde y' é a posição na superfície do material.

Assim, a Equação (3.20), ajustada para o modelo proposto (Figura 3.10), pode ser escrita na seguinte forma:

$$\dot{Q} = P_0 \left(\frac{M(\xi, \eta, t)}{M_0} \right) \varepsilon_r''(M, T) \exp \left\{ -2 \Psi_{\text{prol}} \sqrt{(y' - y)^2 + (z' - z)^2} \right\} \quad (3.84)$$

em que: P_0 é a densidade de potência dissipada, M é o teor de umidade do material em base seca, ε_r'' é o fator de perda dielétrica relativa, Ψ_{prol} é o fator de atenuação para um esferoide prolato e φ é o ângulo direcional da micro-onda incidente.

Da Figura 3.10, os componentes do vetor posição da onda incidente sobre uma esfera ($L_2 \rightarrow L_1$) são dados por:

$$y' - y = (R - r) \cos \varphi \quad (3.85)$$

$$z' - z = (R - r) \sin \varphi \quad (3.86)$$

Então, a Equação (3.84) pode ser reescrita na seguinte forma simplificada:

$$\dot{Q} = P_0 \left[\frac{M(\xi, \eta, t)}{M_0} \right] \varepsilon_r''(M, T) \exp[-2\Psi_{\text{esf}} (R - r)] \quad (3.87)$$

onde ε_r'' é o fator de perda dielétrica dependente do teor de umidade e da temperatura, φ é o ângulo direcional, Ψ_{esf} é o fator de atenuação da esfera e R é o semieixo menor do esferoide ou raio da esfera.

3.2.2 Solução numérica das equações de difusão de calor e massa para um esferoide prolato

3.2.2.1 Formulação geral

A não linearidade de alguns sistemas de equações diferenciais parciais aumenta a complexidade de obtenção de soluções analíticas e nestes casos, usam-se as soluções numéricas para prever o problema. A análise de problemas com altas complexidade vem sendo realizada através de vários métodos numéricos, os quais consistem em substituir um domínio contínuo por um domínio discreto e a equação diferencial parcial é substituída por várias equações algébricas, uma para cada volume de controle. Uma das principais vantagens deste método é a possibilidade de poder encontrar soluções numéricas para a equação de difusão em diversas situações, tais como: meio não homogêneo e não isotrópico, volume e difusividade variáveis e geometria qualquer. Dentre estes métodos, tem-se: Métodos das diferenças finitas (MDF), Método dos elementos finitos (MEF) e o Métodos dos volumes finitos (MVF), conforme citado por (MALISKA, 2004).

Para otimizar uma solução numérica do problema de difusão transiente em sólidos esferoidais prolato é utilizado neste trabalho o método de volumes finitos (MVF). Este método não apresenta problemas de instabilidade ou convergência, garantindo que em cada volume discretizado, a propriedade em estudo obedeça à lei da conservação. A dimensão do volume é definida pela malha numérica. No centro de cada um dos volumes existentes são realizados os cálculos de balanço de massa, quantidade de movimento e energia. Todas as variáveis são definidas no centro do volume de controle, e estes são conectados com as variáveis dos volumes vizinhos através das fronteiras preenchendo, desta forma, todo o domínio físico a ser calculado.

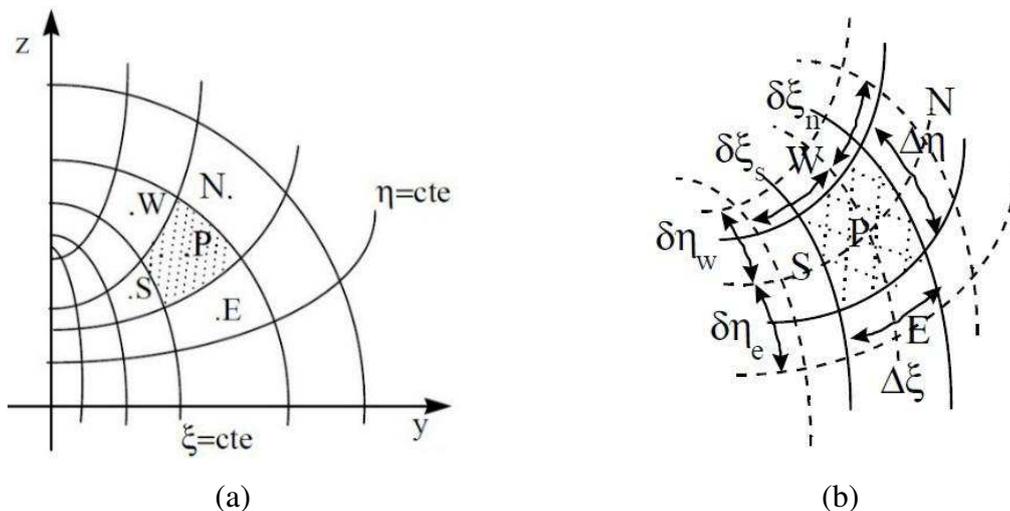
Devido à simetria que existe no esferoide prolato sólido, foi utilizado um domínio computacional para simular o fenômeno de difusão no corpo (Figura 3.9). Considerando que a equação diferencial parcial é do tipo elíptica, as condições de contorno devem ser especificadas em toda a fronteira do domínio. Além disso, existe simetria nos quatro quadrantes do elipsoide formados pelos planos que passam pelos pontos $(x = 0; y = 0; z = 0)$ e $(x = 0; y = 0; z = L)$. Enquanto, no plano em que $\omega = 90^\circ$, ocorre simetria em cada quadrante da elipse. Assim, optou-se por adotar neste trabalho um domínio computacional com quadrante $y \geq 0$ e $z \geq 0$ e $\omega = 90^\circ$.

Oliveira (2006) reporta que a ortogonalidade do sistema de coordenadas esferoidal prolato e da malha numérica associada, comprovada anteriormente por Maliska (2004), é essencial para a aplicação do método de volumes finitos. Quando se calcula o fluxo de Φ através da face do volume de controle, a face deve ser normal à linha que une os dois pontos nodais. A escolha desta técnica ocorreu em virtude da mesma, tornar a determinação dos coeficientes de transporte mais simples e facilitar a incorporação das condições de contorno admitidas na modelagem convectiva. Exemplo, a linha PN, da Figura 3.11b.

Nesta pesquisa optou-se por usar o MVF (método de volumes finitos) com os pontos nodais centrados no volume de controle e a malha adotada possuindo volumes inteiros em todo o domínio, conhecida como Prática B de acordo com Maliska (2004). A escolha desta prática ocorreu por duas razões: facilita a generalização da determinação dos coeficientes e simplifica a aplicação das condições de contorno. Além disso, o uso da mesma elimina o problema de singularidade nas Equações (3.70) e (3.73) para os pontos ($\xi = 1; \eta$) e ($\xi; \eta = 1$).

A Figura 3.11a, ilustra as linhas de ξ e η como constantes, as quais delimitam o volume de controle associado ao ponto nodal P. Na nomenclatura usual, os pontos N, S, E e W são os seus pontos nodais vizinhos, norte, sul, leste e oeste. A Figura 3.11b, ilustra as faces do volume de controle n, e, s e w ao redor do ponto P; as dimensões do volume de controle, $\Delta\xi$ e $\Delta\eta$, bem como as distâncias entre o ponto P e seus vizinhos adjacentes.

Figura 3.11 – Configuração numérica do problema físico.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2006).

3.2.2.2 Discretização das equações governantes para volumes internos

Considere-se a Equação (3.47) aplicada para o caso 2D, na forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\lambda \Phi}{J} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\alpha_{aa} J \Gamma_i^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\alpha_{bb} J \Gamma_i^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + \frac{S}{J} \quad (3.88)$$

onde

$$\alpha_{aa} = \frac{L^4 (\xi^2 - 1) (\xi^2 - \eta^2)}{(1 - \zeta^2)}; \quad (3.89)$$

$$\alpha_{bb} = \frac{L^4 (1 - \eta^2) (\xi^2 - \eta^2)}{(1 - \zeta^2)}; \quad (3.90)$$

$$J^{-1} = \frac{L^3 (\xi^2 - \eta^2)}{\sqrt{(1 - \zeta^2)}} \quad (3.91)$$

Considerando uma formulação totalmente implícita, a qual avalia todos os termos difusivos no instante de tempo $(t + \Delta t)$, a equação algébrica é obtida fazendo integração da Equação (3.87) sobre o volume de controle (Figura 3.11a), que corresponde aos pontos internos do domínio, e no tempo. Neste caso, a integração é dada como:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\lambda \Phi}{J} \right) dV dt &= \int_t^{t+\Delta t} \int_V \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\alpha_{aa} J \Gamma_i^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\alpha_{bb} J \Gamma_i^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) dV dt + \\ &+ \int_t^{t+\Delta t} \int_V \frac{S}{J} dV dt \end{aligned} \quad (3.92)$$

Considerando que ao longo deste trabalho a simbologia J_P é o jacobiano de um volume de controle no ponto nodal P e sabendo que a variável Φ no tempo foi considerada do tipo degrau, tem-se:

$$\frac{\Delta V}{J_P} \left(\frac{\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0}{\Delta t} \right) = \left[D_{aa} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \Big|_n - D_{aa} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \Big|_s \right] + \left[D_{bb} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \Big|_e - D_{bb} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \Big|_w \right] + \frac{S \Delta V}{J_P} \quad (3.93)$$

onde os coeficientes: α_{aa} , α_{bb} , D_{aa} , D_{bb} e o jacobiano são dados por:

$$\alpha_{aa} = \frac{L^4 (\xi^2 - 1) (\xi^2 - \eta^2)}{(1 - \zeta^2)} \quad (3.94)$$

$$\alpha_{bb} = \frac{L^4 (1 - \eta^2) (\xi^2 - \eta^2)}{(1 - \zeta^2)} \quad (3.95)$$

$$D_{aa} = \Gamma_i^\Phi J \alpha_{aa} \Delta \eta \Delta \zeta \quad (3.96)$$

$$D_{bb} = \Gamma_i^\Phi J \alpha_{bb} \Delta \xi \Delta \zeta \quad (3.97)$$

$$\Delta V = \Delta \xi \Delta \eta \Delta \zeta \quad (3.98)$$

$$J^{-1} = \frac{L^3 (\xi^2 - \eta^2)}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \quad (3.99)$$

O problema físico proposto apresenta apenas efeitos difusivos e, portanto torna-se mais simples utilizar uma função linear como função de interpolação espacial entre os pontos nodais. De acordo com a Figura 3.11, as equações das derivadas diretas relativas ao fluxo difusivo podem ser expressas nas formas a seguir:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \Big|_n = \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\delta \xi_n} \quad (3.100)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \Big|_s = \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\delta \xi_s} \quad (3.101)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \Big|_e = \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\delta \eta_e} \quad (3.102)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right|_w = \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\delta \eta_w} \quad (3.103)$$

A substituição das Equações (3.94) a (3.99) e (3.100) a (3.103) na Equação (3.93) resulta na expressão a seguir:

$$\begin{aligned} \frac{L^3(\xi_p^2 - \eta_p^2)}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \left(\frac{\lambda_p \Phi_P}{\Delta t} - \frac{\lambda_p^0 \Phi_P^0}{\Delta t} \right) \Delta \xi \Delta \eta \Delta \zeta &= \frac{L(\xi_n^2 - 1)}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \Gamma_n^\Phi \left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\delta \xi_n} \right) \Delta \eta \Delta \zeta + \\ &- \frac{L(\xi_s^2 - 1)}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \Gamma_s^\Phi \left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\delta \xi_s} \right) \Delta \eta \Delta \zeta + \frac{L(1 - \eta_e^2)}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \Gamma_e^\Phi \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\delta \eta_e} \right) \Delta \xi \Delta \zeta + \\ &- \frac{L(1 - \eta_w^2)}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \Gamma_w^\Phi \left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{\delta \eta_w} \right) \Delta \xi \Delta \zeta + \frac{L^3(\xi_p^2 - \eta_p^2)}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} S_P \Delta \xi \Delta \eta \Delta \zeta \end{aligned} \quad (3.104)$$

Como levou-se em consideração o caso 2D no plano (ξ, η) , então o termo $(\Delta \zeta / (1 - \zeta^2)^{1/2})$ será suprimido na Equação (3.104). Logo, após uma reorganização dos termos comuns e dividindo por L, a mesma pode ser reescrita na forma:

$$\begin{aligned} &\left[\frac{L^2(\xi_p^2 - \eta_p^2) \lambda_p \Delta \xi \Delta \eta}{\Delta t} + \frac{\Gamma_n^\Phi (\xi_n^2 - 1) \Delta \eta}{\delta \xi_n} + \frac{\Gamma_s^\Phi (\xi_s^2 - 1) \Delta \eta}{\delta \xi_s} + \frac{\Gamma_e^\Phi (1 - \eta_e^2) \Delta \xi}{\delta \eta_e} + \right. \\ &\left. + \frac{\Gamma_w^\Phi (1 - \eta_w^2) \Delta \xi}{\delta \eta_w} \right] \Phi_P = \frac{\Gamma_n^\Phi (\xi_n^2 - 1) \Delta \eta}{\delta \xi_n} \Phi_N + \frac{\Gamma_s^\Phi (\xi_s^2 - 1) \Delta \eta}{\delta \xi_s} \Phi_S + \frac{\Gamma_e^\Phi (1 - \eta_e^2) \Delta \xi}{\delta \eta_e} \Phi_E + \\ &+ \frac{\Gamma_w^\Phi (1 - \eta_w^2) \Delta \xi}{\delta \eta_w} \Phi_W + \frac{L^3(\xi_p^2 - \eta_p^2) \lambda_p^0 \Delta \xi \Delta \eta}{\Delta t} \Phi_P^0 + L^3(\xi_p^2 - \eta_p^2) S_P \Delta \xi \Delta \eta \end{aligned} \quad (3.105)$$

Na forma algébrica, a Equação (3.105) pode ser escrita como:

$$A_P \Phi_P = A_N \Phi_N + A_S \Phi_S + A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + A_P^0 \Phi_P^0 + B \quad (3.106)$$

cujos coeficientes são dados por:

$$A_N = \frac{\Gamma_n^\Phi L (\xi_n^2 - 1)\Delta\eta}{\delta\xi_n} \quad (3.107)$$

$$A_S = \frac{\Gamma_s^\Phi L (\xi_s^2 - 1)\Delta\eta}{\delta\xi_s} \quad (3.108)$$

$$A_E = \frac{\Gamma_e^\Phi L(1 - \eta_e^2)\Delta\xi}{\delta\eta_e} \quad (3.109)$$

$$A_W = \frac{\Gamma_w^\Phi L(1 - \eta_w^2)\Delta\xi}{\delta\eta_w} \quad (3.110)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + \frac{\lambda_p \Delta\xi \Delta\eta L^2 (\xi_p^2 - \eta_p^2)}{\Delta t} \quad (3.111)$$

$$A_P^0 = \frac{\lambda_p^0 \Delta\xi \Delta\eta L^2 (\xi_p^2 - \eta_p^2)}{\Delta t} \quad (3.112)$$

$$B = L^3 (\xi_p^2 - \eta_p^2) S_P \Delta\xi \Delta\eta \quad (3.113)$$

Os coeficientes A_K com $K \neq P$, representam as contribuições do transporte difusivo da variável Φ , provenientes dos pontos nodais vizinhos na direção do nodo P . O coeficiente A_P^0 reflete a influência da variável Φ no tempo anterior, sobre o seu valor no tempo atual.

Desde que, para a transferência de massa, tem-se $\Phi = M$, $S_P = S_M = 0$, $B = 0$, $\Gamma_1^\Phi = \rho_s D$, $\lambda = \rho_s$, pode-se escrever a equação algébrica linear discretizada para o teor de umidade na seguinte forma:

$$A_P M_P = A_N M_N + A_S M_S + A_E M_E + A_W M_W + A_P^0 M_P^0 \quad (3.114)$$

cujos coeficientes são dados por:

$$A_N = \frac{\rho_s D_n (\xi_n^2 - 1) \Delta \eta}{\delta \xi_n} \quad (3.115)$$

$$A_S = \frac{\rho_s D_s (\xi_s^2 - 1) \Delta \eta}{\delta \xi_s} \quad (3.116)$$

$$A_E = \frac{\rho_s D_e (1 - \eta_e^2) \Delta \xi}{\delta \eta_e} \quad (3.117)$$

$$A_W = \frac{\rho_s D_w (1 - \eta_w^2) \Delta \xi}{\delta \eta_w} \quad (3.118)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + \frac{\rho_s \Delta \xi \Delta \eta L^2 (\xi_p^2 - \eta_p^2)}{\Delta t} \quad (3.119)$$

$$A_P^0 = \frac{L^3 \rho_s^0 \Delta \xi \Delta \eta (\xi_p^2 - \eta_p^2)}{\Delta t} \quad (3.120)$$

$$B = 0 \quad (3.121)$$

Para a transferência de calor, tem-se $\Phi = T$; $S_T = S = \dot{Q} \neq 0$; $\Gamma_3^\Phi = K_T$ é a condutividade térmica do sólido. Assim, pode-se escrever a equação algébrica linear discretizada, aplicada no ponto nodal P para a temperatura, na forma a seguir:

$$A_P T_P = A_N T_N + A_S T_S + A_E T_E + A_W T_W + A_P^0 T_P^0 + B \quad (3.122)$$

sendo

$$A_N = \frac{K_{Tn} (\xi_n^2 - 1) \Delta \eta}{\delta \xi_n} \quad (3.123)$$

$$A_S = \frac{K_{Ts} (\xi_s^2 - 1) \Delta \eta}{\delta \xi_s} \quad (3.124)$$

$$A_E = \frac{K_{Te}(1 - \eta_e^2) \Delta \xi}{\delta \eta_e} \quad (3.125)$$

$$A_W = \frac{K_{Tw}(1 - \eta_w^2) \Delta \xi}{\delta \eta_w} \quad (3.126)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + \frac{\rho_s c_p \Delta \xi \Delta \eta L^2 (\xi_p^2 - \eta_p^2)}{\Delta t} \quad (3.127)$$

$$A_P^0 = \frac{\rho_s^0 c_p^0 \Delta \xi \Delta \eta L^2 (\xi_p^2 - \eta_p^2)}{\Delta t} \quad (3.128)$$

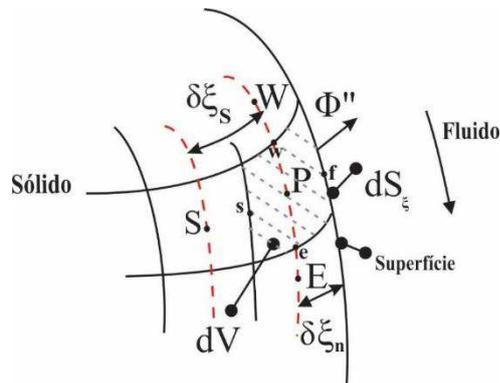
$$B = L^2 (\xi_p^2 - \eta_p^2) \dot{Q} \Delta \xi \Delta \eta \quad (3.129)$$

Os coeficientes A_K , com $K \neq P$, representam as contribuições dos transportes difusivos e convectivos da variável Φ , provenientes dos pontos nodais vizinhos na direção do nodo P . Já o coeficiente A_P^0 reflete a influência da variável Φ no tempo anterior, sobre o seu valor no tempo atual.

3.2.2.3 Discretização para os volumes de fronteira

As equações (3.105) e (3.116) foram aplicadas para todos os pontos internos do domínio computacional, exceto para os pontos de fronteira (Figura 3.12), que corresponde aos volumes de controle adjacentes à superfície do corpo (volumes de fronteira).

Figura 3.12 – Ponto na superfície do corpo.



Para estes volumes, o procedimento adotado é o da integração das equações diferenciais de conservação, considerando-se as condições de contorno existentes ou seja se faz necessário realizar um balanço da propriedade em estudo, para o volume de fronteira, incorporando a condição de contorno à equação aproximada do volume de fronteira.

De acordo com Maliska (2004), três tipos de condições de contorno são possíveis: Φ prescrito, fluxo de Φ prescrito e convecção ou 1º, 2º e 3º tipo, respectivamente.

a) Φ prescrito

Neste tipo de condição de contorno, o valor de Φ'' , será substituído por:

$$\Phi'' dS_{\xi} = \Gamma_n^{\Phi} \frac{(\Phi_n - \Phi_p)}{\delta \xi_n} \quad (3.130)$$

onde Φ'' representa o fluxo de Φ por unidade de área, sendo obtido a partir da condição de contorno imposta ao problema físico, com Φ_n sendo uma variável específica na fronteira.

b) Fluxo de Φ prescrito

O valor de Φ'' será substituído pelo valor prescrito do fluxo de fronteira, ou seja,

$$\Phi'' dS_{\xi} = \text{valor conhecido} = D_{aa} \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right|_n \quad (3.131)$$

c) Convecção

Neste caso, o fluxo difusivo que atravessa a fronteira deve ser igualado ao fluxo convectivo, adicionado a outros efeitos existentes (se houver) nas vizinhanças da mesma e fora do domínio em estudo, ou seja,

$$\Phi'' dS_{\xi} = D_{aa} \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right|_n = \text{fluxo convectivo e outros efeitos, que é função de } \Phi_n \quad (3.132)$$

❖ **No transporte de massa**

A Equação (3.105) obtida na discretização da equação governante para volumes internos, pode ser escrita para o transporte de massa na seguinte forma:

$$L^2(\xi_p^2 - \eta_p^2)(\rho_p M_p - \rho_p^0 M_p^0) \left(\frac{\Delta \xi \Delta \eta}{\Delta t} \right) = \tau M'' dS_\xi - (\xi_s^2 - 1) \rho_s D_s \left(\frac{M_p - M_s}{\delta \xi_s} \right) \Delta \eta + \\ + (1 - \eta_e^2) \rho_s D_e \left(\frac{M_E - M_p}{\delta \eta_e} \right) - (1 - \eta_w^2) \rho_s D_w \left(\frac{M_p - M_w}{\delta \eta_w} \right) \Delta \xi \quad (3.133)$$

onde $S_M = 0$ ou seja, não existe geração de massa.

Substituindo as Equações (3.94) a (3.99) para o caso 2D na Equação (3.132) obtém-se o fluxo difusivo do teor de umidade por unidade de área na fronteira (norte), dado por:

$$M'' \Big|_{\xi = \frac{L_2}{L}} = - \frac{D_n}{L \delta \xi_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - 1)}{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}} (M_n - M_p) \quad (3.134)$$

O fluxo convectivo do teor de umidade na fronteira (norte) do esferoide prolato, é dado por:

$$M'' \Big|_{\xi = \frac{L_2}{L}} = h_m (M_n - M_{eq}) \quad (3.135)$$

onde: h_m é o coeficiente de transferência de massa convectivo, M_n é o teor de umidade na fronteira (norte) e M_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio na fronteira.

Considerando a condição de contorno do 3º tipo, dada pela Equação (3.135), tem-se:

$$M'' \Big|_{\xi = \frac{L_2}{L}} = \frac{D_n}{L \delta \xi_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - 1)}{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}} (M_n - M_p) = h_m (M_{eq} - M_n) \quad (3.136)$$

Assim, reorganizando os termos comuns da Equação (3.136), isolando-se M_n e em seguida substituindo o resultado na Equação (3.132) tem-se:

$$M'' \Big|_{\xi = \frac{L_2}{L}} = \frac{(M_{eq} - M_p)}{\frac{1}{h_m} + \frac{D_n}{L \delta \xi_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - 1)}{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}}} \quad (3.137)$$

onde h_m é o coeficiente de transporte de massa convectivo e D_n é o coeficiente de difusão na fronteira (norte).

Assim, tem-se:

$$\tau M'' dS_\xi = \left[\frac{M_{eq} - M_p}{\frac{1}{h_m \rho_s} + \left(\frac{L \delta \xi_n}{\rho_s D_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}{(\xi_n^2 - 1)}} \right)} \right] L \sqrt{(\xi_n^2 - 1)(\xi_n^2 - \eta_p^2)} \quad (3.138)$$

Substituindo a Equação (3.138) na (3.133), isolando os termos de M_p e reorganizando a Equação tem-se a equação algébrica na forma:

$$A_p M_p = A_S M_S + A_E M_E + A_W M_W + A_p^0 M_p^0 + B_{fM} \quad (3.139)$$

em que:

$$A_p = A_S + A_E + A_W + L^2 (\xi_p^2 - \eta_p^2) \rho_s \frac{\Delta \xi \Delta \eta}{\Delta t} + \frac{L \Delta \eta \sqrt{(\xi_p^2 - 1)(\xi_p^2 - \eta_p)}}{\frac{1}{\rho_s h_m} + \frac{L \delta \xi_n}{\rho_s D_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}{(\xi_n^2 - 1)}}} \quad (3.140)$$

Os coeficientes A_S , A_E , A_W , A_p^0 são iguais aos apresentados anteriormente na discretização para volumes internos da transferência de massa. Enquanto na fronteira (norte) $A_N = 0$ e B_{fM} é dado por:

$$B_{fM} = \frac{L \Delta \eta \sqrt{(\xi_n^2 - 1)(\xi_n^2 - \eta_p^2)} M_{eq}}{\frac{1}{h_m \rho_s} + \frac{L \delta \xi_n}{\rho_s D_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}{(\xi_n^2 - 1)}}} \quad (3.141)$$

❖ **No transporte de calor**

Para o volume de controle de fronteira, incorporando a condição de contorno na equação aproximada do volume de fronteira, obtém-se a seguinte equação discretizada para o calor:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{J_P} (\rho_s c_p T_P - \rho_s^0 c_p^0 T_P^0) = & \left[q'' dS_{\xi} - \left(D_{aa} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \Big|_s \right] \Delta t + \\ & + \left[\left(D_{bb} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \Big|_e - \left(D_{bb} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \Big|_w \right] \Delta t + \frac{S_T}{J} \Delta V \Delta t \end{aligned} \quad (3.142)$$

onde: q'' é o fluxo de calor por unidade de área na fronteira (norte) e T é temperatura.

As expressões para os termos: dS_{ξ} , D_{aa} , D_{bb} e J^{-1} são dadas respectivamente, pelas Equações (3.63) e (3.87) a (3.92) e as derivadas diretas relativas ao fluxo de calor dadas nas Equações (3.90) a (3.93) serão utilizadas a seguir.

Da condição de contorno convectiva, tem-se que o fluxo difusivo que atravessa a fronteira é igual ao fluxo convectivo na vizinhança da mesma e fora do domínio de estudo. Neste caso, tem-se:

$$q'' \Big|_{\xi=L_2/L} = \frac{K_{Tn}}{L \delta \xi_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - 1)}{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}} (T_f - T_P) = h_c (T_{eq} - T_n) \quad (3.143)$$

onde: h_c é o coeficiente de transporte de calor convectivo, T_{eq} é a temperatura de equilíbrio, T_n é a temperatura na fronteira (norte) e K_{Tn} é a condutividade térmica na fronteira (norte).

Assim, isolando os termos com T_n e reorganizando os termos comuns na equação, obtém-se o fluxo na fronteira dado por:

$$\dot{q}'' \Big|_{\xi = \frac{L_2}{L}} = \frac{T_{eq} - T_P}{\frac{1}{h_c} + \frac{L\delta\xi_{3n}}{K_{Tn}} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}{(\xi_n^2 - 1)}}} \quad (3.144)$$

Substituindo as Equações (3.63), (3.87) a (3.92), (3.94) a (3.96) e (3.137) na Equação (3.132) obtém-se a equação na forma:

$$A_P T_P = A_S T_S + A_E T_E + A_W T_W + A_P^0 T_P^0 + B \quad (3.145)$$

onde

$$A_P = A_S + A_E + A_W + \frac{\rho_s c_p \Delta \xi \Delta \eta L^2 (\xi_p^2 - \eta_p^2)}{\Delta t} + \frac{L \Delta \eta \sqrt{(\xi_n^2 - 1) (\xi_n^2 - \eta_p^2)}}{\frac{1}{h_c} + \frac{L\delta\xi_{3n}}{\Gamma_{3n}} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}{(\xi_n^2 - 1)}}} \quad (3.146)$$

Os termos A_S , A_E , A_W , A_P^0 são iguais ao apresentado anteriormente na discretização para volumes internos, $A_N = 0$ e B é dado na seguinte forma:

$$B = \frac{L \Delta \eta \sqrt{(\xi_n^2 - 1) (\xi_n^2 - \eta_p^2)}}{\frac{1}{h_c} + \frac{L\delta\xi_{3n}}{\Gamma_{3n}} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}{(\xi_n^2 - 1)}}} T_{eq} + L^2 \Delta \xi \Delta \eta (\xi_p^2 - \eta_p^2) (\dot{Q}) \quad (3.147)$$

A formulação numérica apresentada é válida para:

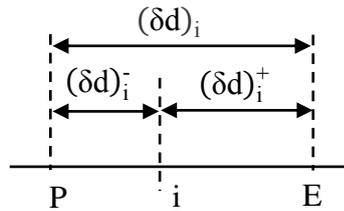
- qualquer tipo de material homogêneo;
- condições de contorno na superfície do corpo do tipo constante ou convectiva;
- coeficiente de difusão constante ou variável;
- padrão de malha uniforme ou não uniforme;
- qualquer intervalo de tempo;
- corpos com formas que variam desde esférica até cilíndrica infinita, passando por elipsoidal, dependendo da razão de aspecto (L_2/L_1).

O procedimento básico para se obter o valor da variável, Γ^Φ , nas interfaces do volume de controle, quando se considera, Γ^Φ variável (Figura 3.13) é assumir uma variável de Γ^Φ entre o ponto e seus vizinhos em qualquer direção (N, S, E, W) expressa por:

$$\Gamma_i^\Phi = \left(\frac{1 - \hat{f}_i}{\Gamma_P^\Phi} - \frac{\hat{f}_i}{\Gamma_E^\Phi} \right)^{-1} \quad (3.148)$$

onde: \hat{f}_i é o fator de interpolação.

