

Jhony Tiago Teleken

**MODELAGEM MULTIFÍSICA E VALIDAÇÃO
EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE MEIOS POROSOS EM
MICRO-ONDAS A VÁCUO**

Tese de doutorado submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos da
Universidade Federal de Santa
Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Augusto
Mattar Carciofi.

Coorientadores: Prof. Dr. João
Borges Laurindo e Prof. Dr.
Marinho Bastos Quadri.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Teleken, Jhony Tiago
MODELAGEM MULTIFÍSICA E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL
DA SECAGEM DE MEIOS POROSOS EM MICRO-ONDAS A VÁCUO
/ Jhony Tiago Teleken ; orientador, Bruno Augusto
Mattar Carciofi, coorientador, João Borges
Laurindo, coorientador, Marinho Bastos Quadri,
2017.

150 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis,
2017.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Secagem com micro
ondas a vácuo. 3. Modelagem multifísica. 4. Meios
Porosos. 5. Simulação Numérica. I. Carciofi, Bruno
Augusto Mattar. II. Laurindo, João Borges. III.
Quadri, Marinho Bastos IV. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos. V. Título.

**“MODELAGEM MULTIFISICA E VALIDAÇÃO
EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE MEIOS POROSOS
EM MICROONDAS A VÁCUO”**


Por

Jhony Tiago Teleken

Tese julgada para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Alimentos**, área de Concentração de **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.



Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi
Orientador



Prof. Dr. João Borges Laurindo
Coorientador



Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri
Coorientador



Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi
Coordenador

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi



Prof. Dr. Jorge Andrey Wilhelms Gut



Prof. Dr. Amir Antônio Martins de Oliveira
Júnior



Prof. Dr. Marco Di Luccio

Florianópolis, 18 de outubro de 2017.

Dedico à minha mãe Deonici
e ao meu pai Jorge.

AGRADECIMENTOS

O principal agradecimento é para minha mãe Deonici, meu pai Jorge e meus irmãos Joel e Junior. Eu agradeço a vocês por todo amor e carinho. Esta conquista é nossa.

Um agradecimento muito especial é para o meu amigo e orientador professor Bruno. Agradeço-lhe por todos os ensinamentos, pelas oportunidades, pela confiança e pelas conversas sempre muito agradáveis e descontraídas.

Obrigado professor Marinho Quadri Bastos e professor João Borges Laurindo pelo apoio, suporte e ideias que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigado professor Walter Carpes Júnior por sempre tão bem me receber e discutir a física do eletromagnetismo. Os seus ensinamentos foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Antônio Pedro Novaes de Oliveira e ao laboratório VITROCER pelo suporte na confecção dos meios porosos e também agradeço os amigos do laboratório LABCET por fornecer os insumos para construção e pela caracterização do meio poroso.

Aos professores Dr. Jorge Andrey Wilhelms Gut, Dr. Amir Antônio Martins e Dr. Marco Di Luccio, agradeço-lhes pela disponibilidade em fazer parte da banca desta tese, com contribuições valiosas.

Agradeço o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo apoio ao longo dos últimos anos, e a CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

Obrigado, sobretudo aos professores que fazem parte do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos que de certo modo contribuíram para minha formação profissional.

Um muito obrigado a todos os amigos que estiveram ao meu lado nos últimos anos e tornaram esse percurso muito agradável e feliz.

Por fim, agradeço ao meu Deus e Pai do Céu pelo dom da vida.

RESUMO

A secagem com micro-ondas a vácuo é um processo que consiste em remover parcialmente a água presente em um meio poroso pela aplicação conjunta de vácuo em uma câmara contendo o meio poroso e o fornecimento de energia eletromagnética na frequência das micro-ondas. Aos alimentos, a secagem com micro-ondas a vácuo se aplica buscando: reduzir os efeitos térmicos sobre compostos termosensíveis, aumentar a velocidade de desidratação do processo e agregar valor ao produto desidratado pela modificação da microestrutura do alimento. O objetivo principal deste trabalho foi propor um modelo matemático para descrever o processo de secagem de meios porosos rígidos com micro-ondas a vácuo. Um modelo matemático tridimensional de escoamento multifásico em meio poroso acoplado com as equações de Maxwell do eletromagnetismo foi proposto para descrever o processo de secagem. O meio poroso, consistindo de uma fase sólida não deformável, uma fase líquida (água) e uma fase gasosa (vapor de água), foi idealizado como um meio contínuo baseado na noção do volume elementar representativo. Os mecanismos de transporte considerados no modelo de meio poroso foram: fluxo capilar, fluxo resultante dos gradientes de pressão e fluxo condutivo. O modelo incorpora também a mudança de fase volumétrica entre água na fase líquida e água na fase vapor (evaporação/condensação). Um modelo bidimensional de escoamento multifásico em meio poroso empregando a equação de Lambert para contabilizar o aquecimento micro-ondas também foi proposto para avaliar o processo de secagem. Os dois modelos foram resolvidos numericamente com o método dos elementos finitos utilizando um código computacional comercial. Os experimentos foram realizados utilizando-se um meio poroso modelo não deformável, obtido por meio do processo de sinterização de microesferas de vidro, e um secador construído com um forno de micro-ondas doméstico adaptado com uma câmara de vácuo de polipropileno. Experimentalmente, determinou-se a evolução temporal do conteúdo de umidade do meio poroso e estes dados foram comparados aos resultados calculados para a validação dos modelos. Os modelos bi e tridimensional descreveram adequadamente os dados experimentais da cinética de secagem, mas apenas o modelo tridimensional fornece informações sobre a dinâmica da distribuição dos campos eletromagnéticos na cavidade do secador e no interior do meio poroso durante a secagem. Ambos os modelos permitiram acompanhar a evolução temporal dos perfis de dissipação de energia micro-ondas, mudança de fase, temperatura, conteúdo de água e pressão no interior do

meio poroso durante a secagem. O modelo permitiu também caracterizar a cinética de secagem em três fases distintas: na primeira fase, não há redução do conteúdo de umidade, apenas o aumento da temperatura do meio; na segunda fase, a água é removida do meio preferencialmente na forma líquida; e na terceira fase, a água é removida do meio preferencialmente na forma vapor. A maior redução no conteúdo de umidade do ocorre pela remoção de água na forma líquida. Com base nos resultados obtidos neste trabalho é possível afirmar que as ferramentas nele desenvolvidas são úteis e aplicáveis à compreensão e a melhoria do processo de secagem de meios porosos com micro-ondas a vácuo.

Palavras-chave: Secagem; Micro-ondas; Vácuo; Meio Poroso; Escoamento Multifásico; Maxwell; Lambert; Modelagem Matemática; Simulação Numérica.

ABSTRACT

Microwave vacuum drying is a process that consists of partially removing the water of a porous medium through the application of vacuum in a hermetic container with the sample followed the application of the microwave heating. In food processing, microwave vacuum drying is applied in order to: reduce the thermal effects on foodstuff, accelerate the dehydration process and modify the microstructure of the dried food. The main objective of this study was to formulate a mathematical model to describe the microwave vacuum drying process in non-deformable porous medium. A three-dimensional multiphase porous media model was coupled with the Maxwell's equations of electromagnetics to describe the drying process. The porous medium consists of a non-deformable solid phase, liquid phase (water) and a gas phase (vapor). For the mathematical description of the transport phenomena in porous medium a continuum approach based on the Representative Elementary Volume method was adopted. The transport mechanisms considered were: capillary flow, pressure driven flow and conduction. The model also incorporates the change of phase between liquid water and vapor (evaporation/condensation) throughout the porous medium domain. A simplified two-dimensional multiphase porous media model using Lambert equation, to model microwave heating, also was evaluated. Both models were solved by Finite Element Method using a commercial CFD program. The experiments were carried out using a non-deformable porous medium, obtained from sintering process of the glass microspheres, and a dryer made from domestic microwave oven adapted with a polypropylene vacuum chamber. The experimental methodology allowed determining the time evolution of the porous medium moisture along the drying process and these results were compared to the results predicted with the developed models. The bi- and three-dimensional models described the experimental data, but only three-dimensional model was able to provide information about the distribution of the electromagnetic fields inside of the dryer and porous medium along the process. Both models allowed following the time evolution of the microwave dissipation, phase change, temperature, moisture content and pressure profiles inside the porous medium. The kinetic drying showed three stages: in the first stage, there was no reduction of the moisture content, only increase of the porous medium temperature; in the second one, water, mostly in liquid form, was removed whereas in the third stage, vapor water, especially, was carried away from the porous medium. The tools

developed in this work are useful and applicable to understanding and improvement of the drying process of porous medium with microwave vacuum drying.

Key-words: Drying, Microwave, Vacuum, Porous Medium, Multiphase transport, Mathematical Modeling, Numerical Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 Diagrama de equilíbrio de fases da água. O ponto A indica as condições de pressão e temperatura da água no alimento antes da secagem e o ponto B indica as condições de pressão e temperatura da água no alimento submetido à secagem com micro-ondas a vácuo.	30
Figura 2.1.2 Curva de secagem ($X_{b,s}$. vs. tempo), curva da taxa de secagem ($dX_{b,s}/dt$ vs. tempo) e evolução temporal da temperatura média (Temperatura vs. tempo) do alimento em um processo de secagem. Os números romanos (I), (II) e (III) indicam: a primeira, segunda e terceira etapa do processo de secagem, respectivamente.	31
Figura 2.2.1 Representação esquemática de uma onda plana uniforme em função de z no tempo zero. Nesta figura, o símbolo E representa o vetor campo elétrico, o símbolo H representa o vetor campo magnético e o símbolo λ representa comprimento da onda.	33
Figura 2.2.2 Efeito do campo elétrico sobre a orientação das moléculas dipolares e na mobilidade dos íons presente na amostra. Representação esquemática do campo elétrico para diferentes valores de tempo observando uma região espacial fixa.	34
Figura 2.3.1 Representação esquemática de um poro cilíndrico contendo uma fase molhante uma uma fase não molhante.	41
Figura 3.1.1 (a) Distribuição do tamanho de partículas das microesferas de vidro; (c) Microscopia ótica de um corte do meio poroso (200 μm).	48
Figura 3.1.2 Representação esquemática do secador micro-ondas a vácuo.	51
Figura 3.1.3 Representação esquemática do aparato experimental utilizado para a impregnação a vácuo do meio poroso.	52
Figura 3.1.4 Representação esquemática: da geometria do meio poroso tridimensional, domínio de cálculo bidimensional axissimétrico e os mecanismos de transporte e condições de contorno consideradas na modelagem matemática.	54
Figura 3.1.5 Representação esquemática da condição de contorno assumida para: (a) equação da conservação da fase gasosa (Equação 3.1.21); (b,c) equação da conservação da fase líquida (Equação (3.1.20)); e (d) equação da conservação da energia térmica (Equação (3.1.26).	63
Figura 3.1.6 Cinética de secagem do meio poroso obtidas com a resolução numérica do modelo utilizando elementos de malha com tamanho de 0,150 e 0,075 mm.	70

Figura 3.1.7 (a) Perfis de dissipação de energia eletromagnética e (b) de mudança de fase ao longo da direção radial em $z = H/2$ para o Modelo I.	72
Figura 3.1.8 (a) Perfis de temperatura, (b) Saturação da fase líquida e (c) Pressão ao longo da direção radial em $z = H/2$ para o Modelo I.....	74
Figura 3.1.9 Perfis de saturação da fase líquida, pressão e temperatura depois de 30 s de secagem previstos pelo (a) Modelo I e (b) Modelo II.	76
Figura 3.1.10 Dados cinéticos da secagem. (a) umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelos Modelos I e II; (b) Taxa de escoamento da água na forma líquida que deixa o meio poroso; (c) Taxa de escoamento da água na forma vapor que deixa o meio poroso.....	78
Figura 3.1.11 Dados cinéticos da secagem: umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelo Modelo I para diferentes valores de K_{evap} .	79
Figura 3.1.12 Perfis de temperatura (linhas pretas) e de temperatura de saturação da água (linhas cinzas) em: P1 ($r = 1$ mm, $z = H/2$) e P2 ($r = R-1$ mm, $z = H-1$ mm) para o Modelo I.	80
Figura 3.1.13 Perfis de (a) dissipação de energia eletromagnética; (b) taxa de mudança de fase; (c) saturação da fase líquida e (d) pressão, em P1 ($r = 1$ mm, $z = H/2$) e P2 ($r = R-1$ mm, $z = H-1$ mm) para o Modelo I.	81
Figura 3.1.14 Dados cinéticos da secagem: umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelo Modelo I considerando diferentes valores de (a) permeabilidade intrínseca, $k_{in,l}$; (b) temperatura inicial, T_0 ; (c) pressão da câmara de vácuo, P^{ch} ; e (d) potência micro-ondas, Q_0	83
Figura 3.1.15 Dados cinéticos da secagem: umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelo Modelo I considerando: (a) as condições limites máximas e mínimas do processo e o $K_{evap} = 1000$ s ⁻¹ ; (b) as condições limites máximas e o $K_{evap} = 10$ s ⁻¹	84
Figura 3.2.1 Representação esquemática do domínio tridimensional de cálculo, condições de contorno e mecanismos de transporte considerados no meio poroso.....	89
Figura 3.2.2 Fluxograma esquemático da resolução numérica do modelo matemático. Os quadros em preto indicam que os modelos, eletromagnético e de transporte em meio poroso, foram resolvidos separadamente de forma desacoplada. Os quadros em cinza indicam as equações resolvidas em cada modelo. As setas em preto indicam a direção do fluxo de informação no ciclo de cálculo. As setas em cinza, no quadro do modelo eletromagnético, indicam a sequência de cálculos e as setas em cinza com duas pontas, no quadro do modelo de transporte indicam que as equações são resolvidas de forma acoplada.	104

Figura 3.2.3 Representação da malha utilizada na resolução numérica do modelo matemático. Para ilustrar os diferentes tamanhos de elementos metade do domínio de cálculo está representado. Na imagem do lado esquerdo está o domínio incluindo cavidade, câmara de vácuo e amostra; e em detalhe na imagem do lado direito está parte do domínio da amostra.	106
Figura 3.2.4 Cinética de secagem do meio poroso obtida com a resolução numérica do modelo utilizando elementos de malha no domínio de cálculo II (meio poroso) com tamanhos de 0,3 cm (linha preta) e 0,2 cm (linha cinza), respectivamente. São apresentados também, em detalhe, três pontos da curva para ilustrar a diferença entre as duas malhas.	107
Figura 3.2.5 Distribuição dos campos elétricos, E (V/m), no interior da cavidade e no interior da amostra nos tempos de 10, 30 e 50 s do processo de secagem para o Modelo I. Resultados no plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo.	110
Figura 3.2.6 Valores médios da constante dielétrica, ϵ' (linha contínua), e da constante de perda, ϵ'' (linha tracejada), do meio poroso durante o processo de secagem para o Modelo I.	111
Figura 3.2.7 Quantidade total de energia eletromagnética dissipada no meio poroso durante o processo de secagem para o Modelo I.	112
Figura 3.2.8 Perfis da taxa de dissipação de energia eletromagnética, Q_{MW} ($W m^{-3}$) e da taxa de mudança de fase I ($kg m^{-3} s^{-1}$) no interior da amostra em diferentes tempos do processo de secagem para a solução do Modelo I. Resultados no plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo do meio poroso.	112
Figura 3.2.9 Representação das frentes de secagem do meio poroso. Resultados no plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo do meio poroso.	114
Figura 3.2.10 Perfis de temperatura, saturação da fase líquida e pressão no interior do meio poroso nos tempos de 10, 20 e 30 s. Os resultados foram previstos pelo Modelo I. Resultados no plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo do meio poroso.	116
Figura 3.2.11 Perfis de temperatura, saturação da fase líquida e pressão no interior do meio poroso nos tempos de 10, 20 e 30 s. Os resultados foram previstos pelo Modelo II.	117
Figura 3.2.12 Perfis temporais da diferença entre a temperatura média (T_{med} , linha preta) e saturação média da fase líquida (S_{med} , linha cinza) previstas pelo Modelo I e Modelo II.	118
Figura 3.2.13 Dados cinéticos da secagem do meio poroso. (a) Umidade vs. tempo previsto pelos Modelos I e II; (b) Taxas de escoamento da	

água na forma líquida que deixa o meio poroso; (c) Taxa de escoamento da água na forma vapor que deixa o meio poroso.....	120
Figura 3.2.14 Dados cinéticos da secagem do meio poroso, unidade vs. tempo previstos pelo Modelo I para diferentes valores de K_{evap}	121
Figura 3.2.15 (a) Perfis temporais de temperatura (linhas na cor preta) e de temperatura de saturação da água (linhas na cor cinza), (b) de pressão, (c) de saturação da fase líquida, (d) de taxa de mudança de fase e (e) de dissipação de energia eletromagnética no centro geométrico do meio poroso. Os resultados foram obtidos com o Modelo I para diferentes valores de K_{vap} : 10 s^{-1} (linha pontilhada), 100 s^{-1} (linha tracejada) e 500 s^{-1} (linha contínua).	123
Figura 3.2.16 Dados cinéticos da secagem: umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelo Modelo I considerando diferentes valores de: (a) permeabilidade intrínseca, $k_{\text{in}, l}$; (b) Potência micro-ondas, P_{in} ; (c) pressão da câmara de vácuo P^{ch} ; (d) Temperatura inicial, T_0 ;.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.1 Características físicas do meio poroso.....	49
Tabela 3.1.2 Parâmetros do modelo matemático bidimensional.	64
Tabela 3.2.1 Parâmetros do modelo matemático tridimensional.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
<u>Eletromagnetismo</u>		
\vec{E}	Vetor campo elétrico	$[V\ m^{-1}]$
\vec{E}_s	Vetor fasor campo elétrico	$[V\ m^{-1}]$
\vec{E}_s^*	Vetor fasor campo elétrico conjugado	$[V\ m^{-1}]$
\vec{H}	Vetor campo magnético	$[A\ m^{-1}]$
\vec{H}_s	Vetor fasor campo magnético	$[A\ m^{-1}]$
\vec{J}	Vetor densidade de corrente elétrica	$[A\ m^{-2}]$
\vec{B}	Vetor indução magnética	[T]
\vec{D}	Vetor indução elétrica	[H]
ρ_m	Densidade de carga	$[C\ m^3]$
μ_m	Permeabilidade magnética	$[H\ m^{-1}]$
μ_0	Permeabilidade magnética no espaço livre	$[H\ m^{-1}]$
ϵ	Permissividade elétrica	$[F\ m^{-1}]$
ϵ_0	Permissividade elétrica no espaço livre	$[F\ m^{-1}]$
σ_m	Condutividade elétrica	$[S\ m^{-1}]$
μ_r	Permeabilidade magnética complexa	[-]
ϵ_c	Permissividade elétrica relativa complexa	[-]
ϵ'	Constante dielétrica	[-]
ϵ''	Constante de perda dielétrica	[-]
α	Constante de atenuação da onda	$[m^{-1}]$
λ	Comprimento da onda	[m]
ω	Frequência angular	$[rad\ s^{-1}]$
f	Frequência	[Hz]
f_c	Frequência de corte do guia de onda	[Hz]
Q_{MW}	Potência dissipada	$[W\ m^{-3}]$
<u>Fenômenos de transporte</u>		
\vec{n}_i	Vetor fluxo mássico de uma espécie química	$[kg\ m^{-2}\ s^{-1}]$
\vec{N}_α	Vetor fluxo mássico de uma fase	$[kg\ m^{-2}\ s^{-1}]$

c_α	Concentração volumétrica de massa	$[\text{kg m}^{-3}]$
$X_{b,s}$	Umidade em base seca	$[\text{kg kg}^{-1}]$
a_w	Atividade de água	$[-]$
$D_{c,\alpha}$	Coefficiente de difusão capilar	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
$D_{i,ap}$	Coefficiente de difusão aparente	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
D_{ij}	Coefficiente de difusão molecular	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
\dot{I}	Taxa de mudança de fase	$[\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}]$
K_{evap}	Constante de mudança de fase	$[\text{s}^{-1}]$
k_i	Condutividade térmica da espécie química	$[\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$
$c_{p,i}$	Calor específico da espécie química	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
$k_{in,\alpha}$	Permeabilidade intrínseca da fase	$[\text{m}^2]$
$k_{re,\alpha}$	Permeabilidade relativa da fase	$[-]$
k_α	Permeabilidade da fase	$[\text{m}^2]$
M_i	Massa molar	$[\text{kg kmol}^{-1}]$
p_c	Pressão capilar	$[\text{Pa}]$
p^{sat}	Pressão do vapor de água saturado	$[\text{Pa}]$
$p_{v,eq}$	Pressão de vapor de equilíbrio	$[\text{Pa}]$
S_α	Saturação da fase	$[-]$
\vec{V}_α	Vetor velocidade de escoamento da fase	$[\text{m s}]$
\vec{q}''	Vetor fluxo de calor por condução	$[\text{W m}^{-2}]$
λ_{ev}	Calor latente de vaporização	$[\text{J kg}^{-1}]$
μ_α	Viscosidade da fase	$[\text{Pa s}]$
ρ_i	Massa específica da espécie química	$[\text{kg m}^{-3}]$
\emptyset	Porosidade	$[-]$
\emptyset_{ap}	Porosidade aparente	$[-]$
P	Pressão	$[\text{Pa}]$
t	Tempo	$[\text{s}]$
T	Temperatura	$[\text{K}]$
θ	Ângulo de contato	$[\text{rad}]$
T	Tortuosidade	$[-]$