Figura 3.13 – Esquema representativo da posição da interface i entre os pontos P e E.



De acordo com a Figura 3.13, se a interface i está localizada no ponto médio que une os dois pontos P e E (malha uniforme) então, $\hat{f}_i = 0,5$ e Γ_i^Φ será obtido pela média harmônica de Γ_P^Φ e Γ_E^Φ , dada por:

$$\Gamma_i^\Phi = \frac{2 \Gamma_P^\Phi \Gamma_E^\Phi}{\Gamma_P^\Phi + \Gamma_E^\Phi} \quad (3.149)$$

Esta é uma formulação mais efetiva, uma vez que, para os casos onde Γ_E^Φ ou Γ_P^Φ é zero, não haverá fluxo de Φ e portanto Γ_i^Φ também é nulo, o que é fisicamente coerente.

3.2.2.4 Discretização para os volumes de simetria

No que se refere aos pontos de simetria estes não entram no conjunto de equações a ser resolvido. Logo após o sistema de equações ter sido resolvido, sua estimativa é feita.

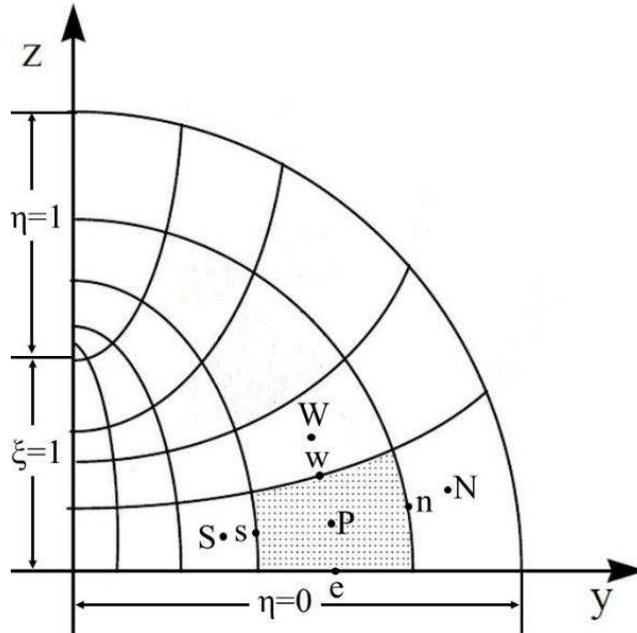
a) Transporte de massa

Assume-se que o fluxo de massa é unidimensional na face do volume de controle ou seja, o fluxo de massa que sai do ponto adjacente ao ponto de simetria é igual ao fluxo de massa que

chega neste ponto. Graficamente, estes pontos podem ser representados pelas Figuras: 3.14, 3.15 e 3.16 e, matematicamente, pelas Equações: (3.150), (3.152) e (3.154), como segue:

❖ **Para os pontos localizados em $\eta = 0$, ($0 < y < L_1$):**

Figura 3.14 – Ponto de simetria na face $\eta = 0$.



Estes pontos podem ser expressos matematicamente, como:

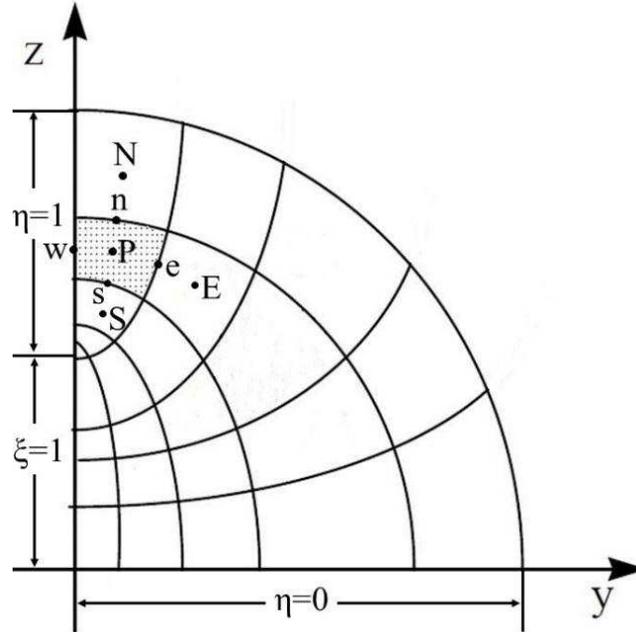
$$\left(\frac{\rho_s D}{L} \sqrt{\frac{(1-\eta^2)}{\xi^2-\eta^2}} \frac{\partial M}{\partial \eta} \right) \Big|_e = \left(\frac{\rho_s D}{L} \sqrt{\frac{(1-\eta^2)}{\xi^2-\eta^2}} \frac{\partial M}{\partial \eta} \right) \Big|_w \quad (3.150)$$

Logo, discretizando a Equação (3.150) e reorganizando os termos comuns, tem-se:

$$M_E = \left[1 + \frac{\left(\frac{\rho_s D_w}{\delta \eta_w} \sqrt{\frac{(1-\eta_w^2)}{(\xi_p^2-\eta_w^2)}} \right)}{\left(\frac{\rho_s D_p}{\delta \eta_e} \sqrt{\frac{(1-\eta_e^2)}{(\xi_p^2-\eta_e^2)}} \right)} \right] M_P - \left[\frac{\left(\frac{\rho_s D_w}{\delta \eta_w} \sqrt{\frac{(1-\eta_w^2)}{(\xi_p^2-\eta_w^2)}} \right)}{\left(\frac{\rho_s D_p}{\delta \eta_e} \sqrt{\frac{(1-\eta_e^2)}{(\xi_p^2-\eta_e^2)}} \right)} \right] M_W \quad (3.151)$$

❖ Para os pontos localizados em $\eta = 1$, ($0 < z < L_1$):

Figura 3.15 – Ponto de simetria na face $\eta = 1$.



Estes pontos podem ser expressos matematicamente, como:

$$\left(\frac{\rho_s D}{L} \sqrt{\frac{(1-\eta^2)}{\xi^2-\eta^2}} \frac{\partial M}{\partial \eta} \right) \Big|_w = \left(\frac{\rho_s D}{L} \sqrt{\frac{(1-\eta^2)}{\xi^2-\eta^2}} \frac{\partial M}{\partial \eta} \right) \Big|_e \quad (3.152)$$

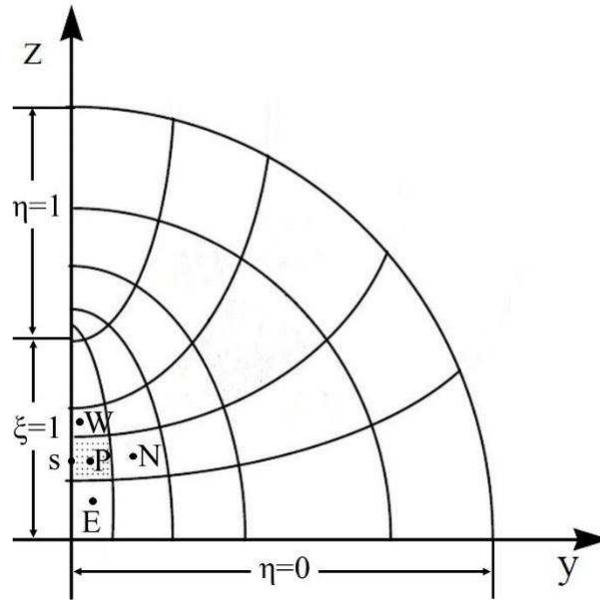
Logo, discretizando a Equação (3.152) e reorganizando os termos comuns, tem-se:

$$M_w = \left[1 + \frac{\left(\frac{\rho_s D_e}{\delta \eta_e} \sqrt{\frac{1-\eta_e^2}{\xi_p^2-\eta_e^2}} \right)}{\left(\frac{\rho_s D_p}{\delta \eta_w} \sqrt{\frac{1-\eta_w^2}{\xi_p^2-\eta_w^2}} \right)} \right] M_p - \left[\frac{\left(\frac{\rho_s D_e}{\delta \eta_e} \sqrt{\frac{1-\eta_e^2}{\xi_p^2-\eta_e^2}} \right)}{\left(\frac{\rho_s D_p}{\delta \eta_w} \sqrt{\frac{1-\eta_w^2}{\xi_p^2-\eta_w^2}} \right)} \right] M_E \quad (3.153)$$

❖ Para os pontos localizados em $\xi = 1$, ($0 < z < L$):

A Figura 3.16 ilustra graficamente a representação do ponto de simetria.

Figura 3.16 – Ponto de simetria na face $\xi = 1$.



Estes pontos podem ser expressos matematicamente, como:

$$\left(\frac{\rho_s D}{L} \sqrt{\frac{(\xi^2 - 1)}{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial M}{\partial \xi} \right) \Big|_s = \left(\frac{\rho_s D}{L} \sqrt{\frac{(\xi^2 - 1)}{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial M}{\partial \xi} \right) \Big|_n \quad (3.154)$$

Logo, discretizando a Equação (3.154) e reorganizando os termos comuns, tem-se:

$$M_S = \left[1 + \frac{\left(\frac{\rho_s D_n}{\delta \eta_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - 1)}{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}} \right)}{\left(\frac{\rho_s D_p}{\delta \eta_s} \sqrt{\frac{(\xi_s^2 - 1)}{(\xi_s^2 - \eta_p^2)}} \right)} \right] M_P - \left[\frac{\left(\frac{\rho_s D_n}{\delta \eta_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - 1)}{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}} \right)}{\left(\frac{\rho_s D_p}{\delta \eta_s} \sqrt{\frac{(\xi_s^2 - 1)}{(\xi_s^2 - \eta_p^2)}} \right)} \right] M_N \quad (3.155)$$

b) Transporte de calor

Assume-se que o fluxo de calor é unidimensional na face do volume de controle ou seja, o fluxo de calor que sai do ponto adjacente ao ponto de simetria é igual ao fluxo de calor que chega neste ponto. Os gráficos representativos dos pontos de simetria, foram omitidos, em virtude da semelhança com os acima ilustrados. Estes pontos serão apresentados matematicamente, na forma a seguir:

❖ Para os pontos localizados em $\eta = 0$, ($0 < y < L_1$):

$$\left(\frac{K_T}{L} \sqrt{\frac{(1 - \eta^2)}{\xi^2 - \eta^2}} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \Big|_w = \left(\frac{K_T}{L} \sqrt{\frac{(1 - \eta^2)}{\xi^2 - \eta^2}} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \Big|_e \quad (3.156)$$

Logo, discretizando a Equação (3.156) e reorganizando os termos comuns, tem-se:

$$T_W = \left[1 + \frac{\left(\frac{K_{Te}}{\delta \eta_e} \sqrt{\frac{1 - \eta_e^2}{\xi_p^2 - \eta_e^2}} \right)}{\left(\frac{K_{Tp}}{\delta \eta_w} \sqrt{\frac{1 - \eta_w^2}{\xi_p^2 - \eta_w^2}} \right)} \right] T_P - \frac{\left(\frac{K_{Te}}{\delta \eta_e} \sqrt{\frac{1 - \eta_e^2}{\xi_p^2 - \eta_e^2}} \right)}{\left(\frac{K_{Tp}}{\delta \eta_w} \sqrt{\frac{1 - \eta_w^2}{\xi_p^2 - \eta_w^2}} \right)} T_E \quad (3.157)$$

❖ Para os pontos localizados em $\eta = 1$, ($0 < z < L_1$):

$$\left(\frac{K_T}{L} \sqrt{\frac{(1 - \eta^2)}{\xi^2 - \eta^2}} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \Big|_e = \left(\frac{K_T}{L} \sqrt{\frac{(1 - \eta^2)}{\xi^2 - \eta^2}} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \Big|_w \quad (3.158)$$

Logo, discretizando a Equação (3.158) e reorganizando os termos comuns, tem-se:

$$T_E = \left[1 + \frac{\left(\frac{K_{Tw}}{\delta \eta_w} \sqrt{\frac{(1 - \eta_w^2)}{(\xi_p^2 - \eta_w^2)}} \right)}{\left(\frac{K_{Tp}}{\delta \eta_e} \sqrt{\frac{(1 - \eta_e^2)}{(\xi_p^2 - \eta_e^2)}} \right)} \right] T_P - \frac{\left(\frac{K_{Tw}}{\delta \eta_w} \sqrt{\frac{(1 - \eta_w^2)}{(\xi_p^2 - \eta_w^2)}} \right)}{\left(\frac{K_{Tp}}{\delta \eta_e} \sqrt{\frac{(1 - \eta_e^2)}{(\xi_p^2 - \eta_e^2)}} \right)} T_W \quad (3.159)$$

❖ Para os pontos localizados em $\xi = 1$, ($0 < z < L$):

$$\left(\frac{K_T}{L} \sqrt{\frac{(\xi^2 - 1)}{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \Big|_s = \left(\frac{K_T}{L} \sqrt{\frac{(\xi^2 - 1)}{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \Big|_n \quad (3.160)$$

Logo, discretizando a Equação (3.160) e reorganizando os termos comuns, tem-se:

$$T_S = \left[1 + \frac{\left(\frac{K_{Tn}}{\delta\eta_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - 1)}{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}} \right)}{\left(\frac{K_{TP}}{\delta\eta_s} \sqrt{\frac{(\xi_s^2 - 1)}{(\xi_s^2 - \eta_p^2)}} \right)} \right] T_P - \left[\frac{\left(\frac{K_{Tn}}{\delta\eta_n} \sqrt{\frac{(\xi_n^2 - 1)}{(\xi_n^2 - \eta_p^2)}} \right)}{\left(\frac{K_{TP}}{\delta\eta_s} \sqrt{\frac{(\xi_s^2 - 1)}{(\xi_s^2 - \eta_p^2)}} \right)} \right] T_N \quad (3.161)$$

3.2.3 Solução do sistema de equações

Em todos os casos analisados, a solução do sistema de equações algébricas gerados ao longo de todos os pontos da malha numérica foi obtida usando-se um algoritmo numérico, implementado no ambiente do Software Mathematica®.

O sistema de equações algébricas é resolvido iterativamente utilizando-se o método de Gauss-Seidel com um critério de convergência de 10^{-8} kg/kg para o teor de umidade e 10^{-8} K para a temperatura.

3.2.4 Casos estudados

3.2.4.1 Refinamento de malha e passo de tempo

A aplicação do método de volumes finitos (MVF) está condicionada ao número de pontos da malha numérica e ao intervalo de tempo (Δt) entre dois valores consecutivos no tempo, para um mesmo ponto da variável de estudo (teor de umidade médio e Temperatura média). Na escolha do tamanho da malha utilizou-se três padrões de malhas: 10×10 ; 20×20 e 40×40 pontos nodais, com intervalos de tempo ($\Delta t = 0,5$; $1,0$ e 10 s) e razão de aspecto $(L_2/L_1)=2,0$ sendo $L_1 = 1,0$ cm e $L_2 = 2,0$ cm.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo de dados da literatura e dados arbitrários, condizentes com dados de produtos agrícolas de alto teor de umidade, que foram utilizados na simulação numérica para obtenção dos três padrões de malha (10×10 , 20×20 e 40×40 pontos nodais) no intervalo de tempo ($\Delta t = 1$ s).

Tabela 3.1 – Dados arbitrários e da literatura utilizados na confecção da malha.

Malha	L_2/L_1 (-)	h_c (W/m ² K)	h_m (m/s)	K_T (W/mK)	D (m ² /s)	M_0 (kg/kg)	M_e (kg/kg)	T_0 (K)	T_e (K)
10×10	2,0	10 ³⁰	10 ³⁰	0,3395	10 ⁻⁷	5,452	0,084	301,76	403,16
20×20	2,0	10 ³⁰	10 ³⁰	0,3395	10 ⁻⁷	5,452	0,084	301,76	403,16
40×40	2,0	10 ³⁰	10 ³⁰	0,3395	10 ⁻⁷	5,452	0,084	301,76	403,16

3.2.4.2 Validação do modelo e metodologia

O modelo aqui apresentado foi utilizado para prever num curto espaço de tempo as cinéticas de aquecimento e de secagem em corpos que apresentam geometria complexa, do tipo esferoidal prolato. A validação deste modelo, foi realizada utilizando os seguintes procedimentos: comparar o modelo com outros modelos que utilizam este tipo de geometria porém em diferentes processos de aquecimento e/ou secagem; aplicar o modelo para uma esfera; considerar a taxa de geração interna de calor constante ou variável durante o aquecimento por micro-ondas. Todos os resultados obtidos na simulação foram comparados com dados analíticos obtidos da literatura. Os testes para validação estão destacados a seguir:

a) Processo de secagem convectiva de um esferoide prolato ($\dot{Q} = 0$) e condição de contorno convectiva.

Os dados utilizados neste trabalho de pesquisa para validação do modelo, adveio da literatura ou através de valores aproximados para este tipo de geometria ou seja, esferoide prolato (LIMA, 1999; OLIVEIRA, 2006; FRANCO et al., 2016).

Os dados $L_1 = 1,0$ cm, $L_2 = 2,0$ cm, $Bi_m = 1,0$, $D = 1,22 \times 10^{-9}$ m²/s, $M_0 = 5,432$ kg/kg em base seca, $M_e = 0,084$ kg/kg em base seca, $T_0 = 5,432$ K e $T_e = 0,084$ K, foram implementados no Software Mathematica[®] para obtenção do teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier de massa.

b) Processo de aquecimento de uma esfera com fonte de calor constante, sem transferência de massa e condição de equilíbrio na superfície.

Para validação do modelo utilizou-se os seguintes dados: $L_1 = 1,000$ cm e $L_2 = 1,001$ cm; $P_0 = 10^6$ W/m³; $\Psi = 0,0$ m⁻¹; $c_p = 3.395$ J/kgK; $K_T = 0,3395$ W/mK; $T_0 = 10^{-15}$ K; $T_e = 0,0$ K; $h_c = 10^{30}$ W/m²K; $\alpha = (K_T/\rho c_p) = 10^{-7}$ m²/s e $\rho = 1000$ kg/m³. Neste caso, os dados preditos foram comparados com os dados analíticos da literatura reportados por Carslaw e Jaeger, (1959) para uma esfera de raio $R = L_1$.

A solução analítica apresentada por Carslaw e Jaeger, (1959) tem a seguinte forma:

$$g(r, t) = \left(-\frac{2R}{\pi^2 r K_T}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[\frac{-\alpha n^2 \pi^2 t}{R^2}\right] \left(\left(\sin\left[\frac{n\pi r}{R}\right]\right) \int_0^R r' \sin\left[\frac{n\pi r'}{R}\right] f(r') dr' \right) +$$

$$+ \frac{1}{K_T} \left\{ \frac{1}{r} \int_0^r r'^2 f(r') dr' + \int_r^R r' f(r') dr' - \frac{1}{R} \int_0^R r'^2 f(r') dr' \right\} \quad (3.162)$$

onde:

$$\dot{Q} = f(r') = P_0. \quad (3.163)$$

c) Processo de aquecimento de uma esfera, sem transferência de massa e condição de equilíbrio na superfície.

Neste caso, os dados usados na simulação foram os mesmos do item b), exceto o termo fonte de geração de calor dado por:

$$\dot{Q} = f(r') = P_0 \exp[-2\Psi (R - r)] \quad (3.164)$$

onde:

$$\Psi = 1,0 \text{ m}^{-1}.$$

3.2.4.3 Simulação com um material arbitrário

Conforme mencionado, as equações discretizadas foram implementadas no software Mathematica[®] para a solução do problema físico. Realizou-se várias simulações de secagem e

aquecimento por micro-ondas para vários esferoides prolatos, considerando as propriedades termo físicas constantes dadas em termos dos parâmetros adimensionais, número de Biot de massa e de calor ($Bi_m = h_m L_1 / D$ e $Bi_c = h_c L_1 / K_T$), número de Fourier de massa e de calor ($Fo_m = (\rho D t / L_1^2)$ e $Fo_c = (K_T / \rho c_p L_1^2)$) e o termo fonte de geração de calor (\dot{Q}) considerado como constante ou variável.

Tabela 3.2 – Casos simulados na pesquisa para o aquecimento por micro-ondas.

Caso	L_2/L_1 (-)	h_m (m/s)	h_c (W/m²K)	P_0 (W/m³)	Bi (-)	Ψ (1/m)
1	1,001	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^6$	∞	0,0
2	1,100	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^6$	∞	0,0
3	1,500	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^6$	∞	0,0
4	2,000	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^6$	∞	0,0
5	5,000	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^6$	∞	0,0
6	2,000	$1,22 \times 10^{-7}$	33,95	$1,0 \times 10^3$	1,0	0,0
7	2,000	$3,66 \times 10^{-7}$	101,85	$1,0 \times 10^3$	3,0	0,0
8	2,000	$6,10 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^3$	5,0	0,0
9	2,000	$12,20 \times 10^{-7}$	339,50	$1,0 \times 10^3$	10,0	0,0
10	2,000	$1,00 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^{30}$	$1,0 \times 10^3$	∞	0,0
11	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^4$	5,0	0,0
12	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^5$	5,0	0,0
13	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^6$	5,0	0,0
14	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^7$	5,0	0,0
15	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^3$	5,0	0,0
16	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^3$	5,0	0,0
17	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^3$	5,0	1,0
18	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^3$	5,0	10,0
19	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^3$	5,0	50,0
20	2,000	$6,1 \times 10^{-7}$	169,75	$1,0 \times 10^3$	5,0	100,0

Na Tabela 3.2 apresentou-se um resumo dos casos simulados nesta pesquisa, considerando apenas transferência de calor pela ação de micro-onda. Foram simulados um total de 20 casos, variando-se: razão de aspecto (L_2/L_1), coeficiente de transferência de massa convectivo (h_m), coeficiente de transferência de calor convectivo (h_c), densidade de potência incidente (P_0), número de Biot (Bi) para transferência de massa e calor e fator de atenuação (Ψ). Os dados arbitrários e da literatura considerados neste trabalho de pesquisa são: $M_0 = 0,20$ kg/kg em base seca, $M_{eq} = 0,01$ kg/kg em base seca, $T_0 = 298,16$ K, $T_{eq} = 373,16$ K, $D = 1,220 \times 10^{-9}$ m²/s, $c_p = 3395$ (J/kg)/K, $\rho = 10^3$ kg/m³ e $K_T = 0,3395$ (W/m)/K. Nestes casos, utilizou-se o termo fonte dado pela equação ($\dot{Q} = P_0 \exp(-2\Psi \vec{x} \cdot \vec{n})$).

3.2.4.4 Simulação com grãos de arroz em casca

Tendo por objetivo avaliar a modelagem matemática apresentada para materiais com teor de umidade intermediário, onde o efeito da temperatura está presente em todo o processo de secagem, os modelos desenvolvidos foram usados para prever a cinética de secagem e aquecimento de arroz em casca (variedade BRSMG Conai) tratando o grão como um esferoide prolato. Não foi considerado o encolhimento do material.

Com respeito aos dados experimentais de secagem, nos instantes iniciais, a taxa de secagem é elevada, requerendo em experimentos de secagem tomadas de tempo menores. Sob o aspecto físico, isto é muito importante para captar o comportamento do teor de umidade com precisão. No entanto, sob o aspecto estatístico, não é satisfatório, uma vez que elevada densidade de pontos ocorre nesses intervalos de tempo (tempos iniciais de secagem) em comparação àquela para os períodos finais da secagem. Isto é não há uma distribuição uniforme de pontos experimentais ao longo do processo, que prejudica o uso direto destes dados para comparar com os dados preditos visando a estimativa dos coeficientes de transporte.

Assim, para contornar o problema explícito acima, foi implementada a Equação (3.8) no código computacional desenvolvido afim de permitir uma comparação entre os teores de umidade preditos e experimentais em tempos aproximadamente espaçados (distribuição dos pontos aproximadamente uniforme).

O desvio quadrático médio entre os valores preditos e experimentais para os teores de umidade médio, foram calculados como segue:

$$\text{ERMQ} = \sum_{i=1}^n (\bar{M}_{i, \text{num}} - \bar{M}_{i, \text{exp}})^2 \quad (3.165)$$

onde o número de pontos experimentais é representado por n (LIMA,1999).

O menor valor do erro médio quadrático, ERMQ, foi usado como critério para obter os melhores valores dos coeficientes de difusão de massa D e do coeficiente de transferência de massa convectivo h_m . Foram consideradas duas situações distintas: Modelo I, onde ajustou-se apenas D, com h_m infinito (condição de contorno de equilíbrio higroscópico) e Modelo II, onde ajustou-se D e h_m (condição de contorno convectiva). Os ajustes foram realizados para as três condições experimentais estudadas nos processos de secagem por micro-ondas de grãos de arroz em casca, considerando-se as potências nominais absorvidas: $P_{n1} = 0,192$; $P_{n2} = 0,491$ e $P_{n3} = 0,694$ W.

Para computar a quantidade de calor por unidade de tempo e por unidade de volume recebido pelos grãos de arroz em casca, a partir da potência incidente fornecida pelo forno de micro-ondas doméstico procedeu-se como descrito a seguir.

Inicialmente, a potência incidente ou absorvida pela água destilada colocada no forno, é dada por:

$$P_{\text{inc}} = \rho c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.166)$$

onde ρ e c_p são a densidade e o calor específico da água, respectivamente.

Com esta potência determina-se o campo médio quadrático (E_0) no interior do forno, como segue:

$$P_{\text{inc}} = 2 \pi f \epsilon_{\text{água}}'' E_0^2 = 2 \pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' \text{água} E_0^2 \quad (3.167)$$

onde $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m é a permissividade do espaço livre, $f = 2450 \times 10^6$ Hz é a frequência do forno de micro-ondas e $\epsilon_{r\text{água}}''$ é o fator de perda dielétrico da água.

Desde que, nos grãos de arroz em casca, o campo elétrico decresce desde a superfície, como segue:

$$|\vec{E}| = E_0 \exp(-\Psi \vec{r} \cdot \vec{n}) \quad (3.168)$$

Então o campo elétrico médio quadrático no interior do grão será:

$$E_{\text{médio}} = \frac{\int_V |\vec{E}| dV}{\int_V dV} \quad (3.169)$$

Com $E_{\text{médio}}$ determinado obtém-se a potência incidente por unidade de volume no grão de arroz em casca, como segue:

$$P_0 = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_{r\text{arroz}}'' E_{\text{médio}}^2 \quad (3.170)$$

Assim sendo, o decaimento da potência de micro-onda por unidade de volume no interior do grão de arroz será dado por:

$$P = P_0 \epsilon_{r\text{arroz}}'' \exp(-2 \Psi \vec{r} \cdot \vec{n}) \quad (3.171)$$

onde ($\epsilon_{r\text{arroz}}''$) é o fator de perda dielétrica do grão de arroz, obtido pela Equação (3.172) apresentada por Berteli, et al. (2014) como segue:

$$\epsilon'' = 0,146 \rho_p^2 + 0,004615 M^2 \rho_p^2 \left(0,32 \log f + \frac{1,743}{\log f} - 1 \right) \quad (3.172)$$

onde (ρ_p) é a densidade do produto úmido em g/cm³. Este parâmetro é dado por:

$$\rho_p = \frac{\rho_s}{1 - \phi} \quad (3.173)$$

onde (ρ_s) é a densidade aparente do grão em g/cm^3 e ϕ é a porosidade.

A constante dielétrica do grão ε' é dada por:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{0,504 M \rho_p}{\sqrt{M} + \log f} \quad (3.174)$$

onde f é a frequência do forno em MHz, M é o percentual do teor de umidade do produto em base úmida (% b.u.) e o logaritmo está em base 10.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimental

O estudo das cinéticas de secagem experimentais dos grãos de arroz em casca, in natura (variedade BRSMG Conai) tem importância fundamental para o modelo matemático proposto neste trabalho de pesquisa, uma vez que posteriormente será realizado um comparativo entre as cinéticas de secagem experimentais e as simuladas.

4.1.1 Perda de massa dos grãos de arroz durante a secagem

A Tabela 4.1 ilustra os resultados iniciais e finais dos teores de umidade médio, as potências absorvidas pelo grão e o tempo total do processo de secagem para cada experimento realizado. Os termos desta tabela são discriminados como: P_{abs} (potência absorvida pelo grão), m_s (massa seca de grão), M_0 (teor de umidade inicial em base seca ou em base úmida), M_{eq} (teor de umidade de equilíbrio em base seca ou base úmida), T_0 (temperatura inicial na superfície dos grãos), T_f (temperatura final na superfície dos grãos) e t é o tempo total da secagem. Para obtenção dos valores da potência absorvida pelo grão dividiu-se a potência experimental

absorvida (Apêndice A) pelo número de grãos de cada amostra. O resultado da massa seca obtida após 24 horas em estufa também foi dividido pelo número de grãos.

Já na Tabela 4.2 ilustra-se a média aritmética das dimensões (A, B e C) de 36 grãos de arroz; os valores dos semieixos menor (L_1) e dos semieixos maior (L_2), admitindo a geometria do grão como esferoide prolato; o volume total (V_t), a área superficial total (S_t) do grão de arroz, obtidas a partir das Equações (3.5) e (3.6), respectivamente e o número total de grãos (N_t) correspondente a cada teste.

Tabela 4.1 – Potências absorvidas, parâmetros de secagem e tempo total de secagem.

Teste	P_{abs} (W)	Parâmetros de secagem dos grãos de arroz								t (min)
		m_0 (g)	M_0 (b.s.)	M_e (b.s.)	M_0 (b.u.)	M_e (b.u.)	m_s (g)	T_0 (°C)	T_f (°C)	
1	0,192	10,01	0,228	0,044	0,186	0,042	0,025	30,6	74,5	310
2	0,491	10,02	0,240	0,027	0,194	0,026	0,027	30,7	97,1	180
3	0,694	10,01	0,245	0,019	0,197	0,018	0,025	28,8	130,0	110

Tabela 4.2 – Número total, dados dimensionais, volume total e área superficial total dos grãos de arroz em casca antes da secagem por micro-ondas.

Teste	N_t	Parâmetros geométricos dos grãos de arroz em casca						
		A (mm)	B (mm)	C (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	V_t (mm ³)	S_t (mm ²)
1	327	9,79	2,47	1,98	1,112	4,895	25,354	54,89
2	298	9,85	2,45	1,92	1,092	4,925	24,600	54,18
3	331	9,37	2,45	1,93	1,095	4,685	23,530	51,79

Silva (2016), utilizando grãos de arroz em casca in natura (variedade BRSMG Conai) na secagem convectiva em leito fixo com temperaturas de 50, 60 e 70 °C obteve: percentuais do teor de umidade médio inicial (17,0; 34,5 e 36,3% b.s.); percentuais do teor de umidade médio no equilíbrio (0,54, 0,44 e 0,1%) e tempo final de secagem (1.260, 960 e 840 min). Comparando os resultados apresentado na Tabela 4.1 com os de Silva (2016) observa-se que nos dois métodos de secagem utilizados, o aumento da temperatura no interior dos grãos proporcionou rapidez na taxa de secagem com redução no tempo final do processo.

As Figuras 4.1 a 4.3 ilustram, com maior precisão, os valores do teor de umidade médio em base seca em função do tempo obtidos experimentalmente com ajuste de 10, 20 e 30% da potência máxima configurada respectivamente no forno de micro-ondas. O nível de potência morno foi reservado para amostra 1, o nível de potência baixa para amostra 2 e descongelar para amostra 3, conforme característica do forno de micro-ondas utilizado. Nestas figuras observa-se, a influência dos níveis de potência aplicada sobre o tempo de secagem.

Figura 4.1 – Cinética de secagem de grãos de arroz por micro-ondas na potência de 0,192 W.

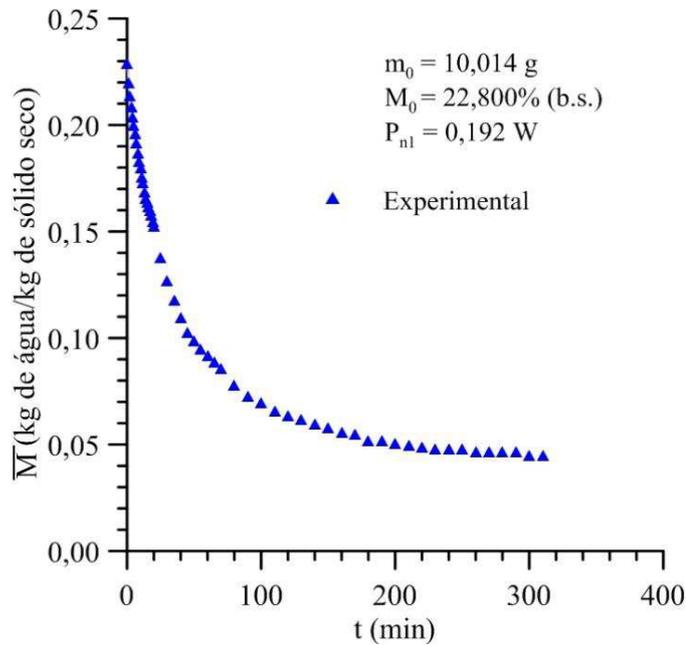


Figura 4.2 - Cinética de secagem de grãos de arroz por micro-ondas na potência de 0,491 W.

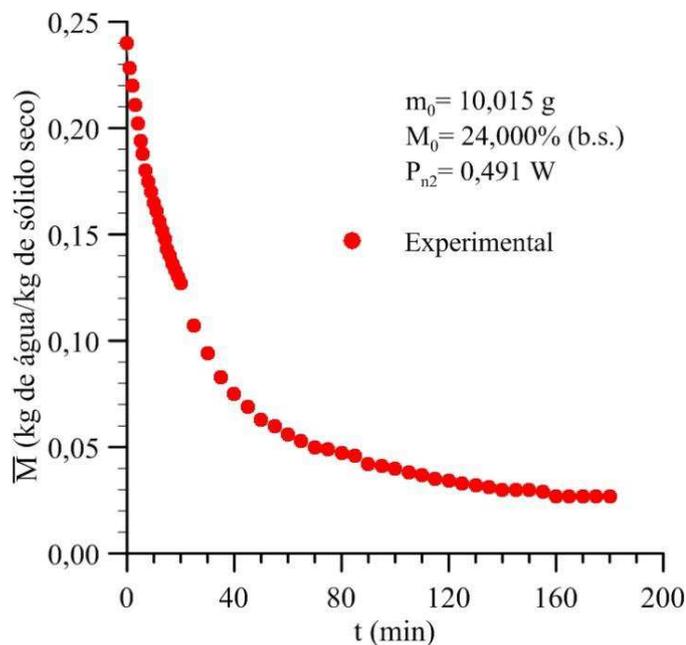
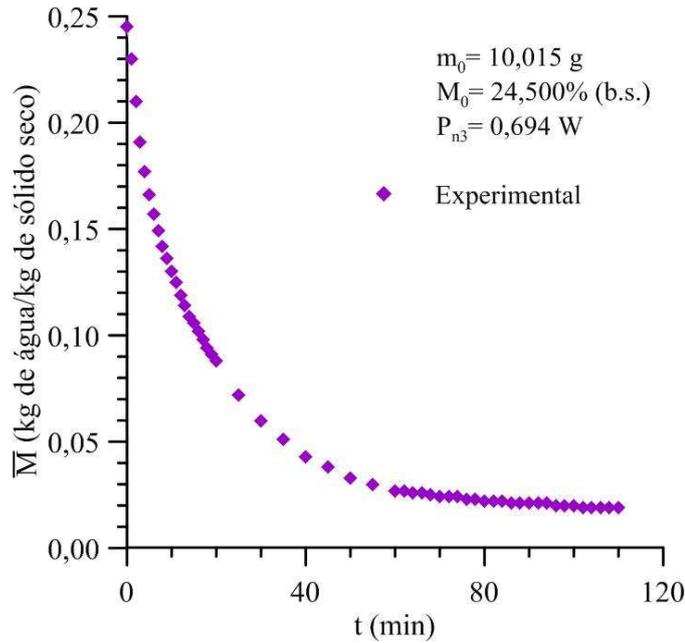


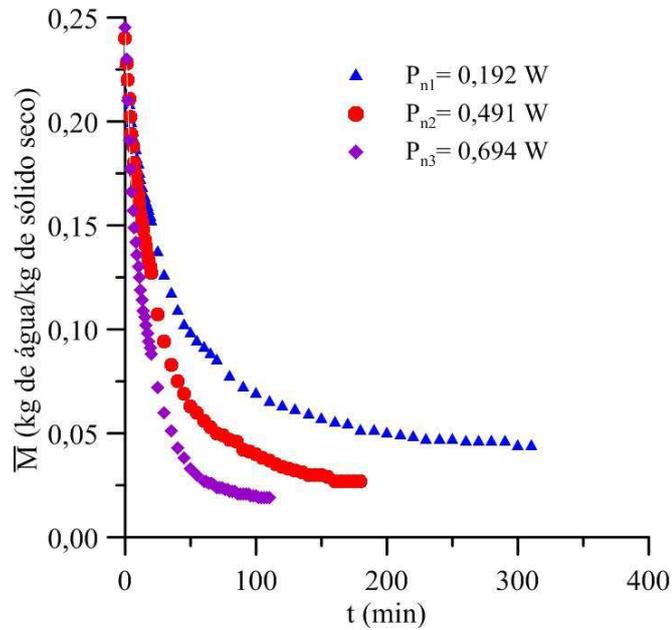
Figura 4.3 - Cinética de secagem de grãos de arroz por micro-ondas na potência de 0,694 W.



Analisando as Figuras 4.1 a 4.3, verifica-se que nos primeiros 20 minutos do processo de secagem ocorreu um rápido decréscimo na umidade média dos grãos de arroz em casca. Na Figura 4.1, em 20 minutos do processo, o teor umidade médio em base seca do material é de 15,2% (b.s.) ou seja, cerca de 66,6% do teor de umidade inicial. Na Figura 4.2, em 20 minutos do processo, o teor umidade médio em base seca do material é de 12,7% (b.s.) ou seja, cerca de 52,9% do teor de umidade inicial e, na Figura 4.3, para o mesmo tempo de secagem, o teor de umidade médio em base seca do material é de 8,8% ou seja, cerca de 35,9% do teor de umidade inicial. Após 20 minutos do processo, a perda de umidade ficou mais lenta, até estabilizar-se aos 310, 180 e 110 minutos, respectivamente. O teor de umidade médio ideal para armazenamento e comercialização de grãos, 15% (b.s.), ocorreu em tempos diferentes nas amostras ou seja, em 20, 13 e 7 minutos, para cada um dos três níveis de potências estudados (0,192, 0,491 e 0,694 W), respectivamente. O processo de secagem é finalizado quando o teor de umidade de equilíbrio das amostras atingir um percentual de 4,4%, 2,7% e 1,9% em 310, 180 e 110 minutos, respectivamente.

A Figura 4.4 ilustra os efeitos causados pelas diferentes potências aplicadas no processo de secagem. Verifica-se, nesta figura, uma redução significativa no tempo final do processo de secagem da amostra 3, em virtude da maior potência aplicada e da maior quantidade de energia de micro-ondas absorvida pelos grãos. É fácil verificar que a maior taxa de secagem ocorreu, quando uma maior potência foi usada.

Figura 4.4 -. Efeito da potência nominal absorvida sobre o teor de umidade dos grãos de arroz



As Figura 4.5 – 4.7 ilustram as variações das taxas de secagem durante o processo de secagem por micro-ondas de grão de arroz em casca para os 3 níveis de potências nominais absorvidas. Observa-se nessas figuras, a ocorrência de um período de taxa de secagem decrescente variável ao longo do tempo de secagem. No início do processo, a taxa de secagem é mais intensa e após 20 minutos fica mais lenta até estabilizar-se após 60 minutos. Além disso, observa-se maiores taxas de secagem nas maiores potências de micro-ondas absorvidas.

Figura 4.5 –Taxa de secagem de grãos de arroz por micro-ondas com potência de 0,192 W.

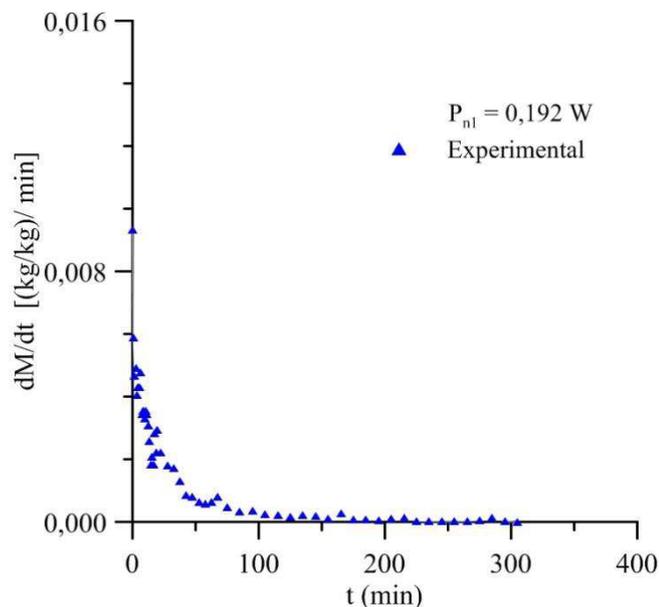


Figura 4.6 –Taxa de secagem de grãos de arroz por micro-ondas com potência de 0,491 W.

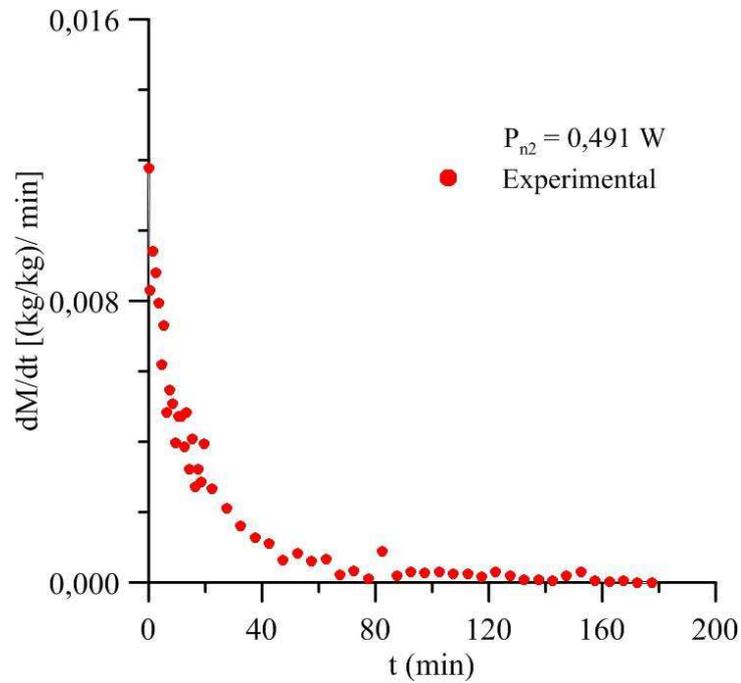
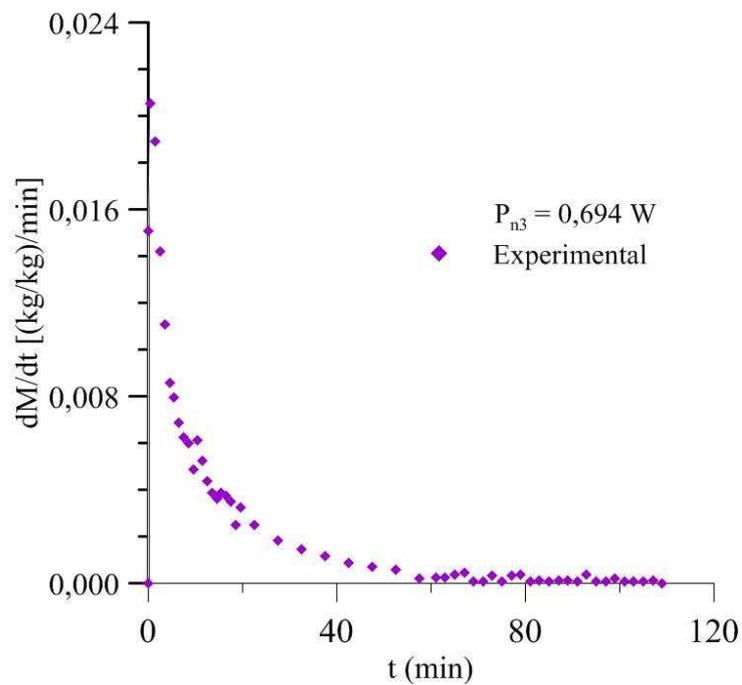


Figura 4.7 –Taxa de secagem de grãos de arroz por micro-ondas com potência de 0,694 W.



Já as Figuras 4.8 a 4.10, ilustram a evolução do teor de umidade adimensional em função do tempo para os grãos de arroz submetidos ao processo de secagem. Verifica-se maior rapidez na secagem da amostra usada no teste 3, em decorrência do maior teor de umidade médio inicial

e maior potência aplicada. O tempo final de secagem da amostra 1 é quase 3 vezes o tempo de secagem da amostra 3.

Figura 4.8 – Teor de umidade médio adimensional da amostra 1 ($P_{n1} = 0,192 \text{ W}$) em função do tempo de secagem com micro-ondas.

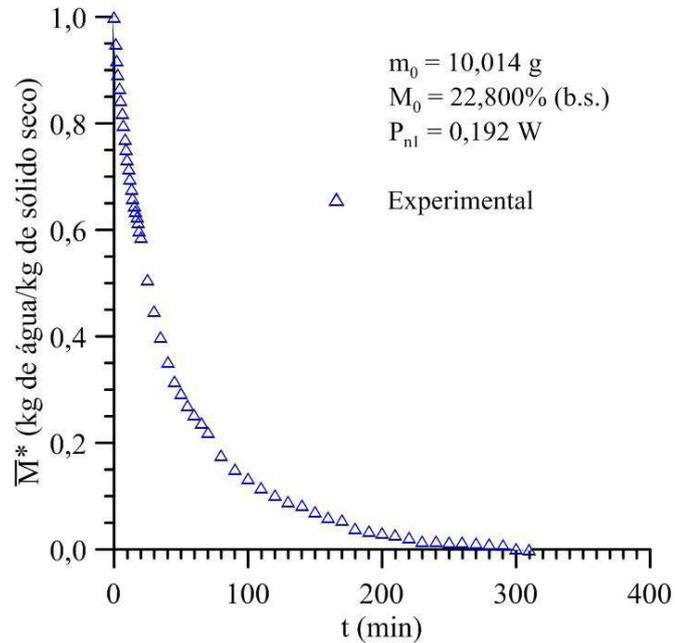


Figura 4.9 – Teor de umidade médio adimensional da amostra 2 ($P_{n2} = 0,491 \text{ W}$) em função do tempo de secagem com micro-ondas.

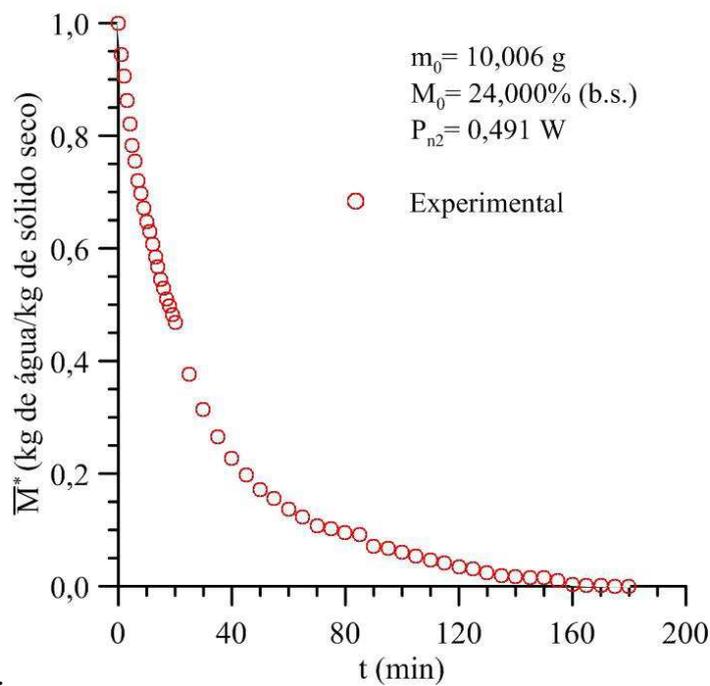
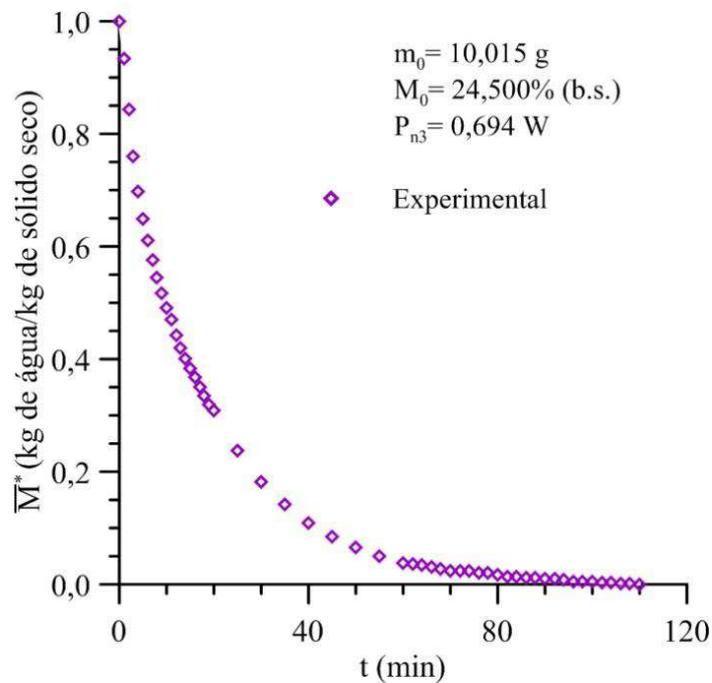
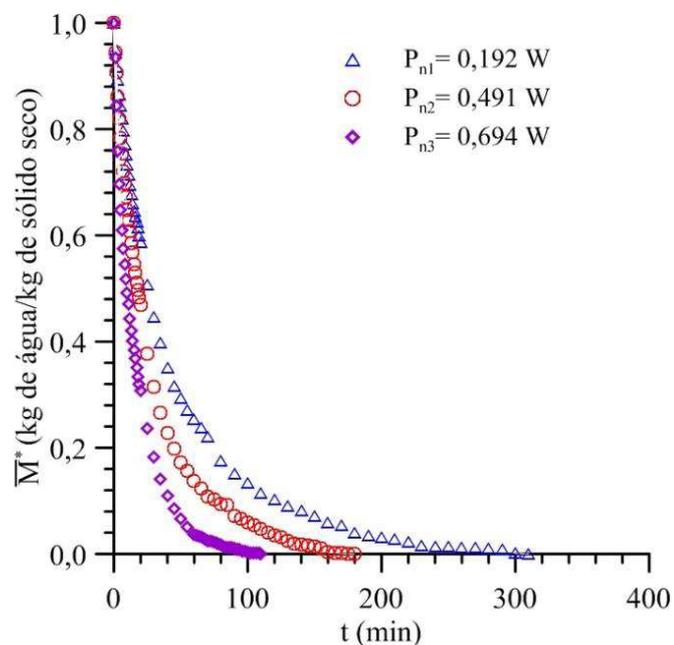


Figura 4.10 – Teor de umidade médio adimensional da amostra 3 ($P_{n3} = 0,692 \text{ W}$) em função do tempo de secagem com micro-ondas.



A Figura 4.11 ilustra uma comparação dos teores de umidade adimensionais médio para três diferentes potências nominais absorvidas em função do tempo de secagem.

Figura 4.11 - Comparação entre os teores de umidade médio adimensional obtidos para as amostras 1, 2 e 3 em função do tempo de secagem com micro-ondas.



Analisando a Figura 4.11, observa-se que, para maior potência aplicada (ajustada no forno de micro-ondas) e conseqüentemente maior quantidade de potência absorvida pelos grãos, o processo de secagem ocorreu mais rápido. Através desta figura é fácil verificar o tempo de secagem requerido para o material atingir a condição de equilíbrio higroscópico.

4.1.2 Aquecimento dos grãos de arroz durante a secagem

O aquecimento por micro-ondas é muito rápido e bastante utilizado, porém a sua não uniformidade têm sido objeto de estudo. As Figuras 4.12 a 4.14 ilustram o comportamento transiente da temperatura na superfície dos grãos de arroz em casca, medidas nas três amostras. Nos três casos analisados, observa-se uma rápida elevação da temperatura no início do processo de secagem em decorrência das potências de micro-ondas absorvidas ($P_{n1} = 0,192$, $P_{n2} = 0,491$ e $P_{n3} = 0,694$ W) com tendência de estabilizar-se no final do processo. Nas amostras 1, 2 e 3 as temperaturas nas superfícies dos grãos de arroz atingiram os valores máximos de 74,5°C, 95,2°C e 112,0°C e como a amostra 3 apresentou temperatura superior a 100°C ocorreu uma evaporação no interior do produto.

Figura 4.12 – Temperatura na superfície dos grãos da amostra 1 ($P_{n1} = 0,192$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.

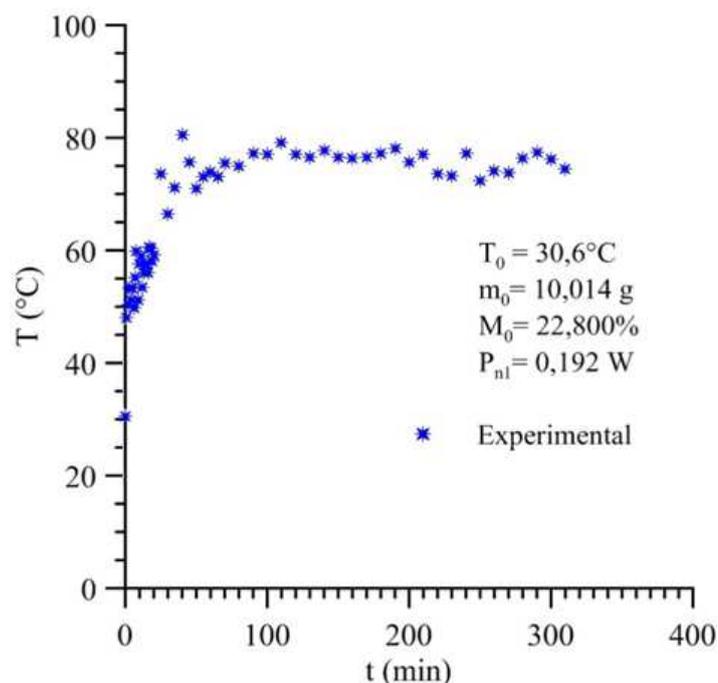


Figura 4.13 - Temperatura na superfície dos grãos da amostra 2 ($P_{n2} = 0,491$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.

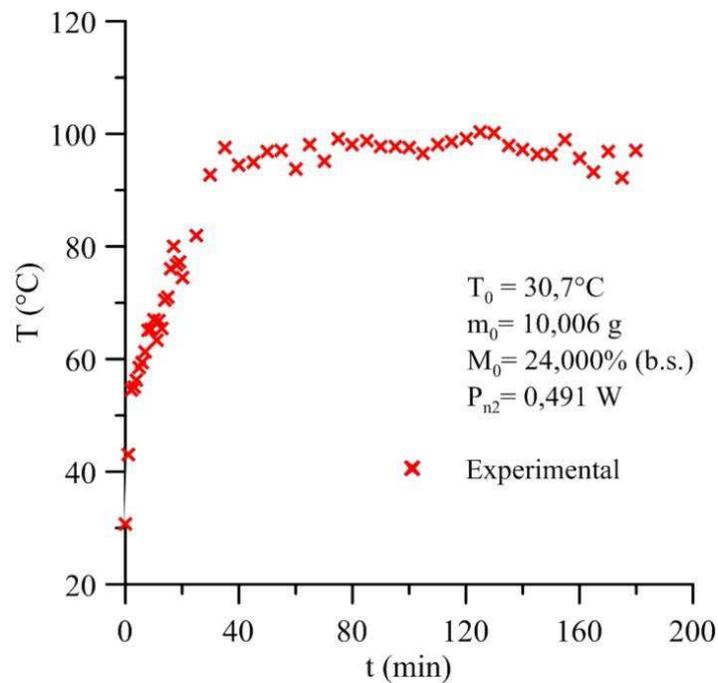
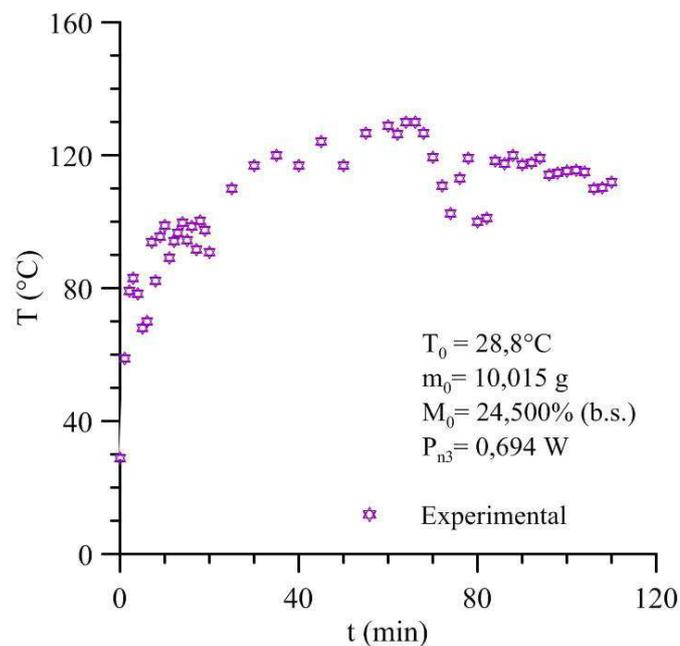
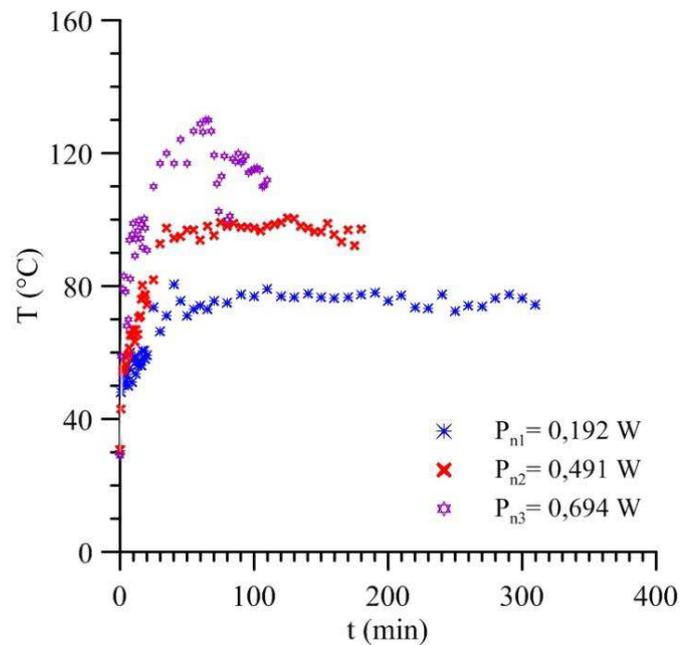


Figura 4.14 - Temperatura na superfície dos grãos de arroz da amostra 3 ($P_{n3} = 0,694$ W) em função do tempo de secagem com micro-ondas.



A Figura 4.15 demonstra que a elevação da temperatura na superfície dos grãos de arroz é decorrente da potência absorvida pelos mesmos. Observa-se que o acréscimo da potência nominal absorvida pelos grãos corresponde ao decréscimo no tempo de secagem.