γ

Tensão superficial

[N m⁻¹]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS.....	27
1.1.1 Objetivo geral.....	27
1.1.2 Objetivos específicos.....	28
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	29
2.1 SECAGEM COM MICRO-ONDAS A VÁCUO	29
2.2 ASPECTOS FÍSICO-MATEMÁTICOS DO AQUECIMENTO ELETROMAGNÉTICO	32
2.3 ASPECTOS FÍSICO-MATEMÁTICOS DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE EM MEIOS POROSOS.....	38
2.3.1 Difusão molecular	38
2.3.2 Escoamento hidrodinâmico.....	39
2.3.3 Potencial Matricial.....	40
2.3.4 Transporte de energia térmica	42
2.3.5 Equações de conservação da massa e da energia térmica	42
3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	45
3.1 ESTUDO 1 – SECAGEM DE MEIOS POROSOS RÍGIDOS EM FORNOS DE MICRO-ONDAS SOB VÁCUO: MODELAGEM MATEMÁTICA, SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ESTUDO EXPERIMENTAL	46
3.1.1 Introdução	46
3.1.2 Materiais e Métodos.....	48
3.1.2.1 Meio poroso sintético	48
3.1.2.2 Aparato experimental	50
3.1.2.3 Procedimento experimental.....	51
3.1.3 Modelagem Matemática	52
3.1.3.1 Conservação da Quantidade de Movimento Linear	54
3.1.3.2 Conservação da Massa	56
3.1.3.3 Conservação da Energia	59
3.1.3.4 Aquecimento Micro-ondas.....	60
3.1.3.5 Condições Iniciais	62
3.1.3.6 Condições de Contorno	62
3.1.3.7 Propriedades físicas e parâmetros utilizados na resolução do modelo	64
3.1.3.8 Resolução Numérica	68
3.1.4 Resultados e discussões.....	69
3.1.4.1 Estudo de malha e conservação numérica da massa	69
3.1.4.2 Dinâmica do processo de secagem.....	71
3.1.4.3 Validação experimental e análise paramétrica	79

3.1.5 Conclusões	85
3.2 ESTUDO 2 – SECAGEM MICRO-ONDAS A VÁCUO: ACOPLAMENTO DOS FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS E DE TRANSPORTE MULTIFÁSICO EM MEIO POROSO.....	85
3.2.1 Introdução	85
3.2.2 Materiais e Métodos.....	87
3.2.3 Modelagem Matemática	88
3.2.3.1 Modelo Eletromagnético	90
3.2.3.2 Modelo de Transporte Multifásico no Meio Poroso	92
3.2.3.3 Propriedades físicas e parâmetros utilizados na resolução do modelo	99
3.2.3.4 Resolução Numérica.....	102
3.2.4 Resultados e Discussões	106
3.2.4.1 Estudo de Malha e Conservação Numérica da Massa	106
3.2.4.2 Dinâmica do processo de secagem	108
3.2.4.3 Validação Experimental e Análise Paramétrica	121
3.2.5 Conclusões	126
4 CONCLUSÕES	127
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXO A - ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA CURVA DE CARGA DE UM FORNO DE MICRO-ONDAS.....	145

1 INTRODUÇÃO

A operação de secagem é baseada no desequilíbrio do potencial químico entre a água contida em um substrato e a água presente em um fluido de secagem. O potencial químico da água depende de fatores como a temperatura, a pressão, o teor de sólidos dissolvidos e a interação das moléculas de água com a matriz do substrato. Em geral, os métodos de secagem envolvem o fornecimento de energia térmica para aumentar o potencial químico da água e favorecer a transferência de massa para o fluido de secagem (GEANKOPLIS, 2003).

Na secagem de alimentos sólidos, o substrato pode ser idealizado como um meio poroso, contemplando uma matriz sólida deformável preenchida por líquidos e gases (DATTA, 2007). Durante a secagem, a solução líquida é parcialmente removida e a principal consequência disso é a redução da velocidade de deterioração do alimento. Além de ser empregada como uma técnica de conservação, a secagem vem sendo cada vez mais utilizada pela indústria de alimentos para agregar valor ao material desidratado (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

O emprego de ondas eletromagnéticas na região do espectro das micro-ondas como fonte de energia térmica combinado aos diferentes métodos de secagem (convectiva, liofilização, a vácuo, entre outras) tem sido muito estudado na desidratação de materiais biológicos (OZKAN, AKBUDAK, AKBUDAK, 2007; THERDTHAI e ZHOU, 2009; WANG, ZHANG e MUJUMDAR, 2010; DUAN et al., 2011; HUANG et al., 2016; MONTEIRO, CARCIOFI e LAURINDO, 2016; PU e SUN, 2017). O aquecimento micro-ondas combinado com a secagem a vácuo é especialmente utilizado na desidratação de alimentos sensíveis a elevadas temperaturas e à presença de oxigênio (SCAMAN et al., 2014).

As baixas pressões empregadas na secagem a vácuo reduzem a temperatura de saturação do vapor de água presente no alimento, enquanto a onda eletromagnética na frequência de micro-ondas penetra neste e dissipa parte da energia na forma de calor. Neste caso, a evaporação da água ocorre no interior do alimento resultando no aparecimento de gradientes de pressão que intensificam o transporte de massa na rede de canais da matriz porosa e são responsáveis pela deformação da estrutura do alimento (SCAMAN et al., 2014). A secagem com micro-ondas a vácuo pode ser então utilizada para modificar a microestrutura do material desidratado (MONTEIRO, CARCIOFI e LAURINDO, 2016; PU e SUN, 2017).

A conversão da energia eletromagnética, na frequência das micro-ondas, em energia térmica é resultado de dois mecanismos: rotação

dipolar e condução iônica, ambos causados pela polarização oscilatória dos campos elétricos (DATTA e ANATHESWARAN, 2001). A quantidade de energia térmica dissipada no meio dielétrico é proporcional à intensidade local do campo elétrico (SADIKU, 2012). A distribuição dos campos eletromagnéticos depende de inúmeros fatores, incluindo: as dimensões e a geometria da cavidade do forno de micro-ondas; a posição, as dimensões, a geometria, a temperatura e a composição da amostra; e a frequência de propagação das ondas eletromagnéticas (DATTA e ANATHESWARAN, 2001).

Durante a secagem, a temperatura do meio aumenta e o conteúdo de umidade diminui, tais alterações modificam localmente as propriedades dielétricas do material e conseqüentemente a distribuição dos campos eletromagnéticos (ZHU et al., 2015; GULATI, ZHU e DATTA, 2016). Entretanto, obter informações quantitativas sobre as distribuições da dissipação da energia micro-ondas, da temperatura, da pressão e da umidade são difíceis e caras de serem obtidas por meio de técnicas experimentais. Uma alternativa é aliar à investigação, estudos de modelagem matemática e simulação numérica (DATTA et al., 2012).

O aquecimento eletromagnético pode ser modelado utilizando três abordagens: a equação de Lambert, as equações de Maxwell do eletromagnetismo resolvidas apenas no meio poroso e as equações de Maxwell resolvidas no meio poroso e na cavidade do forno de micro-ondas. A equação de Lambert é uma abordagem mais simplificada e considera que a quantidade de energia dissipada decai exponencialmente da superfície em direção ao interior do meio (LU, TANG e LIANG, 1998; SANGA, MUJUMDAR e RAGHAVAN, 2002; SALAGNAC, GLOUANNEC, LECHARPENTIER, 2004; ARBALLO, CAMPAÑONE, MASCHERONI, 2012, 2014; KUMAR et al., 2016a, 2016b, JIANG et al., 2017). Esse comportamento é apropriado para meios relativamente grandes, ou seja, nas quais os fenômenos de reflexão da onda eletromagnética no interior deste meio possam ser desprezados (AYAPPA et al., 1991). A segunda abordagem consiste em resolver as equações de Maxwell apenas no meio (TURNER e JOLLY 1991; MARRA, De BONIS e RUOCCO, 2010). Nesta abordagem os efeitos de reflexão da onda são contabilizados, entretanto assume que a radiação eletromagnética incide com a mesma intensidade e na direção normal da superfície do meio. Uma abordagem mais completa é obtida resolvendo as equações de Maxwell do eletromagnetismo para toda a cavidade incluindo o meio poroso e o ar ao redor (MALAFRONTTE et al., 2012; ZHU et al., 2015, GULATI, ZHU e DATTA, 2016).

Os fenômenos de transporte governantes da secagem de sólidos porosos por micro-ondas podem ser descritos, mais simplificada, por mecanismos de difusão de calor e massa em um meio contínuo utilizando-se de coeficientes efetivos de transferência (LU, TANG e MOA, 1998; SANGA, MUJUMDAR e RAGHAVAN, 2002; MARRA, De BONIS e RUOCCO, 2010; MALAFRONTTE et al., 2012; ARBALLO, CAMPAÑONE, MASCHERONI, 2012; KUMAR et al., 2016b, JIANG et al., 2017), ou por modelos que consideram a estrutura porosa e incluem os fenômenos de difusão molecular, capilaridade e/ou escoamento hidrodinâmico. Estes modelos idealizam um meio poroso, que pode ser rígido ou deformável, preenchido por uma fase líquida, composta por água livre ou livre com uma fração ligada, e uma fase gasosa, composta por vapor de água ou por uma mistura de vapor de água e ar seco. (TURNER e JOLLY, 1991; SALAGNAC, GLOUANNEC, LECHARPENTIER, 2004; LI, ZHANG e LI, 2008; ARBALLO, CAMPAÑONE, MASCHERONI, 2014; ZHU et al., 2015; KUMAR et al., 2016a; GULATI, ZHU e DATTA, 2016).

Na secagem em condições de pressão subatmosférica duas abordagens matemáticas são geralmente utilizadas para descrever as condições na interface meio poroso/ar ambiente: na primeira assume-se que as condições ambientais no interior do secador são conhecidas e condições de contorno de Dirichlet, Neumann e/ou Robin são utilizadas (TURNER e PERRÉ, 2004; ZHANG e KONG, 2012; WARNING, ARQUIZA e DATTA, 2015); na segunda, o modelo de escoamento multifásico em meio poroso é acoplado com balanços globais de energia e massa no interior da câmara de secagem (PERRÉ e TURNER 2006; TORRES et al., 2011).

Diante do exposto, pode-se afirmar que a proposta de um modelo físico-matemático para descrever o processo de secagem com micro-ondas em pressões subatmosféricas, contemplando os fenômenos de aquecimento eletromagnético acoplados aos modelos de transporte multifásico em meio poroso é inédita e justifica a proposta desta tese de doutorado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta tese é propor um modelo físico-matemático para descrever o processo de secagem de meios porosos

com micro-ondas a vácuo e validar o modelo pela comparação da cinética de secagem simulada à observada experimentalmente.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Propor a formulação matemática de escoamento multifásico em meio poroso baseado na noção do volume elementar representativo. Utilizar as equações diferenciais da conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia e propor as respectivas condições de contorno para descrever o processo de secagem em ambientes sob vácuo.
- b) Propor um modelo matemático bidimensional de transporte multifásico em meio poroso utilizando uma abordagem simplificada para descrever o aquecimento micro-ondas. Considerar apenas o meio poroso como domínio de cálculo e utilizar a equação de Lambert para modelar a dissipação da energia eletromagnética.
- c) Propor um modelo matemático tridimensional que acopla as equações de transporte multifásico em meio poroso com as equações de Maxwell do eletromagnetismo. Assumir como domínio de cálculo a cavidade do secador e o meio poroso.
- d) Avaliar a sensibilidade paramétrica dos modelos de secagem bi e tridimensional.
- e) Desenvolver uma metodologia experimental para avaliar o processo de secagem em micro-ondas a vácuo incluindo: a construção e caracterização de um meio poroso rígido reutilizável e a obtenção das cinéticas de secagem do meio poroso.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos encontrados na literatura que serviram de fundamento às análises, aos desenvolvimentos e às discussões apresentadas neste trabalho. Primeiro, há uma breve apresentação sobre o processo de secagem com micro-ondas a vácuo, depois, são apresentados os conceitos físicos e as diferentes abordagens para modelar o aquecimento eletromagnético e por fim, são apresentados os aspectos físicos e matemáticos dos mecanismos de transporte em meio poroso.

2.1 SECAGEM COM MICRO-ONDAS A VÁCUO

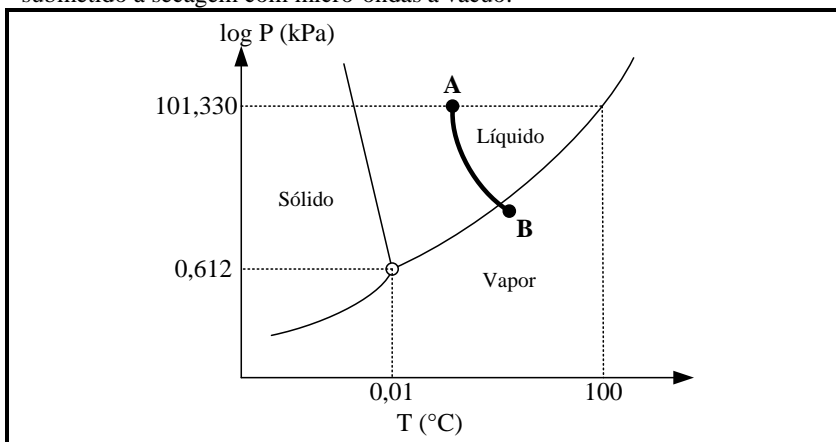
A secagem é a principal operação unitária empregada na indústria de alimentos. É um processo complexo que envolve simultaneamente os fenômenos de transporte de calor e massa. Os sistemas de secagem disponíveis no mercado se diferenciam, principalmente, pelo método de transferência de energia empregado na desidratação. Os mecanismos recorrentemente utilizados incluem: convecção, condução, radiação infravermelha, radiação micro-ondas e radiofrequência (CHEN e MUJAMDAR, 2008). A combinação de energia micro-ondas com aplicação de vácuo tem sido vista como uma alternativa muito interessante aos métodos convencionais de desidratação, tal como secagem convectiva e a liofilização. As principais vantagens deste método são as elevadas taxas de evaporação aliadas com as baixas temperaturas de processo. A principal desvantagem é falta de homogeneidade do aquecimento micro-ondas (SCAMAN et al., 2014).

A energia eletromagnética ganhou popularidade na desidratação de alimentos devido às particularidades do aquecimento micro-ondas. A energia é transportada por ondas eletromagnéticas que são capazes de penetrar no alimento dissipando parte da energia na forma de energia térmica (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001). Além disso, uma onda eletromagnética não necessita de um meio para transportar energia, uma característica muito conveniente em ambientes mantidos sob vácuo. Devido à natureza dipolar da água e por se tratar, na maioria dos alimentos, do componente majoritário, é a principal responsável pelo aquecimento por rotação dipolar. Mas durante a secagem parte da água é removida do alimento e a fração líquida remanescente é continuamente concentrada em sólidos. Assim, a dissipação de energia micro-ondas em energia térmica ocorre majoritariamente pelo mecanismo de condução iônica.

Em geral, os alimentos são caracterizados por apresentar pequena condutividade térmica e a utilização de micro-ondas oferece a oportunidade de elevar rapidamente a temperatura interna do alimento sem a necessidade de criar grandes gradientes de temperatura entre a superfície e o interior do produto (DATTA e RAKESH, 2013). O rápido aquecimento interno aliado com as baixas pressões na câmara de secagem resulta em elevadas taxas de evaporação. Uma vez que o ponto de bolha da água é atingido, há um aumento da pressão no interior do produto, resultado da mudança de fase, forçando o transporte de vapor e água para a superfície do alimento (GULATI et al., 2015).

A secagem com micro-ondas a vácuo é conduzida em temperaturas acima de 0,01 °C e na faixa de pressão compreendida entre 0,612 e 101,325 kPa. No diagrama de fases da água, ilustrado na Figura 2.1.1, a linha que liga os pontos A e B representa o comportamento da água no alimento durante um processo de secagem com micro-ondas a vácuo qualquer, no qual um determinado alimento, inicialmente á temperatura ambiente (ponto A), é submetido a uma redução de pressão e aquecimento micro-ondas (ponto B). Lembrando que a solução aquosa nos alimentos apresenta ponto de ebulição maior que a da água pura, esse efeito é atribuído à presença de sólidos dissolvidos e a interação da solução com a matriz do alimento (SCAMAN et al., 2014).

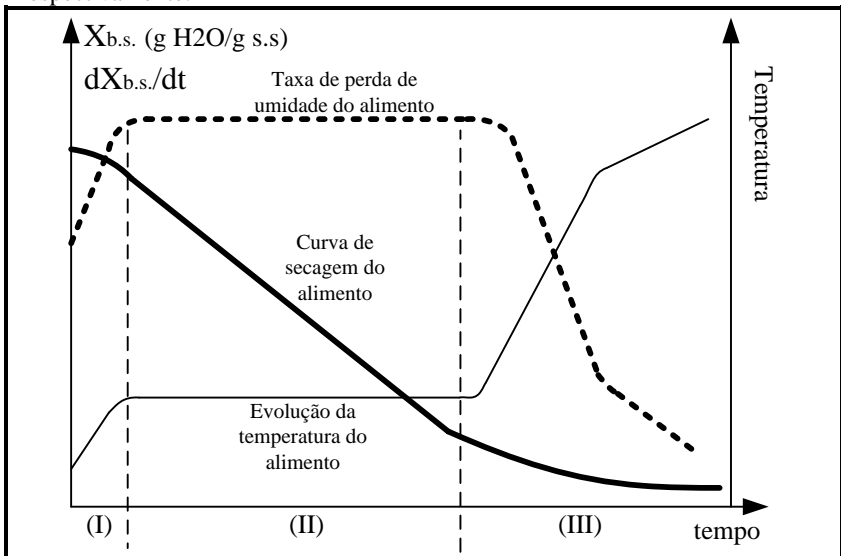
Figura 2.1.1 Diagrama de equilíbrio de fases da água. O ponto A indica as condições de pressão e temperatura da água no alimento antes da secagem e o ponto B indica as condições de pressão e temperatura da água no alimento submetido à secagem com micro-ondas a vácuo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

As elevadas taxas de perda de umidade na secagem com micro-ondas a vácuo podem ser atribuídas aos efeitos do aquecimento eletromagnético em cada uma das três regiões distintas que caracterizam um processo de secagem. Na Figura 2.1.2 estão ilustradas: uma típica curva de secagem, a curva da taxa de secagem e a evolução da temperatura do produto durante o processo.

Figura 2.1.2 Curva de secagem ($X_{b.s.}$ vs. tempo), curva da taxa de secagem ($dX_{b.s.}/dt$ vs. tempo) e evolução temporal da temperatura média (Temperatura vs. tempo) do alimento em um processo de secagem. Os números romanos (I), (II) e (III) indicam: a primeira, segunda e terceira etapa do processo de secagem, respectivamente.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

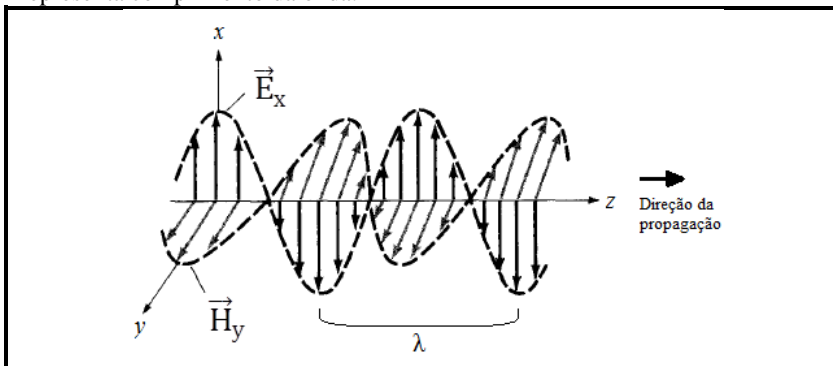
Na primeira etapa (I) ou período de acomodação, há o aumento da temperatura do produto e a energia eletromagnética é convertida em energia térmica. Com o fornecimento de energia, a pressão de vapor da água no alimento torna-se superior à do ambiente e o material perde umidade. As taxas de transferência de massa aumentam em paralelo ao aumento de temperatura até atingir o ponto de bolha. A partir daí a secagem é caracterizada por uma taxa constante de perda de umidade (segunda etapa). Na secagem com micro-ondas a vácuo, a etapa de acomodação é imperceptível devido ao rápido aquecimento

eletromagnético. A temperatura do ponto de bolha e consequentemente a velocidade de perda de massa dependem da pressão ambiente utilizada na secagem. Durante a segunda etapa (II), a temperatura do produto é mantida relativamente constante no ponto de bolha, porque a energia eletromagnética convertida em energia térmica for equivalente ao calor latente de vaporização da água (resfriamento evaporativo). O terceiro período (III) é definido como período de taxa decrescente, no qual a velocidade de perda de umidade diminui à medida que a água ligada é removida. Nesse período, a energia necessária para a vaporização da água é inferior à energia térmica convertida pelas micro-ondas e a temperatura do alimento pode elevar-se acima do ponto de bolha. A secagem com micro-ondas à vácuo pode fornecer uma significativa vantagem neste período por duas razões: (1) esta região pode ser reduzida pela maior umidade perdida na região de taxa constante; e (2) a evaporação da água no interior do alimento promove uma maior velocidade na perda de umidade (ZHANG et al., 2006; SCAMAN et al., 2014).

2.2 ASPECTOS FÍSICO-MATEMÁTICOS DO AQUECIMENTO ELETROMAGNÉTICO

A energia micro-ondas é transportada por ondas eletromagnéticas (EM). Basicamente as ondas EM contém duas componentes, um vetor campo elétrico (\vec{E}) e um vetor campo magnético (\vec{H}), que variam periodicamente (comportamento oscilatório) no tempo e espaço. Esses campos são dispostos perpendicular um ao outro (onda plana uniforme) e a direção de propagação da onda segue a regra da mão direita (Figura 2.2.1) (SADIKU, 2012). As micro-ondas, em particular, ocupam a banda do espectro eletromagnético compreendida entre as frequências de 300 MHz e 300 GHz, porém, a utilização de radiação micro-ondas no processamento de alimentos é geralmente limitada às frequências de 915 e 2450 MHz (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001).