Figura 4.15 – Comparação entre as temperaturas medidas na superfície dos grãos, obtidas para as amostras 1, 2 e 3 em função do tempo de secagem com micro-ondas.



4.1.3 Avaliação da qualidade dos grãos de arroz antes e pós secagem

As Figuras 4.16 e 4.17 (a), (b) e (c) ilustram a estrutura física dos grãos de arroz em casca, das amostras 1, 2 e 3, antes e pós processo de secagem em forno de micro-ondas doméstico e passagem em estufa a 105°C, por 24 horas para obtenção da matéria seca. Pequenos danos físicos na estrutura final dos grãos de arroz foram observados.

Figura 4.16 – Grãos de arroz em casca antes do processo de secagem por micro-ondas.



Figura 4.17 - Grãos de arroz das amostras 1, 2 e 3 após processo de secagem por micro-ondas.



(a) Amostra 1



(b) Amostra 2



(c) Amostra 3

Analisando os grãos de arroz em casca pós secagem em forno de micro-ondas e estufa com circulação a ar quente é possível destacar alguns efeitos do processo de secagem na qualidade final dos grãos de arroz seco: aparecimento de vários grãos com coloração escura; presença de pintas pretas na casca e extremidades, em decorrência da alta temperatura atingida na superfície dos grãos em alguns instantes do processo de secagem, principalmente para a amostra 3, onde a temperatura na superfície atingiu a marca de 130°C em $t = 64$ min.

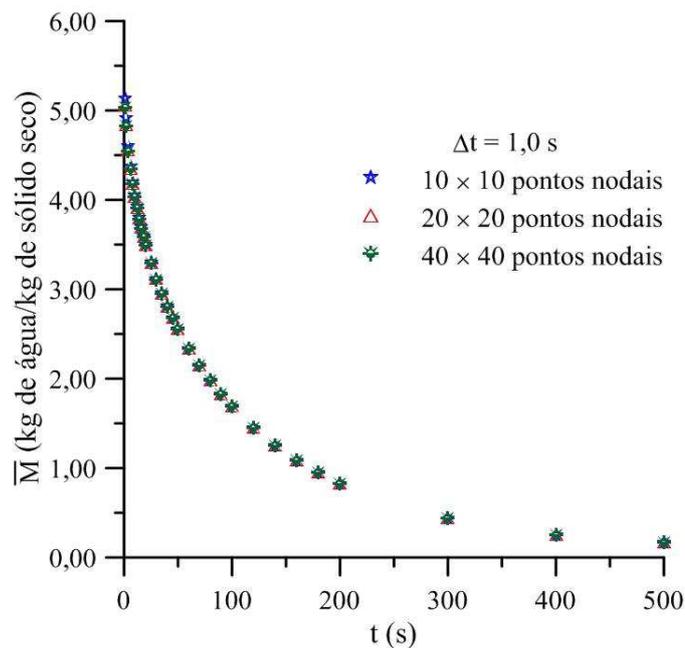
Silva (2016) relata sobre a influência da temperatura na qualidade final do grão de arroz em casca (variedade BRSMG Conai) durante o processo de secagem convectiva pura. De acordo com o autor, foi detectado um aumento no índice de trincas e quebras nos grãos de arroz secos na temperatura de ar de secagem de 70°C em relação as secagens realizadas com temperatura menores de 40,50 e 60°C. E, que trincas severas prejudica a germinação do grão de arroz.

4.2 Teórico

4.2.1 Refinamento de malha e tempo

A Figura 4.18 ilustra os três padrões de malha estudados, onde observar-se a semelhança dos resultados para a variável em estudo nos diversos instantes de tempo do processo.

Figura 4.18 – Teor de umidade médio em função do tempo para $\Delta t = 1,0$ s e diferentes padrões de malhas.



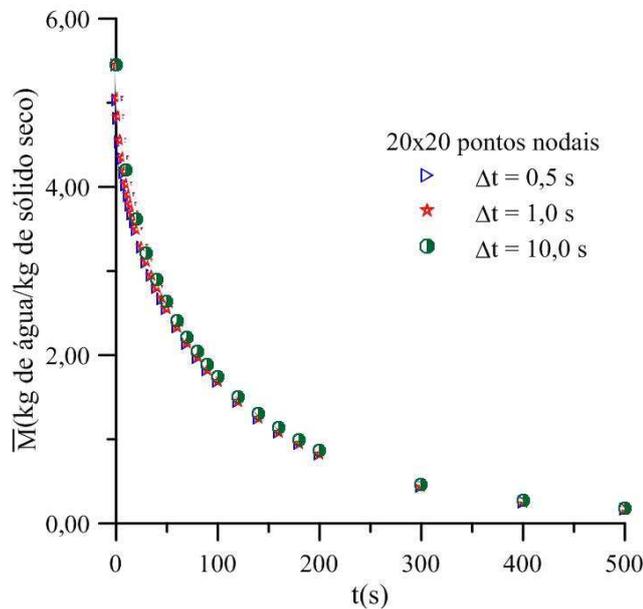
A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos desvios entre os resultados obtidos para o teor de umidade médio nos três padrões de malha. As discrepâncias apresentadas, no início do processo pelo padrão de malha de 10×10 pontos nodais, levou ao descarte da mesma. No entanto as outras malhas apresentaram resultados praticamente idênticos. A escolha pelo padrão de malha de 20×20 pontos nodais, ocorreu em virtude da mesma ter apresentado menor tempo computacional em relação a malha numérica de 40×40 pontos nodais.

Após ter sido fixado o padrão de malha de 20×20 pontos nodais, novos resultados foram obtidos considerando diferentes passos de tempo ($\Delta t = 0,5; 1,0$ e 10 s). Os três casos avaliados não apresentaram grande discrepância e portanto, a escolha pelo intervalo de tempo ($\Delta t = 1,0$ s) ocorreu em virtude do processo ser transiente, de aquecimento rápido e não linear. A Figura 4.19 ilustra a malha numérica selecionada com os três intervalos de tempo requerido.

Tabela 4.3 – Resumo do teor de umidade médio (b.s.) para três padrões de malha, considerando o intervalo de tempo de 1,0 s.

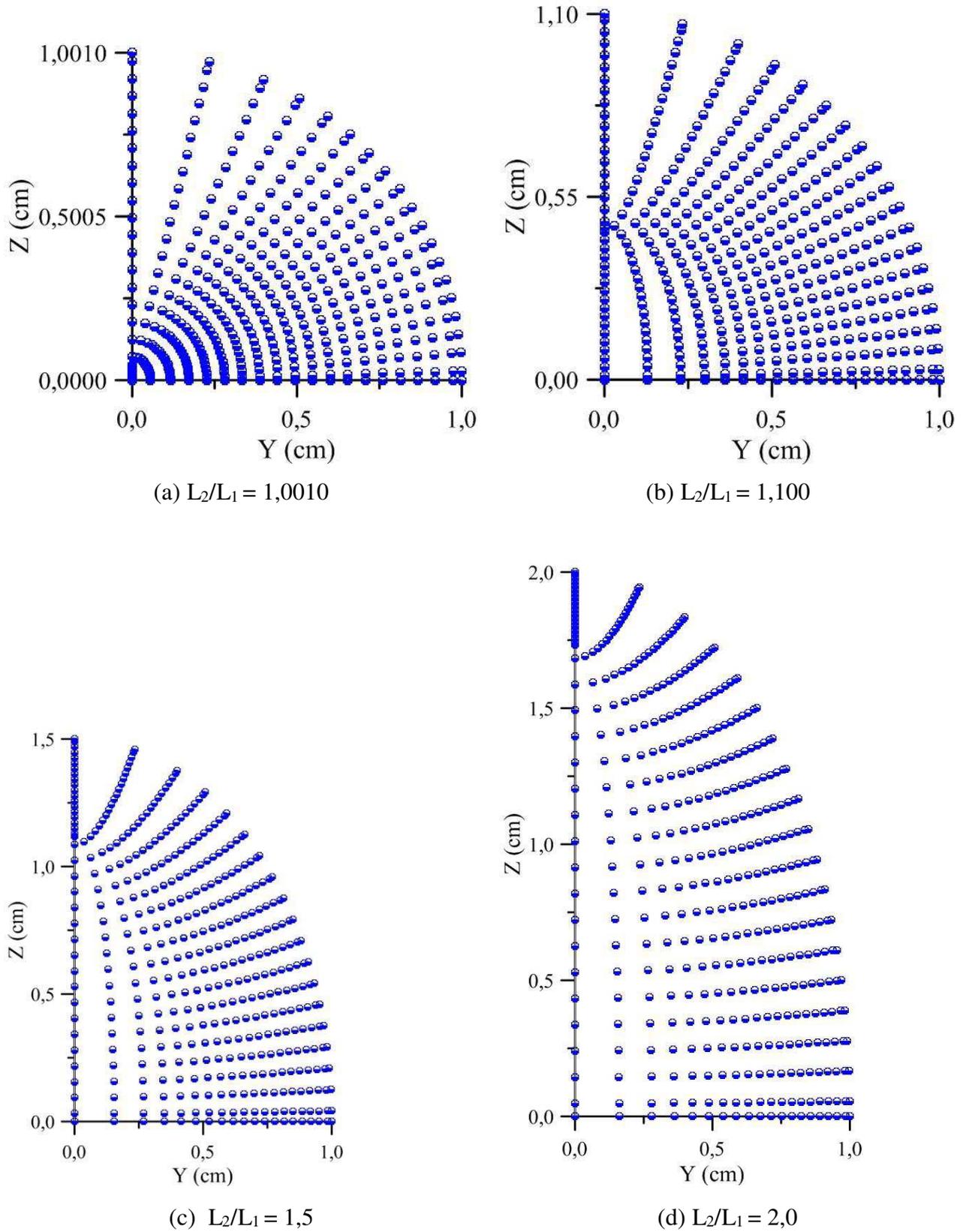
t (s)	Malha		
	A: 10 × 10	B: 20 × 20	C: 40 × 40
	\bar{M} (b.s.)		
1	5,138	5,059	5,035
10	4,055	4,035	4,031
20	3,507	3,497	3,495
40	2,813	2,808	2,808
100	1,689	1,689	1,689

Figura 4.19 – Teor de umidade médio em função do tempo para o padrão de malha de 20 × 20 pontos nodais e diferentes passos de tempo.



A seguir, nas Figuras 4.20 (a) – (d), estão ilustradas quatro malhas numéricas no plano z - y utilizadas nas simulações ξ - η . No plano z - y, os volumes de controle não são igualmente espaçados, concentrando-se mais na superfície do corpo com relação a ξ e no eixo y, com relação à coordenada angular η , caracterizando a malha gerada como uma malha irregular. Contudo, no plano ξ - η esta malha é regular e ortogonal, como mostra a Figura 4.20 (a) para a razão de aspecto ($L_2/L_1 = 1,0010$). Neste plano, está concentrado toda a resolução numérica. Quando $L_2/L_1 \rightarrow \infty$, o ponto focal desloca-se para a superfície do corpo, e inversamente, para $L_2/L_1 \rightarrow 1$, este mesmo ponto tende a ser coincidente com o centro geométrico do corpo.

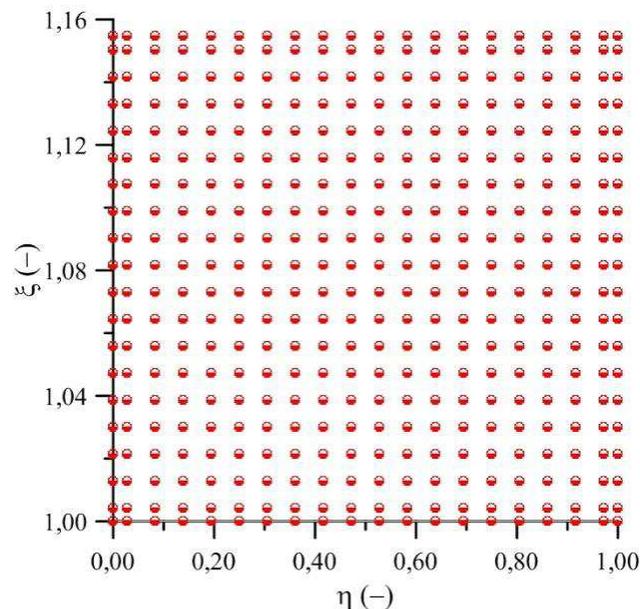
Figura 4.20 – Malhas numéricas no plano físico para elipsoides com diferentes razões de aspecto.



Lima (1999) relata a existência da forte influência, nos valores de fronteira, do espaçamento da malha, para pontos nodais próximos a superfície do corpo, apesar do caráter elíptico da equação de difusão. Em especial, nestes pontos, deve-se ter um bom controle sobre o espaçamento da malha, principalmente quando existe altos gradientes e se requer uma solução mais precisa.

A Figura 4.21 apresenta uma malha numérica no plano computacional, onde observa-se que os pontos $(\xi = 1; \eta)$ e $(\xi; \eta = 0)$ são pontos singulares e mesmo que exista um considerável espaçamento dos primeiros pontos nodais em relação a estes pontos, isto traz benefícios para a solução da equação algébrica. Quanto mais próximos se estiver destes pontos, menos preciso será o resultado obtido.

Figura 4.21 – Malha numérica no plano computacional para um elipsoide com razão de aspecto $L_2 / L_1 = 1,001$.



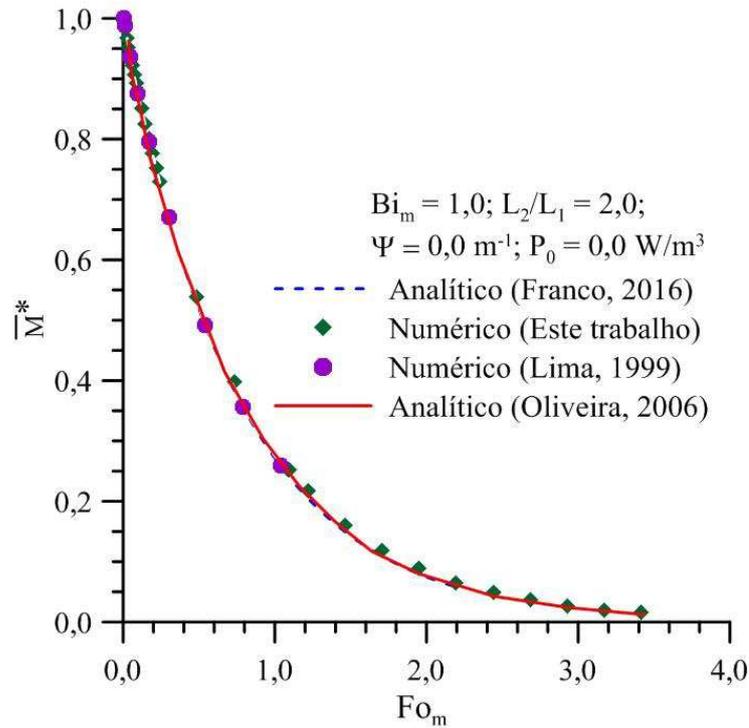
4.2.2 Validação do modelo e metodologia

a) Processo de secagem convectiva de um esferoide prolato ($\dot{Q} = 0$) e condição de contorno convectiva.

A Figura 4.22 ilustra uma comparação entre o teor de umidade em um esferoide prolato com razão de aspecto 2,0 ($L_2 = 2\text{cm}$ e $L_1 = 1\text{cm}$), número de Biot igual a 1,0 e com resultados

analíticos e numéricos reportados na literatura (LIMA, 1999; OLIVEIRA, 2006 e FRANCO, 2016). Isto corresponde a um fenômeno de secagem puramente convectiva. Verifica-se a excelente concordância entre os resultados.

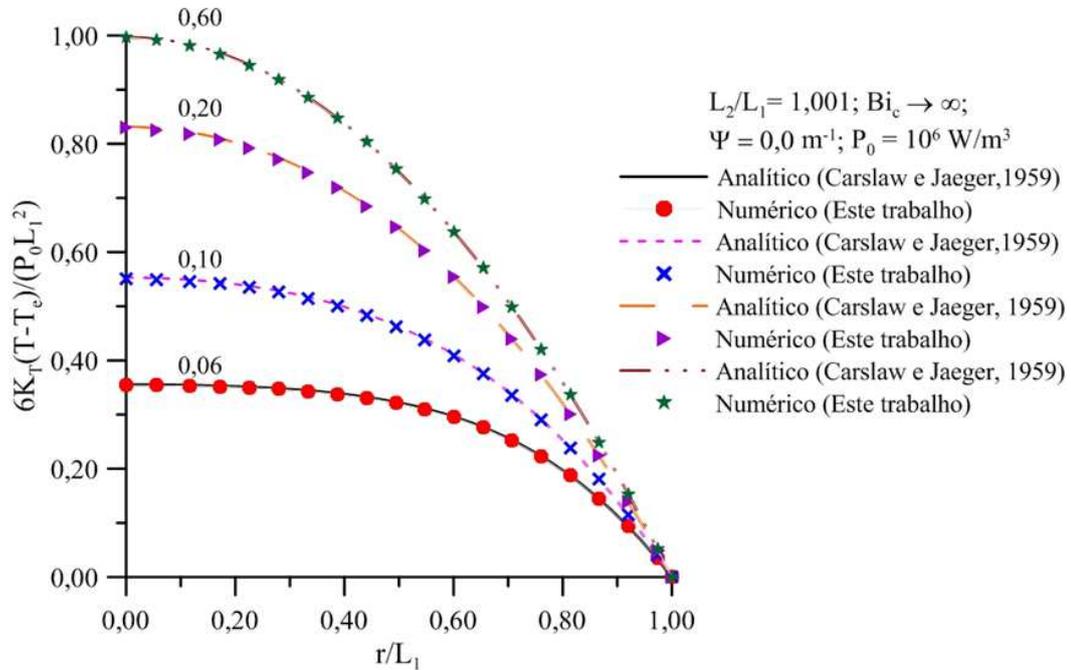
Figura 4.22 – Comparação entre os teores de umidade médio adimensional em função dos tempos preditos pelo modelo e os reportados da literatura para uma secagem convectiva.



b) Processo de aquecimento de uma esfera com fonte de calor constante, sem transferência de massa e condição de equilíbrio na superfície.

A Figura 4.23 ilustra uma comparação entre o parâmetro adimensional $6 K_T (T - T_0)/(P_0 L_1^2)$ predito e reportado da literatura (CARSLAW e JAEGER, 1959), no interior de uma esfera de raio $L_1 = 1,0 \text{ cm}$ para diferentes tempos adimensionais ou números de Fourier ($Fo = 0,06; 0,10; 0,20$ e $0,60$). Isto corresponde a uma condição de convecção intensa na superfície da esfera em conjunto com um aquecimento intenso proveniente da micro-onda com densidade de potência de aquecimento constante dada por: $P_0 = 10^6 \text{ W/m}^3$ e considerando o fator de atenuação ($\Psi = 0,0 \text{ m}^{-1}$). Verifica-se uma excelente concordância entre os resultados.

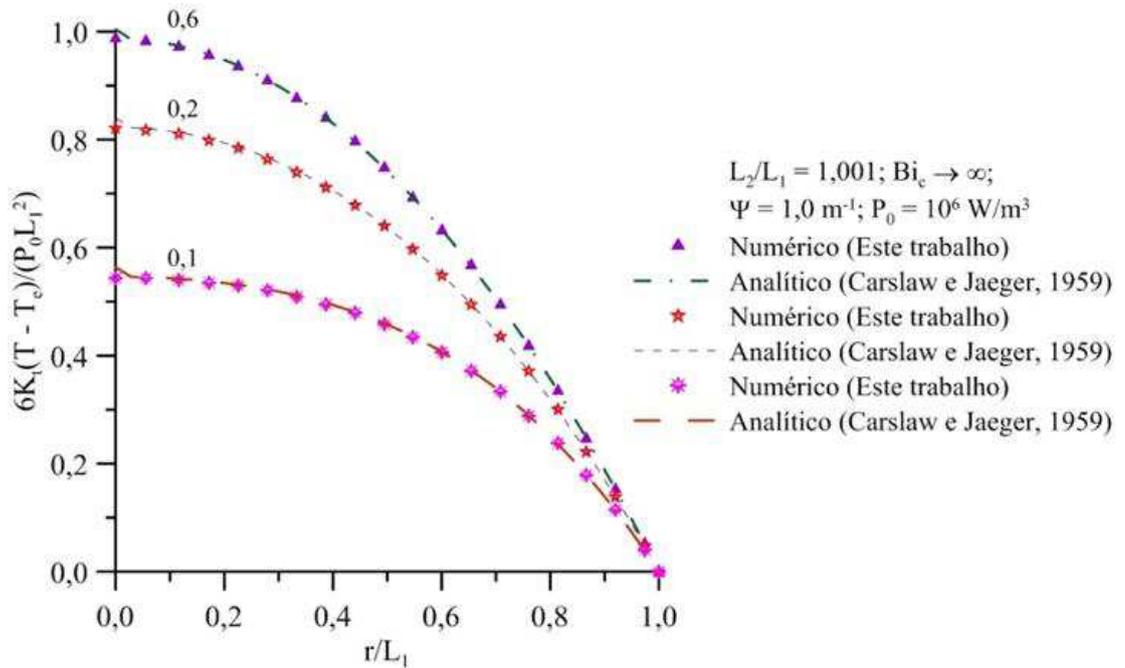
Figura 4.23– Comportamento adimensional da temperatura numa esfera com temperatura na superfície igual a zero e produção de calor constante.



c) Processo de aquecimento de uma esfera com fonte de calor variável, sem transferência de massa e condição de equilíbrio na superfície.

A Figura 4.24 ilustra a comparação dos resultados obtidos numericamente e analiticamente para distribuição da temperatura numa esfera ($0 \leq r \leq L_1$), para o caso de taxa de geração de calor \dot{Q} variável, para densidade de potência ($P_0 = 10^6 \text{ W/m}^3$), fator de atenuação ($\Psi = 1,0 \text{ m}^{-1}$) e diferentes tempos adimensionais ou números de Fourier: $Fo = 0,1; 0,2 \text{ e } 0,6$. Dados analíticos obtidos da literatura (CARSLAW e JAEGER, 1959) e expressos nas Equações (3.162) e (3.164) foram usados para comparação com o modelo proposto neste trabalho de pesquisa para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto L_2/L_1 igual a 1,001 correspondente a geometria próximo de uma esfera. A taxa de calor gerada internamente durante o aquecimento por micro-ondas de corpos com geometria esférica, dada pela expressão: $\dot{Q} = P_0 \exp[-2\Psi (L_1 - R)]$ é variável e os dados numéricos considerados para validação foram os mesmos que o apresentado para o caso b. Verifica-se uma excelente concordância entre os resultados.

Figura 4.24 – Comportamento adimensional da temperatura numa esfera com temperatura na superfície igual a zero e produção de calor variável.



4.2.3 Casos simulados: Aplicação a material arbitrário

4.2.3.1 Secagem por micro-ondas e convecção na superfície

As Figuras 4.25 e 4.26 (Casos 1 a 5 da Tabela 3.2), ilustram os teores de umidade médio e temperaturas médias para diferentes razões de aspecto de sólidos esferoidais prolatos em função do tempo de secagem, respectivamente, com potência de aquecimento constante ($P_0=10^6 \text{ W/m}^3$) e intensa convecção na superfície do sólido ($Bi_c \rightarrow \infty$).

Na Figura 4.25 observa-se que sólidos com maior relação área/volume (esfera) secam mais rápido ou seja, atingem o teor de umidade de equilíbrio num tempo mais curto.

Já na Figura 4.26 verifica-se que, no início do processo, os sólidos com formas geométricas próximo de esferas apresentam aquecimento mais rápido do que os sólidos com outras formas geométricas, ocorrendo uma reversão após 200 s de processo. As temperaturas média de equilíbrio: 392,87 K; 394,04 K; 397,28 K; 399,35 K e 402,03 K atingidas são referentes aos diferentes sólidos esferoidais prolatos apresentados na Tabela 3.2 com razão de aspecto: 1,001; 1,1; 1,5; 2,0 e 5,0 conforme ilustrado na Figura 4.26. Observou-se, também,

que no início do processo de aquecimento, a temperatura no centro é maior do que na superfície e quando o equilíbrio térmico é atingido no centro do corpo, o aquecimento finaliza-se, a temperatura no material fica uniforme e assim a perda de massa passa a ser dada por um processo isotérmico.

Figura 4.25 – Teor de umidade médio em função do tempo para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).

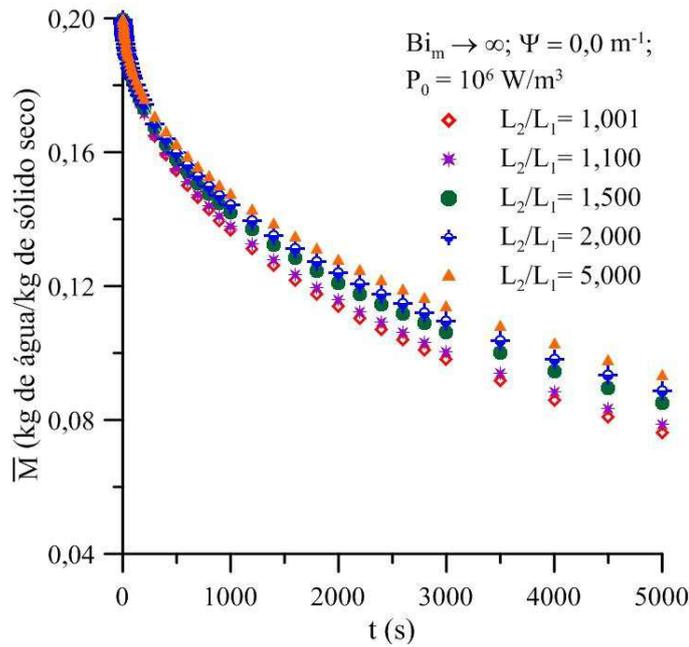
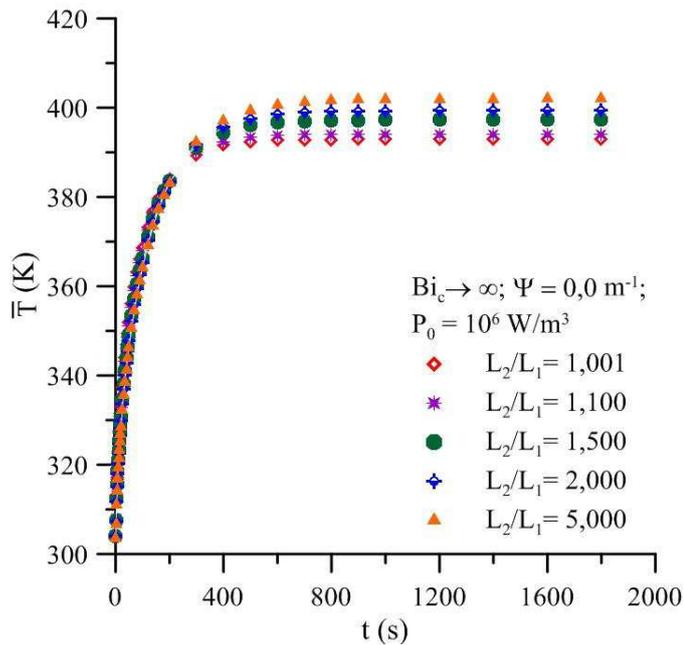


Figura 4.26 – Temperatura média em função do tempo para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).



As Figuras 4.27 e 4.28 (Casos 1 a 5 da Tabela 3.2) ilustram os perfis de umidade para cinco razões de aspecto, representadas pelas formas geométricas de esfera, esferoide prolato e cilindro, em dois instantes de tempo (1000 e 4000 s).

Figura 4.27– Teor de umidade no eixo y (z = 0) em t = 1000 s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).

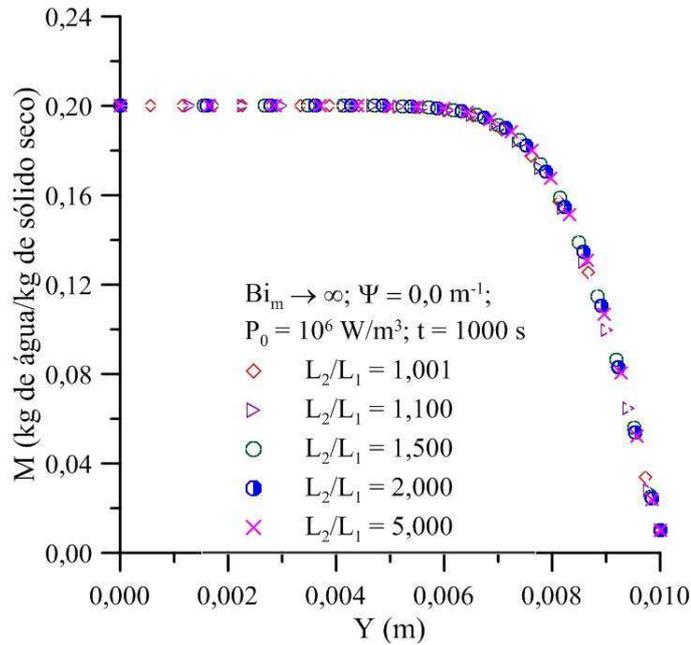
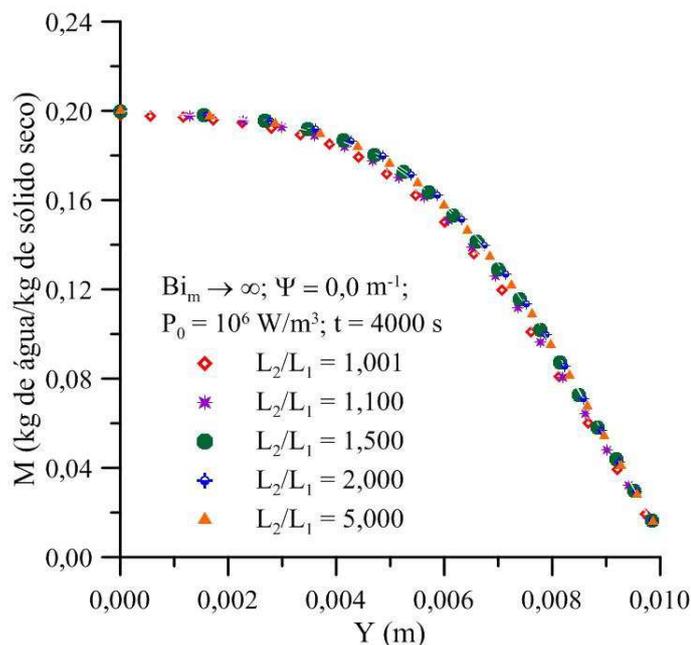


Figura 4.28 – Teor de umidade no eixo y (z = 0) em t = 4000 s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).



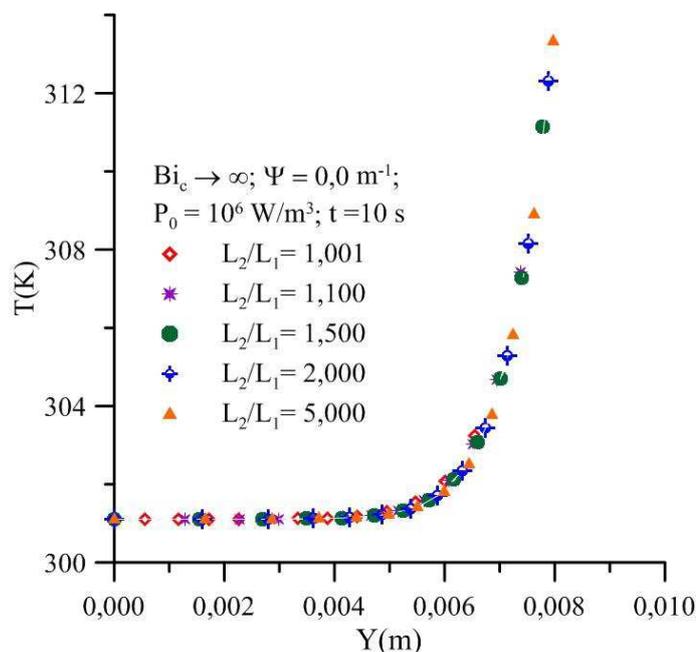
Analisando a Figura 4.27 observa-se uma região de umidade constante, seguindo-se de um decréscimo próximo a superfície até atingir a umidade de equilíbrio. Verifica-se elevados gradientes de umidade próximo à superfície. Isto evidencia que o fluxo de massa do grão ocorre do centro para a superfície para o instante de tempo $t = 1000$ s.

Já para o instante $t = 4000$ s (Figura 4.28) verifica-se uma variação do teor de umidade desde o centro até a superfície, que proporciona moderados gradientes de umidade. No que diz respeito a forma do corpo verifica-se, em ambos os instantes de tempo, que este parâmetro tem pouco efeito no teor de umidade, apenas nessa região.

As Figuras 4.29 a 4.33 (Casos 1 a 5 da Tabela 3.2) ilustram os perfis de temperatura para cinco razões de aspectos em diferentes instantes de tempo do processo de aquecimento por micro-ondas submetidos a densidade de potência de 10^6 W/m³.

Na análise das figuras, verifica-se a ocorrência de um acréscimo da temperatura no eixo y ($z = 0$) para os cinco casos estudados. A medida que o tempo de aquecimento aumenta, a temperatura no centro se eleva a uma maior taxa de aquecimento que a superfície.

Figura 4.29 – Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 10$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).



Um fato interessante pode ser notado na Figura 4.30. O corpo com forma geométrica próxima de uma esfera está com temperatura superior à dos demais. Após um certo tempo do processo, há uma inversão de valores, como pode ser visto nas Figuras 4.31 a 4.33.

Figura 4.30 – Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 100$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).

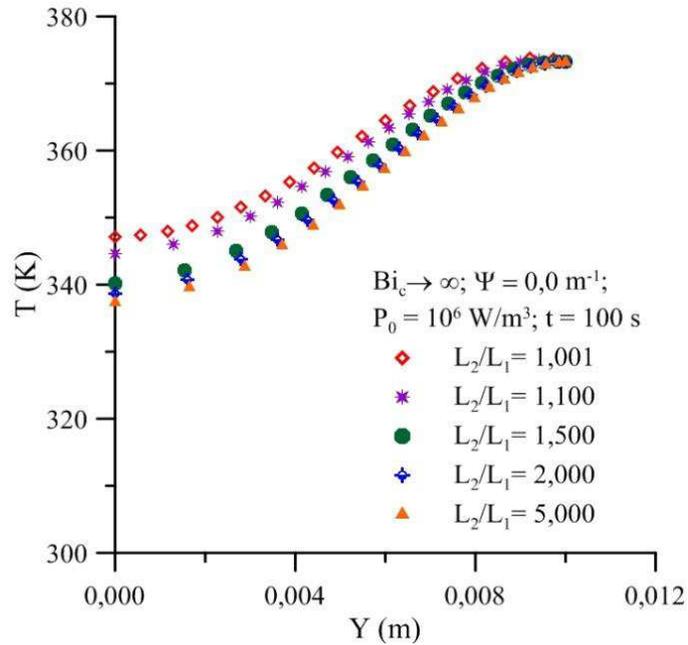


Figura 4.31 – Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 300$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).

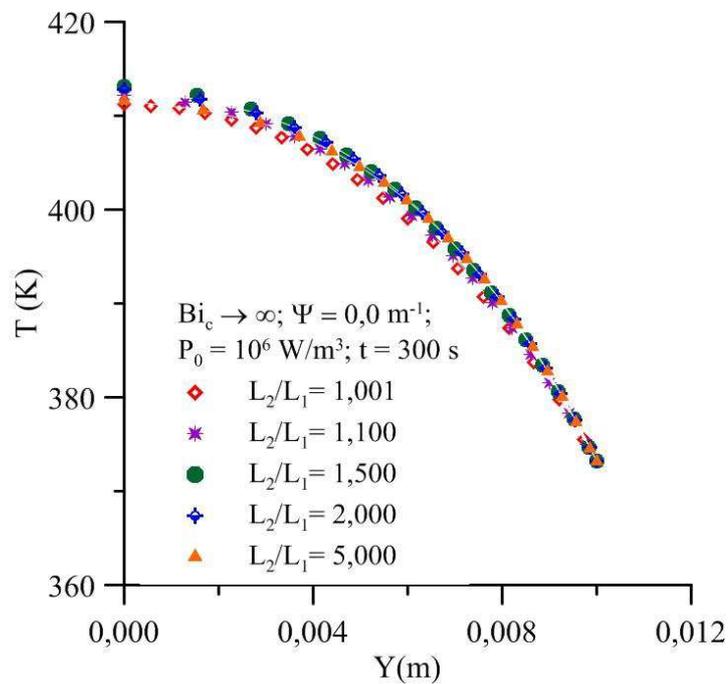


Figura 4.32 – Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 500$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).

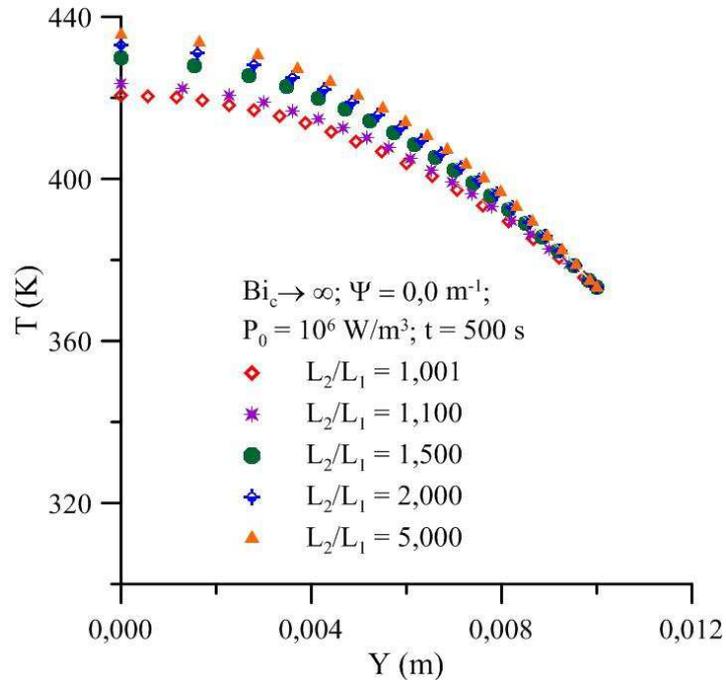
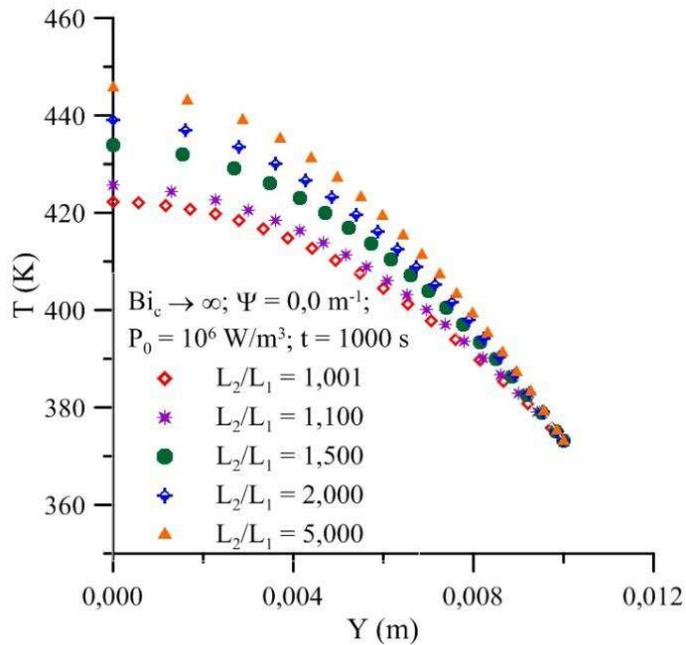


Figura 4.33 – Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 1000$ s para diferentes sólidos esferoidais prolatos (secagem combinada).



As Figuras 4.34 e 4.35 (Casos 6 a 10 da Tabela 3.2) apresentam o teor de umidade médio e temperatura média num esferoide prolato com razão de aspecto (2,0) para diferentes números de Biot. Nessas figuras $Bi_c = 1,0$, corresponde a um fenômeno de convecção fraca na superfície

do sólido e $Bi_c \rightarrow \infty$, ao contrário, corresponde a uma interação física de convecção extremamente forte, a ponto de instantaneamente, a temperatura na superfície se igualar a temperatura do ar de secagem, e o teor de umidade na superfície atinge seu valor de equilíbrio higroscópico.

Figura 4.34 – Comportamento transiente do teor de umidade médio do sólido esferoidal prolato com razão de aspecto (2,0), diferentes números de Biot (de massa) e $P_0 = 10^3 \text{ W/m}^3$.

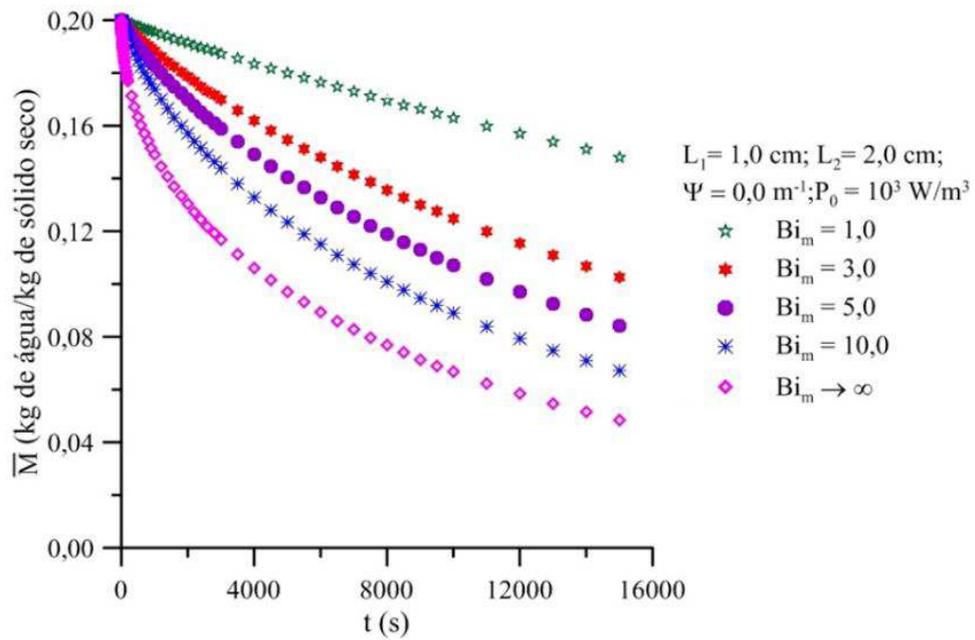
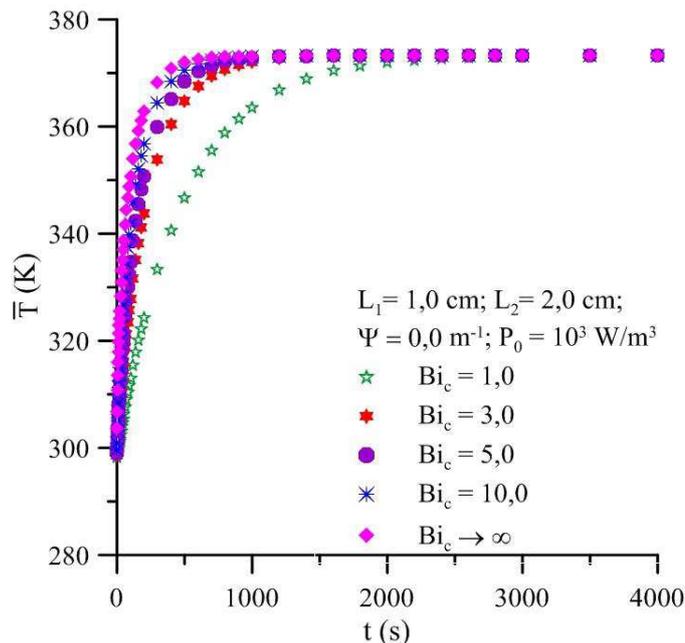


Figura 4.35 – Comportamento transiente da temperatura média de um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto (2,0), diferentes números de Biot (de calor) e $P_0 = 10^3 \text{ W/m}^3$.



Analisando-se as Figuras 4.34 e 4.35, observa-se que o aumento do número de Biot (de massa ou de calor), proporciona acréscimo nas taxas de secagem e no aquecimento do sólido, ou seja, o corpo atinge equilíbrios higroscópico e térmico em menor tempo. O número de Biot (de massa), pequeno ou seja igual a um, acarreta diminuição na velocidade de secagem do material e portanto maior tempo de exposição as radiações de micro-ondas, podendo provocar danos ao produto que está sendo seco. Enquanto isso, a medida que o número de Biot (de calor) cresce o material atinge o equilíbrio térmico num menor tempo de aquecimento. Verifica-se ainda que, o processo de aquecimento do sólido é mais rápido que o de secagem.

As Figuras 4.36 e 4.37 (Casos 6 a 10 da Tabela 3.2) apresentam os perfis do teor de umidade no eixo y ($z = 0$) para um esferoide prolato com razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$) para diferentes números de Biot (de massa) em diferentes instantes de tempo. Analisando estas figuras verifica-se que o aumento do número de Biot (de massa), corresponde ao aumento na taxa de secagem, o que conduz a maiores gradientes de umidade no interior do sólido, principalmente nos instantes iniciais de secagem e próximo a superfície do sólido.

Figura 4.36 – Teor de umidade no eixo y ($z = 0$) em $t = 1000$ s para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$), diferentes números de Biot (de massa) e densidade de potência de 10^3 W/m³.

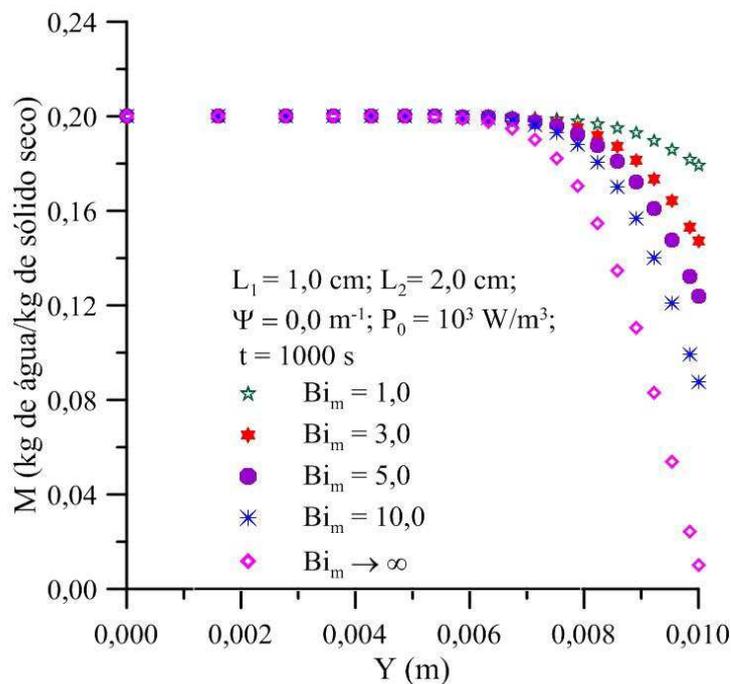
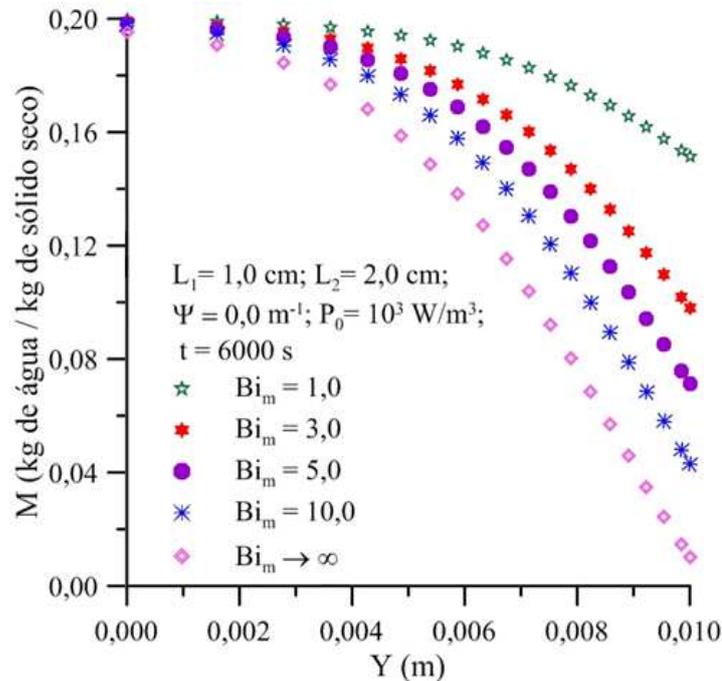


Figura 4.37 – Teor de umidade no eixo y ($z = 0$) em $t = 6000$ s para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$), diferentes números de Biot (de massa) e densidade de potência de 10^3 W/m³.



Nas Figuras 4.38 a 4.40 (Casos 6 a 10 da Tabela 3.2) estão ilustrados os perfis da temperatura no eixo y ($z = 0$) para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto igual a 2,0 para diferentes números de Biot (de calor) em diferentes instantes de tempo. Ao analisar estas figuras percebe-se que o aumento do número de Biot (de calor) implica numa taxa de aquecimento mais intensa do sólido, fazendo com que o mesmo atinja sua temperatura de equilíbrio na superfície mais rápido. Nos tempos iniciais de aquecimento, o fluxo de calor ocorre da superfície para o centro do sólido. Após um certo período de aquecimento, este comportamento se inverte, e o fluxo de calor ocorre do centro para a superfície do sólido e, quanto menor for o número de Biot de calor, maior será a temperatura no interior do sólido esferoidal prolato. Do ponto de vista físico, quando o valor do número de Biot de calor é pequeno, tem-se uma situação física com transferência de calor baixa e neste caso o aquecimento por micro-ondas domina o fenômeno.

Figura 4.38–Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 300$ s para um sólido esferoidal prolato de razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$), diferentes números de Biot (de calor) e densidade de potência de 10^3 W/m³.

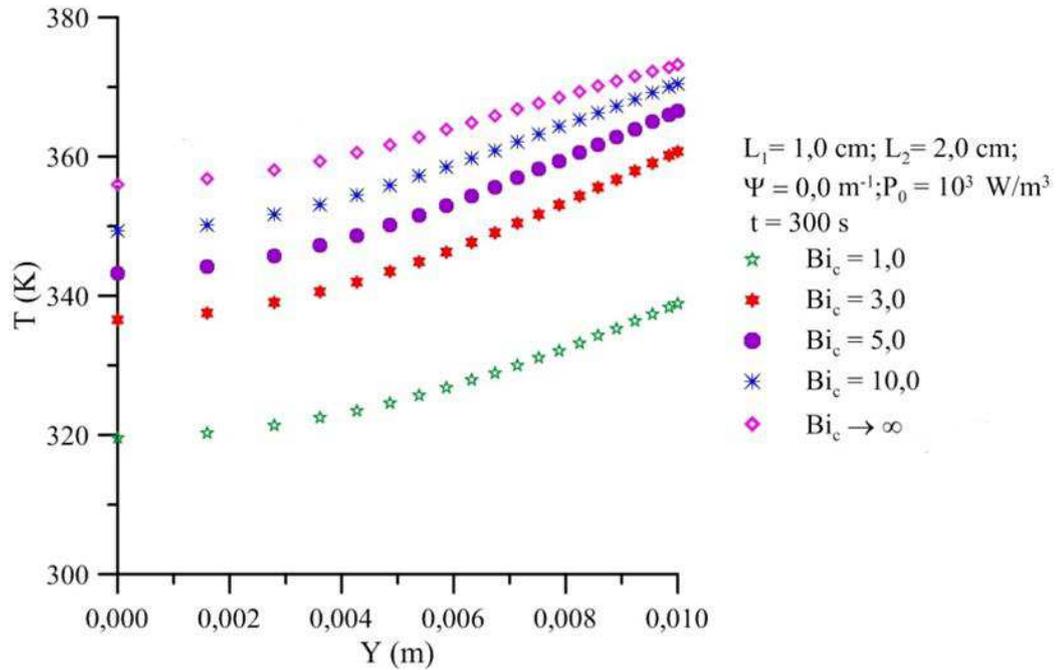


Figura 4.39 –Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 1000$ s para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto $L_2 / L_1 = 2,0$, para diferentes números de Biot (de calor) e densidade de potência de 10^3 W/m³.

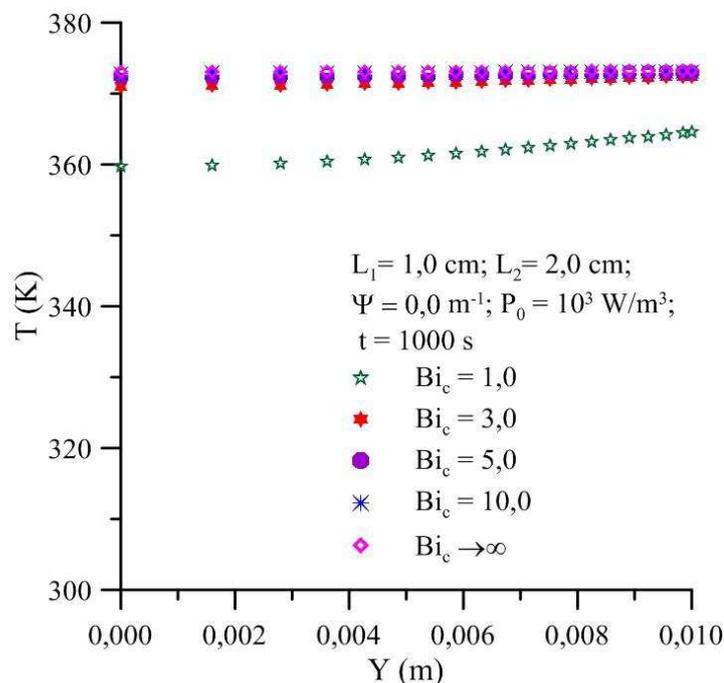
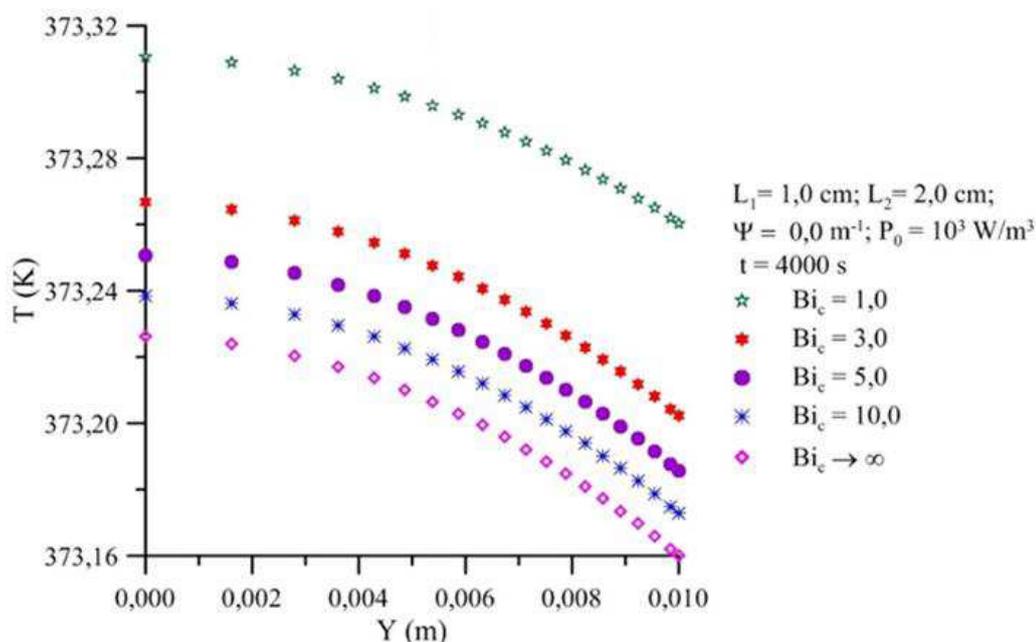


Figura 4.40 - Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 4000$ s para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$), diferentes números de Biot (de calor) e densidade de potência de 10^3 W/m³.



As Figuras 4.41 e 4.42 (Casos 11 a 14 da Tabela 3.2) ilustram a distribuição de temperatura no interior de um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$) para quatro densidades de potências e diferentes instantes de tempo.

Figura 4.41– Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 300$ s para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$), diferentes densidades de potências (P_0) e $Bi_c = 5,0$.

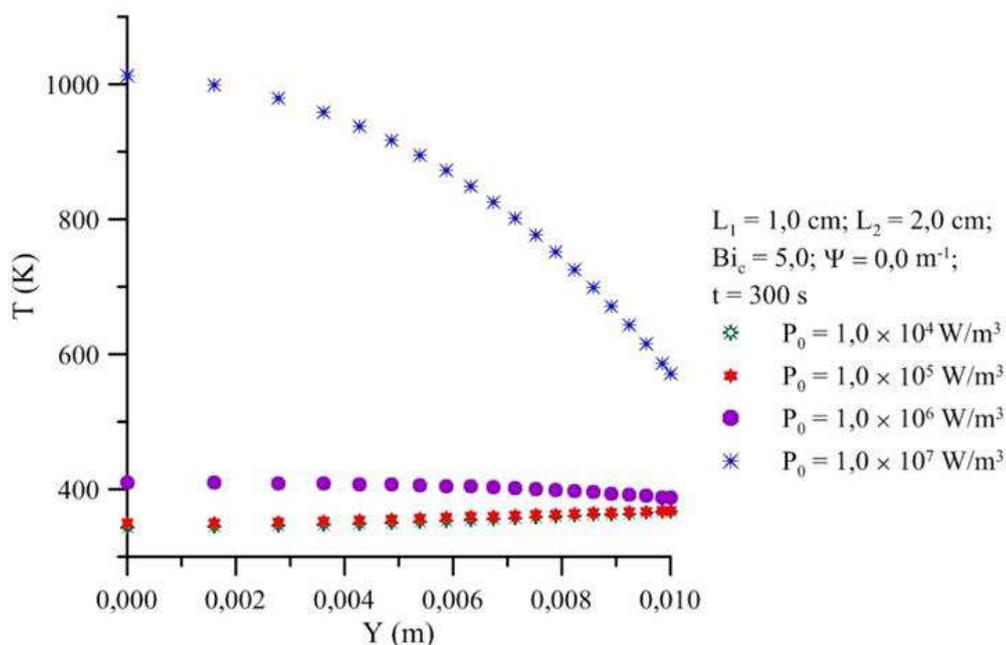
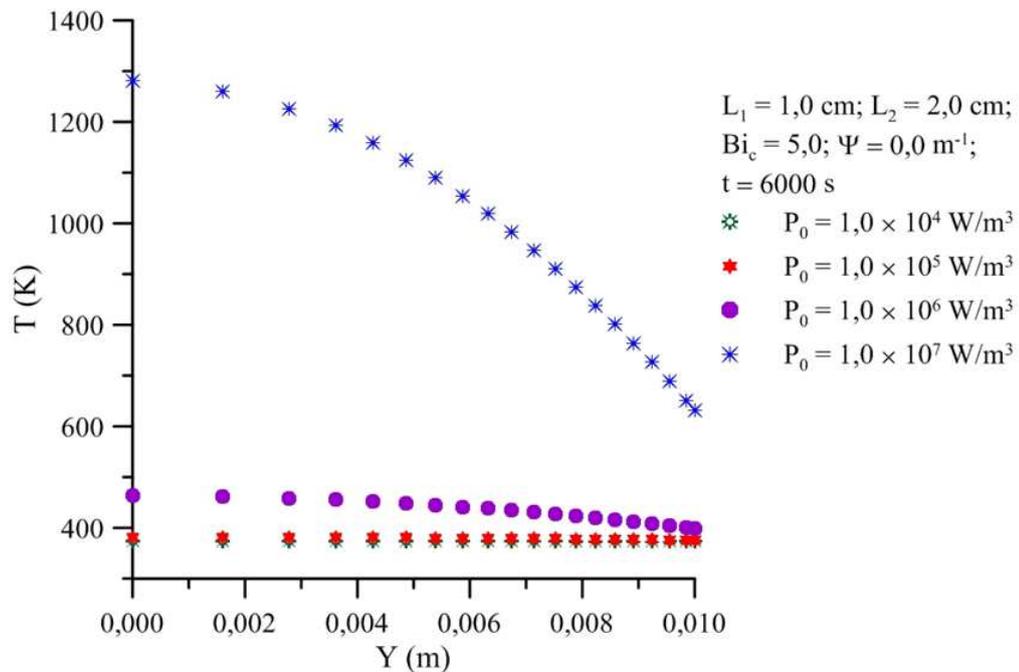


Figura 4.42 - Temperatura no eixo y ($z = 0$) em $t = 6000$ s para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$), diferentes densidades de potências (P_0) e $Bi_c = 5,0$.