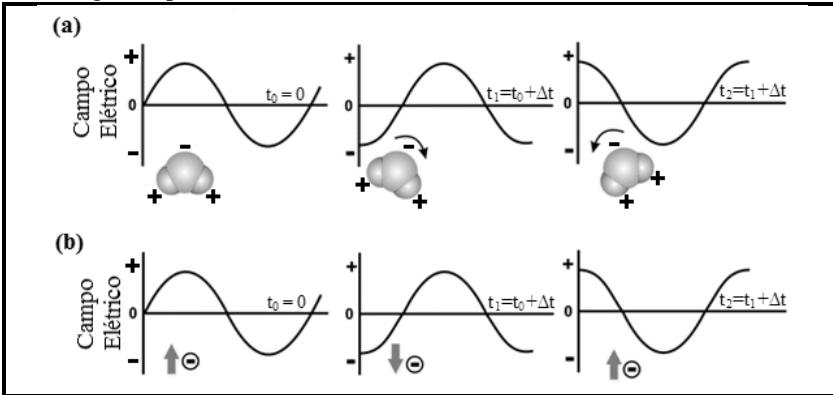
Figura 2.2.1 Representação esquemática de uma onda plana uniforme em função de z no tempo zero. Nesta figura, o símbolo \vec{E} representa o vetor campo elétrico, o símbolo \vec{H} representa o vetor campo magnético e o símbolo λ representa comprimento da onda.



Fonte: Adaptado de Sadiku, 2012.

Quando um campo elétrico oscilante incide sobre moléculas dipolares, elas realinham-se com a polaridade do campo elétrico (Figura 2.2.2). Devido à alta frequência de oscilação do campo, este realinhamento ocorre em milhões de vezes por segundo e o atrito entre as moléculas resulta no aquecimento do material. O segundo mecanismo de aquecimento ocorre devido à migração oscilatória dos íons, que acompanham a oscilação do campo elétrico. As colisões resultantes entre os íons e moléculas vizinhas resultam na dissipação de energia na forma de energia térmica (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001). Mas o aquecimento micro-ondas não depende apenas dos conteúdos de água (molécula dipolar e geralmente o principal componente de alimentos) e de sais dissolvidos presentes, mas, principalmente como estes componentes estão interagindo com os demais constituintes do alimento e qual o estado físico em que se encontram. Alimentos congelados, por exemplo, têm menor absorção de energia micro-ondas, devido à menor mobilidade das moléculas de água (CHEN et al., 2015).

Figura 2.2.2 Efeito do campo elétrico sobre a orientação das moléculas dipolares e na mobilidade dos íons presente na amostra. Representação esquemática do campo elétrico para diferentes valores de tempo observando uma região espacial fixa.



Fonte: Adaptado de Bilecka e Niederberger, 2010.

Pode-se afirmar que o perfil de aquecimento do alimento em fornos micro-ondas é definido pelo padrão de ressonância dos campos eletromagnéticos no interior da amostra. As equações de Maxwell do eletromagnetismo formam um conjunto de quatro leis (Equações 2.2.1; 2.2.2; 2.2.3 e 2.2.4) que juntamente com as equações constitutivas descrevem os fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas. As equações de Maxwell descrevem como o campo elétrico varia no tempo e espaço acompanhado do correspondente campo magnético (SADIKU, 2012)

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_m \quad (2.2.4)$$

A Equação (2.2.1), ou lei de Ampère, expressa a maneira com a qual o campo magnético, \vec{H} (A/m), pode ser criado a partir de uma corrente de condução, \vec{J} (A/m²), e da variação temporal da indução

elétrica, $\partial\vec{D}/\partial t$. O campo magnético e a densidade de corrente elétrica total são ligados por um rotacional. Isso significa que o vetor corrente elétrica é rodeado por um campo magnético normal à direção de \vec{J} . A Equação (2.2.2), ou lei de Faraday, ilustra que uma variação temporal da indução magnética, \vec{B} (T, Tesla), é capaz de criar um campo elétrico, \vec{E} (V/m). Geometricamente, o vetor indução magnética é rodeado pelo campo elétrico. As Equações (2.2.3) e (2.2.4), ou Leis de Gauss, completam o sistema. A Equação (2.2.3) indica que o fluxo magnético é conservativo, ou seja, os fluxos que entram e saem de um volume de controle são iguais. Já a Equação (2.2.4) mostra que o fluxo elétrico não é conservativo e pode ser criado em um volume de controle pela densidade da carga ρ_m (Coulomb/m³) contida em seu interior (SADIKU, 2012).

As relações constitutivas, Equações (2.2.5), (2.2.6) e (2.2.7), suplementam as equações de Maxwell. Elas incluem o efeito das características do meio de propagação da onda sobre os campos eletromagnéticos,

$$\vec{B} = \mu_m \vec{H} \quad (2.2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma_m \vec{E} \quad (2.2.7)$$

nessas equações, μ_m é a permeabilidade magnética do meio (Henry/m) e expressa a capacidade do meio ser mais ou menos susceptível à passagem de fluxo magnético; ϵ é a permissividade elétrica (Farad/m) e expressa a capacidade do meio ser mais ou menos susceptível à passagem de fluxo elétrico e σ_m é a condutividade elétrica do meio (Siemens/m) e exprime o inverso da resistência ao fluxo de elétrons no meio.

Assumindo que os campos EM sejam harmônicos, ou seja, variem periodicamente ou senoidalmente com o tempo, os vetores campo elétrico, \vec{E} , e campo magnético, \vec{H} , podem ser expressos em termos de fasores, conforme as Equações (2.2.8) e (2.2.9) (SADIKU, 2012):

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{E}_s(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.2.8)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{H}_s(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.2.9)$$

nas quais $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular (rad/s) e \vec{E}_s e \vec{H}_s são os fasores campo elétrico e campo magnéticos, respectivamente. Ambos apresentam as mesmas unidades dos vetores campo elétrico e campo magnético. As equações de Maxwell reescritas na forma fasorial, para um meio dielétrico isotrópico, homogêneo e isento de carga fonte, assumem a seguinte estrutura (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001):

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}_s = j\omega\epsilon_0\epsilon_c\vec{E}_s \quad (2.2.10)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_s = -j\omega\mu_0\mu_r\vec{H}_s \quad (2.2.11)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_s = 0 \quad (2.2.12)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \epsilon_c\vec{E}_s = 0 \quad (2.2.13)$$

Observa-se que o fator temporal, $e^{j\omega t}$, desaparece por estar associado a cada termo e, portanto, são equações independentes do tempo, permitindo que o fator tempo possa ser omitido e inserido quando necessário.

Nas Equações (2.2.10 - 2.2.13), μ_0 representa a permeabilidade do vácuo ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$), μ_r a permeabilidade relativa do meio, ϵ_0 a permissividade do vácuo ($10^{-9}/36\pi \text{ F m}^{-1}$) e ϵ_c a permissividade relativa complexa do meio, definida como:

$$\epsilon_c = \epsilon \left(1 - j \frac{\sigma_m}{\omega\epsilon} \right) \quad (2.2.14)$$

Em uma abordagem mais geral, tem-se:

$$\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.2.15)$$

na qual ϵ' é chamada de constante dielétrica e representa a habilidade do material em estocar energia eletromagnética. Essa propriedade influencia principalmente a distribuição dos campos EM no interior do material. O fator de perda dielétrica, ϵ'' , contabiliza a capacidade do material em dissipar a energia EM (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001). As propriedades dielétricas de um dado alimento são influenciadas por inúmeros fatores, incluindo a frequência da radiação eletromagnética, a temperatura e a composição do alimento (NELSON, 1991; SIPAHIOLU e BARRINGER, 2003; LIU, TANG e MOA, 2009).

A potência dissipada em um meio pode ser calculada utilizando o teorema de Poynting (SADIKU, 2012). Para meios dielétricos a potência dissipada é contabilizada pela Equação (2.2.16) (METAXAS e MEREDITH, 1993):

$$Q_{MW}(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \iiint \omega \epsilon_0 \epsilon'' \left(\vec{E}_s^* \cdot \vec{E}_s \right) dx dy dz \quad (2.2.16)$$

O aquecimento eletromagnético (Equação 2.2.16) é tratado como um termo fonte na equação da conservação de energia (RAKESH et al., 2010, 2012; CHEN et al., 2014, 2015; PITCHAI et al., 2014; ZHU et al., 2015, GULATI, ZHU e DATTA, 2016). Em muitos trabalhos o termo que contabiliza a potência eletromagnética dissipada na amostra é descrita pela equação de Lambert (ARBALLO et al., 2012, 2014; KUMAR et al., 2016a, 2016b; JIANG et al., 2017). Essa é uma abordagem empírica, assumindo que há um decaimento exponencial da potência da superfície para o interior do alimento. A equação de Lambert, para um meio unidirecional com a onda se propagando na direção contrária de z , é descrita pela Equação (2.2.17) (LIN, ANANTHESWARAN e PURI, 1995):

$$Q_{MW}(z, t) = 2\alpha Q_s e^{-2\alpha(L-z)} \quad (2.2.17)$$

na qual Q_s é a potência eletromagnética por unidade de área superficial da amostra ($W m^{-2}$), L é a dimensão do meio e α é a constante de atenuação da onda (m^{-1}), representada pela Equação (2.2.18) (SADIKU, 2012):

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]} \quad (2.2.18)$$

Embora a lei de Lambert seja válida para amostras suficientemente grandes, esta aproximação na maioria das situações práticas não é válida. Reflexões de ondas no interior da amostra alteram a distribuição do campo elétrico e, conseqüentemente, o comportamento da dissipação de energia (AYAPPA et al., 1991; OLIVEIRA e FRANÇA, 2002). No interior da amostra, as ondas incidentes e refletidas se combinam, resultando em uma onda estacionária com

regiões de interferência construtiva, que aumentam a potência absorvida, e regiões de interferência destrutiva, que geram um mínimo na potência absorvida. Esse comportamento é responsável pelo aparecimento dos *hot spots* (AYAPPA et al., 1997). Para prever a ressonância dos campos elétricos no interior da amostra, a resolução do problema eletromagnético requer inevitavelmente a utilização das equações de Maxwell.

2.3 ASPECTOS FÍSICO-MATEMÁTICOS DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE EM MEIOS POROSOS

Os mecanismos geralmente considerados nos modelos de transporte multifásico em meios poroso aplicados para alimentos sólidos incluem: difusão molecular e o escoamento resultante de gradientes de pressão e do potencial matricial. Essa abordagem matemática foi utilizada com sucesso na modelagem de processos de aquecimento (RAKESH et al., 2012; CHEN et al., 2014) e secagem com micro-ondas (KUMAR et al., 2016a; ZHU et al., 2015, GULATI, ZHU e DATTA, 2016), secagem à vácuo (ERRIGUIBLE et al., 2007; TORRES et al., 2011), impregnação à vácuo (CARCIOFI, PRAT e LAURINDO, 2012), fritura por imersão (WARNING et al., 2012; HALDER, DHALL e DATTA, 2007), secagem por liofilização (WARNING, ARQUIZA e DATTA, 2015), secagem por *refractance-window* (ORTIZ-JEREZ et al., 2015), processos de cozimento de carne (DHALL, HALDER e DATTA, 2012), processos de panificação (OUSEGUI et al., 2010), entre outros. Nesta seção há uma breve apresentação sobre cada um desses mecanismos de transporte.

2.3.1 Difusão molecular

O transporte por difusão é descrito pela Lei de Fick, que estabelece que o fluxo de massa de uma determinada espécie química (\vec{n}_i) em um dado meio é proporcional ao gradiente de concentração da espécie química (c_i) (CUSSLER, 2009)

$$\vec{n}_i = -D_{ij}\vec{\nabla}c_i \quad (2.3.1)$$

na qual D_{ij} é o coeficiente de difusão molecular binário.

Em meios porosos de partículas inertes e sólidas a difusão ocorre apenas nas fases que preenchem os vazios e não através das partículas

que formam o sólido. Neste caso, define-se um coeficiente de difusão aparente que leva em consideração os aspectos físicos do meio poroso (Equação (2.3.2))

$$D_{i,ap} = \frac{\emptyset D_{ij}}{\tau} \quad (2.3.2)$$

na qual \emptyset e τ são a porosidade e a tortuosidade do meio poroso, respectivamente (KAVIANY, 1995). Em modelos de secagem, a difusão molecular é geralmente utilizada para descrever o transporte binário de vapor de água e ar na fase gasosa. Nesse trabalho a presença de ar será minimizada e assim essa relação não será usada.

2.3.2 Escoamento hidrodinâmico

Na secagem de alimentos com aquecimento por micro-ondas a mudança de fase da água ocorre no interior do produto, resultando no aparecimento de gradientes de pressão que forçam o escoamento dos líquidos e gases através da rede de canais que formam o meio poroso (GULATI et al., 2015). O escoamento em baixa velocidade em meios porosos pode ser descrito matematicamente pela Lei de Darcy, representada pela Equação (2.3.3)

$$\vec{v}_\alpha = -\frac{k_\alpha}{\mu_\alpha} \vec{\nabla}P \quad (2.3.3)$$

A lei de Darcy estabelece que a velocidade do escoamento da fase α (\vec{v}_α) (ou fluxo volumétrico) é proporcional ao gradiente de pressão ($\vec{\nabla}P$) e inversamente proporcional à viscosidade da fase (μ_α). O coeficiente de proporcionalidade, k_α , é chamado de permeabilidade do meio poroso (KAVIANY, 1995).

Em processos de secagem, o meio poroso é definido como um meio não saturado, havendo uma fase líquida e uma fase gasosa, e neste caso a permeabilidade pode ser representada pelo produto entre permeabilidade intrínseca ($k_{in,\alpha}$) e permeabilidade relativa ($k_{re,\alpha}$) (Equação (2.3.4)):

$$k_\alpha = k_{in,\alpha} k_{re,\alpha} \quad (2.3.4)$$

A permeabilidade intrínseca representa a permeabilidade da fase em um meio completamente saturado, enquanto a permeabilidade relativa representa o efeito da proporção volumétrica ocupada por cada fase no meio. A permeabilidade intrínseca é afetada, principalmente, pelas características geométricas, como distribuição de tamanho e forma de poros, porosidade e tortuosidade (KAVIANY, 1995). O fluxo de massa associado ao escoamento da fase (\vec{N}_α) em um meio poroso pode ser escrito em termos da lei de Darcy de acordo com a Equação (2.3.5):

$$\vec{N}_\alpha = \rho_\alpha \vec{v}_\alpha = -\rho_\alpha \frac{k_{in,\alpha} k_{re,\alpha}}{\mu_\alpha} \nabla P_\alpha \quad (2.3.5)$$

na qual ρ_α é a massa específica da fase.

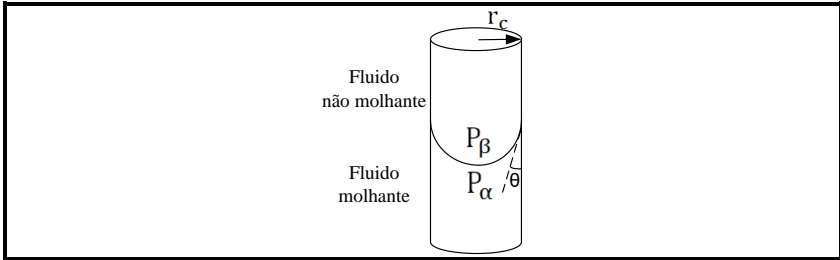
2.3.3 Potencial Matricial

Em um meio poroso não saturado, uma fase pode escoar de uma região de maior concentração para uma região de menor concentração como resultado da diferença relativa entre as forças de adesão e coesão das moléculas que compõem a fase. Quando as forças de adesão forem maiores que as forças de coesão, o fluido é dito molhante e pode inundar um poro sem a necessidade da aplicação de uma força externa (KAVIANY, 1995).

Os efeitos das forças capilares são geralmente quantificados em termos da pressão capilar (p_c), a qual é definida como a diferença de pressão na interface entre a fase molhante (P_α) e a fase não molhante (P_β) em um poro. A pressão capilar está relacionada com o tamanho e forma dos poros, o ângulo de contato (θ) na interface entre líquido, sólido e gás e a tensão superficial (γ) do fluido. A Equação de Laplace descreve como esses fatores afetam a pressão capilar para um poro com formato cilíndrico de raio r_c (Equação (2.3.6)) (KAVIANY, 1995). A **Figura 2.3.1** ilustra um poro cilíndrico contendo uma fase molhante e uma fase não molhante e também apresenta a definição geométrica do ângulo de contato (θ).

$$P_\beta - P_\alpha = p_c = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_c} \quad (2.3.6)$$

Figura 2.3.1 Representação esquemática de um poro cilíndrico contendo uma fase molhante e uma fase não molhante.



Fonte: Adaptado de Kaviany, 1995.

Além das dimensões do poro e da natureza das fases molhante e não molhante, a pressão capilar é afetada também pela temperatura e saturação do meio poroso (KAVIANY, 1995).

Na desidratação de meios porosos, o escoamento da fase líquida (fase molhante) é regido pela diferença entre o gradiente de pressão da fase não molhante e o gradiente de pressão capilar e o fluxo mássico capilar é representado matematicamente de acordo com Equação (2.3.7):

$$\vec{N}_\alpha = -\rho_\alpha \frac{k_{in,\alpha} k_{re,\alpha}}{\mu_\alpha} \vec{\nabla}(P_\beta - p_c) \quad (2.3.7)$$

Outra abordagem é expressar o fluxo mássico capilar de forma análoga a um fluxo difusivo (DATTA, 2007). Assumindo que a pressão capilar depende apenas da concentração da fase molhante no meio poroso (c_α), a Equação (2.3.7) pode ser escrita como,

$$\vec{N}_\alpha = -\rho_\alpha \frac{k_{in,\alpha} k_{re,\alpha}}{\mu_\alpha} \vec{\nabla} P_\beta + \rho_\alpha \frac{k_{in,\alpha} k_{re,\alpha}}{\mu_\alpha} \frac{\partial p_c}{\partial c_\alpha} \vec{\nabla} c_\alpha \quad (2.3.8)$$

Define-se como coeficiente de difusão capilar ($D_{c,\alpha}$),

$$D_{c,\alpha} = -\rho_\alpha \frac{k_{in,\alpha} k_{re,\alpha}}{\mu_\alpha} \frac{\partial p_c}{\partial c_\alpha} \quad (2.3.9)$$

na qual nota-se que $\partial p_c / \partial c_\alpha \leq 0$.

Nesta configuração o coeficiente de difusão capilar ($D_{c,\alpha}$) contabiliza os efeitos das forças capilares e a Equação (2.3.7) pode ser reescrita na forma da Equação (2.3.10) (DATTA, 2007).

$$\vec{N}_\alpha = -\rho_\alpha \frac{k_{in,\alpha} k_{r,\alpha}}{\mu_\alpha} \vec{\nabla} P_\beta - D_{c,\alpha} \vec{\nabla} c_\alpha \quad (2.3.10)$$

2.3.4 Transporte de energia térmica

O transporte de calor por condução é descrito pela Lei de Fourier, que estabelece que o fluxo de energia térmica (\vec{q}'') em um dado meio é proporcional ao gradiente de temperatura (Equação (2.3.11)) (INCROPERA et al., 2008):

$$\vec{q}'' = -k \vec{\nabla} T \quad (2.3.11)$$

Na qual k é a condutividade térmica do meio.

Nos modelos de escoamento multifásico em meio poroso geralmente é utilizada uma condutividade térmica efetiva, levando em consideração as condutividades térmicas individuais (k_α) das fases que compõem o meio poroso. O modelo do coeficiente de condutividade térmica em paralelo é recorrentemente utilizado (Equação 2.3.12).

$$k_{ef} = \sum_{i=1}^n v_\alpha k_\alpha \quad (2.3.12)$$

Na qual v_α é a fração volumétrica do meio poroso ocupada por cada uma das fases (sólida, líquida e/ou gasosa).

A advecção é a energia térmica transportada pelo escoamento das fases fluidas no interior do meio poroso, contabilizada pelo produto entre o fluxo mássico da fase (\vec{N}_α) e o calor específico da fase transportada ($c_{p,\alpha}$).

2.3.5 Equações de conservação da massa e da energia térmica

As equações da conservação da massa da fase molhante (α), massa da fase não molhante (β) e da energia térmica para um meio poroso podem ser descritas matematicamente pelas Equações (2.3.13), (2.3.14) e (2.3.15), respectivamente. Essas equações consideram o meio

poroso como um meio contínuo fictício, baseado na noção do Volume Elementar Representativo, que permite definir as grandezas como médias espaciais (WHITAKER, 1977).

$$\frac{\partial c_\alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{N}_\alpha = -\dot{I} \quad (2.3.13)$$

$$\frac{\partial c_\beta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{N}_\beta = \dot{I} \quad (2.3.14)$$

$$(\rho c_p)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{N}_\alpha c_{p,\alpha} + \vec{N}_\beta c_{p,\beta}) \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (k_{ef} \vec{\nabla} T) - \lambda_{ev} \dot{I} + Q_{MW} \quad (2.3.15)$$

nas quais c_α e c_β são a concentração volumétrica da massa da fase molhante e da massa da fase não molhante, respectivamente; \dot{I} é a taxa volumétrica de mudança de fase (condensação/evaporação); o termo $\lambda_{ev} \dot{I}$ contabilizada e energia térmica cedida ou absorvida na mudança de fase, onde λ_{ev} é o calor latente de vaporização; e Q_{MW} é a taxa volumétrica de dissipação de energia proveniente do aquecimento micro-ondas.

Os fluxos mássicos da fase molhante (\vec{N}_α) e da fase não molhante (\vec{N}_β) são descritos pelas Equações (2.3.16) e (2.3.17), respectivamente.

$$\vec{N}_\alpha = -\rho_\alpha \frac{k_{in,\alpha} k_{re,\alpha}}{\mu_\alpha} \vec{\nabla} (P_\beta - p_c) \quad (2.3.16)$$

$$\vec{N}_\beta = -\rho_\beta \frac{k_{in,\beta} k_{re,\beta}}{\mu_\beta} \vec{\nabla} P_\beta \quad (2.3.17)$$

As hipóteses assumidas e os modelos utilizados para descrever os parâmetros das equações da conservação da massa e da energia térmica são apresentados a seguir no item 3 Desenvolvimento da Pesquisa.

3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Os estudos realizados nesta tese foram subdivididos em dois capítulos de acordo com os conceitos físicos considerados na formulação matemática do modelo.

No primeiro estudo, a taxa de dissipação volumétrica de energia micro-ondas em energia térmica foi contabilizada pela equação de Lambert. Um modelo de escoamento multifásico em meio poroso considerando um domínio de cálculo bidimensional axissimétrico foi proposto para descrever o processo de secagem com micro-ondas a vácuo.

No segundo estudo, as equações de Maxwell do eletromagnetismo foram utilizadas para prever a distribuição dos campos eletromagnéticos no interior do secador e do meio poroso e o teorema de Poynting foi utilizado para contabilizar a taxa volumétrica de dissipação de energia micro-ondas em energia térmica. Um modelo que acopla os fenômenos de escoamento multifásico em meio poroso com os fenômenos eletromagnéticos, considerando um domínio de cálculo tridimensional, foi proposto para descrever o processo de secagem com micro-ondas a vácuo.

3.1 ESTUDO 1 – SECAGEM DE MEIOS POROSOS RÍGIDOS EM FORNOS DE MICRO-ONDAS SOB VÁCUO: MODELAGEM MATEMÁTICA, SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1.1 Introdução

O emprego de ondas eletromagnéticas na região do espectro das micro-ondas como fonte de energia térmica combinado aos diferentes métodos de secagem (convectiva, liofilização, a vácuo, entre outras) tem sido muito estudado na desidratação de materiais biológicos, tais como frutas (MONTEIRO et al., 2015; MONTEIRO, CARCIOFI e LAURINDO, 2016; PU e SUN, 2017), tubérculos (WANG, ZHANG e MUJUMDAR, 2010; HUANG et al., 2016), folhas (OZKAN, AKBUDAK, AKBUDAK, 2007; THERDTHAI e ZHOU, 2009), cereais (WALDE et al. 2002; RANJBARAN e ZARE, 2013), carne (WANG e SHI, 1999; DUAN et al., 2011) e madeira (DU, WANG e CAI, 2005; LI, ZHANG e LI, 2008; VONGPRADUBCHAI e RATTANADECHO, 2009). De maneira geral, os materiais biológicos são caracterizados por apresentar baixa condutividade térmica e a radiação micro-ondas é uma alternativa de elevar rapidamente a temperatura interna dos produtos sem a necessidade de criar grandes gradientes de temperatura. A onda eletromagnética na frequência 2450 MHz é capaz de penetrar no alimento e dissipar parte da energia na forma de calor. A dissipação da energia térmica é resultado de dois mecanismos, rotação dipolar e condução iônica, causados pela polarização oscilatória dos campos elétricos no interior da amostra (DATTA e ANATHESWARAN, 2001).

A secagem por micro-ondas a vácuo é caracterizada por apresentar elevadas taxas de secagem e baixas temperaturas de processo, ideal para produtos termosensíveis. Além disso, alguns estudos indicam também que é possível criar e modificar a microestrutura do material desidratado, sendo este um dos principais atrativos do método para a indústria de alimentos (SCAMAN et al., 2014; MONTEIRO et al., 2016; PU e SU, 2017). Alimentos desidratados por micro-ondas a vácuo podem apresentar características mecânicas semelhantes aos de produtos obtidos em processos de fritura, mas com a vantagem de serem isentos de óleo (SCAMAN et al., 2014).

Os atributos de qualidade do alimento, como textura, cor e sabor, são resultado das mudanças químicas e físicas que ocorrem durante a secagem. Essas mudanças dependem das taxas e da uniformidade do aquecimento, bem como do transporte e perda de umidade durante o

processo (DATTA e RAKESH, 2013). A utilização da simulação numérica como uma ferramenta complementar na investigação da dinâmica da secagem pode contribuir para o aperfeiçoamento do processo. Com um modelo físico matemático é possível obter informações como distribuição de temperatura, pressão e umidade no interior da amostra, as quais muitas vezes são muito difíceis e muito caras para se obter por meio de técnicas experimentais (DATTA et al., 2012).

A modelagem de processos de secagem com micro-ondas disponíveis na literatura têm se diferenciado principalmente pelos modelos empregados para descrever o aquecimento eletromagnético (termo fonte uniformemente distribuído, Equação de Lambert ou Equações de Maxwell) e os mecanismos considerados no transporte de massa (difusão efetiva, escoamento hidrodinâmico e capilaridade) (KOUMOUTSAKOS et al., 2001; SANGA et al., 2002; SALAGNAC et al., 2004; LI, ZHANG e LI, 2008; MALAFRONTA et al., 2012; ZHU et al., 2015; KUMAR et al., 2016a, 2016b; GULATI, ZHU e DATTA, 2016; JIANG et al., 2017).

O trabalho de Li, Zhang e Li (2008) descreve matematicamente e simula o processo de secagem com micro-ondas a vácuo de madeira, assumindo a amostra um meio poroso onde escoam vapor e líquido e o aquecimento por micro-ondas constante e uniformemente distribuído. Entretanto, estes autores negligenciam um aspecto fundamental do aquecimento por micro-ondas. Como consequência da geometria, das dimensões, da temperatura e da composição local do corpo sob aquecimento, o campo de micro-ondas e, conseqüentemente, a quantidade de energia dissipada é diferente em cada instante e em cada ponto no interior do corpo durante o processo de secagem.

A Equação de Lambert (LIN, ANANTHESWARAN e PIRI, 1995) ou as Equações de Maxwell (SADIKU, 2010) permitem descrever a potência dissipada ou campo eletromagnético, respectivamente, dentro do meio sob aquecimento como uma função local em cada posição no interior da amostra apresentando uma abordagem mais realística deste processo.

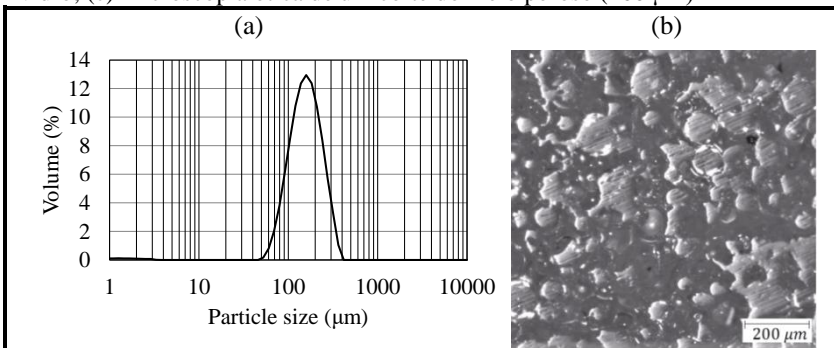
O presente estudo tem como objetivo propor um modelo matemático para descrever o processo de secagem com micro-ondas a vácuo, incluindo os mecanismos de transporte de quantidade de movimento, de calor e de massa e utilizando a Equação de Lambert para a conversão da energia eletromagnética em energia térmica. O modelo matemático foi validado pela comparação da taxa de secagem simulada à observada experimentalmente em um meio poroso sintético.

3.1.2 Materiais e Métodos

3.1.2.1 Meio poroso sintético

Um meio poroso cilíndrico (3,0 x 3,5 cm, raio e altura, respectivamente) não deformável e reutilizável foi confeccionado pelo processo de sinterização de microesferas de vidro soda-lime (Potters, microesfera AD, Brasil). As microesferas apresentam diâmetro médio de 154 μm e a fração volumétrica como uma função da distribuição do diâmetro de partícula foi determinada por difração a laser (Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Malvern, UK), conforme apresentado na Figura 3.1.1(a).

Figura 3.1.1 (a) Distribuição do tamanho de partículas das microesferas de vidro; (c) Microscopia óptica de um corte do meio poroso (200 μm).



No processo de sinterização, as esferas foram acondicionadas em um tubo de aço inox e aquecidas a uma taxa de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ até atingir $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, permanecendo 60 min nesta temperatura (Forno Mufla JUNG, J200, $T_{\text{max}}1250$, Brasil). Depois disso, as amostras eram deixadas durante a noite no interior do forno desligado para resfriar até atingir a temperatura ambiente. A Figura 3.1.1(b) apresenta a vista interna de um corte da amostra, na qual é possível visualizar que as esferas conectam-se uma às outras formando um corpo rígido com a presença de poros, sem haver a densificação do meio.

O diâmetro (D) e a altura (H) das amostras foram determinados usando um paquímetro (Mitutoyo Sul Americana, Calibre, Brasil) e a massa seca (m_s) foi medida em balança analítica (Shimadzu, AY220, Filipinas). A Tabela 3.1.1 apresenta as propriedades físicas das

amostras, valores médios medidos em triplicata de: volume (V, Equação 3.1.1), densidade aparente (ρ_{ap} , Equação 3.1.2), porosidade (\emptyset , Equação 3.1.3) e porosidade aparente (\emptyset_{ap} , Equação 3.1.4). A porosidade aparente foi estimada pelo volume de água impregnada na amostra utilizando o método de impregnação a vácuo.

$$V = \pi \frac{D^2}{4} H \quad (3.1.1)$$

$$\rho_{ap} = \frac{m_s}{V} \quad (3.1.2)$$

$$\emptyset = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_s} \quad (3.1.3)$$

$$\emptyset_{ap} = \frac{1}{V_{ap}} \left(\frac{m_l}{\rho_l} \right) \quad (3.1.4)$$

Na qual, m_l é a massa de água impregnada, ρ_l é a massa específica da água na temperatura da água impregnada e ρ_s é a massa específica real do vidro, determinada pela técnica de picnometria de gás hélio (Micromeritics, AccuPyc II 1340, USA). A técnica é baseada no princípio de Arquimedes e consiste em determinar o volume ocupado por um material sólido através da comparação da variação da pressão do gás numa câmara de volume conhecido contendo a amostra e uma câmara de expansão de volume também conhecido (KENG, 1970).

Tabela 3.1.1 Características físicas do meio poroso.

Amostra	m_{ss} (g)	V_{ap} (cm ³)	ρ_{ap} (g cm ⁻³)	\emptyset	\emptyset_{ap}
(a)	152,70	100,098	1,525	0,385	0,372
(b)	155,45	100,098	1,553	0,374	0,351
(c)	152,55	96,623	1,579	0,364	0,336

A permeabilidade intrínseca da água no meio poroso ($k_{in,l}$) foi determinada utilizando a metodologia do experimento de Darcy (BEAR, 1972). Com um permeâmetro de carga constante foi medida a vazão volumétrica de água (Q) através de uma amostra do meio poroso de comprimento L e seção reta de área A, e o valor de $k_{in,l}$ foi obtido pela Equação de Darcy (BEAR, 1972).

$$k_{in,l} = -\mu_l \frac{L Q}{\Delta P A} \quad (3.1.5)$$

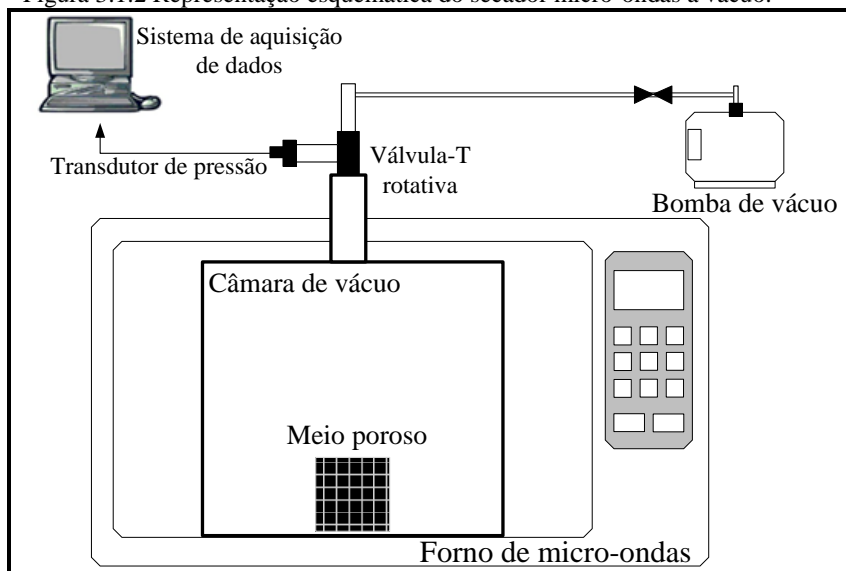
na qual, ΔP é a diferença de pressão entre as duas faces da amostra, uma submetida à uma coluna de água com altura conhecida e a outra aberta à atmosfera, μ_1 é a viscosidade da água na temperatura em que foram conduzidos os experimentos.

Foram utilizadas cinco amostras cilíndricas de meio poroso (1,20 cm de altura e 1,86 cm de diâmetros) e, para cada amostra, as medidas foram realizadas em quadruplicata. As amostras foram obtidas dos mesmos meios porosos empregados nos experimentos de secagem. Cada meio poroso deu origem a duas amostras com exceção de um deles que deu origem a apenas uma amostra. As amostras foram obtidas serrando o meio poroso na metade da altura do cilindro, e cada metade serrada posteriormente em pequenos cilindros utilizando uma serra copo elétrica. O valor médio para a permeabilidade intrínseca ($k_{in,l}$) foi de $4,91 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ com desvio padrão de $1,87 \times 10^{-12} \text{ m}^2$. O valor máximo e o valor mínimo da permeabilidade obtido experimentalmente foram $8,10 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e $2,98 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, respectivamente.

3.1.2.2 Aparato experimental

Os experimentos de secagem foram conduzidos em um secador micro-ondas sob vácuo construído utilizando um forno doméstico (45 dm^3 , Electrolux, MEX55, Brasil) adaptado com uma câmara de vácuo cilíndrica de polipropileno (com volume interno livre de $10,47 \text{ dm}^3$), conforme proposto por Monteiro et al. (2015) e esquematizado na Figura 3.1.2. O forno operou em potência nominal constante de 1000 W, gerando ondas eletromagnéticas na frequência de 2450 MHz. A câmara de vácuo foi conectada a uma bomba de vácuo (DVP, LC.305, Itália) por uma válvula-T rotativa e a um transdutor de pressão digital (Warme, WTP4010, Brasil) que permitiu a aquisição online da pressão.

Figura 3.1.2 Representação esquemática do secador micro-ondas a vácuo.

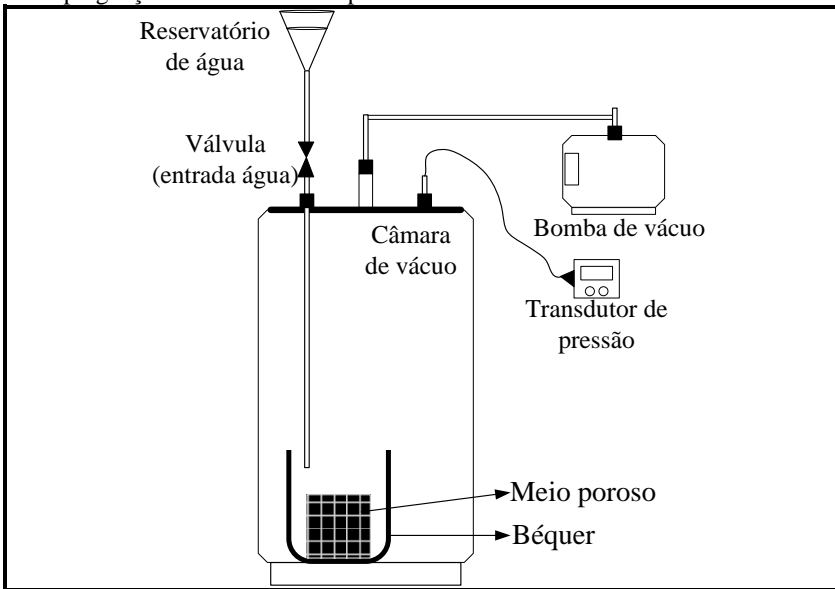


Fonte: Adaptado de Monteiro et al. (2015).

3.1.2.3 Procedimento experimental

Previamente à secagem, as amostras porosas eram saturadas com água destilada utilizando o método de impregnação a vácuo. A saturação foi realizada alocando a amostra em um béquer vazio no interior de uma câmara de vácuo. Inicialmente, a pressão da câmara foi reduzida até cerca de 3 kPa, em seguida, água destilada foi gotejada lentamente sobre a superfície do meio poroso até a completa submersão da amostra. Então reestabelecia-se a pressão, tomava-se a temperatura da água no interior do béquer com um termômetro de mercúrio, e a massa da amostra impregnada era determinada em balança analítica (Shimadzu, AY220, Philippines). O vácuo na câmara foi produzido por uma bomba de vácuo (RC. 8D, D.V.P. Vacuum technology, Itália) e a pressão foi monitorada por um vacuômetro digital (Multi-Range Vacuum Gauge PIZA 111 – ILMVAC, Alemanha). Uma representação esquemática do aparato experimental utilizado para a saturação do meio poroso está ilustrada na Figura 3.1.3.

Figura 3.1.3 Representação esquemática do aparato experimental utilizado para a impregnação a vácuo do meio poroso.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Para o processo de secagem, o meio poroso saturado foi posicionado no interior da câmara do forno e o sistema de produção de vácuo foi ligado. Quando a pressão atingiu 10 kPa, o gerador de micro-ondas foi ligado em 1000 W, potência máxima do equipamento, significando que o magnetron operou em modo contínuo.

O conteúdo total de umidade do meio poroso ao longo do tempo (cinética de secagem) foi obtido interrompendo o processo de secagem e pesando o meio poroso em balança analítica (Shimadzu, AY220, Philippines). Depois de pesado, ele foi levado ao processo de saturação com água para posterior novo processo de secagem, ou seja, para obter cada ponto da cinética sempre se iniciava a secagem com o meio poroso saturado. Esse procedimento foi conduzido para cada amostra porosa e o valor do conteúdo de umidade foi determinado em quintuplicata.

3.1.3 Modelagem Matemática

Uma representação esquemática tridimensional da amostra, o domínio de cálculo bidimensional axissimétrico e os mecanismos de transporte considerados no modelo estão representados

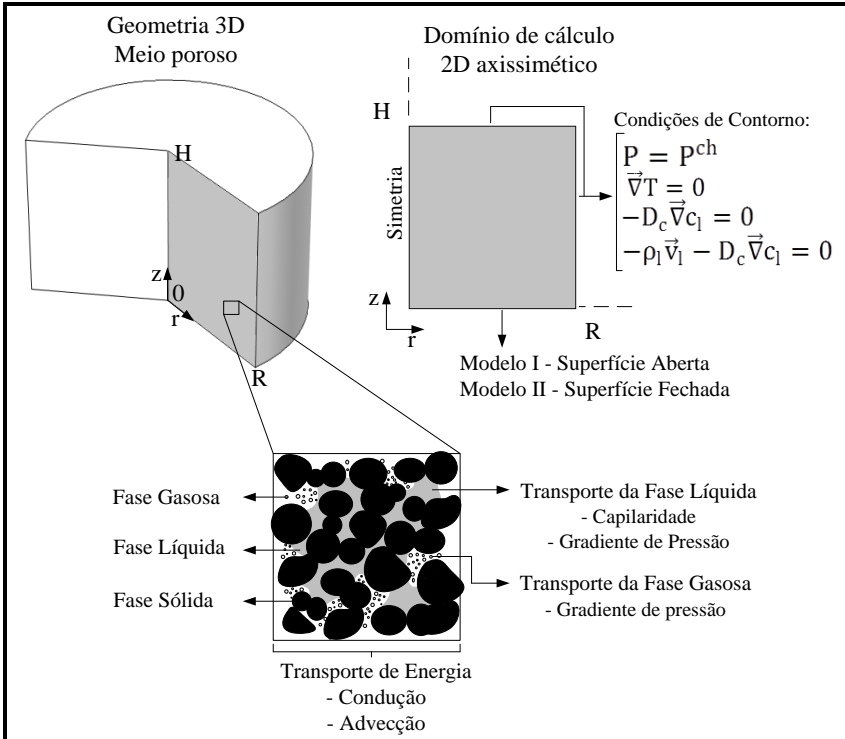
esquemáticamente na Figura 3.1.4. O meio poroso foi idealizado como um meio contínuo baseado na noção do Volume Elementar Representativo, que permite definir as grandezas como médias espaciais (WHITAKER, 1977). A amostra definida como um meio contínuo não deformável (\emptyset constante) é composta por uma fase sólida (vidro), uma fase líquida (água) e uma fase gasosa (vapor de água). Os fenômenos de transporte considerados no interior da amostra foram: fluxo de massa capilar, fluxo de massa resultante do gradiente de pressão e condução de calor.