Analisando as Figuras 4.41 e 4.42, observam-se que para as densidades de potências $10^4, 10^5$, e 10^6 W/m³ os perfis de temperatura apresentaram comportamento semelhante e para a densidade de potência 10^7 W/m³ houve uma pequena discrepância ocorrendo um acréscimo substancial da temperatura no início do processo de aquecimento por micro-ondas, podendo ocasionar danos na estrutura física do produto que estar sendo aquecido ou até incinerar. Além disso, é sabido que quanto maior a potência aplicada maior será a quantidade de calor gerado internamente no produto, proporcionando maior rigidez e menor encolhimento.

A Figura 4.43 e as Figuras 4.4 e 4.45 (Casos 16 a 20 da Tabela 3.2) ilustram a cinética de aquecimento e o perfil de temperatura de um sólido esferoidal prolato para diferentes fatores de atenuação das ondas eletromagnéticas, nos tempos de 600 e 900 s, respectivamente, quando submetido a uma densidade de potência de 10^6 W/m³ e número de Biot de calor igual a 5,0.

Analisando a Figura 4.43 verifica-se que o crescimento da temperatura com o tempo ocorrido do centro para a superfície é mais intenso para fatores de atenuação menores ou seja, menores fatores de atenuação e conseqüentemente maior profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas proporcionam maior rapidez no aquecimento do sólido esferoidal prolato, podendo ocorrer incineração do mesmo.

Figura 4.43 – Comportamento transiente da temperatura média de um sólido esferoidal prolato, para diferentes fatores de atenuação (Ψ) e densidade de potência de 10^6 W/m^3 .

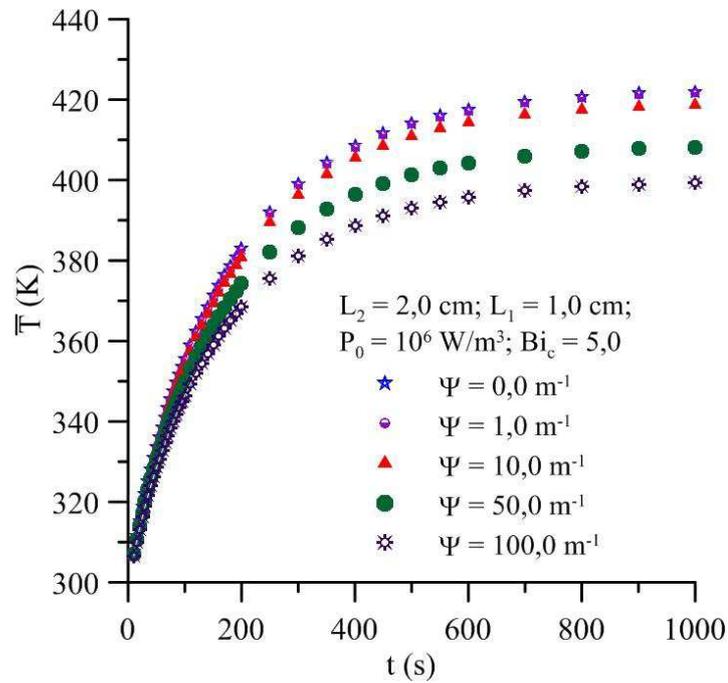


Figura 4.44 – Comportamento transiente da distribuição de temperatura de um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto ($L_2 / L_1 = 2,0$), para diferentes fatores de atenuação (Ψ), densidade de potência 10^6 W/m^3 e $t = 600 \text{ s}$.

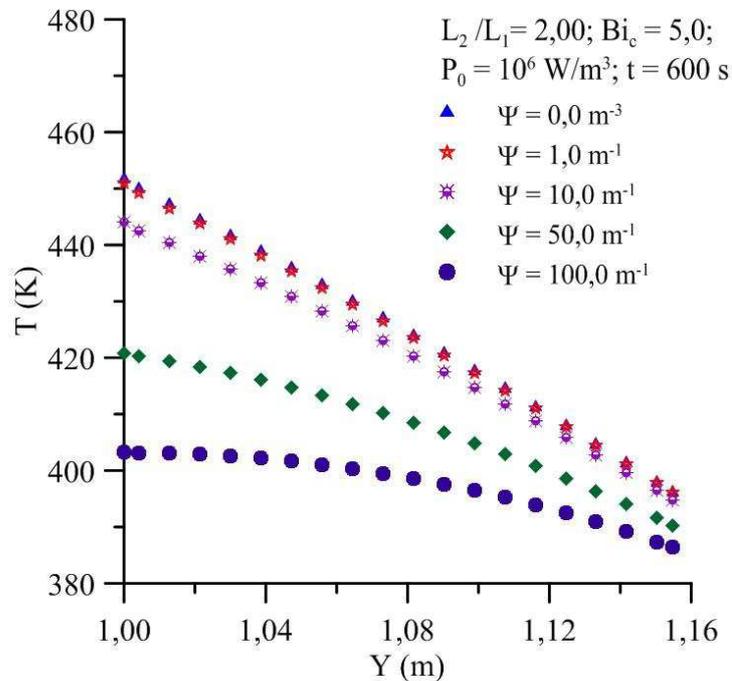
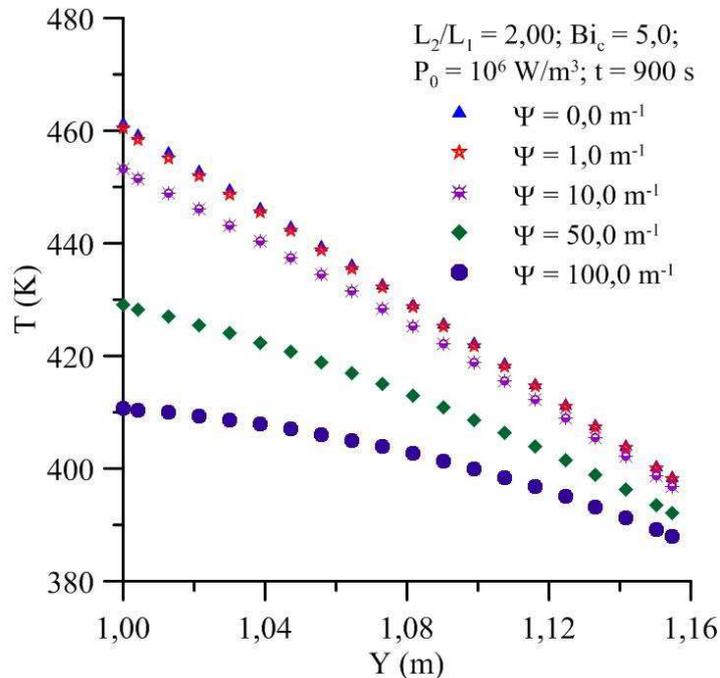


Figura 4.45- Comportamento transiente da distribuição de temperatura de um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto ($L_2/L_1 = 2,0$), para diferentes fatores de atenuação (Ψ), densidade de potência 10^6 W/m^3 e $t = 900 \text{ s}$.



Analisando-se a distribuição das temperaturas no eixo y ($z = 0$) para os tempos de 600 e 900 s das Figuras 4.44 e 4.45 observa-se que o maior valor da temperatura atingida de 451,75 e 461,28 K, respectivamente, ocorreu nos dois casos estudados para o menor fator de atenuação ($\Psi = 0,0 \text{ m}^{-1}$). Isso se dá em virtude do fator de atenuação ser inversamente proporcional a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas, principal responsável pelo aumento da temperatura durante o processo de aquecimento por micro-ondas em sólidos esferoidais prolato. O alto valor da temperatura no interior do produto pode trazer danos irreparáveis ao mesmo, podendo até incinerar.

4.2.4 Casos simulados: Aplicação a grãos de arroz em casca

4.2.4.1 Ajuste do modelo empírico aos dados experimentais

A formulação numérica da equação de difusão de calor necessita do conhecimento dos dados referentes as propriedades físicas do grão de arroz. Inicialmente, o modelo matemático empírico de Henderson e Pabis, 1961 dado pela Equação (3.8), foi utilizado para prever a perda de água nos grãos de arroz durante o processo de secagem por micro-ondas.

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros estatísticos dos modelos empíricos propostos que foram ajustados aos dados experimentais do teor de umidade dos grãos de arroz da variedade BRSMG Conai nos três casos estudados para diferentes potências nominais absorvidas na secagem por micro-ondas. Para obtenção destes parâmetros utilizou-se o ambiente do Software Grapher® 8.0 e o método dos mínimos quadrados.

Tabela 4.4 – Parâmetros estatísticos do modelo empírico proposto após ajustes aos dados experimentais da secagem.

Teste	P_n (W)	Parâmetros estatísticos			
		A	K	R^2	ERMQ
1	0,192	0,9341	0,0225	0,9949	0,0300
2	0,491	0,9429	0,0348	0,9958	0,0216
3	0,694	0,9266	0,0591	0,9942	0,0243

Analisando os dados da Tabela 4.4, observa-se um crescimento na constante de secagem (K) com o aumento da potência nominal absorvida (P_n), que proporcionou um aumento da temperatura interna do produto e um aumento na taxa de secagem.

O modelo matemático (empírico) de Henderson e Pabis, (1961), ajustado aos dados experimentais das três amostras de grãos de arroz em casca apresentaram coeficiente de determinação (R^2) superiores a 99,4% e resíduo quadrático mínimo ou erro quadrático médio com valor máximo de 3%, indicando um bom ajuste.

As Figuras 4.46 a 4.48 ilustram as curvas de ajuste do teor de umidade médio em relação ao tempo de secagem por micro-ondas dos grãos de arroz em casca para as potências de micro-ondas absorvidas: 0,192; 0,491 e 0,694 W. Analisando as três figuras observa-se uma boa concordância entre os valores preditos e experimentais em virtude dos coeficientes de determinação apresentarem valores próximos de 1,0 para todas as potências nominais absorvidas pelas amostras de grãos de arroz em estudo.

Figura 4.46 – Comparação entre as cinéticas de secagem dos grãos de arroz em casca experimental e predita pelo modelo empírico para $P_{n1} = 0,192$ W.

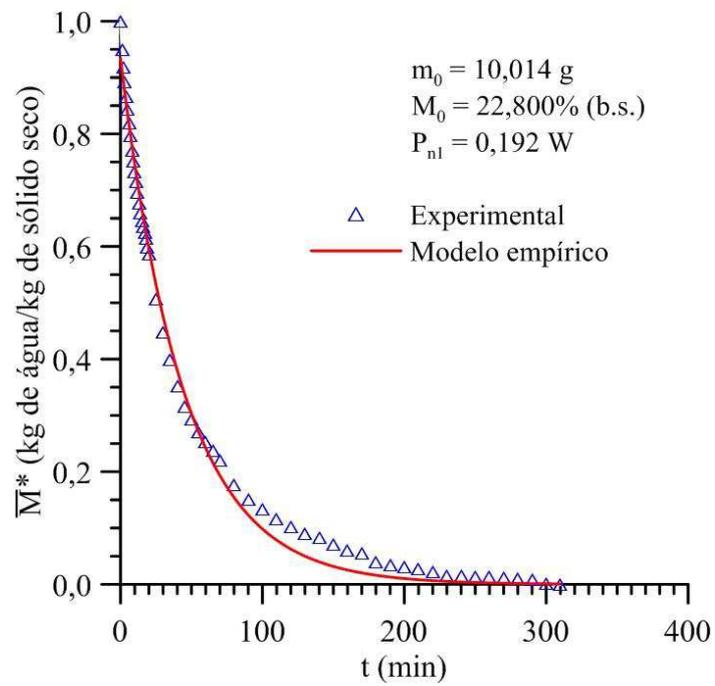


Figura 4.47 – Comparação entre as cinéticas de secagem dos grãos de arroz em casca experimental e predita pelo modelo empírico para $P_{n2} = 0,491$ W.

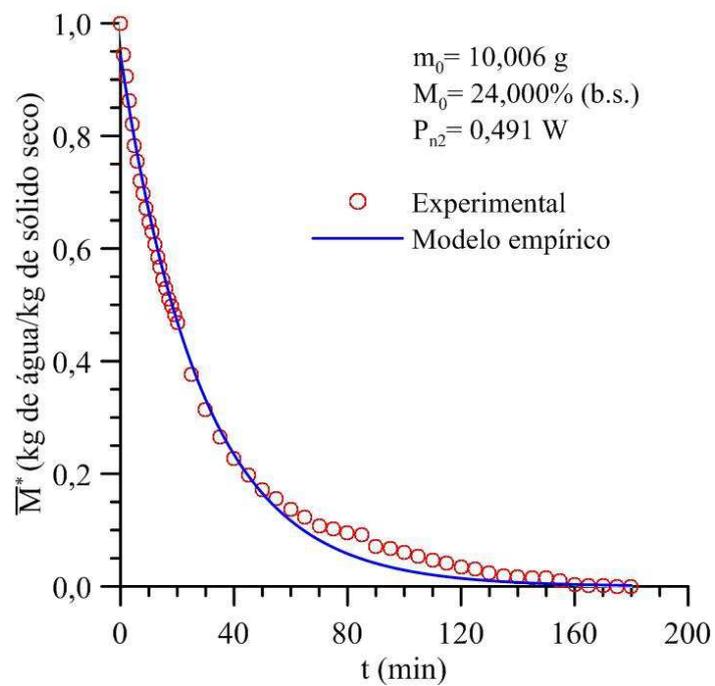
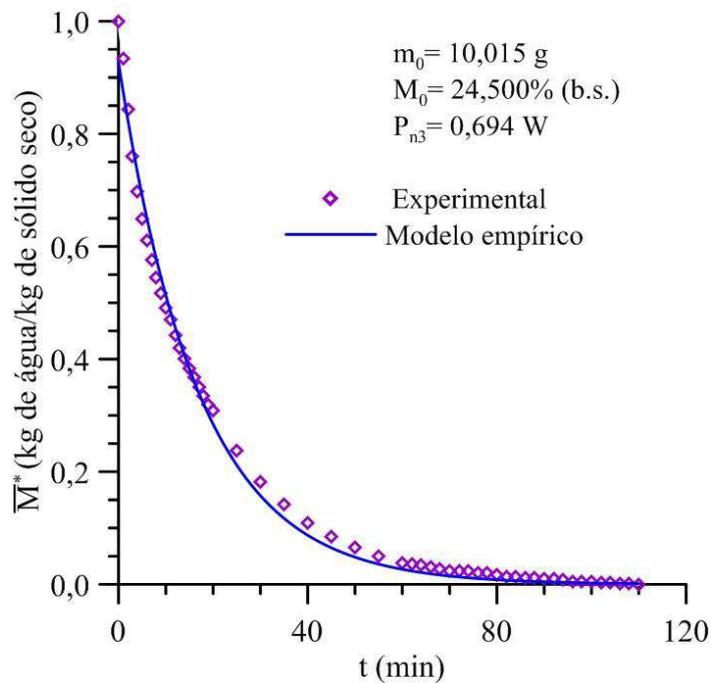


Figura 4.48– Comparação entre as cinéticas de secagem dos grãos de arroz em casca experimental e predita pelo modelo empírico para $P_{n3} = 0,694$ W.



4.2.4.2 Estimativa dos coeficientes de difusão e de transferência de massa convectivo com o modelo de Fick

Como mencionado no Capítulo 3, fez-se uma comparação entre os dados teóricos e experimentais do teor de umidade médio via modelo de Fick de difusão, para a estimativa dos coeficientes de transporte, pelo método dos mínimos quadrados.

a) Modelo I: Condição de contorno de equilíbrio higróscopico e aquecimento por micro-onda.

A Tabela 4.5 apresenta o resultado dos dados numéricos do coeficiente de difusão (D) considerando o coeficiente de transferência de massa (h_m) infinito para os três experimentos de secagem por micro-ondas de grãos de arroz em casca. Observa-se na tabela a seguir um crescimento do coeficiente de difusão de massa com a potência nominal absorvida.

Silva (2016) analisando a influência do aumento de temperatura na secagem convectiva de grão de arroz em casca da mesma variedade utilizada neste trabalho, observou um acréscimo no valor da difusividade de massa do produto com o aumento da temperatura fixa utilizada no processo de scagem convectiva. Para a temperatura de 70°C , os coeficientes de transporte

apresentaram os dados: percentual do teor umidade médio inicial (36,3% em base seca), coeficiente de difusão de $2,93 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ e tempo final de secagem de 840 min. Neste trabalho, durante o processo de secagem com micro-ondas, a temperatura final atingida pelas amostras de grãos de arroz assumiu os valores: 74,5; 95,2 e 112,0°C com percentuais de teores de umidade médio inicial: 22,80; 24,00 e 24,50%. Os coeficientes de difusão de massa (D) e tempo final de secagem estão ilustradas na Tabela 4.5. De acordo com os dados apresentados nos dois processos de secagem, observa-se uma compatibilidade entre os métodos apresentados, apesar do alto valor do teor de umidade médio inicial obtido por Silva, (2016), contudo o tempo de secagem foi muito menor quando se usou a micro-onda como fonte de energia.

Tabela 4.5 – Valores do coeficiente de transporte estimado pelo modelo de Fick (Equilíbrio) e erro quadrático médio para cada teste de secagem de grão de arroz em casca.

Teste	P_n (W)	t (s)	Coeficientes de secagem			
			D ($10^{-11}\text{m}^2/\text{s}$)	h_m (10^{30}m/s)	h_c (W/m ² K)	ERMQ
1	0,192	18.600	3,122	1,0	5,0	0,0941198
2	0,491	10.800	5,220	1,0	5,0	0,0923880
3	0,694	6.600	10,21	1,0	5,0	0,0045675

As Figuras 4.49 a 4.51 ilustram uma comparação entre os teores de umidade médio predito e experimental em função do tempo de secagem para os coeficientes de difusão (D) e de transferência de massa convectivo (h_m) dados na Tabela 4.5 para os três experimentos. Observa-se nestas figuras a necessidade de ajustes para o coeficiente de transferência de massa, uma vez que as curvas uma regular concordância entre os dados experimentais e numéricos implicando que o modelo adotado não representa bem, o problema físico aqui tratado, principalmente para baixas potências da micro-onda.

Já as Figuras 4.52 a 4.54 ilustram a distribuição do teor de umidade no interior dos grãos de arroz obtidos com o uso dos coeficientes de difusão (D) e coeficiente de transferência de massa convectivo (h_m), conforme dados na Tabela 4.5 para três tempos particulares do processo da secagem: $t = 200 \text{ s}$; $t = 1800 \text{ s}$ e $t = 4000\text{s}$. A análise da distribuição do teor de umidade no interior do grão é bastante importante uma vez que demonstra a evolução das tensões hidromecânicas desenvolvidas no material em virtude dos altos gradientes de umidade. A partir da

análise destas figuras percebe-se que o fluxo de umidade do produto ocorre do centro para a superfície, e que a secagem é mais intensa na região próxima de $z = L_2$.

Figura 4.49 – Comparação entre os teores de umidade médio do grão de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Equilíbrio na superfície e potência nominal de 0,192 W).

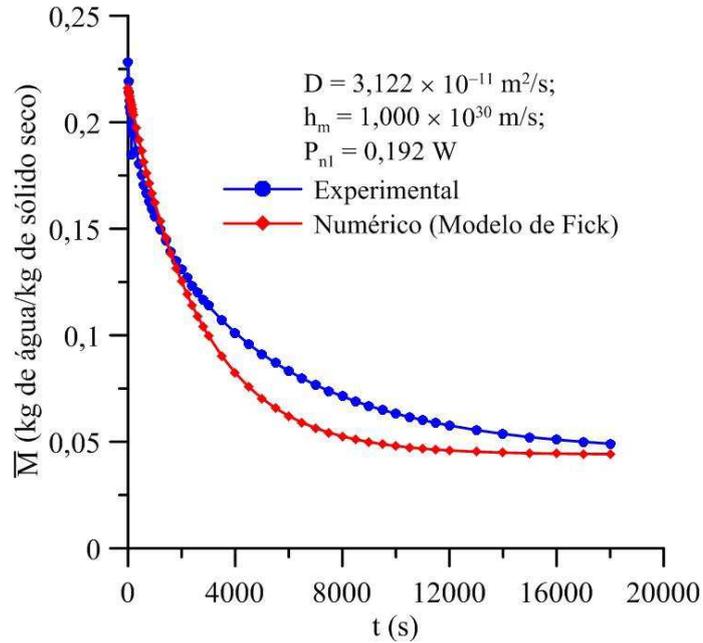


Figura 4.50 - Comparação entre os teores de umidade médio do grão de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Equilíbrio na superfície e potência nominal de 0,491 W).

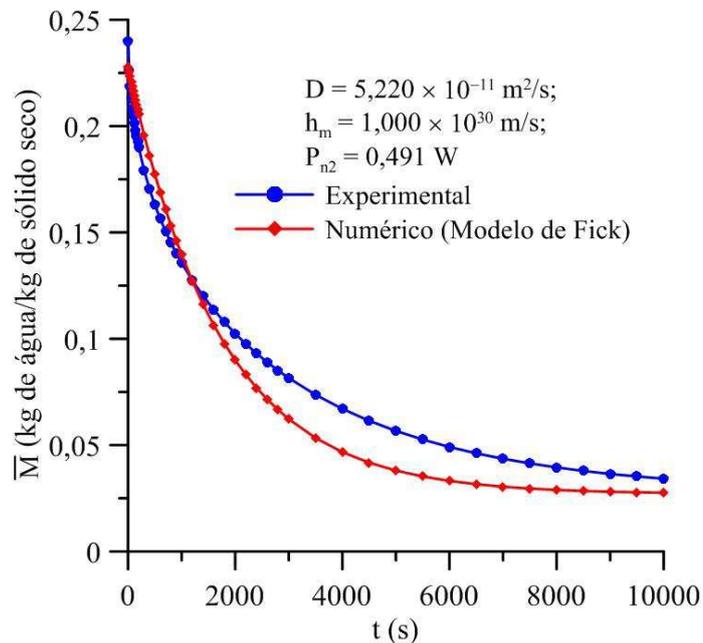


Figura 4.51 - Comparação entre os teores de umidade médio do grão de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Equilíbrio na superfície e potência nominal de 0,694 W).

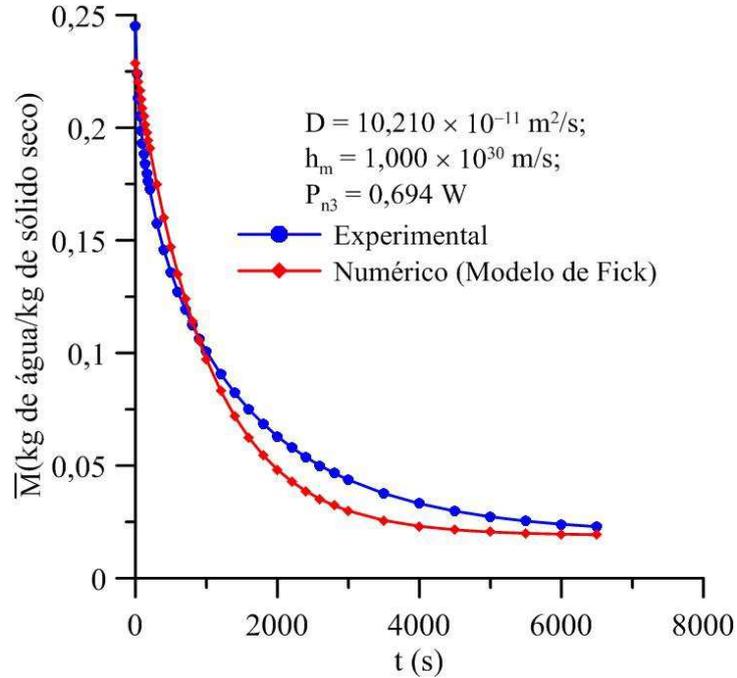


Figura 4.52 – Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz em casca (Modelo de equilíbrio) para a secagem com potência nominal absorvida de 0,192 W.

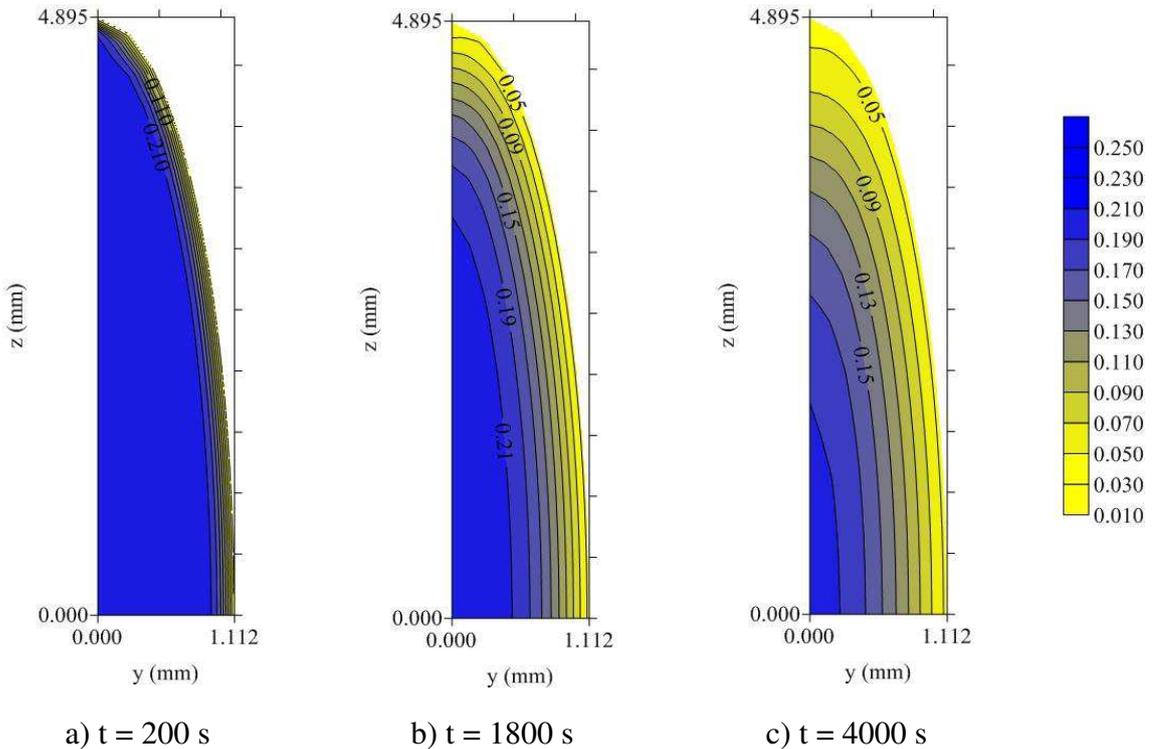


Figura 4.53 – Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz em casca (Modelo de equilíbrio) para a secagem com potência nominal absorvida de 0,491 W.