Durante a realização dos experimentos o meio poroso era posicionado sobre a base da câmara de vácuo, conforme representado esquematicamente na Figura 3.1.2. Neste caso, a superfície inferior do meio poroso ficava em contato com a parede de polipropileno criando uma resistência ao escoamento das fases gasosa e líquida que deixavam o meio poroso por esta superfície. Para avaliar o efeito desta resistência de escoamento sobre a dinâmica do processo de secagem foram analisadas duas condições limites no modelo de secagem: (I) a extremidade inferior do meio poroso foi considerada aberta, ou seja, não há resistência ao escoamento; (II) esta mesma extremidade foi considerada fechada, ou seja, não há escoamento.

As demais hipóteses empregadas na formulação do modelo foram:

- fase gasosa segue o comportamento de gás ideal e consiste apenas de vapor de água;
- escoamento da fase gasosa é resultado do gradiente de pressão do gás;
- fase líquida foi idealizada como um fluido incompressível;
- escoamento da fase líquida é resultado do gradiente de pressão da fase gasosa e das forças capilares;
- equilíbrio térmico local, ou seja todas as fases compartilham a mesma temperatura em uma dada posição do meio poroso;
- mudança de fase (evaporação/condensação) pode ocorrer ao longo de todo o volume do meio poroso;
- não há equilíbrio termodinâmico durante a mudança de fase;
- energia micro-ondas pode ser dissipada ao longo de todo o volume do meio poroso;
- energia micro-ondas dissipada no meio é atenuada exponencialmente da superfície em direção ao interior do meio poroso;

Figura 3.1.4 Representação esquemática: da geometria do meio poroso tridimensional, domínio de cálculo bidimensional axissimétrico e os mecanismos de transporte e condições de contorno consideradas na modelagem matemática.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.1.3.1 Conservação da Quantidade de Movimento Linear

Na secagem com micro-ondas a vácuo, os gradientes de pressão desempenham papel importante no escoamento das fases fluidas, pois a mudança de fase ocorre no interior da amostra como resultado da concentração da energia dissipada (*hot spots*) nos pontos de convergência e sobreposição das ondas eletromagnéticas. O transporte de fluidos através do meio poroso foi descrito pela lei de Darcy, na qual a velocidade de escoamento de cada fase (água líquida e vapor) é proporcional ao gradiente de pressão desenvolvido no meio. As equações de transporte apresentadas aqui são basicamente as descritas por Kaviany (1995).

A velocidade da fase gasosa (\vec{v}_v) resultante do gradiente de pressão da fase vapor (P) no meio poroso, pode ser escrita como

$$\vec{v}_v = -\frac{k_v}{\mu_v} \vec{\nabla}P \quad (3.1.6)$$

na qual μ_v e k_v são a viscosidade e a permeabilidade da fase gasosa.

Em meios porosos não saturados, a velocidade da fase líquida pode ser descrita pela lei de Darcy, porém o gradiente de pressão não é a mesmo da fase gasosa, pois há presença das forças capilares. Assim, o fluxo é resultado de uma combinação entre pressão capilar e a pressão da fase gasosa. As forças capilares resultam da diferença entre as forças de atração das moléculas da fase líquida uma como as outras e dessas com a fase sólida. A velocidade para a fase líquida (\vec{v}_l) pode ser obtida por

$$\vec{v}_l = -\frac{k_l}{\mu_l} \vec{\nabla}(P - p_c) \quad (3.1.7)$$

na qual μ_l e k_l são a viscosidade e a permeabilidade da fase líquida e p_c é a pressão capilar. A pressão capilar é função do tamanho e forma dos poros, das espécies químicas das fases molhante e não molhante, temperatura e saturação de líquido no meio poroso.

A permeabilidade (k) é um parâmetro afetado pelas características físicas do meio poroso, tal como: tamanho e forma dos poros, porosidade, tortuosidade e saturação de líquido. A permeabilidade de meios porosos não saturados pode ser obtida pelo produto da permeabilidade intrínseca (k_{in}) e da permeabilidade relativa (k_{re}).

$$k_l = k_{in,l} k_{re,l} \quad (3.1.8)$$

$$k_v = k_{in,v} k_{re,v} \quad (3.1.9)$$

nas quais $k_{in,l}$ e $k_{in,v}$ são a permeabilidade intrínseca do líquido e do gás em um meio totalmente saturado, respectivamente, e $k_{re,l}$ e $k_{re,v}$ são a permeabilidade relativa do líquido e do gás, respectivamente. $k_{re,\alpha}$ é uma função da saturação da fase α e varia de 0, quando não há presença da fase α , para 1, quando o meio está totalmente saturado desta fase.

3.1.3.2 Conservação da Massa

A concentração volumétrica da massa de água líquida (c_l) e da massa de vapor de água (c_v) no interior da amostra é definida pelas Equações (3.1.10) e (3.1.11), respectivamente.

$$c_l = S_l \rho_l \quad (3.1.10)$$

$$c_v = S_v \rho_v \quad (3.1.11)$$

nas quais S_l e S_v são a saturação das fases líquida e gasosa, respectivamente, definidas como a fração volumétrica ocupada por cada fase relativa ao volume total de poros da amostra, resultando em $S_l + S_v = 1$; ρ_l e ρ_v são a massa específica da água líquida e do vapor de água, respectivamente. A água líquida foi idealizada como um fluido incompressível ($\rho_l = \text{constante}$) e a fase gasosa como um gás ideal (Equação (3.1.12)).

$$\rho_v = \frac{M_v P}{RT} \quad (3.1.12)$$

na qual M_v é a massa molar da água, R é a constante dos gases e T é a temperatura local da amostra.

A presença de ar na fase gasosa no interior da amostra foi negligenciada, pois a amostra foi, previamente à secagem, saturada com água em uma câmara sob vácuo (abaixo de 10 kPa). Considerar a fase gasosa composta exclusivamente por vapor de água é uma hipótese assumida por Li, Zhang e Li (2008) para modelar a secagem por micro-ondas a vácuo de madeira e por Warning et al. (2015) para modelar o processo de secagem de alimentos por liofilização. Durante o processo de secagem a quantidade de ar no interior da câmara de secagem também foi negligenciada, assumindo apenas a presença de vapor de água.

As equações da conservação da fase líquida e da fase gasosa no meio poroso são, respectivamente,

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{N}_l = -i \quad (3.1.13)$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{N}_v = i \quad (3.1.14)$$

nas quais \dot{I} é a taxa volumétrica de mudança de fase (evaporação/condensação), \vec{N}_l é o fluxo de água, resultado do gradiente de pressão no líquido (diferença entre pressão da fase gasosa e pressão capilar) e \vec{N}_v é o fluxo da fase gasosa, resultado do gradiente de pressão no gás (não há contribuição difusiva; consequência da hipótese da fase gasosa ser composta apenas uma espécie química), definidos como

$$\vec{N}_l = \rho_l \vec{v}_l = -\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \vec{\nabla}(P - p_c) \quad (3.1.15)$$

$$\vec{N}_v = \rho_v \vec{v}_v = -\rho_v \frac{k_{in,v} k_{re,v}}{\mu_v} \vec{\nabla}P \quad (3.1.16)$$

O fluxo de água pode ser expresso utilizando um coeficiente de difusão capilar ($D_{c,l}$) (DATTA, 2007). Assumindo que a pressão capilar depende apenas da concentração da fase líquida no meio poroso, a Equação (3.1.15) pode ser reescrita como

$$\vec{N}_l = -\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \vec{\nabla}P_l + \rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial c_l} \vec{\nabla}c_l \quad (3.1.17)$$

Definindo o coeficiente de difusão capilar, $D_{c,l}$, como

$$D_{c,l} = -\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial c_l} \quad (3.1.18)$$

o fluxo de água, \vec{N}_l , pode ser reescrito como

$$\vec{N}_l = -\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \vec{\nabla}P - D_{c,l} \vec{\nabla}c_l \quad (3.1.19)$$

A equação da conservação da fase líquida foi resolvida considerando o fluxo conforme a Equação (3.1.19) utilizando o coeficiente de difusão capilar pela facilidade de implementação no software de cálculo e por apresentar melhores velocidades de convergência.

Para a solução matemática do modelo, a variação espacial da concentração da fase líquida foi obtida resolvendo a equação da conservação da massa (Equação (3.1.13)) em termos de sua saturação, S_l ,

$$\frac{\partial(\rho_1 S_1 \emptyset)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[-\rho_1 \frac{k_{in} k_{rel,l}}{\mu_l} \vec{\nabla} P - D_{c,l} \vec{\nabla}(\rho_1 S_1 \emptyset) \right] = -\dot{i} \quad (3.1.20)$$

A partir de S_1 , o valor da saturação da fase gasosa é obtido pela relação $S_g = 1 - S_1$.

A pressão local da fase gasosa (P) foi calculada pela equação da conservação da massa na fase gasosa,

$$\frac{\partial[(M_v P/RT) S_v \emptyset]}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[-\frac{M_v P}{RT} \frac{k_{in,v} k_{rel,v}}{\mu_v} \vec{\nabla} P \right] = \dot{i} \quad (3.1.21)$$

A taxa de mudança de fase, \dot{i} , é distribuída espacialmente e foi modelada usando uma abordagem denominada de formulação em não equilíbrio. A formulação em não equilíbrio assume que a mudança de fase não ocorre instantaneamente, ou seja, não existe equilíbrio local durante a evaporação/condensação do vapor de água na fase gasosa e da água nos poros da amostra (HALDER et al., 2007). A expressão para a taxa de evaporação em não equilíbrio utilizada para modelar a mudança de fase no meio poroso é dada por (HALDER et al., 2007)

$$\dot{i} = K_{evap} (p_{v,eq} - P) \frac{M_v}{RT} S_v \emptyset \quad (3.1.22)$$

na qual $p_{v,eq}$ é a pressão de vapor de equilíbrio e K_{evap} é um parâmetro empírico relativo à mudança de fase. Para altos valores de K_{evap} , o tempo para mudança de fase é pequeno e quando K_{evap} é infinitamente grande a mudança de fase é instantânea, $p_{v,eq} \approx P$, ou seja, a formulação em equilíbrio é um caso especial da formulação em não equilíbrio (HALDER et al., 2007). Esta abordagem tem sido utilizada para processos de secagem, fritura e cozimento de alimentos (OUSEGUI et al., 2010; DHALL, HALDER e DATTA, 2012; WARNING et al., 2012, 2015; CHEN et al., 2014; ZHU et al., 2015; KUMAR et al., 2016a, GULATI, ZHU e DATTA, 2016).

A pressão de vapor de equilíbrio ($p_{v,eq}$) é dada por

$$P_{v,eq} = a_w P^{sat} \quad (3.1.23)$$

na qual P^{sat} é a pressão de vapor de água saturada e pode ser obtida por relações termodinâmicas, tal qual a equação de Antoine, e a_w é a atividade de água.

O meio poroso utilizado neste estudo é um material não higroscópico, em outras palavras, não há água fisicamente ligada na fase sólida. Porém, as dimensões de tamanho de poro obtidas com um leito de microesferas de vidro *soda-lime* de diâmetro médio de 150 μm resultam na condensação capilar, conforme reportado por Stoklosa et al. (2012). A Equação (3.2.24) foi ajustada para descrever os dados experimentais fornecidos por Stoklosa et al. (2012) para prever os valores de atividade de água ($0,03 \leq a_w \leq 0,96$) em função da umidade em base seca ($0,00 \leq X_{\text{b.s.}} \leq 0,60$).

$$a_w = \exp[-5,01 \exp(-95,42 X_{\text{b.s.}})] \quad (3.1.24)$$

3.1.3.3 Conservação da Energia

A hipótese de equilíbrio térmico local foi assumida, isto é, em cada posição do meio poroso todas as fases compartilham a mesma temperatura. Assim, a conservação da energia pode ser descrita por uma única equação

$$(\rho c_p)_{\text{ef}} \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{N}_l c_{p,l} + \vec{N}_v c_{p,v}) \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (k_{\text{ef}} \vec{\nabla} T) - \lambda_{\text{ev}} \dot{I} + Q_{\text{MW}} \quad (3.1.25)$$

na qual termo $\lambda_{\text{ev}} \dot{I}$ refere-se à geração volumétrica de energia térmica devido à mudança de fase, sendo λ_{ev} o calor latente de mudança de fase da água. Q_{MW} é o termo de geração volumétrica de energia térmica proveniente do aquecimento pelas micro-ondas (detalhada na Equação (3.1.34) a seguir). As propriedades térmicas efetivas do meio poroso foram definidas como propriedades médias ponderadas pelas frações mássicas ou volumétricas de cada fase (NI, DATTA e TORRANCE, 1999)

$$(\rho c_p)_{\text{ef}} = (1 - \phi) \rho_s c_{p,s} + \phi (S_l \rho_l c_{p,l} + S_v \rho_v c_{p,v}) \quad (3.1.26)$$

$$k_{\text{ef}} = (1 - \phi) k_s + \phi (S_l k_l + S_v k_v) \quad (3.1.27)$$

nas quais c_p e k são o calor específico e a condutividade térmica de cada fase, respectivamente.

3.1.3.4 Aquecimento Micro-ondas

O aquecimento por micro-ondas foi modelado utilizando a Equação de Lambert. Nesta abordagem, assumiu-se que a potência incidente por micro-ondas (Q_0) é atenuada exponencialmente da superfície em direção ao interior da amostra. O modelo de Lambert para descrever a potência propagada unidirecionalmente (Q_s) é dado por (LIN, ANANTHESWARAN e PIRI, 1995)

$$Q_s = Q_0 e^{-2\alpha s} \quad (3.1.28)$$

na qual α é a constante de atenuação da onda eletromagnética e s é a distância de penetração.

Assumindo que a potência Q_0 incide na direção normal a superfície da amostra e é igualmente distribuída, a quantidade de energia por unidade de área superficial do cilindro é definida como

$$Q_c = \frac{Q_0}{2\pi RH + 2\pi R^2} \quad (3.1.29)$$

a potência incidente nas direções radial e axial da amostra são descritas pelas Equações (3.1.30) e (3.1.31), respectivamente.

$$Q_R = 2\pi RH Q_c \quad (3.1.30)$$

$$Q_{z0} = \pi R^2 Q_c \quad (3.1.31a)$$

$$Q_{zH} = \pi R^2 Q_c \quad (3.1.31b)$$

Substituindo Q_0 , na Equação (3.1.28), por Q_R (Equação (3.1.30)) e por Q_{z0} e Q_{zH} (Equações (3.1.31a,b)) e dividindo pela área perpendicular, $2\pi rH$ (quando a potência está sendo dissipada na direção radial) e πR^2 (quando a potência está sendo dissipada na direção axial), obtém-se os fluxos de energia na direção radial (Q_r) e na direção axial (Q_z)

$$Q_r = Q_c \left(\frac{R}{r}\right) e^{-2\alpha(R-r)} \quad (3.1.32)$$

$$Q_{z0} = Q_c e^{-2\alpha z} \quad (3.1.33a)$$

$$Q_{zH} = Q_c e^{-2\alpha(H-z)} \quad (3.1.33b)$$

A energia transportada pelas micro-ondas dissipada em um volume infinitesimal da amostra cilíndrica (Q_{MW}) pode então ser calculado de acordo com a Equação 3.1.34.

$$Q_{MW} = \left| \frac{\partial(rQ_r)}{r\partial r} \right| + \left| \frac{\partial Q_{zH}}{\partial z} \right| + \left| \frac{\partial Q_{z0}}{\partial z} \right| \quad (3.1.34a)$$

$$Q_{MW} = 2\alpha Q_c \left\{ \left(\frac{R}{r} \right) [e^{-2\alpha(R-r)}] + e^{-2\alpha(H-z)} + e^{-2\alpha z} \right\} \quad (3.1.34b)$$

A constante de atenuação da onda eletromagnética (α) pode ser expressa como uma função da constante dielétrica (ε'_{ef}) e da constante de perda dielétrica (ε''_{ef})

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\varepsilon'_{ef} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''_{ef}}{\varepsilon'_{ef}} \right)^2} - 1 \right]}{2}} \quad (3.1.35)$$

na qual λ_0 é o comprimento da micro-onda no espaço livre.

As propriedades dielétricas do meio poroso têm grande influência sobre a distribuição da temperatura no aquecimento micro-ondas. Essas propriedades são influenciadas pela temperatura e composição da amostra. Durante o processo de secagem, a concentração de água no meio poroso é reduzida, a temperatura aumenta e há geração de vapor, que foi assumido como não absorvedor da energia eletromagnética (ZHU et al., 2015). Para incluir tais variações nas propriedades dielétricas, estas foram calculadas a partir da contribuição individual de cada fase do meio poroso (ARBALLO et al., 2014)

$$\varepsilon'_{ef} = (1 - \phi)\varepsilon'_s + \phi(S_l\varepsilon'_l + S_v\varepsilon'_v) \quad (3.1.36)$$

$$\varepsilon''_{ef} = (1 - \phi)\varepsilon''_s + \phi(S_l\varepsilon''_l + S_v\varepsilon''_v) \quad (3.1.37)$$

Nas quais ε'_i e ε''_i são a constante dielétrica e a constante de perda dielétrica, respectivamente, da fase sólida ($i = s$), da fase líquida ($i = l$) e da fase gasosa ($i = v$).

3.1.3.5 Condições Iniciais

Inicialmente, assumiu-se que o meio poroso estava saturado com fase líquida, que a temperatura inicial estava espacialmente homogênea e que a pressão no interior do meio poroso estava igual à pressão observada experimentalmente no interior da câmara de secagem. As condições iniciais (C.I.) para a conservação da massa e energia são descritas por

$$\text{C.I. para Equação (3.1.20): } S_l = S_{l0} \quad (3.1.38)$$

$$\text{C.I. para Equação (3.1.21): } P = P_0^{\text{ch}} \quad (3.1.39)$$

$$\text{C.I. para Equação (3.1.25): } T = T_0 \quad (3.1.40)$$

3.1.3.6 Condições de Contorno

Para a equação da conservação da fase gasosa (Equação (3.1.21)) a pressão do gás na superfície da amostra foi prescrita e constante, dado por

$$P = P^{\text{ch}} \quad (3.1.41)$$

na qual P^{ch} é a pressão da câmara de vácuo mensurada durante os experimentos de secagem (Figura 3.1.5 (a)).

Para a equação da conservação da fase líquida (Equação (3.1.20)), foi considerado que a água líquida pode ser empurrada para fora do meio poroso quando os gradientes de pressão interna forem suficientemente elevados para vencerem às forças capilares. Assim, a condição de contorno descrita condicionalmente por

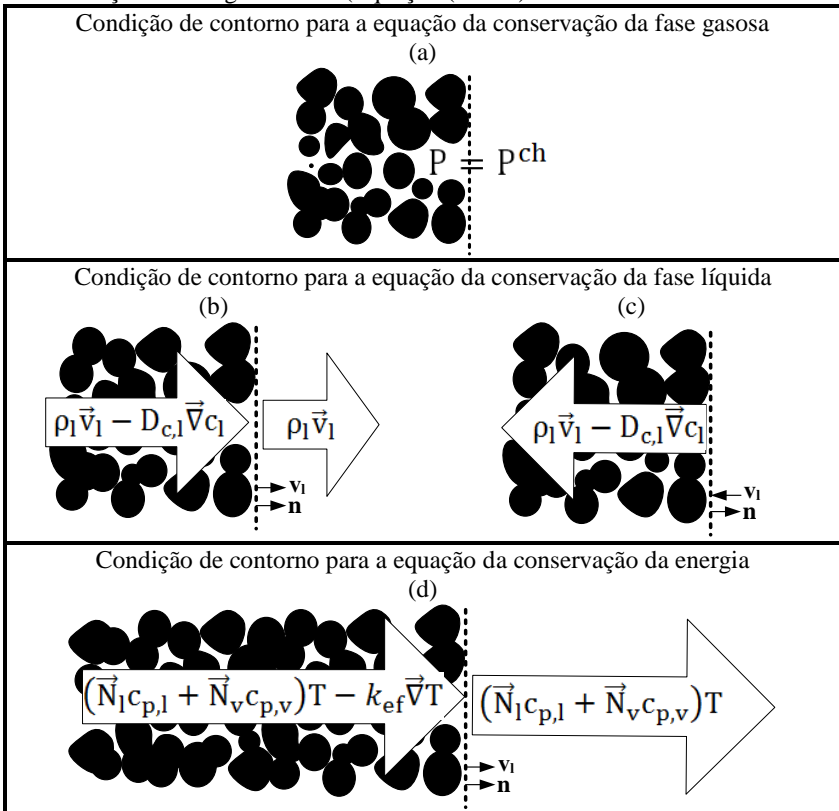
$$\text{Se } \mathbf{n} \cdot \vec{v}_l \geq 0, \text{ então, } -D_{c,l} \vec{\nabla} c_l = 0 \quad (3.1.42)$$

$$\text{Se } \mathbf{n} \cdot \vec{v}_l < 0, \text{ então, } \rho_l \vec{v}_l - D_{c,l} \vec{\nabla} c_l = 0$$

na qual \mathbf{n} é o vetor unitário normal à superfície do meio poroso.

Quando o produto interno do vetor velocidade e do vetor unitário for positivo, o fluxo mássico capilar é nulo, em outras palavras, a água é transportada pelo campo de velocidades para fora do meio poroso (Figura 3.1.5(b)). Quando o produto interno dos vetores for negativo, o fluxo mássico total é nulo, ou seja, massa não entra no meio poroso se a direção do escoamento for da superfície para o interior do meio poroso (Figura 3.1.5(c)).

Figura 3.1.5 Representação esquemática da condição de contorno assumida para: (a) equação da conservação da fase gasosa (Equação 3.1.21); (b,c) equação da conservação da fase líquida (Equação (3.1.20)); e (d) equação da conservação da energia térmica (Equação (3.1.26)).



Fonte: desenvolvido pelo autor

Para a equação da conservação da energia foi usada uma condição de contorno de Newmann, assumindo que o fluxo condutivo a partir da superfície da amostra para a fase gasosa externa é zero. Todo calor do meio poroso que chega até a superfície é transportado por condução ou pelo escoamento das fases fluidas. Considerando a baixa pressão no interior da câmara de vácuo, a fase gasosa no interior da câmara atua como um isolante térmico ideal, ou seja, o calor é transportado para fora do meio poroso carregado pelo escoamento das fases fluidas. Um balanço de energia na superfície do meio poroso

revela que é possível assumir um fluxo prescrito como condição de contorno para conservação da energia (Figura 3.1.5(c)).

$$\vec{\nabla}T = 0 \quad (3.1.43)$$

3.1.3.7 Propriedades físicas e parâmetros utilizados na resolução do modelo

Os parâmetros de entrada do modelo estão listados na Tabela 3.1.2. Alguns parâmetros importantes de transporte e o valor da potência micro-ondas dissipada na amostra são discutidos separadamente.

Tabela 3.1.2 Parâmetros do modelo matemático bidimensional.

Parâmetros	Valores	Fonte
Condições Iniciais		
Temperatura, T_0 (K)	293,15	Mensurado
Pressão, P^{ch} (kPa)	10	Mensurado
Saturação fase líquida, S_{l0}	0,999	Assumido
Meio Poroso		
Raio, R (m)	0,030	Mensurado
Altura, H (m)	0,035	Mensurado
Porosidade, \emptyset	Tabela 3.1.1	Mensurado
Porosidade aparente, \emptyset_{ap}	Tabela 3.1.1	Mensurado
Eletromagnetismo		
Q_0 (W)	Equação (3.1.51)	Mensurado
λ_0 (m)	0,12245	Sadiku (2012)
Constante dielétrica		
água, ϵ'_1	86,5-0,33(T-273,15)	Nelson e Datta (2001)
vidro, ϵ'_s	7,3	Bansal e Doremus (1986)
gás, ϵ'_v	1	Assumido
Constante de perda		
água, ϵ''_1	13,4-0,13(T-273,15)	Nelson e Datta (2003)
vidro, ϵ''_s	0,051	Bansal e Doremus (1986)
vapor, ϵ''_v	0	Assumido
Transporte		
Massa molar		
líquido, M_l (kg kmol ⁻¹)	18	Bejan (2004)

vapor, M_v (kg kmol ⁻¹)	18	Bejan (2004)
Massa específica		
líquido, ρ_l (kg m ⁻³)	1000	Bejan (2004)
vapor, ρ_v (kg m ⁻³)	Equação (3.1.12)	
vidro, ρ_s (kg m ⁻³)	2482	Mensurado
Calor específico		
líquido, $c_{p,l}$ (J/kgK)	4182	Bejan (2004)
vapor, $c_{p,v}$ (J/kgK)	1870	Bejan (2004)
vidro, $c_{p,s}$ (J/kgK)	870	Bansal e Doremus (1986)
Condutividade térmica		
líquido, k_l (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,59	Bejan (2004)
vapor, k_v (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,025	Bejan (2004)
vidro, k_s (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1,03	Bansal e Doremus (1986)
Permeabilidade intrínseca		
líquido, $k_{in,l}$ (m ²)	$4,92 \times 10^{-12}$	Mensurado
vapor, $k_{in,v}$ (m ²)	Eq. (3.1.44)	Jones e Owens (1980)
Permeabilidade relativa		
líquido, $k_{re,l}$	Eq. (3.1.45)	Verma et al. (1985)
vapor, $k_{re,v}$	Eq. (3.1.46)	Verma et al. (1985)
Coefficiente de difusão capilar, $D_{c,l}$ (m ² s ⁻¹)	Eq. (3.1.48)	Calculado a partir dados de She e Sleep (1998)
Viscosidade		
líquido, μ_l (Pa s)	$2,74 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{1735,5}{T}\right)$	McCabe et al. (2005)
vapor, μ_v (Pa s)	$0,017 \times 10^{-3} \left(\frac{T}{273}\right)^{0,35}$	McCabe et al. (2005)
Constante de evaporação, K_{evap} (s ⁻¹)	1000	Assumido
Calor latente de vaporização, λ (J/kg)	de $\frac{10^7}{2,385 \times 10^{-3} p^{0,4343} + 4,034}$	Elliott e Lira, (1999) apud Warning et al. (2012)

Pressão de saturação da água P^{sat} (Pa)	$10^3 \exp\left(\frac{16,3872 - 3885,7}{T - 42,98}\right)$	Smith, Van Ness e Abbott, (2007)
---	--	--

Permeabilidade

A permeabilidade intrínseca de um material é supostamente constante e quantifica o efeito da matriz sólida no escoamento da fase, independentemente da espécie do fluido. Entretanto, variações podem ocorrer em condições de baixa pressão ou baixa permeabilidade. Tanikawa e Shimamoto (2009) observaram diferenças nas permeabilidades intrínsecas do gás ($k_{in,v}$) e da água ($k_{in,l}$) em rochas e atribuíram esse comportamento ao efeito Klinkenberg. Este efeito é resultado da condição de deslizamento dos gases nas paredes dos poros, aumentando o fluxo de gás em poros de pequenas dimensões e condições de baixa diferença de pressão no meio poroso. A equação proposta por Tanikawa e Shimamoto (2009) foi utilizada para modelar processos de fritura à vácuo (WARNING et al., 2012), secagem por liofilização (WARNING et al., 2015) e secagem micro-ondas (ZHU et al., 2015; GULATI, ZHU e DATTA, 2016).

No presente trabalho, a correção do efeito Klinkenberg na permeabilidade intrínseca da fase gasosa foi baseada na relação de Jones e Owens (1980) obtida para um leito de areia (Equação (3.1.44)).

$$k_{in,v} = k_{in,l} \left(1 + \frac{0,86(k_{in,l})^{-0,33}}{P} \right) \quad (3.1.44)$$

As permeabilidades relativas da fase líquida ($k_{in,l}$) e da fase gasosa ($k_{in,v}$) foram modeladas pelas relações empíricas obtidas por Verma et al. (1985) para um leito de microesferas de vidro de 100 μm de diâmetro (Equações (3.1.45) e (3.1.46)).

$$k_{re,l} = \begin{cases} 0, & \text{se } S_l < 0,200 \\ S_e^3, & \text{se } 0,200 \leq S_l \leq 0,895 \\ 1, & \text{se } S_l > 0,895 \end{cases} \quad (3.1.45)$$

$$k_{re,g} = \begin{cases} 1, & \text{se } S_l < 0,3112 \\ 1,2984 - 1,9832S_e + 0,7432S_e^2, & \text{se } S_l \geq 0,3112 \end{cases} \quad (3.1.46)$$

nas quais, $S_e = \frac{S_l - 0,2}{0,895 - 0,2}$.

Capilaridade

A pressão capilar do meio poroso (p_c) foi modelada pela relação obtida por She e Sleep (1998) (Equação (3.1.47)). Os dados de pressão capilar vs saturação da fase líquida foram obtidos para um sistema água-areia. No experimento foi utilizado um leito de areia com tamanho de partícula variando entre 104 e 210 μm .

$$p_c = 100 \frac{\left(\frac{1 - 0,126}{S_1 - 0,126} - 1\right)^{1/8,41}}{0,0215} \quad (3.1.47)$$

O coeficiente de difusão capilar, $D_{c,l}$, foi calculado a partir da definição dada pela Equação (3.1.18) conhecendo $k_{re,l}$ (Equação 3.1.46) e p_c (Equação (3.1.47)),

$$D_{c,l} = \begin{cases} 0, & \text{se } S_1 < 0,200 \\ \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l \phi} \frac{(1 - 0,126) \left(\frac{1 - 0,126}{S_1 - 0,126} - 1\right)^{\frac{1}{8,41} - 1}}{0,215 \times 8,41 (S_1 - 0,126)^2}, & \text{se } 0,2 \leq S_1 \leq 0,895 \\ \frac{k_{in,l}}{\mu_l \phi} \frac{(1 - 0,126) \left(\frac{1 - 0,126}{S_1 - 0,126} - 1\right)^{\frac{1}{8,41} - 1}}{0,215 \times 8,41 (S_1 - 0,126)^2}, & \text{se } S_1 \geq 0,895 \end{cases} \quad (3.1.48)$$

Potência Micro-ondas

A potência das micro-ondas dissipada no meio poroso (Q_0) foi determinada experimentalmente calculando a energia dissipada em uma amostra de água destilada, conforme metodologia utilizada por Arballo et al. (2012), Kumar et al. (2016b) e Jiang et al. (2017). Um béquer de 58 mm de diâmetro interno foi preenchido com cerca de 90 ± 1 g de água destilada (altura da água de 35 mm). As dimensões da água são bem próximos às dimensões da amostra porosa e aquecida no secador micro-ondas a vácuo na mesma posição da amostra porosa. Para calcular a potência dissipada na água ($Q_{0,exp}$) foi utilizada a Equação (3.1.49) (ARBALLO et al., 2012).

$$Q_{0,exp} = m_l c_{p,l} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.1.49)$$

na qual, ΔT é a variação da temperatura da água após um intervalo de tempo, Δt , de aquecimento.

O experimento de aquecimento de água foi repetido 16 vezes, obtendo-se um valor médio de energia dissipada, $Q_{0,exp}$, de 341,5 W com desvio padrão de 25,5 W. Os valores máximo e mínimo de energia foram de 378,3 e 301,4 W, respectivamente.

Calculando a integral de volume da Equação (3.1.34), a quantidade total de energia dissipada na amostra de água é dada pela Equação (3.1.50).

$$Q_{0,exp} = \int_0^H \int_0^R Q_{MW} 2\pi r dr dz \quad (3.1.50)$$

$$Q_{0,exp} = \frac{Q_0}{2\pi RH + 2\pi R^2} [(1 - e^{-2\alpha R}) 2\pi RH + (1 - e^{-2\alpha H}) 2\pi R^2]$$

De acordo com a Equação (3.1.50), $Q_{0,exp} \approx Q_0$ somente para amostras relativamente grandes e/ou com elevados valores para a constante de atenuação de onda, α . Nesses limites, os termos $(1 - e^{-2\alpha R})$ e $(1 - e^{-2\alpha H})$ da equação se aproximam da unidade. Então, para estimar o valor do parâmetro Q_0 do modelo de aquecimento micro-ondas foi utilizada a Equação a (3.1.51).

$$Q_0 = \frac{Q_{0,exp}}{(1 - e^{-2\alpha R}) 2\pi RH + (1 - e^{-2\alpha H}) 2\pi R^2} [2\pi RH + 2\pi R^2] \quad (3.1.51)$$

na qual α é a constante de atenuação da água, calculada utilizando a Equação 3.1.35 com $\epsilon'_{ef} = \epsilon'_1$ e $\epsilon''_{ef} = \epsilon''_1$.

3.1.3.8 Resolução Numérica

O modelo matemático foi resolvido com o método dos elementos finitos utilizando um código computacional comercial (COMSOL Multiphysics® versão 5.3). As equações que regem o transporte multifásico no meio poroso (Equações (3.1.20), (3.1.21) e (3.1.25)) foram resolvidas em termos da saturação da fase líquida (S_l), da pressão da fase gasosa (P) e da temperatura (T), conforme proposto em trabalhos prévios (HALDER et al., 2007; RAKESH et al., 2012; CHEN et al., 2014; ZHU et al., 2015; WARNING et al., 2015).

As equações da conservação das fases líquida e gasosa foram resolvidas utilizando os módulos *Chemical Reaction Engineering*

Module e *CFD Module* com as interfaces *Transport of Dilute Species* e *Darcy's Law*, respectivamente, e a conservação da energia foi resolvida com o módulo *Heat Transfer Module* na interface *Heat Transfer in Fluids*. O domínio do modelo foi discretizado utilizando elementos retangulares de 0,150 mm (totalizando 46 800 elementos) e função de interpolação de primeira ordem, correspondendo a 141 705 graus de liberdade. As equações foram resolvidas de forma acoplada utilizando o solver direto de resolução de sistemas lineares PARDISO. O método PARDISO é baseado nos métodos de decomposição LU. O problema transiente foi resolvido com método *Backward Differentiation Formula* (BDF) com passo de tempo adaptativo. Os métodos BDF são definidos por fórmulas de diferenciação *backward*, ou seja, estabelecidas no sentido contrário ao sentido da evolução da integração do problema de valor inicial. A resolução numérica foi realizada em um processador Intel CORE i7-4790K com 32 GB de memória RAM, consumindo um tempo médio de 90 minutos para simular um processo de secagem de 3,5 minutos.

Na implementação numérica do modelo, foi especificado um intervalo fechado para a saturação da fase líquida: $0,001 \leq S_l \leq 0,999$, evitando divergência da solução numérica. O meio poroso não pode ser completamente saturado ($S_l = 1$), pois o termo de mudança de fase (\dot{I}) seria sempre zero, já que a função (Equação 3.1.22) é diretamente proporcional ao valor da saturação da fase gasosa ($S_g = 1 - S_l$). Como consequência, o cálculo da taxa de mudança de fase foi definido em partes, garantindo que possa existir apenas evaporação ($\dot{I} \geq 0$) quando o meio estiver completamente saturado com a fase líquida ($S_l = 0,999$) e que exista apenas condensação ($\dot{I} \leq 0$) quando o meio estiver completamente saturado com fase gasosa ($S_l = 0,001$).

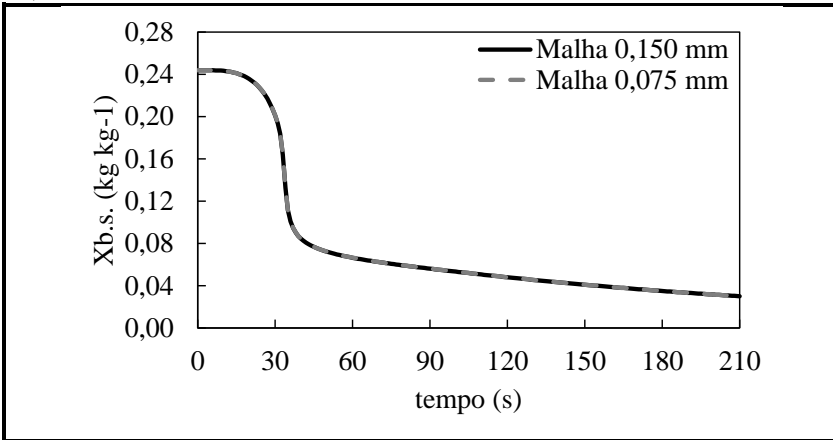
3.1.4 Resultados e discussões

3.1.4.1 Estudo de malha e conservação numérica da massa

Uma análise de sensibilidade da malha está apresentada na Figura 3.1.6, na qual é comparada a cinética de secagem do meio poroso obtida com o domínio de cálculo discretizado com elementos de 0,150 mm (46 800 elementos e 141 705 graus de liberdade) e de 0,075 mm (186 800 elementos e 563 005 graus de liberdade), respectivamente. Observou-se que a diferença relativa absoluta média do valor de $X_{b,s}$ obtido pela solução de cada uma das malhas propostas foi inferior a

0,05%. Além disso, houve um grande aumento do tempo de cálculo com o aumento do número de divisões do domínio, sendo aproximadamente 4,9 vezes maiores quando o tamanho de elemento da malha passa de 0,150 mm (cerca de 90 minutos) para 0,075 mm (cerca de 440 minutos).

Figura 3.1.6 Cinética de secagem do meio poroso obtidas com a resolução numérica do modelo utilizando elementos de malha com tamanho de 0,150 e 0,075 mm.



Para verificar a conservação da massa durante a resolução numérica do modelo, a quantidade total de água remanescente no meio poroso ($m_{\text{H}_2\text{O}}$), após um intervalo de tempo ($\Delta t = t - t_0$) foi calculada pela Equação (3.1.52). Este valor foi comparado à massa inicial descontada da quantidade total de água (líquida e vapor) que saiu pelas superfícies do meio poro neste mesmo Δt (superfície radial, Equação (3.1.53), superfície axial, Equação (3.1.54)).

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \int_0^H \int_0^R \phi [\rho_l S_l + \rho_v (1 - S_l)] 2\pi r dr dz \quad (3.1.52)$$

$$m_{\text{H}_2\text{O},R} = \int_{t_0}^t \left[\int_0^H (\rho_l \vec{v}_l + \rho_v \vec{v}_v) 2\pi R dz \right] dt \quad (3.1.53)$$

$$m_{\text{H}_2\text{O},H} = \int_{t_0}^t \left[\int_0^R (\rho_l \vec{v}_l + \rho_v \vec{v}_v) 2\pi r dr \right] dt \quad (3.1.54)$$

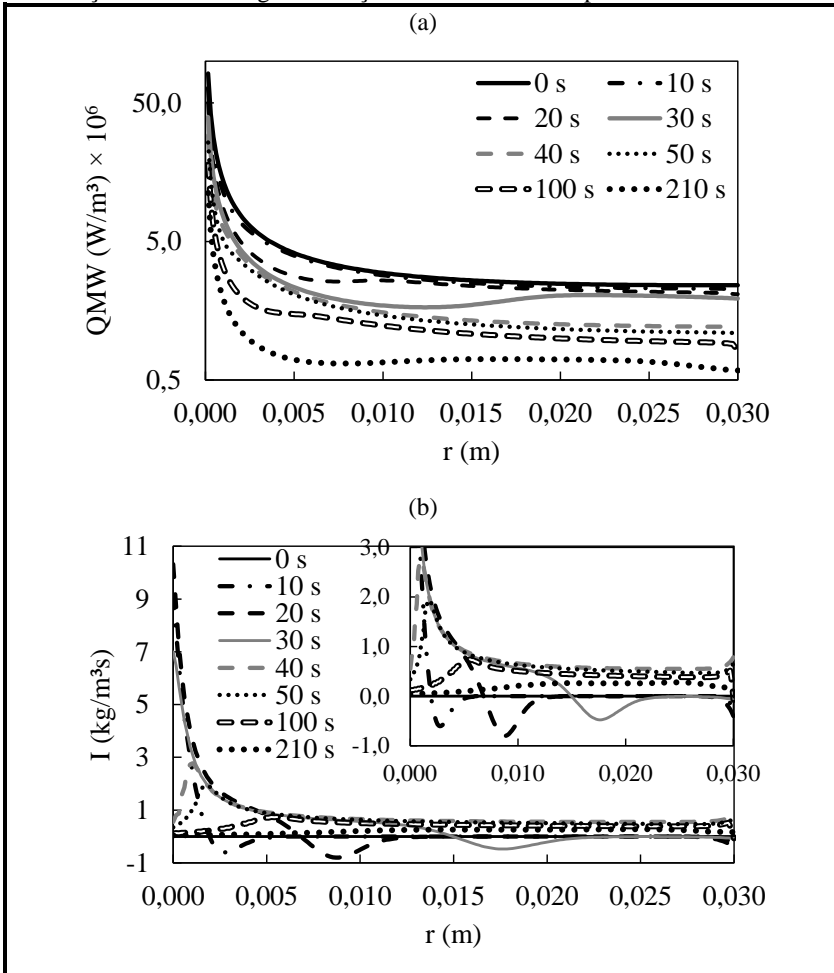
Para o tempo de secagem $\Delta t = 210$ s, a diferença percentual no valor da massa de água remanescente no meio poroso foi inferior a 1 %. Esse resultado é um indicativo de que implementação e a resolução numérica do modelo na plataforma de cálculo foi adequada.

3.1.4.2 Dinâmica do processo de secagem

A Figura 3.1.7 apresenta perfis para a solução do Modelo I. Na Figura 3.1.7(a) estão apresentados os perfis radiais de energia eletromagnética dissipada na amostra. Observa-se que a maior dissipação de energia ocorre no centro da amostra ($r = 0$), efeito das dimensões e da geometria do meio poroso (ZHANG e DATTA, 2005a, 2005b). Com o passar do tempo, a intensidade da energia dissipada diminui, consequência do efeito combinado da redução do conteúdo de umidade e do aumento da temperatura nas propriedades dielétricas do meio poroso.

Conforme pode ser observada na Figura 3.1.7(b), os perfis de mudança de fase apresentam duas regiões: evaporação da água líquida ($\dot{I} > 0$) e condensação do vapor ($\dot{I} < 0$). Inicialmente, as maiores taxas de evaporação ocorrem no centro da amostra, seguindo os perfis de dissipação de energia. A taxa de evaporação no centro da amostra atinge um valor máximo (próximo a 20 s) e, então, começa a reduzir em virtude do decréscimo do conteúdo água. A partir dos 40 s de secagem as taxas de evaporação passam a exibir um ponto de máximo, o qual se distancia de $r = 0$ e perde intensidade com o decorrer do processo. O vapor de água gerado próximo ao centro da amostra é transportado por diferença de pressão para uma região de temperatura menor onde acaba condensando ($\dot{I} < 0$). No decorrer do processo os picos de condensação se distanciam de $r = 0$ e perdem intensidade, até ser observada apenas a evaporação (40 s).

Figura 3.1.7 (a) Perfis de dissipação de energia eletromagnética e (b) de mudança de fase ao longo da direção radial em $z = H/2$ para o Modelo I.