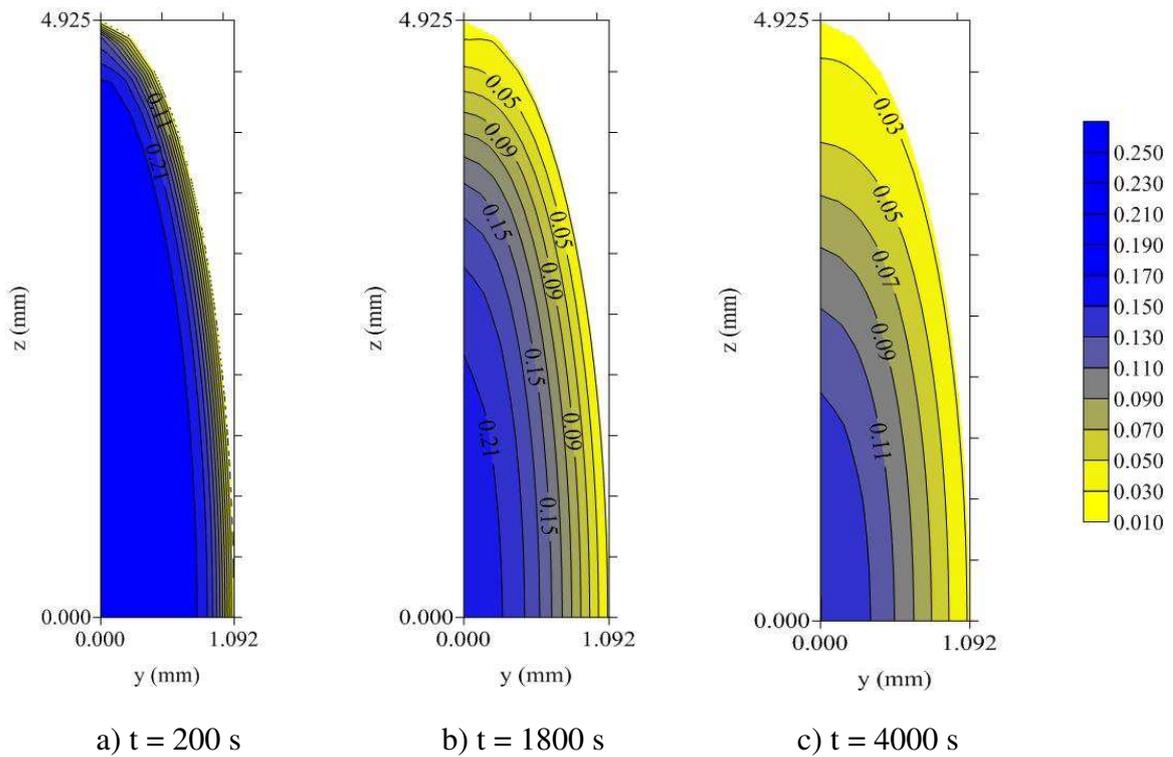
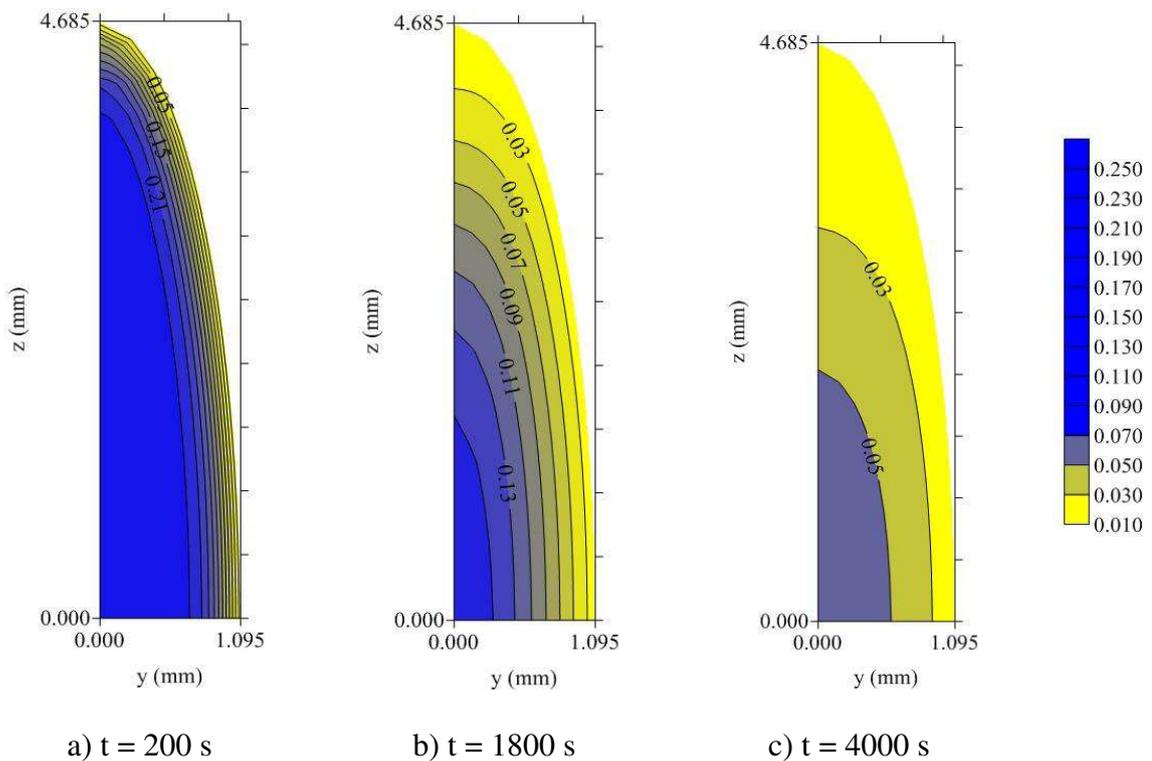


Figura 4.54 – Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz em casca (Modelo de equilíbrio) para a secagem com potência nominal absorvida de 0,694 W.



A Tabela 4.6 apresenta o resultado dos dados numéricos do coeficiente transferência de calor convectivo (h_c) considerando o coeficiente de difusão de massa (D) e o coeficiente de transferência de massa convectivo (h_m) infinito, dados na Tabela 4.5 para dois experimentos de secagem por micro-ondas de grãos de arroz em casca. Observa-se na tabela a seguir um crescimento do coeficiente de transferência de calor convectivo com a potência aplicada.

Tabela 4.6 – Valores do coeficiente de transporte estimado pelo modelo de Fick (Equilíbrio) e erro quadrático médio para dois testes de secagem de grãos de arroz em casca.

Teste	P_n (W)	P (W/m ³)	t (s)	Coeficientes de secagem			ERMQ
				D (10 ⁻¹¹ m ² /s)	h_m (10 ³⁰ m/s)	h_c (W/m ² K)	
1	0,192	21.390,8	18.600	3,122	1,0	0,4	7,63
2	0,491	52.867,64	10.800	5,220	1,0	0,5	6,95

As Figuras 4.55 e 4.56 ilustram uma comparação entre as temperaturas médias previstas e experimentais em função do tempo de secagem por micro-ondas de grãos de arroz em casca para o coeficiente de difusão de massa (D), de transferência de massa convectivo (h_m) infinito e de transferência de calor convectivo (h_c), dados na Tabela 4.6. Observa-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e previstos nos dois casos analisados.

Figura 4.55 - Comparação entre as temperaturas médias previstas e experimentais em função do tempo de secagem dos grãos de arroz para o teste 1.

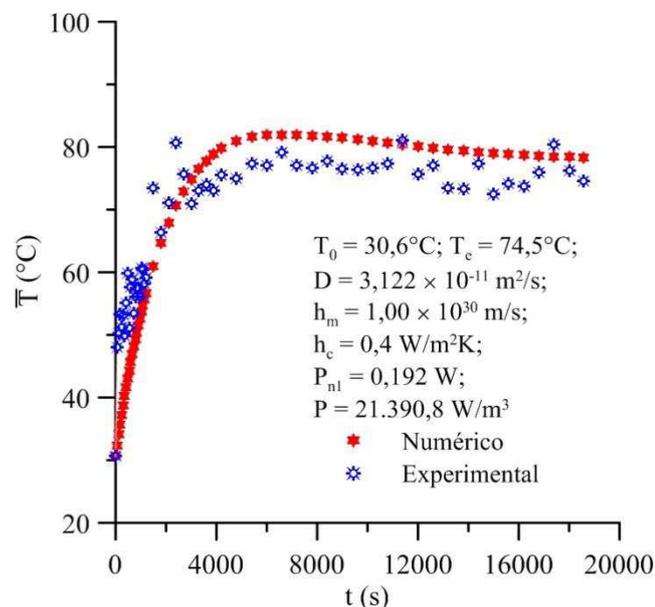
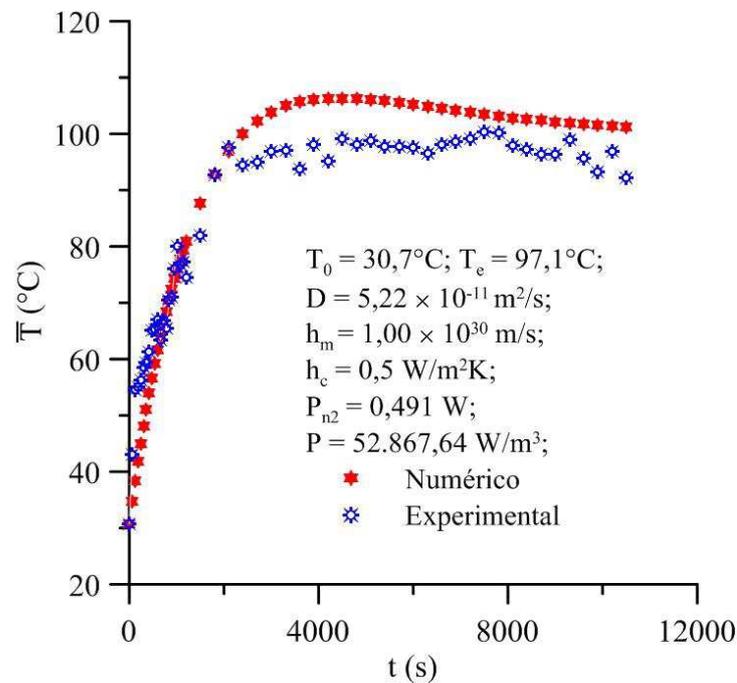


Figura 4.56 - Comparação entre as temperaturas médias previstas e experimentais em função do tempo de secagem dos grãos de arroz para o teste 2.



b) Modelo II: Condição de contorno convectiva e aquecimento por micro-onda

A Tabela 4.7 apresenta o resultado dos dados numéricos do coeficiente de difusão de massa (D) e o coeficiente de transferência de massa convectivo (h_m) finito para os três experimentos de secagem por micro-ondas de grãos de arroz em casca. Observa-se na tabela um crescimento do coeficiente de difusão de massa com a potência nominal absorvida.

Tabela 4.7 – Valores do coeficiente de difusão (D) com coeficiente de massa (h_m) finito.

Teste	P_n (W)	t (s)	Coeficientes de secagem			
			D (m^2/s)	h_m (m/s)	h_c (W/m^2K)	ERMQ
1	0,192	18600	$3,322 \times 10^{-11}$	$35,15 \times 10^{-7}$	5,0	0,001254230
2	0,491	10800	$7,520 \times 10^{-11}$	$36,22 \times 10^{-7}$	5,0	0,000015593
3	0,694	6600	$12,490 \times 10^{-11}$	$57,00 \times 10^{-7}$	5,0	0,003128680

As Figuras 4.57 a 4.59 ilustram uma comparação entre os teores de umidade médio predito e experimental em função do tempo de secagem por micro-ondas dos grãos de arroz em casca para os coeficientes de difusão de massa (D) e de transferência de massa convectivo (h_m)

finito, dados na Tabela 4.7 para os três experimentos. Observa-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e preditos nos três casos em estudo.

Figura 4.57 - Comparação entre os teores de umidade médio dos grãos de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Convecção na superfície e potência nominal de 0,192 W).

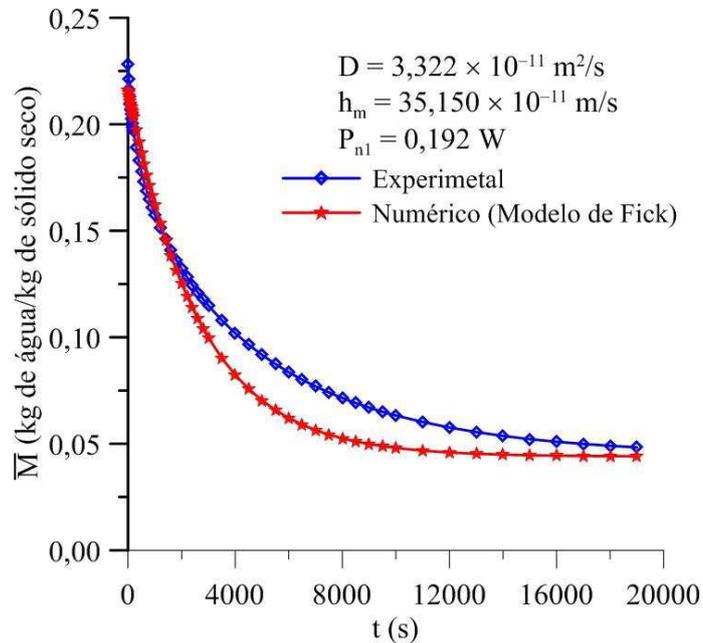


Figura 4.58 - Comparação entre os teores de umidade médio dos grãos de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Convecção na superfície e potência nominal de 0,491 W).

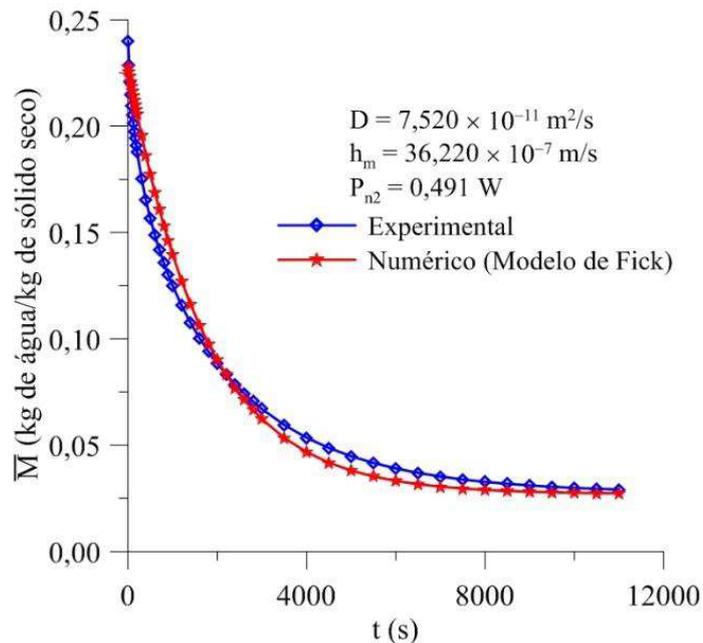
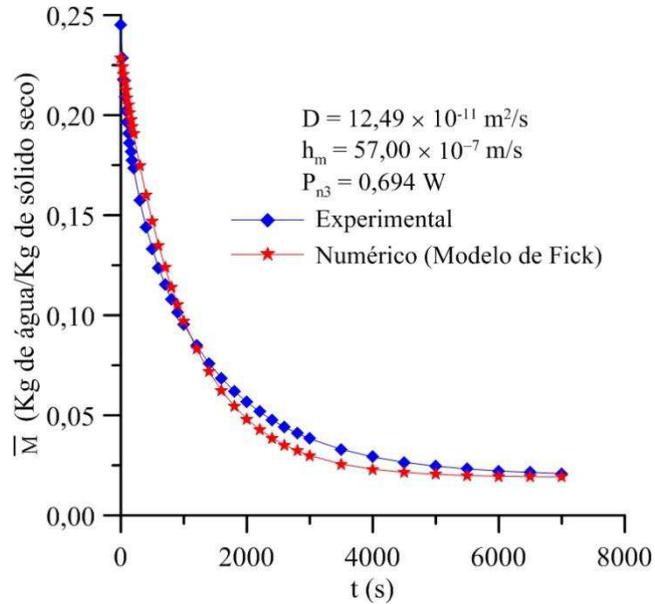


Figura 4.59 - Comparação entre os teores de umidade médio dos grãos de arroz em casca, predito pela lei de Fick e experimental, em função do tempo de secagem (Convecção na superfície e potência nominal de 0,694 W).



Já as Figuras 4.60 a 4.62 ilustram a distribuição do teor de umidade no interior dos grãos de arroz obtidos com o uso dos coeficientes de secagem, dados na Tabela 4.7.

Figura 4.60 – Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz (Modelo de equilíbrio) com potência nominal absorvida de 0,192 W.

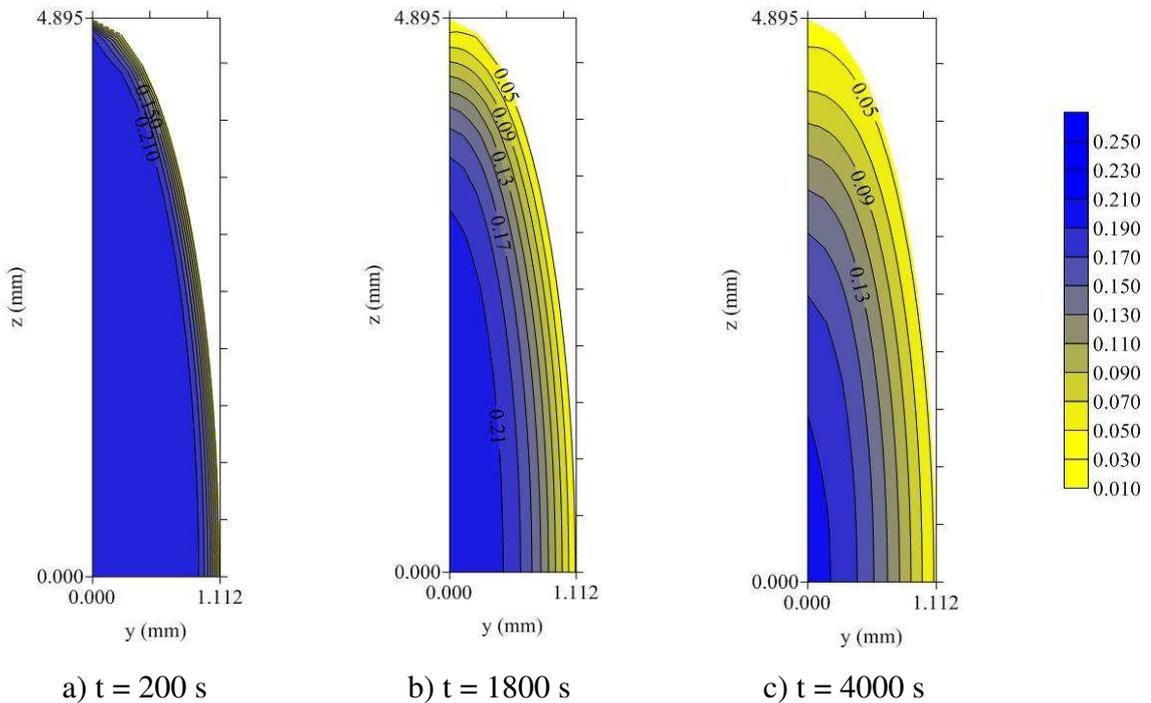


Figura 4.61 – Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz (Modelo de equilíbrio) com potência nominal absorvida de 0,491 W.

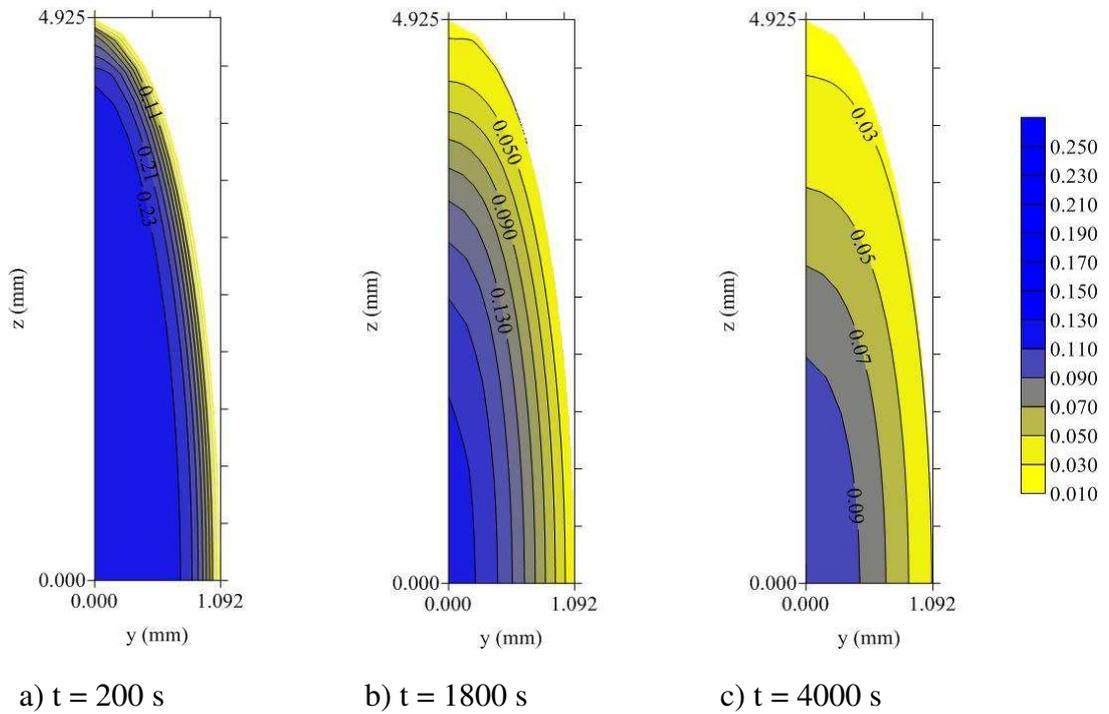
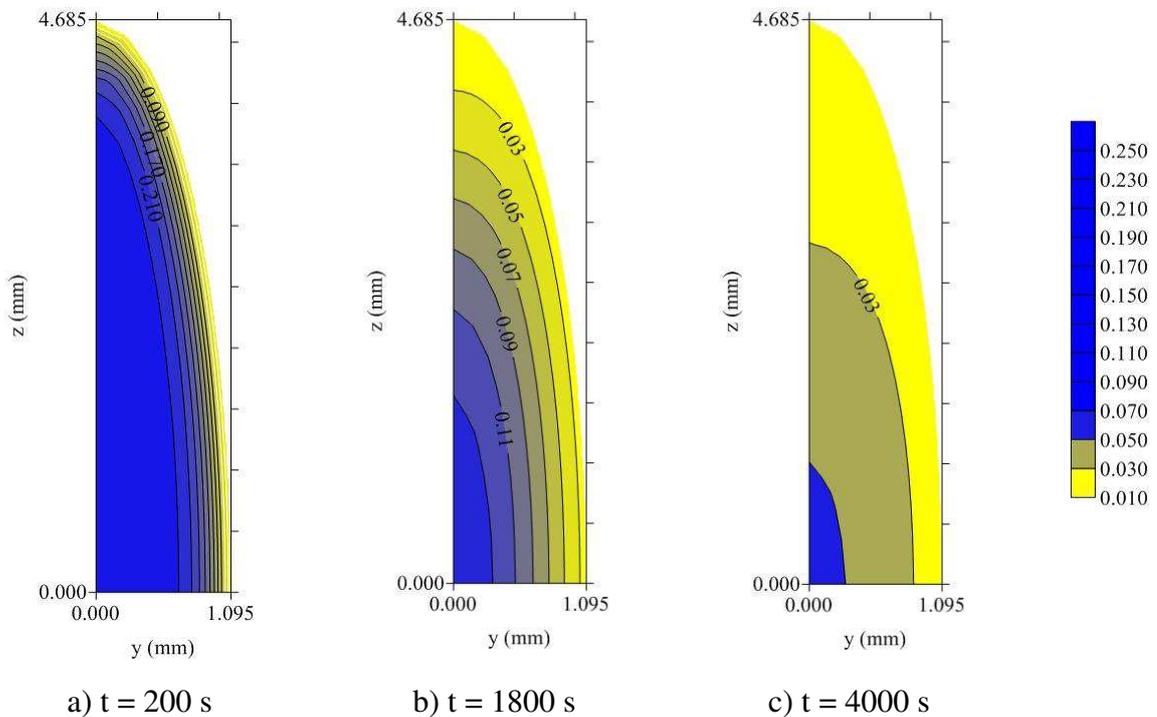


Figura 4.62 – Distribuição do teor de umidade (b.s.) no interior do grão de arroz (Modelo de equilíbrio) com potência nominal absorvida de 0,694 W.



Analisando a distribuição dos teores de umidade no interior dos grãos de arroz para os três testes de secagem por micro-ondas apresentados nas Figuras 4.60, 4.61 e 4.62 em tempos específicos de 200 s, 1800 s e 4000 s observa-se que o fluxo de umidade do produto ocorre do centro para a superfície, e que o processo de secagem por micro-ondas é mais intenso na região próxima de $z = L_2$.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos neste trabalho de pesquisa utilizando a metodologia experimental e teórica para o processo de secagem por micro-ondas e convectiva, pode-se concluir que:

- Na secagem por micro-ondas de grãos de arroz em casca, in natura (variedade BRSMG Conai), o comportamento da taxa de secagem se mostrou decrescente e independente da potência aplicada;
- A potência aplicada, a temperatura no interior do grão e a geometria do produto, influenciam na cinética de secagem. Quanto maior a potência aplicada, maior é a redução no tempo de secagem;
- O tempo necessário para o grão de arroz em casca atingir o teor de umidade médio de equilíbrio, diminui com aumento da potência aplicada, sendo de 310 minutos para 0,192 W, 180 minutos para 0,491 W e 110 minutos para 0,694 W;

- O modelo matemático proposto, implementado no software Mathematica®, reflete bem o problema físico do processo de aquecimento e secagem por micro-ondas para corpos que apresentam geometria complexa do tipo esferoidal prolato e outras geometrias simples como esfera e cilindro finito. Além de apresentar as distribuições de temperatura e umidade no interior do produto;
- Verificou-se que a migração da umidade e o aquecimento ocorrem no mesmo sentido ou seja, do centro para a superfície gerando altos gradientes térmicos e hídricos;
- Os ajustes implementados no programa computacional do software Mathematica® proporcionaram a otimização dos coeficientes de transporte de massa e de difusão preditos inicialmente. A distribuição do teor de umidade médio no interior dos grãos de arroz apresentou bons resultados;
- Os coeficientes de difusão de massa do modelo I com condição de contorno do primeiro tipo equilíbrio higroscópico e aquecimento por micro-ondas variaram de $3,122 \times 10^{-11}$, $5,220 \times 10^{-11}$ e $10,21 \times 10^{-11}$ m²/s, enquanto que no modelo II com condição de contorno convectiva e aquecimento por micro-onda variaram de $3,322 \times 10^{-11}$, $7,520 \times 10^{-11}$, $12,49 \times 10^{-11}$ m²/s, quando as potências nominais absorvidas pelos grãos variaram de 0,192, 0,491 e 0,694 W.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicar os modelos apresentados neste trabalho a secagem de outros produtos biológicos.
- Estudar a secagem de grãos arroz em casca para outras condições experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADU, B.; OTTEN, L.. Diffusion characteristics of white beans during microwave drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 64, n. 1, p. 61-69, 1996.

ADU, B.; OTTEN, L.; BROWN, R.. Modelling thin layer microwave drying of soybeans. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 36, n. 3, p. 135, 1994.

AL-DURI, B.; MCINTYRE, S.. Comparison of drying kinetics of foods using a fan-assisted convection oven, a microwave oven and a combined microwave/convection oven. **Journal of Food Engineering**, v. 15, n. 2, p. 139-155, 1992.

ALMEIDA, D.; ROCHA, J.; LAGES, S.; COIMBRA, H.. Micro-ondas: Processamento Geral de Alimentos. **Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC)**, 2010.

ALVES, S. M. **Estudo da Secagem de Tomate Pêra**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

ANDRÉS, A.; BILBAO, C.; FITO, P.. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air–microwave dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 1, p. 71-78, 2004.

ARBALLO, J. R.; CAMPAÑONE, L. A.; MASCHERONI, R. H.. Modeling of microwave drying of fruits. **Drying Technology**, v. 28, n. 10, p. 1178-1184, 2010.

BAJZA, Ž.. The influence of fatliquor concentration on microwave drying kinetics. **Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists**, v. 81, p. 227-230, 1997.

BAL, L. M.; KAR, A.; SATYA, S.; NAIK, S. N.. Drying kinetics and effective moisture diffusivity of bamboo shoot slices undergoing microwave drying. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 11, p. 2321-2328, 2010.

BARBOZA, A.C.R.N.; CRUZ, C.V.M.S.; GRAZIANI, M.B.; LORENZETTI, M.C.F.; SABADINI, E.. Aquecimento em forno de microondas/desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 901-904, 2001.

BERTELI, M. N.; NOGUEIRA, T. L.; MARSAIOLI JUNIOR, A.. Levantamento das distribuições de temperatura em leito de arroz com casca durante o tratamento térmico por micro-ondas. **Brazilian Journal of food Technology**, v.17, n.4, p.319-328, Campinas, 2014.

BINGOL, G.; PAN, Z.; ROBERTS, J. S.; DEVRES, Y. O.; BALABAN, M. O.. Mathematical modeling of microwave-assisted convective heating and drying of grapes. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 1, n. 2, p. 46-54, 2008.

BOLDOR, D.; SANDERS, T. H.; SWARTZEL, K. R.; FARKAS, B. E.. A model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying*. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28, n. 1, p. 68-87, 2005.

BORIES, S.. Fundamentals of drying of capillary-porous bodies. In: (Ed.). **Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media**: Springer, 1991. p.391-434. ISBN 9401054193.

BOURAOUI, M.; RICHARD, P.; DURANCE, T.. Microwave and convective drying of potato slices. **Journal of Food Process Engineering**, v. 17, n. 3, p. 353-363, 1994.

BRODKEY, R. S.. **The Phenomena of Fluid Motions**. Addison-Wesley Publishing Company, 1967.

BROOKER, D. B.; ARKEMA, F. W. B.; HALL, C. W.. **Drying Cereal Grains**. AVI Publishing Company, 1974. 265p. ISBN 9780870551611.

BRUCE, D. M.. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32, p. 337-347, 1985.

BUDD, C. J.; HILL, A.. A comparison of models and methods for simulating the microwave heating of moist foodstuffs. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 4, p. 807-817, 2011.

CABRAL, R. A. F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; FINZER, J. R. D.. Effect of apparent viscosity on fluidized bed drying process parameters of guava pulp. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 4, p. 1096-1106, 2007.

CARSLAW, H. S., JAEGER, J. C.. **Conduction of heat in solids**. 2^a ed., Oxford: University Press, New York, 510p, 1959.

CARVALHO, R. P.. **Temas Atuais de Física: Micro-ondas**. Sociedade Brasileira de Física, 1^a ed., São Paulo, Livraria de Física, 2005. ISBN 8588325330.

CASADA, M. E.; WALTON, L. R.; SWETNAM, L. D.; CASADA, J. H.. Moisture content as a function of temperature rise under microwave radiation. **Transactions of the ASAE**, ASAE, St. Joseph, MI, p. 907-911, 1983.