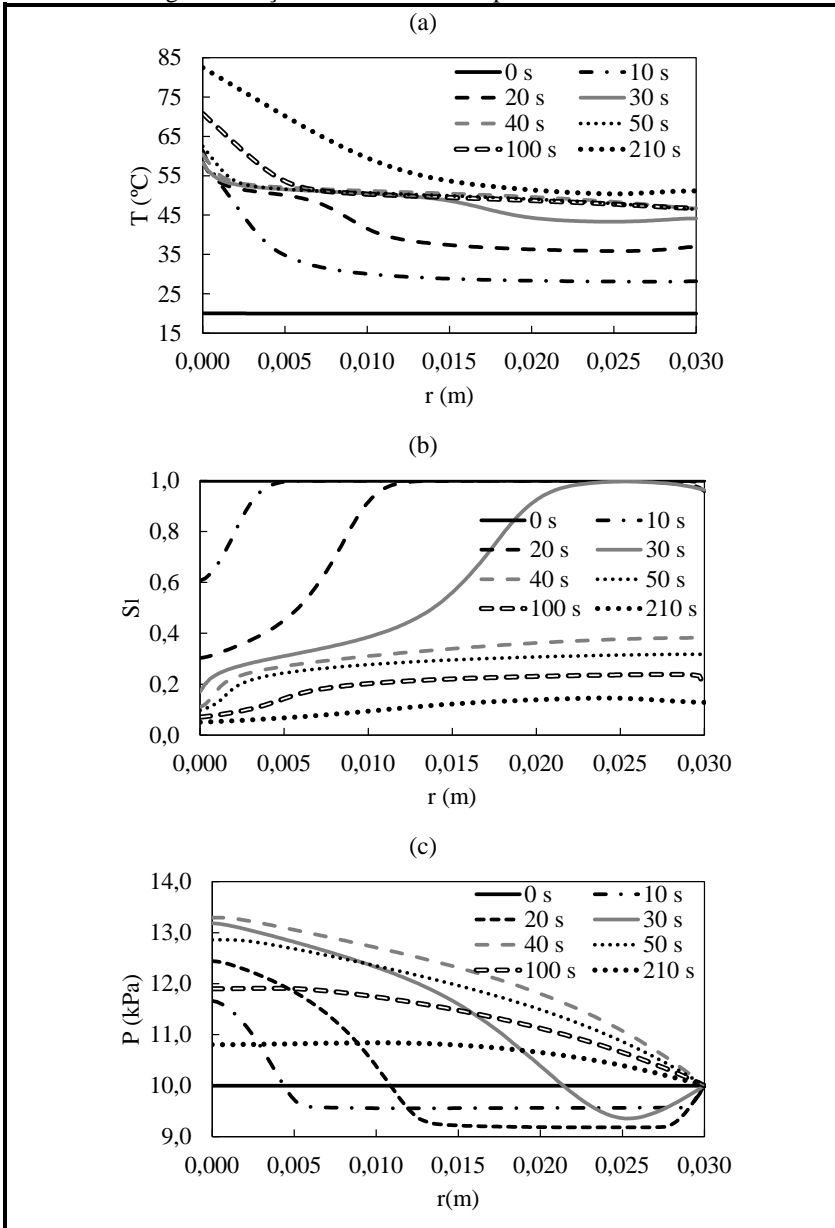
Na Figura 3.1.8 estão ilustrados os perfis radiais de temperatura, saturação da fase líquida e pressão para o Modelo I. A temperatura aumenta mais rapidamente no centro da amostra da amostra (Figura 3.1.8(a)), havendo, consequentemente, maior taxa de evaporação da água e a redução mais rápida da saturação da fase líquida (Figura 3.1.8(b)), levando ao aumento da pressão (Figura 3.1.8(c)) nesta região. O aumento da pressão de vapor no interior de materiais dielétricos

aquecidos em micro-ondas foi observado experimentalmente por Gulati et al. (2015).

Na Figura 3.1.8(a) observa-se a formação de um platô de temperatura próximo aos 54°C. Esta temperatura correspondente à temperatura da saturação de vapor da água na pressão desenvolvida no interior do meio poroso. No decorrer do processo os perfis de temperatura ultrapassam o valor platô, primeiramente, nas regiões próximas ao centro geométrico do meio poroso. Neste ponto há maior dissipação de energia (Figura 3.1.7(a)) e com a redução do conteúdo de umidade (Figura 3.1.8(b)) há consequente redução das taxas de evaporação (Figura 3.1.7(b)). Assim, quantidade de energia associada ao resfriamento evaporativo torna-se inferior a quantidade de energia micro-ondas dissipada no meio poroso e a temperatura do meio eleva-se acima da temperatura de saturação da água.

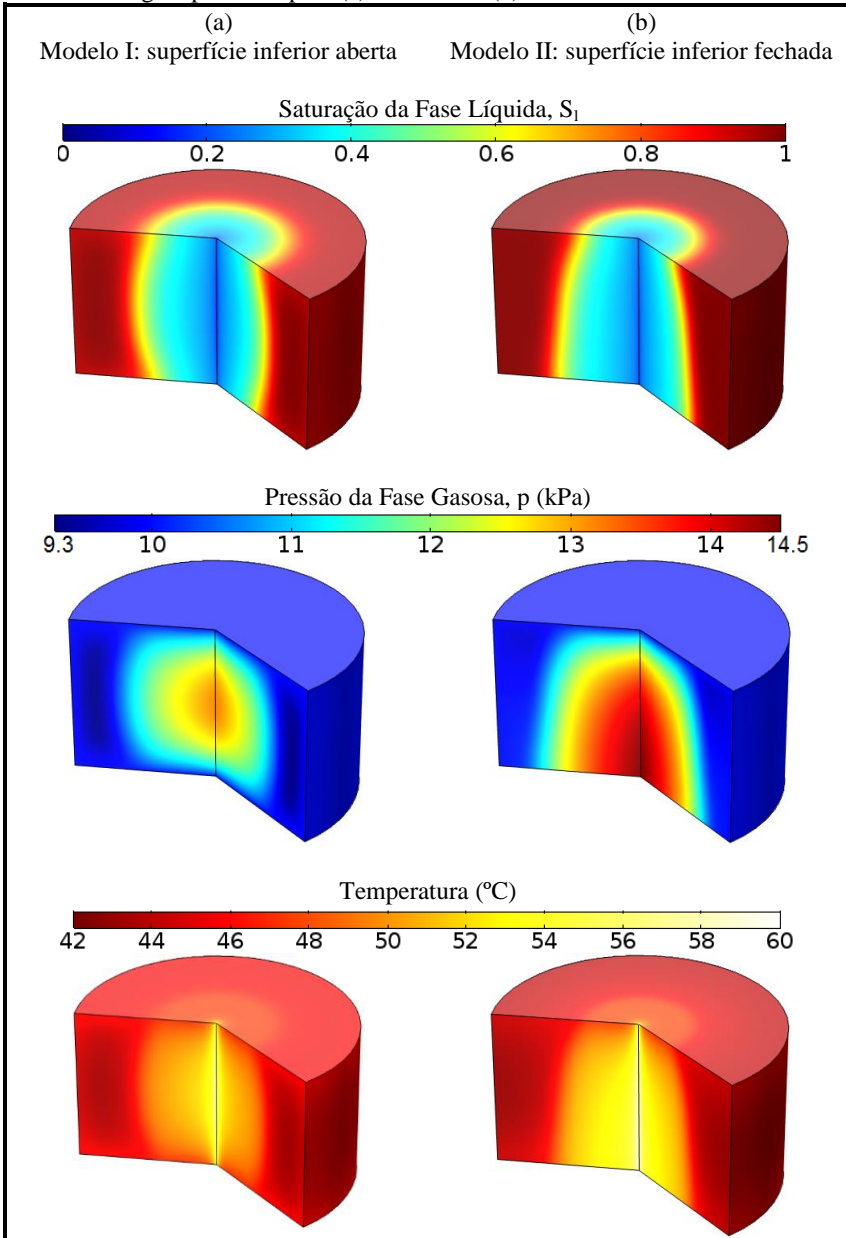
A redução da saturação da fase líquida na direção radial (Figura 3.1.8(b)) se deve à evaporação e ao escoamento de água líquida para fora do meio poroso como resultado do aumento da pressão interna. Na Figura 3.1.8(c), observa-se a presença de regiões na qual a pressão fica ligeiramente inferior à pressão da câmara de secagem (10 kPa), este resultado está associado à condensação do vapor de água, corroborado pelos dados da Figura 3.1.7(b). A redução da pressão também foi reportada na literatura por Rakesh et al. (2012) na simulação do aquecimento de alimentos sólidos em forno micro-ondas. Na Figura 3.1.8(c) observa-se também que a pressão atinge o maior valor aos 40 s de processo e então começa a reduzir (50 s). Esse comportamento está associado ao efeito combinado de dois fenômenos: redução das taxas de evaporação e a resistência ao escoamento de água líquida formada ao longo da superfície ($r = R$) (Figura 3.1.8(b)). Quando a saturação da fase líquida sobre a superfície do meio poroso torna-se menor que a unidade, o escoamento da fase gasosa é facilitado e consequentemente há o alívio da pressão interna.

Figura 3.1.8 (a) Perfis de temperatura, (b) Saturação da fase líquida e (c) Pressão ao longo da direção radial em $z = H/2$ para o Modelo I.



Na Figura 3.1.9 estão apresentados os perfis de saturação da fase líquida, pressão e temperatura no meio poroso, obtidos com o Modelo I, (superfície inferior do meio poroso aberta) e com o Modelo II (superfície inferior do meio poroso fechada). Para o Modelo II, a pressão desenvolvida no interior do meio poroso é maior que a pressão prevista pelo Modelo I, como esperado, pois, o vapor gerado no interior da amostra deixa o meio poroso pelas superfícies axiais. Com a superfície inferior fechada, o vapor gerado no centro da amostra tem uma resistência ao transporte maior para ser vencida, resultando em um aumento dos gradientes de pressão interna. Esse maior aumento da pressão de vapor prevista pelo modelo com superfície fechada é responsável pelo maior fluxo de água através da direção radial no meio poroso conforme discutido a seguir.

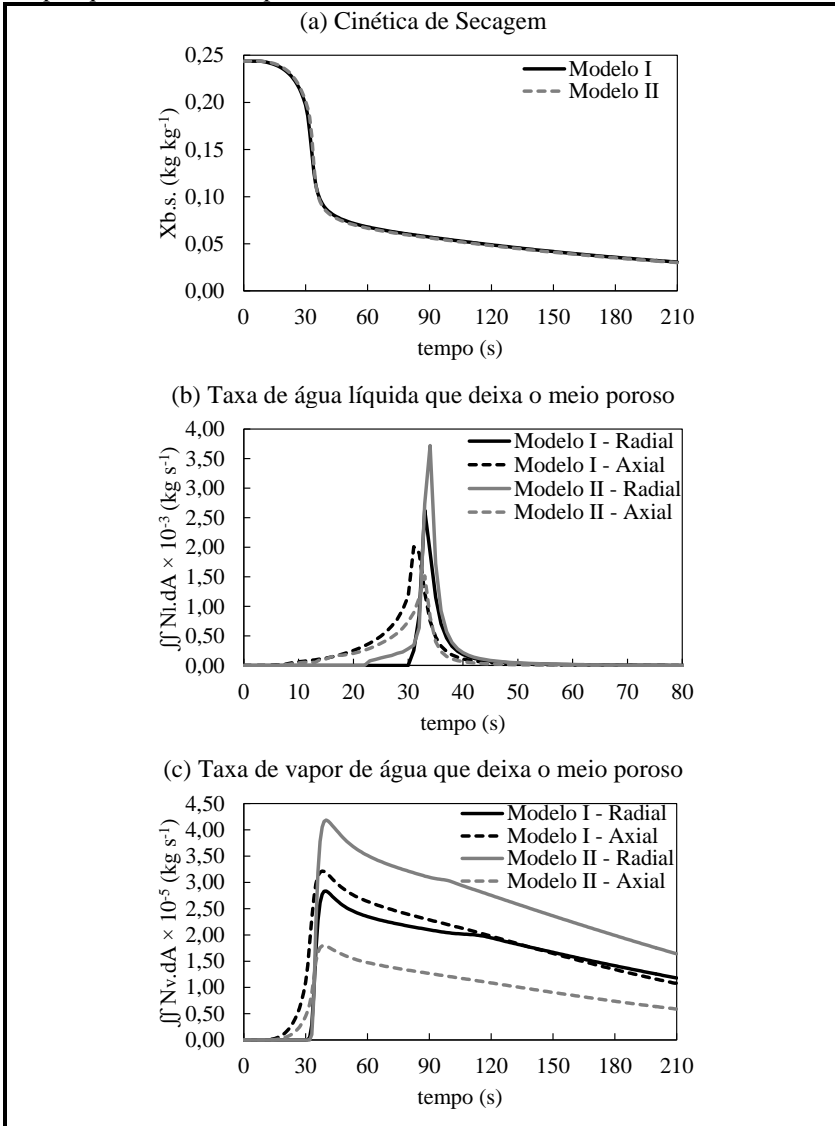
Figura 3.1.9 Perfis de saturação da fase líquida, pressão e temperatura depois de 30 s de secagem previstos pelo (a) Modelo I e (b) Modelo II.



As cinéticas de secagem obtidas com os Modelos I e II estão apresentadas na Figura 3.1.10(a) e observa-se que as curvas apresentam três fases. Na primeira fase, ocorre o aumento da temperatura do meio poroso até aproximadamente a temperatura de saturação do vapor da água na pressão do ambiente, sem haver redução do conteúdo de umidade. Atingida a temperatura de saturação, há geração de vapor e aumento da pressão interna, que deslocam a fase líquida para fora do meio poroso. A taxa de escoamento da água líquida que deixa a amostra está na ordem de grandeza de $10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$ (Figura 3.1.10 (b)) e se estendem até aproximadamente 60 s de processo, enquanto a taxa de escoamento da água na forma vapor está na ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ kg s}^{-1}$ e se estende durante todo o processo (Figura 3.1.10 (c)). A segunda fase da cinética de secagem é caracterizada pelo elevado conteúdo de água líquida que deixa o meio poroso (drenagem), resultando em rápida redução de $X_{b,s}$. (Figura 3.1.10(a)). No intervalo entre os instantes 50 e 60 s de processo, a intensidade das taxas de escoamento da água na forma líquida e vapor que deixam o meio poroso se invertem, ou seja, a drenagem da água passa a ser preferencialmente na forma de vapor. Após os 60 s, as taxas de escoamento da água líquida tendem a zero e o transporte de umidade para fora do meio poroso é exclusivamente na forma de vapor de água, caracterizando a terceira fase da cinética de secagem. Durante os primeiros 210 s de processo, cerca de 79 % da água que deixou o meio poroso estava na forma líquida e 21 % estava na forma vapor.

Quando a superfície inferior do meio poroso é fechada, uma quantidade maior de água líquida deixa a amostra através da superfície radial quando comparado ao modelo com a superfície aberta (Figura 3.1.10 (b)), resultante do maior aumento da pressão interna. Porém, quanto a superfície inferior é aberta, a água pode deixar o meio poroso por ambas as extremidades axiais. Estes dois efeitos (aumento da pressão no Modelo I e a maior área superficial para drenagem no Modelo II) se equivalem, e este comportamento é responsável pelas cinéticas de secagem previstas pelos Modelos I e II serem parecidas (Figura 3.1.10 (a)).

Figura 3.1.10 Dados cinéticos da secagem. (a) umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelos Modelos I e II; (b) Taxa de escoamento da água na forma líquida que deixa o meio poroso; (c) Taxa de escoamento da água na forma vapor que deixa o meio poroso.



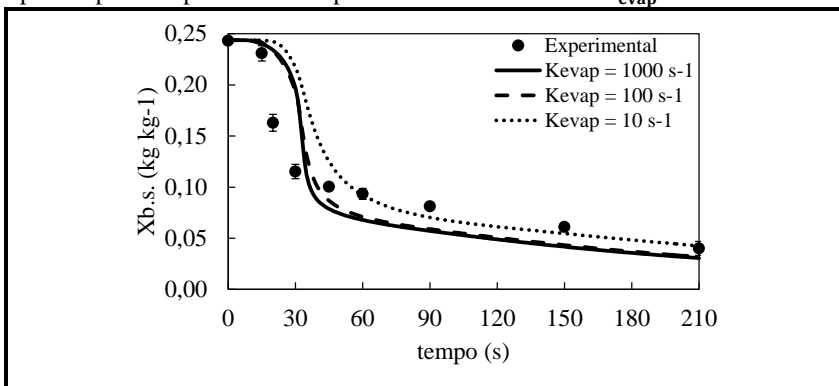
3.1.4.3 Validação experimental e análise paramétrica

Os parâmetros do processo: temperatura inicial do meio poroso (T_0), pressão da câmara de vácuo (P^{ch}) e a potência micro-ondas (Q_0), e as propriedades físicas do meio poroso: constante de mudança de fase (K_{evap}) e permeabilidade intrínseca da fase líquida ($k_{in,l}$), foram analisados numericamente e os resultados comparados aos dados experimentais da cinética de secagem.

Constante de mudança de fase

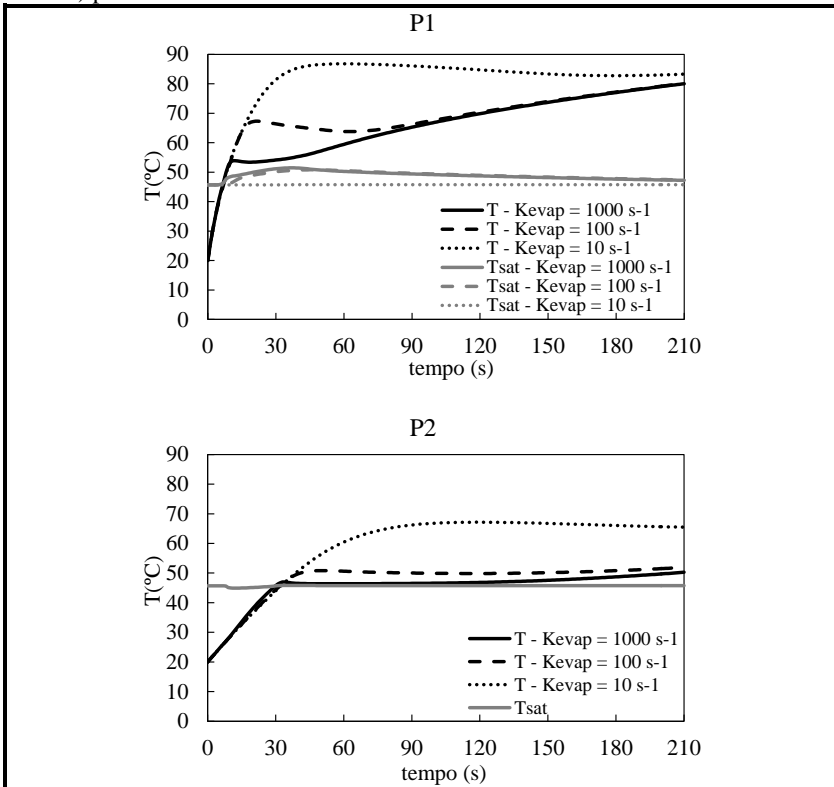
Para avaliar o efeito da constante de mudança de fase sobre a dinâmica do processo de secagem foram assumidos três valores: 10, 100 e 1000 s^{-1} . Na Figura 3.1.11 estão ilustradas as cinéticas de secagem obtidas para cada valor de K_{evap} comparadas aos valores experimentais para o Modelo I. Conforme o valor de K_{evap} diminui, o tempo necessário para que a mudança de fase aumenta, assim a velocidade de redução do conteúdo de água é menor (Figura 3.1.11).

Figura 3.1.11 Dados cinéticos da secagem: umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelo Modelo I para diferentes valores de K_{evap} .



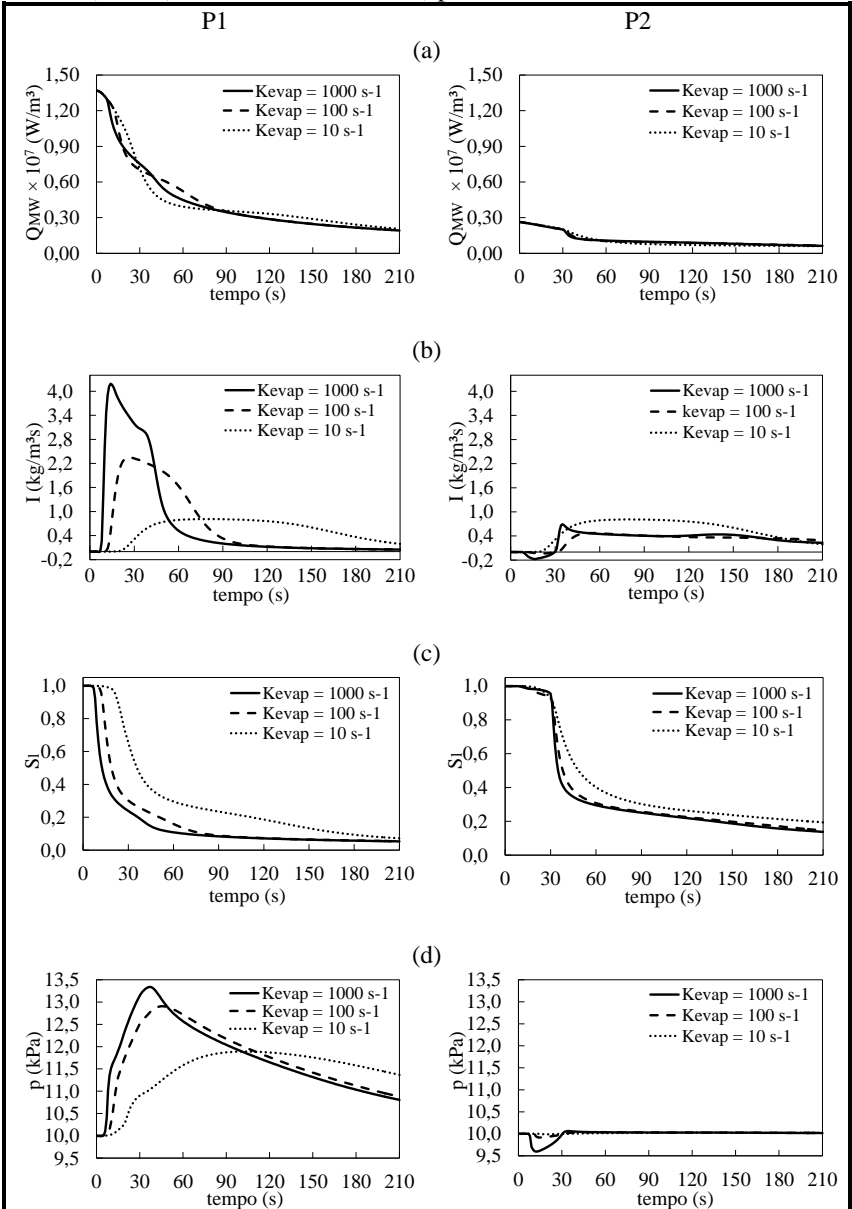
Quanto menor o valor de K_{evap} , menor é a quantidade de energia associada ao resfriamento evaporativo e conseqüentemente a temperatura do meio pode ser elevada acima da temperatura de saturação da água líquida. Esse comportamento é observado na Figura 3.1.12, que apresenta os perfis de temperatura e temperatura de saturação da água em dois pontos distintos do domínio de cálculo: P1-centro ($r = 1\ mm$, $z = H/2$) e P2-superfície ($r = R-1\ mm$ e $z = H-1\ mm$).