CELEN, S. e KAHVECI, K.. Microwave drying behaviour of tomato slices.. **Journal of Food Science**, v. 31, n. 2, p. 132-138, 2013.

CHEN, G.; WANG, W.; MUJUMDAR, A. S.. Theoretical study of microwave heating patterns on batch fluidized bed drying of porous material. **Chemical Engineering Science**, v. 56, n. 24, p. 6823-6835, 2001.

CHEN, H.; TANG, J.. Computer Simulation for Microwave Heating. In: KNOERZER, K.; JULIANO, P., *et al* (Ed.). **Innovative Food Processing Technologies: Advances in Multiphysics Simulation**: Wiley, 2011. ISBN 9780470959428.

CLICK, L. S.; BAKER, C. J.. Moisture determination of agricultural products using a microwave oven. **ASAE Paper**, n. 80-3050, 1980.

CONSTANT, T.; MOYNE, C.; PERRE, P.. Drying with internal heat generation: Theoretical aspects and application to microwave heating. **AIChE Journal**, v. 42, n. 2, p. 359-368, 1996.
CRANK, J.. **The Mathematics of Diffusion**. 2ed., Oxford University Press, London, 1975.

CUNHA, M.; CANTO, M.; MARSAIOLI JUNIOR, A.. Secagem de café cereja descascado por ar quente e microondas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. 3, p. 381-5, 2003.

DADALI, G.; DEMIRHAN, E.; ÖZBEK, B.. Microwave heat treatment of spinach: Drying kinetics and effective moisture diffusivity. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1703-1712, 2007.

DADALI, G.; ÖZBEK, B.. Microwave heat treatment of leek: drying kinetic and effective moisture diffusivity. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 43, n. 8, p. 1443-1451, 2008.

DIAMANTE, L. M.; MUNRO, P. A.. Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 26, p. 99, 1991.

DÍAZ, G. R. Z.; MONZO, J. M.; FITO, P.; CHIRALT, A.. Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 4, n. 2, p. 203-209, 2003.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**.: John Wiley e Sons, 3th edition, New York, 1998, 736p.

DROUZAS, A.; TSAMI, E.; SARAVACOS, G.. Microwave/vacuum drying of model fruit gels. **Journal of Food Engineering**, v. 39, n. 2, p. 117-122, 1999.

DUNAEVA, T.; MANTUROV, A.. The phenomenological model microwave drying kinetics of food products. In: Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), **2010 International Kharkov Symposium on**. IEEE, p. 1-3, 2010.

FENG, H.. Analysis of microwave assisted fluidized-bed drying of particulate product with a simplified heat and mass transfer model. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 29, n. 8, p. 1021-1028, 2002.

FENG, H.; WEISS, J.. Power ultrasound in food processing. In: **Encyclopedia of Agricultural, Food and Biological Engineering**, (ed.) Heldman DR, Marcel Dekker, New York. 2008.

FENG, H.; YIN, Y.; TANG, J.. Microwave drying of food and agricultural materials: basics and heat and mass transfer modeling. **Food Engineering Reviews**, v. 4, n. 2, p. 89-106, 2012.

FLEISCHMAN, G. J.. Predicting temperature range in food slabs undergoing long term/low power microwave heating. **Journal of Food Engineering**, v. 27, n. 4, p. 337-351, 1996.

FRANCO, C. M. R.; LIMA, A. G. B.; SILVA, J. V.; NUNES, A. G.. Applying Liquid Diffusion Model for Continuous Drying of Rough Rice in fixed Bed. **Defect and Diffusion Forum. Trans Tech Publications**, v. 369, p. 152-156, 2016.

FUMAGALLI, F.. **Secagem de pêra em secador a microondas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2003.

GIRI, S.; PRASAD, S.. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 2, p. 512-521, 2007.

GOKSU, E. I.; SUMNU, G.; ESIN, A.. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 463-468, 2005.

GORAKHPURWALLA, H.; MCGINTY, R.; WATSON, C.. Determining moisture content of grain using microwave energy for drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 20, n. 3, p. 319-325, 1975.

GROLMES, J.; BERGMAN, T.. Dielectrically-assisted drying of a nonhygroscopic porous material. **Drying Technology**, v. 8, n. 5, p. 953-975, 1990.

- HAGHI, A. K.; AMANIFARD, N.. Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. **Brazil Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 3, p. 491 - 501, 2008.
- HAJI-SHEIKH, A.; SPARROW, E.. Transient heat conduction in a prolate spheroidal solid. **Journal of Heat Transfer**, v. 88, n. 3, p. 331-333, 1966.
- HAMMOUDA, I.; MIHOUBI, D.. Comparative numerical study of kaolin clay with three drying methods: Convective, convective–microwave and convective infrared modes. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 832-839, 2014.
- HANSSON, L. E ANTTI, L.. Modeling Microwave Heating and Moisture Redistribution in Wood. **Drying Technology**, v. 26, n. 5, p. 552-559, 2008.
- HAPPEL, J.; BRENNER, H.. **Low Reynolds number hydrodynamics with special applications to particulate media**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 553 p. 1991.
- HENDERSON, S. M., and PABIS, S.. Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.6, n. 3 p.169–174, 1961.
- HENDERSON, S. M.. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 6, p. 1167–1172, 1974.
- JIA, L. W.; ISLAM, MD. R. AND MUJUMDAR, A. S.. A Simulation Study on convection and Microwave Drying of Different Food Products. **Drying Technology**, Marcel Dekker. Inc., New York, v.21, n.8, p. 1549–1574, 2003.
- JOLLY, P.; TURNER, I.. Microwave drying of porous media. In: **Proceedings of 4th August heat and mass transfer conference**, p.331-342, 1989.
- JUN, W.; JING-PING, Z.; JIAN-PING, W. and NAI-ZHANG, X.. Modeling simultaneous heat and mass transfer for microwave drying on apple. **Drying Technology**, v. 17, n. 9, p. 1927-1934, 1999.

KHRAISHEH, M. A. M.; COOPER, T. J. R.; MAGEE, T. R. A.. Investigation and modelling of combined microwave and air drying. **Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v.73, p.121-126, 1995.

KHRAISHEH, M. A. M.; COOPER, T. J. R.; MAGEE, T. R. A.. Microwave and air drying I. Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric power absorption. **Journal of Food Engineering**, v. 33, n. 1, p. 207-219, 1997.

KHRAISHEH, M. A. M.; MCMINN, W.; MAGEE, T. R. A.. A multiple regression approach to the combined microwave and air drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 43, n. 4, p. 243-250, 2000.

KRISTIAWAN, M.; SOBOLIK, V.; KLIMA, L.; ALLAF, K.. Effect of expansion by instantaneous controlled pressure drop on dielectric properties of fruits and vegetables, **Journal of Food Engineering**, v. 102, p. 361–368, 2011.

KNOERZER, K.; JULIANO, P.; ROUPAS, P. and VERSTEEG, C.. **Innovative Food Processing Technologies: Advances in Multiphysics Simulation**. Mathematical and Statistical Methods in Food Science and Technology, editado por Wiley Blackwell, IFT Press, 2011.

KOWALSKI, S. J.. Continuous thermohydrromechanical model using the theory of mixtures.. **Modern Drying Technology: Computational Tools at Different Scales**, v.1, p. 125-154, 2007.

KOWALSKI, S. J.; PAWLOWSKI, A.. Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. **Chemical Engineering and Processing**, v. 50, p.384–390, 2011.

KRASZEWSKI, A.; NELSON, S.; YOU, T.. Moisture content determination in single corn kernels by microwave resonator techniques. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 48, p. 77-87, 1991.

KREYSZIG, E.. **Advanced Engineering Mathematics**. John Wiley & Sons, 1988. ISBN 0471858242.

LAGUERRE, J. C.; TAUZIN, V.; GRENIER, E.. Hot air and microwave drying of onions: A comparative study. **Drying technology**, v. 17, n. 7-8, p. 1471-1480, 1999.

LEWIS, W. K.. The Rate of Drying Solids Materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. v.13, p. 427, 1921.

LIAN, G.; HARRIS, C. S.; EVANS, RAND WARBOYS, M.. Coupled heat and moisture transfer during microwave vacuum drying. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 32, n. 1, p. 34-44, 1997.

LIMA, A. G. B.. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Um estudo de caso: secagem de banana**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1999.

LIMA, A. G. B.; DELGADO, J. M. P. Q.; SILVA, E. G.; FARIAS NETO, S. R.; SANTOS, J. P. S.; DE LIMA, W. M. P. B.. Drying Process in Electromagnetic Fields. In: Delgado, J. M. P. Q. e Lima, A. G. B. (Ed.). **Drying and Energy Technologies**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p.89-110. ISBN 978-3-319-19767-8.

LIU, S.; FUKUOKA, M.; SAKAI, N.. A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating. **Journal of Food Engineering**, v. 115, n. 1, p. 49-62, 2013.

LU, L.; TANG, J.; LIANG, L.. Moisture distribution in spherical foods in microwave drying. **Drying Technology**, v. 16, n. 3-5, p. 503-524, 1998.

LU, L.; TANG, J.; RAN, X.. Temperature and moisture changes during microwave drying of sliced food. **Drying Technology**, v. 17, n. 3, p. 414-431, 1999.

LUIKOV, A. V.. **Advances in Heat Transfer**. New York: Pergamon Press, 1964.

LYONS, D. W.; HATCHER, J. D.; SUNDERLAND, J. E.. Drying of a porous medium with internal heat generation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 15, n. 5, p. 897-905, 1972.

LUZ, C.; BAUDET, L.; FRANDOLOSO, V.. Determinação do teor de água de sementes de arroz por secagem com micro-ondas. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 20, n. 1, p. 70-74, 1998.

MACROBERT, T. M.; SNEDDON, I. N.. **Spherical Harmonics: An Elementary Treatise on Harmonic Functions, with Applications**. Oxford: Pergamon Press, 349p, 1967.

MAGALHÃES, R. S.; LIMA, R. M. F.; SOUZA, H. A. D.. O uso de microondas para determinação de umidade de bauxita. **Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 4, p. 255-259, 2003.

MAGNUS, W.; OBERHETTINGER, F.; SONI, R. P.. **Formulas and theorems for the special functions of mathematical physics**. Springer Science & Business Media, 1966. ISBN 3662117614.

MAJETICH, G.; HICKS, R.. Applications of microwave-accelerated organic synthesis. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 45, n. 4, p. 567-579, 1995.

MALISKA, C. R.. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2.. LTC, 2004. ISBN 9788521613961.

MARSAIOLI JUNIOR, A.. **Caracterização e Testes de Fornos de Microondas**. Campinas: II Workshop Internacional Enumas 2010, 50 slides, color. Disponível em: <[http://www.nipeunicamp.org.br/enumas2010/apresentacoes/Antonio Marsaioli - 20-08.pdf](http://www.nipeunicamp.org.br/enumas2010/apresentacoes/Antonio%20Marsaioli%20-%2008.pdf)>. Acesso em: 08 out. 2015.

MARSAIOLI JUNIOR, A.. **Tecnologia das micro-ondas no processamento de alimentos**. Campinas: Ed. da Universidade Estadual de Campinas, 2001.

MASKAN, M.. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering**, v. 44, n. 2, p. 71-78, 2000.

MASKAN, M.. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 2, p. 177-182, 2001.

MCMINN, W.. Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 2, p. 113-123, 2006.

MCMINN, W.; KHRAISHEH, M.; MAGEE, T.. Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave-convective drying of solid slabs and cylinders. **Food Research International**, v. 36, n. 9, p. 977-983, 2003.

MELLENDEZ, W.; FLAKE, B.; SCHMIDT, P.. A process simulation model for convective and dielectrically-enhanced single-zone tunnel dryers. In: BOEHM, R. F. (Ed.). **Simulation of Thermal Energy Systems**. New York: ASME, 1989.

MENEZES, R.; SOUTO, P.; KIMINAMI, R.. Microwave sintering of ceramics. Part I: Fundamental aspects. **Cerâmica**, v. 53, n. 325, p. 1-10, 2007.

MEREDITH, R.J.. **Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating**, IEE Power Engineering, ISBN-10: 0852969163, London, UK, 1998.

METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J.. **Industrial Microwave Heating**. Peter Peregrinus Ltd., ISBN 0906048893, London, UK, 1983.

MONKS, L. F.; COSTA, C. S.; SOARES, G. J. D.. Microwave effects on wheat drying (*T. aestivum*, L.) and flour quality. **Revista de Alimentação e Nutrição**, Araraquara, S.P., v.14, n.2, p.219 - 224, 2003.

MONZÓ-CABRERA, J.; DÍAZ-MORCILLO, A.; CATALÁ-CIVERA, J.M.; DE LOS REYES, E.. Heat and Mass Transfer Characterization of Microwave Drying of Leather. In: Proceedings of the **12th International Drying Symposium IDS2000**, Noordwijkerhout, The Netherlands, n. 27, p. 28-31, August 2000,

MOYNE, C.; PERRE, P.. Processes related to drying: Part I, Theoretical model. **Drying Technology**, v. 9, n. 5, p. 1135-1152, 1991.

NI, H.; DATTA, A.; PARMESWAR, R.. Moisture loss as related to heating uniformity in microwave processing of solid foods. **Journal of Food Process Engineering**, v. 22, n. 5, p. 367-382, 1999.

NIJHUIS, H.N.,TORRINGA, E., LUYTEN, H., RENÉ, F., JONE, P., FUNEBO, T., OHLSSON, T.. Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and vegetables. **Drying Technology**, v. 14, n. 6, p. 1429-1457, 1996.

OLIVEIRA, V. A. B.; LIMA, A. G. B.. Massa Diffusion Inside Prolate Spherical Solids: An Analytical Solution. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 41-50, 2002.

OLIVEIRA, V. A. B.. **Transferência de Calor e Massa no Interior de Sólidos com Forma Esferoidal Prolata Via Termodinâmica dos Processos Irreversíveis**. 2006. (Tese de Doutorado). Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

OOMAH, B. D.; LIANG, J.; GODFREY, D. E MAZZA, G.. Microwave heating of grapeseed: Effect on oil quality. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 46, n. 10, p. 4017-4021, 1998.

PAGE, G. E.. **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers**. 1949. M. Sc. Thesis (Department of Mechanical Engineering), Purdue University, Indiana., USA.

PANDIT, R. B., PRASAD, S.. Finite element analysis of microwave heating of potato-transient temperature profiles. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p.193–202, 2003.

PATANKAR, S.. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Taylor & Francis, 1980. 197 p. ISBN 9780891165224.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.. *Análise de Materiais Biológicos*. Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. UNICAMP. **Apostila**. 2006.

PEREIRA FILHO, E. R.. **Sistemas Mecanizados Acoplados a Forno de Microondas para a Mineralização em Linha de Amostras de Interesse Alimentício: Determinação de Ferro e Cobalto**. 1999. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

PHILIP, J.; DE VRIES, D.. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 2, p. 222-232, 1957.

PLUMB, O.. Transport phenomena in porous media: modeling the drying process. In: VAFAI, K. (Ed.). **Handbook of Porous Media**: CRC Press, 2000. p.755-785.

PÓLYA, G., SZEGÖ, G.. Inequalities for the capacity of a condenser. **American Journal of Mathematics**, v. 27, p. 1-32, 1945.

PRABHANJAN, D. G.; RAMASWAMY, H. S.; RAGHAVAN, G. S. V.. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. **Journal of Food engineering**, v. 25, n. 2, p. 283-293, 1995.

PRAKASH, S.; THA, K. S.; DATTA, N.. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different dries. **Journal of Food Engineering**, v. 62, p. 305-313, 2004.

PTASZNIK, W.; ZYGMUNT, S.; KUDRA, T.. Simulation of RF-assisted convective drying for seed quality broad bean. **Drying Technology**, v. 8, n. 5, p. 977-992, 1990.

RAMASWAMY, H.; PILLET-WILL, T.. Temperature distribution in microwave-heated food models. **Journal of Food Quality**, v. 15, n. 6, p. 435-448, 1992.

REN, G.; CHEN, F.. Drying of American ginseng (*Panax quinquefolium* roots by microwave-hot air combination. **Journal of Food Engineering**, v. 35, n. 4, p. 433-443, 1998.

RESURRECCION Jr, F. P; TANG, J.; PEDROW, P.; CAVALIERI, R.; LIU, F.; TANG, Z.. Development of a computer simulation model for processing food in a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system. **Journal of Food Engineering**, v. 118, n. 4, p. 406-416, 2013.

RIBEIRO, R. C.. **Tomates semi desidratados obtidos por secagem micro-ondas convectiva precedida por desidratação osmótica**. 2013. Dissertação (Pós - Graduação em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2013.

ROSA, J. G.. **Secagem de cenoura (*Daucus carota L.*) em microondas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.

RYYNÄNEN, S.; OHLSSON, T.. Microwave heating uniformity of ready meals as affected by placement, composition, and geometry. **Journal of Food Science**, v. 61, n. 3, p. 620-624, 1996.

SAKAI, N.; KOSHIMA, Y.; WATANABE, M.. A method for developing model food system in microwave heating studies. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 525-531, 2005.

SALTIEL, C.; DATTA, A. K.. Heat and mass transfer in microwave processing. **Advances in Heat Transfer**, v. 33, n. 1, p. 1-94, 1999.

SANGA, E.; MUJUMDAR, A.; RAGHAVAN, G.. Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 41, n. 6, p. 487-499, 2002.

SANSEVERINO, A. M.. Microondas em síntese orgânica.. **Química Nova**, v. 25, n. 4, p. 660-667, 2002.

SENISE, J. T.. A utilização de rádio frequência e micro-ondas na eletrônica industrial. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 8, p. 51-61, 1985.

SHARMA, G.; PRASAD, S.. Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 4, p. 609-617, 2004.

SHIVHARE, U.; RAGAVAN, V.; BOSÍSIO, R.; GIROUX, M.. Microwave drying of soybean at 2.45 GHz. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 28, p. 11-17, 1993.

SILVA, F. A.; MAXIMO, G. J.; LI Jr, A. M.; SILVA, M. A. A. P.. Impacto da secagem com micro-ondas sobre o perfil sensorial de amêndoas de noz macadâmia..**Ciências e Tecnologia de Alimentos**. Campinas. v. 27, n. 3, p. 553-561, jul/set, 2007

SILVA, J. V.. **Secagem de Grãos de Arroz em leito fixo: Modelagem, Simulação e experimentação**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

SKANSI, D., SANDER, A., BAJZA, Ž.. Experimental evaluation of the microwave drying of leather. **Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists**, v. 79, p. 171-177, 1995.

SOARES, A. A.; REIS, M. S.; CORNÉLIO, V. M. ; SOARES, P. C. ; SANTOS, P.G.; SOUZA, M. A.. BRSMG Conai: Cultivar de arroz super precoce para terras altas. **Revista Ceres**, v. 52, n. 303, p. 721-727, 2005.

SOYSAL, Y.. Mathematical modeling and evaluation of drying kinetics of mint (*Mentha picata* L.). **Journal of Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 1266-1274, 2005.

SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S.. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. **Journal of Food Engineering**, v. 74, n. 1, p. 143-152, 2006.

SUTAR, P.; PRASAD, S.. Modeling microwave vacuum drying kinetics and moisture diffusivity of carrot slices. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1695-1702, 2007.

TANG, J.; HAO, F.; LAU, M.. Microwave Heating in Food Processing. In: YANG, X. H. e TANG, J. (Ed.). **Advances in Bioprocessing Engineering**: World Scientific, 2002. cap. 1, p.1-44. ISBN 9789810246976.

TANG, J.; RESURRECCION Jr, F. P.. Electromagnetic basis of microwave heating. In: LORENCE, Matthew W.; PESHECK, Peter S. (Ed.). **Development of packaging and products for use in microwave ovens**. Elsevier, 2007. p. 1-37

TERRÃO, W. J.; MENDONÇA, A. L.. Processamento de Tomate Seco em micro-ondas. **Estudos**, Goiana, v. 36, n. 5/6, p. 867-874, maio/jun, 2009.

THERDTHAI, N.; ZHOU, W.. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 3, p. 482-489, 2009.

TOGRUL, I. T.; PEHLIVAN, D.. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 3, p. 209–216, 2002.

TONG, C.; LUND, D.. Effective moisture diffusivity in porous materials as a function of temperature and moisture content. **Biotechnology Progress**, v. 6, n. 1, p. 67-75, 1990.

TORRINGA, E.; ESVELED, E.; SCHEEWE, I.; BARTELS, P. e BERG, R.. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 2, p. 185-191, 2001.

TORRINGA, H.; DIJK, V. E.; BARTELS, P.. Microwave puffing of vegetables: Modelling and measurements. **Proceedings of 31st Microwave Power Symposium**, 1996.

TULASIDAS, T.; RAGHAVAN, G.; NORRIS, E.. Microwave and convective drying of grapes. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n. 6, p. 1861-1865, 1993.

TURNER, I.; PUIGGALI, J.; JOMAA, W.. A numerical investigation of combined microwave and convective drying of a hygroscopic porous material: A study based on pine wood. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 76, n. 2, p. 193-209, 1998.

TURNER, I. W.; JOLLY, P.. The Modelling of Combined microwave and convective drying of a Wet porous material. **Drying Technology**, v. 9, n. 5, p. 1209-1269, 1991.

VALENTINI, S. R. T.; CASTRO, M. F. P M.; ALMEIDA, F. H.. Determinação do teor de umidade de milho utilizando aparelho de microondas. **Food Science and Technology (Campinas)**, v. 18, n. 2, p. 237-240, 1998.

VENKATACHALAPATHY, K.; RAGHAVAN, G.. Microwave drying of osmotically dehydrated blueberries. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 33, n. 2, p. 95-102, 1998.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P.. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 11, p. 668–672, 1978.

WANG, J.; XI, Y.. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. **Journal of Food Engineering**, v. 68, n. 4, p. 505-511, 2005.

WANG, Z.; SUN, F.; CHEN, X.; LIAO; HU, X.. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 2, p. 536-544, 2007.

WANG, J.; ZHANG, JP.; WANG, JP.; XU, NZ.. Modeling simultaneous heat and mass transfer for microwave drying on apple. **Drying Technology** 17:1927–1934, 1999.

WÄPPLING-RAAHOLT, B.; RISMAN, P.; OHLSSON, T.. Microwave heating of ready meals–FDTD simulation tools for improving the heating uniformity. In: (Ed.). **Advances in Microwave and Radio Frequency Processing**: Springer, 2006. p.243-255. ISBN 3540432523.

WEI, C. K.; AVIS, E. A.; E GORDDAVIS, H. T., DON, J.. Heat and mass transfer in water-laden sandstone: Microwave heating. **AIChE Journal**, v. 31, n. 5, p. 842-848, 1985.

WHITE, G. M.; ROSS, I. J.; PONELEERT, R.. Fully exposed drying of popcorn. **Transactions of the ASAE**, v.24, p.466–468, 1981.

WHITAKER, S.. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying. **Advanced Heat Transfer**, n. 13, p. 119-203, 1977.

WHITAKER, S.. Heat and mass transfer in granular porous media. In: (Ed.). **Advances in Drying**, Volume I, 1980. p.23-61. ISBN 0891161856.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H. I.. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v. 26, n. 5, p. 457–465, 2001.

ZHANG, H.; DATTA, A. K.. Electromagnetics of Microwave Heating: Magnitude and Uniformity of Energy Absorption in an Oven. In: DATTA, A. K. e ANANTHESWARAN, R. C. (Ed.). **Handbook of Microwave Technology for Food Application**. 2. New York: Taylor & Francis, 2001. cap. 2, p.33-67. ISBN 9780824704902.

ZHANG, M. TANG, J.; MUJUMDAR, A. S. e WANG, S.. Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 10, p. 524-534, 2006.

ZHAO, X.; YAN, L.; HUANG, K.. Review of numerical simulation of microwave heating process: **Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials**, Stanisław Grundas (Ed.), InTech, Disponível em: 2011.

ZHENGFU, W. JUNHONG, S.; FANG, C.. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 536-544, 2006

ZHOU, L. PURI, V. M.; ANANTHESWARAN, R. C.; YEH, G.. Finite element modeling of heat and mass transfer in food materials during microwave heating-model development and validation. **Journal of Food Engineering**, v. 25, n. 4, p. 509-529, 1995.

APÊNDICE A – POTÊNCIA NOMINAL UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM POR MICRO-ONDAS DE GRÃOS DE ARROZ EM CASCA

1. Cálculo da potência de saída, a partir de dados do fabricante

As Tabelas A1 e A2, apresentam informações sobre o forno de micro-ondas utilizado.

Tabela A1 .– Características do forno de micro-ondas da marca Electrolux,

Características	MEP37
Tensão (V)	220
Corrente elétrica (A)	6,5
Eficiência (%) ou Efic. (%)	54
Frequência em (Hz)	60
Frequência das micro-ondas em (MHz)	2450
Capacidade (L)	27
Altura (mm)	283
Largura (mm)	486
Profundidade (mm)	405
Diâmetro do prato (mm)	284
Peso (kg)	12,5

Tabela A2 – Níveis de potências programadas no forno de Micro-ondas (Electrolux).

Display	Nível de potência
P100	Alto
P90	Cozimento rápido
P80	Reaquecer
P70	Médio alto
P60	Aquecimento brando
P50	Médio
P40	Médio baixo
P30	Descongelar
P20	Baixo
P10	Morno

Como o forno de micro-ondas da marca Electrolux não apresenta níveis de potências na forma quantitativa, fez-se necessário ter uma base destes valores, antes da realização dos experimentos de secagem dos grãos de arroz. Apenas os percentuais de 10, 20 e 30% da potência máxima foram utilizados na secagem em estudo.

Marsaioli Junior (2001) reporta que a potência de saída ($P_{saída}$) no forno de micro-ondas pode ser obtida através da equação:

$$P_{saída} = P_{ent} \times \text{efic. (\%)} \quad (\text{A.1})$$

$$P_{ent} = V \times I \quad (\text{A.2})$$

onde P_{ent} é a potência elétrica de entrada no forno; V é a tensão e I é a corrente elétrica.

Da Tabela A1 e da Equação (A.2), obtêm-se o valor da potência de saída ($P_{saída}$) do forno segundo dados do fabricante, cujo valor é 772,2 W. Assim, os níveis de potência: P10 (10% da potência máxima), P20 (20% da potência máxima) e P30 (30% da potência máxima) no forno de micro-ondas Electrolux correspondem a 77,2 W, 154,4 W e 231,6 W, respectivamente. A potência de entrada é 1430 W.

2. Obtenção da potência de saída utilizando procedimento experimental.

Material utilizado: forno de micro-ondas; 5L de água destilada; termômetro de mercúrio (110°C) e recipiente plástico próprio para uso em micro-ondas.

O procedimento experimental seguiu a sequência: colocou-se um certo volume de água num recipiente plástico; após a medição da temperatura inicial da água, o recipiente foi colocado no centro do forno; e, após fechamento da porta, foram ajustados a potência e o tempo do processo. Finalizado o tempo, realizaram-se as medições da temperatura da água. Um resumo, dos vários testes aplicados encontram-se na Tabela A3.

A Tabela A3 ilustra os valores da potência, considerando que não existe perda de calor durante a realização do experimento. Rosa (2010) sugere que antes do procedimento experimental, o cálculo da potência seja realizado pela Equação (A.3).

$$P = \frac{V\rho c_p \Delta T}{t} \quad (\text{A.3})$$

onde P é potência útil ou potência nominal absorvida pela água ou potência de saída; V é o volume de água; c_p é o calor específico da água; T é a temperatura da água ρ é a densidade volumétrica da água e t é o tempo de aplicação.

Tabela A3 – Valores da potência nominal absorvida para os níveis de potência (10, 20 e 30 e 100 % da potência máxima)

Display (%)	Vol. (mL)	t (s)	T _i (°C)	T _f (°C)	ΔT (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg°C)	P _{saída} (W)
P10	600	120	26	29	3	1000	4186	62,7
P10	300	120	26	32	6	1000	4186	62,7
P10	600	120	28,3	31,5	3,2	1000	4186	66,9
P10	300	120	28,5	34,8	6,3	1000	4186	65,8
P20	600	120	27	34	7	1000	4186	146,3
P20	300	120	30	44	14	1000	4186	146,3
P20	600	120	28,8	35,5	6,3	1000	4186	131,7
P20	300	60	31,2	44,7	13,5	1000	4186	141,1
P30	600	120	33,2	44,2	11	1000	4186	229,9
P30	300	120	31	53	22	1000	4186	229,9
P30	600	120	31	41	10	1000	4186	209,0
P30	300	120	32,3	54,4	22,1	1000	4186	231,9
P100	1000	120	27,5	48	20,5	1000	4186	714,1
P100	500	60	28	45,8	17,8	1000	4186	620

Com base nos dados da Tabela A3 e na Equação (A.1), a eficiência para potência de saída de maior volume de água ou seja, $P_{saída}=714,1$ W é de 49,9%. Marsaioli Junior (2001) relata que a máxima eficiência apresentada por um forno de micro-ondas doméstico ou industrial é de 50% e portanto o valor obtido para o forno utilizado está dentro do esperado. Assim, os níveis de potência: P10 (10% da potência máxima), P20 (20% da potência máxima) e P30 (30% da potência máxima), obtidos experimentalmente no forno de micro-ondas (marca Electrolux) correspondem respectivamente a 71,4 W, 142,8 W e 214,2 W. A potência de entrada é 1430 W.

No processo de secagem por micro-ondas de grãos de arroz em estudo, utilizou-se a seguinte relação para obtenção dos três níveis de potência nominal absorvida de saída ou nominal absorvida: amostra 1 ou experimento 1: $P_{n1} = (62,7/327) W$; amostra 2 ou experimento 2: $P_{n2} = (146,3/298) W$ e amostra 3 ou experimento 3: $P_{n3} = (229,9/331) W$ que corresponde a 0,192 W, 0,491 W e 0,694 W, respectivamente. O número total de grãos nas amostras são: 327, 298 e 331. Assumiu-se estes valores numéricos de potência com base nas repetições apresentadas na Tabela A3 para diferentes volumes de água destilada.