Figura 3.1.12 Perfis de temperatura (linhas pretas) e de temperatura de saturação da água (linhas cinzas) em: P1 ($r = 1 \text{ mm}$, $z = H/2$) e P2 ($r = R-1 \text{ mm}$, $z = H-1 \text{ mm}$) para o Modelo I.



Em ambos os pontos, a temperatura ultrapassa a temperatura de saturação da água e essa diferença é maior quanto menor o valor de K_{evap} . A diferença de temperatura em P1 é maior do que em P2, pois há concentração da potência dissipada no centro da amostra (Figura 3.1.13(a)). Com a redução do conteúdo de água em ambos os pontos (Figura 3.1.13 (c)) a diferença entre as temperaturas aumenta, pois há redução da intensidade das taxas de mudança de fase (Figura 3.1.13(b)), atenuando os efeitos do resfriamento evaporativo, enquanto a matriz sólida permanece dissipando energia eletromagnética. O aumento da temperatura de saturação da água ilustrado na Figura 3.1.12 é resultado do aumento da pressão no interior da amostra (Figura 3.1.13(d)).

Figura 3.1.13 Perfis de (a) dissipação de energia eletromagnética; (b) taxa de mudança de fase; (c) saturação da fase líquida e (d) pressão, em P1 ($r = 1$ mm, $z = H/2$) e P2 ($r = R-1$ mm, $z = H-1$ mm) para o Modelo I.



Permeabilidade intrínseca da fase líquida

Foram considerados valores de permeabilidade intrínseca variando dentro da faixa de valores observados experimentalmente (entre 10^{-12} e 10^{-11} m²) para as amostras em estudo. Quanto menor a permeabilidade intrínseca do meio poroso maior é a resistência ao escoamento das fases fluidas e conseqüentemente menor é a velocidade de secagem da amostra (Figura 3.1.14 (a)).

Temperatura inicial do meio poroso

Nos experimentos de impregnação do meio poroso os valores da temperatura da água ficaram compreendidos entre 18 e 22 C. Para avaliar o efeito de T_0 na cinética de secagem foram assumidos dois senários de condição inicial: 18 e 22 °C. Para a maior T_0 , o tempo de duração da primeira fase da cinética de secagem é menor, pois a quantidade de energia necessária para atingir a temperatura de saturação da água é (Figura 3.1.14(b)).

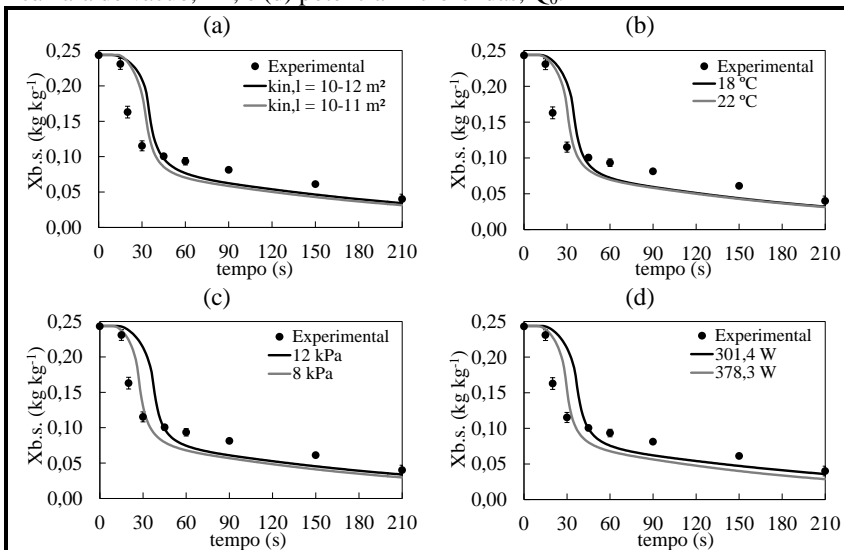
Pressão da câmara de secagem

Os experimentos de secagem foram conduzidos em uma pressão média de 10 kPa, mas durante a execução dos experimentos algumas variações na ordem de 2 kPa foram observadas. Para avaliar o efeito da pressão da câmara de vácuo na cinética de secagem foram consideradas duas condições limites: 8 e 12 kPa. Quanto menor a pressão da câmara de secagem menor é a temperatura de saturação da água e conseqüente menor é o tempo de duração da primeira fase da cinética de secagem (Figura 3.1.14(c)).

Potência Micro-ondas

Para avaliar o efeito da intensidade da potência micro-ondas no processo de secagem, foram utilizados os valores experimentais de potência dissipada de 301,4 (valor mínimo) e 378,3 W (valor máximo), para estimar o valor do parâmetro Q_0 (Equação 3.2.52). Para a maior quantidade de energia eletromagnética dissipada na amostra, maior foi a velocidade de perda de umidade do meio poroso durante a secagem (Figura 3.1.14(d)).

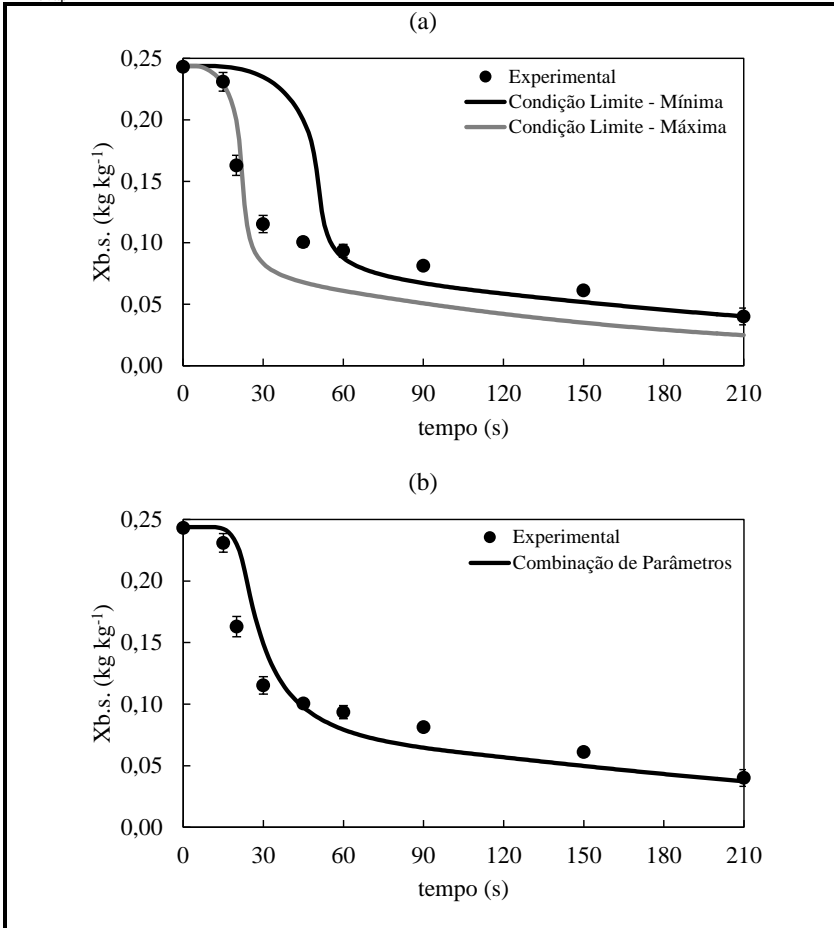
Figura 3.1.14 Dados cinéticos da secagem: umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelo Modelo I considerando diferentes valores de (a) permeabilidade intrínseca, $k_{in,l}$; (b) temperatura inicial, T_0 ; (c) pressão da câmara de vácuo, P^{ch} ; e (d) potência micro-ondas, Q_0 .



Efeito combinado dos parâmetros

As cinéticas de secagem apresentadas na Figura 3.1.15(a) foram obtidas com duas combinações de valores de parâmetros de processo e propriedades físicas. A primeira combinação foi denominada de condição limite mínima: $T_0 = 18^\circ\text{C}$, $P^{ch} = 12 \text{ kPa}$, e $Q_{0,exp} = 301,4 \text{ W}$, $k_{in,l} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (resultados representados pela linha preta na Figura 3.1.14) e a segunda combinação foi denominada de condição limite máxima: $T_0 = 22^\circ\text{C}$, $P^{ch} = 8 \text{ kPa}$, e $Q_{0,exp} = 378,3 \text{ W}$, $k_{in,l} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ (resultados representados pela linha cinza na Figura 3.1.14). A condição de limite máxima descreveu melhor os dados experimentais da segunda fase da cinética de secagem, enquanto a condição de limite mínima descreveu melhor os dados da terceira fase da cinética de secagem. Este resultado indica que possíveis anisotropias presentes no meio poroso e variações das condições de processo durante a secagem podem afetar a qualidade das previsões geradas pelo modelo. Para a condição limite máxima considerando o $K_{evap} = 10 \text{ s}^{-1}$ a previsão gerada pelo modelo se aproxima ainda mais das condições experimentais, conforme ilustrado na Figura 3.1.15(b).

Figura 3.1.15 Dados cinéticos da secagem: umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelo Modelo I considerando: (a) as condições limites máximas e mínimas do processo e o $K_{\text{evap}} = 1000 \text{ s}^{-1}$; (b) as condições limites máximas e o $K_{\text{evap}} = 10 \text{ s}^{-1}$.



Os resultados das simulações numéricas apresentaram o comportamento qualitativo idêntico ao revelado pela cinética experimental. Utilizando uma combinação de valores de parâmetros de processo e propriedades físicas os dados experimentais da cinética de secagem puderam ser reproduzidos adequadamente e esses resultados indicam que as hipóteses consideradas na formulação matemática do

fenômeno foram adequadas para descrever o processo de secagem com micro-ondas a vácuo.

3.1.5 Conclusões

O modelo matemático proposto nesse trabalho é capaz de descrever a dinâmica do processo de secagem de um meio poroso rígido em um secador de micro-ondas a vácuo. O modelo bidimensional axissimétrico acopla os fenômenos de transporte de calor, massa e quantidade de movimento, descrevendo detalhadamente a evolução temporal e espacial da distribuição de temperatura, umidade e pressão no interior do meio poroso.

O modelo proposto descreveu adequadamente os dados experimentais da cinética de secagem do meio poroso indicando que as hipóteses assumidas na formulação matemática foram adequadas para descrever o processo de secagem. Além disso, o modelo demanda baixo recurso computacional para a resolução numérica, desta forma é possível obter um grande volume de resultados em curtos períodos de tempo.

A formulação do modelo considera um meio poroso rígido, portanto, deve ser utilizado estritamente para estudar o processo de secagem de materiais que não sofram grandes deformações durante a desidratação, caso contrário, modelos de deformação devem ser considerados para contemplar o fenômeno.

3.2 ESTUDO 2 – SECAGEM MICRO-ONDAS A VÁCUO: ACOPLAMENTO DOS FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS E DE TRANSPORTE MULTIFÁSICO EM MEIO POROSO

3.2.1 Introdução

A secagem com micro-ondas a vácuo é muito empregada na desidratação de alimentos e outros materiais biológicos termossensíveis, em geral meios porosos, pois o processo pode ser conduzido em baixas temperaturas e em baixas concentrações de oxigênio (ZHANG et al., 2006). Neste processo, a evaporação da água ocorre abaixo da superfície do meio e provoca o aparecimento de gradientes de pressão, responsáveis pelo escoamento de água e vapor na rede de canais da matriz porosa e pela deformação da estrutura do produto (RAKESH e DATTA, 2011; RAKESH et al., 2012; ZHU et al., 2015; GULATI, ZHU e DATTA, 2016), podendo então ser utilizado para modificar a

microestrutura do material desidratado (MONTEIRO, CARCIOFI e LAURINDO, 2016; PU e SU, 2017).

A conversão da energia eletromagnética em energia térmica é resultado de dois mecanismos: rotação dipolar e condução iônica, ambos causados pela polarização oscilatória dos campos elétricos (DATTA e ANATHESWARAN, 2001). No processo de secagem, as micro-ondas penetram no meio a ser seco e convertem parte da sua energia em energia térmica, a qual é proporcional à intensidade local do campo elétrico (SADIKU, 2012). A distribuição dos campos eletromagnéticos depende de inúmeros fatores, incluindo: as dimensões e a geometria da cavidade do forno de micro-ondas; a posição, as dimensões, a geometria, a temperatura e a composição da amostra; e a frequência de propagação das ondas eletromagnéticas (DATTA e ANATHESWARAN, 2001).

No processo de secagem com micro-ondas, há um complexo acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e de transporte de calor e massa. Durante a secagem, a temperatura do meio aumenta e o conteúdo de umidade diminui, tais alterações modificam localmente as propriedades dielétricas do material e conseqüentemente a distribuição dos campos eletromagnéticos (ZHU et al., 2015; GULATI, ZHU e DATTA, 2016). Entretanto, obter informações quantitativas sobre as distribuições da dissipação da energia micro-ondas, da temperatura, da pressão e da umidade são difíceis e caras de serem obtidas por meio de técnicas experimentais. Uma alternativa é aliar à investigação, estudos de modelagem matemática e simulação numérica (DATTA et al., 2012).

O aquecimento eletromagnético pode ser descrito matematicamente por três abordagens: a Equação de Lambert, as Equações de Maxwell resolvidas apenas no meio dielétrico e as Equações de Maxwell resolvidas no meio e na cavidade do forno micro-ondas. A Equação de Lambert é uma abordagem mais simplificada e considera que a quantidade de energia dissipada decai exponencialmente da superfície em direção ao interior do meio (LU, TANG e LIANG, 1998; SANGA, MUJUMDAR e RAGHAVAN, 2002; SALAGNAC, GLOUANNEC, LECHARPENTIER, 2004; ARBALLO et al., 2012, 2014; KUMAR et al., 2016a, 2016b; JIANG et al., 2017). Este comportamento é apropriado para meios relativamente grandes, ou seja, nas quais os fenômenos de reflexão da onda eletromagnética no interior deste meio possam ser desprezados (AYAPPA et al., 1991). A segunda abordagem consiste em resolver as Equações de Maxwell no interior do alimento, considerando que a radiação eletromagnética incide com a mesma intensidade e na direção normal à toda superfície do meio

(TURNER e JOLLY 1991; MARRA, De BONIS e RUOCCO, 2010). Uma abordagem mais completa é obtida resolvendo as Equações de Maxwell para toda a cavidade, incluindo o meio dielétrico e o ar ao redor (MALAFRONTÉ et al., 2012; ZHU et al., 2015; GULATI, ZHU e DATTA, 2016).

Os fenômenos de transporte governantes da secagem de sólidos porosos por micro-ondas podem ser descritos, mais simplificada, por mecanismos de difusão de calor e massa em um meio contínuo utilizando-se de coeficientes efetivos de transferência (LU, TANG e MOA, 1998; SANGA, MUJUMDAR e RAGHAVAN, 2002; MARRA, De BONIS e RUOCCO, 2010; MALAFRONTÉ et al., 2012; ARBALLO et al., 2012; KUMAR et al., 2016b; JIANG et al., 2017) ou por modelos que consideram a estrutura porosa e incluem os fenômenos de difusão molecular, capilaridade e/ou escoamento hidrodinâmico. Estes modelos idealizam um meio poroso, que pode ser rígido ou deformável, preenchido por uma fase líquida, composta por água livre ou livre com uma fração ligada, e uma fase gasosa, composta por vapor de água ou por uma mistura de vapor de água e ar seco (TURNER e JOLLY, 1991; KOUMOUTSAKOS, AVRAMIDIS, HATZIKIRIAKOS, 2001; SALAGNAC, GLOUANNEC, LeCHARPENTIER, 2004; LI, ZHANG e LI, 2008; ZHU et al., 2015; KUMAR et al., 2016a; GULATI, ZHU e DATTA, 2016).

O objetivo do presente estudo é propor um modelo matemático para descrever o processo de secagem com micro-ondas em um ambiente em pressão subatmosférica, acoplando os fenômenos de escoamento multifásico em meio porosos com as equações de Maxwell do eletromagnetismo e a geração e transferência de calor. As informações quantitativas obtidas foram validadas pela comparação da taxa de secagem simulada à observada experimental em meios porosos modelo.

3.2.2 Materiais e Métodos

Meios porosos rígidos foram obtidos por meio da sinterização de microesferas de vidro *soda-lime*. Os experimentos de secagem foram conduzidos em um secador construído com um forno micro-ondas doméstico adaptado com câmara de vácuo de polipropileno. Para o processo de secagem, o meio poroso foi previamente saturado com água utilizando o método de impregnação a vácuo. A amostra foi posicionada no interior da câmara do forno e o sistema de produção de vácuo foi ligado. Quando a pressão atingiu 10 kPa, o gerador de micro-ondas foi

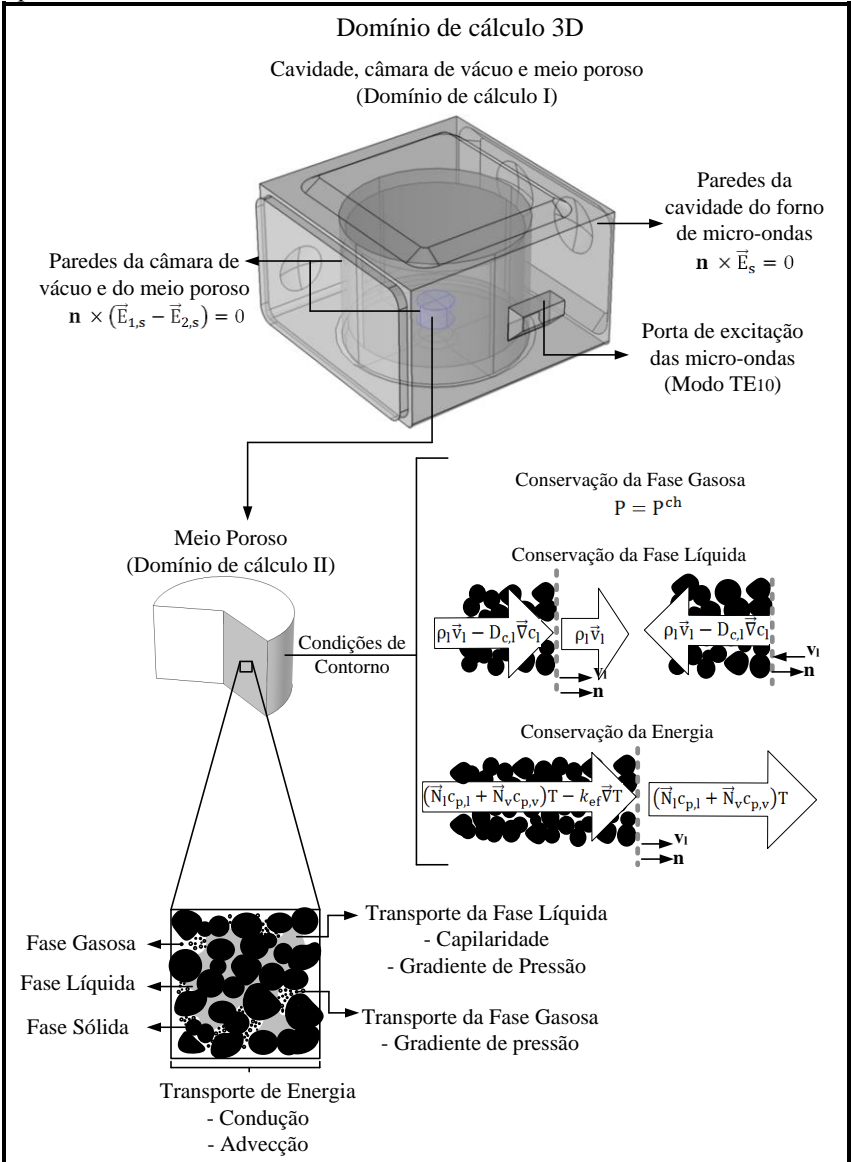
ligado em 1000 W. O conteúdo total de umidade do meio poroso ao longo do tempo (cinética de secagem) foi obtido interrompendo o processo de secagem e pesando a amostra em balança analítica. Uma descrição detalhada do método experimental foi apresentada nos itens 3.1.2.1 Meio poroso sintético, 3.1.2.2 Aparato experimental e 3.1.2.3 Procedimento experimental deste texto.

3.2.3 Modelagem Matemática

A Figura 3.2.1 apresenta esquematicamente o domínio de cálculo tridimensional, os mecanismos de transporte e condições de contorno considerados no modelo. Foram considerados dois domínios de cálculo: (I) toda cavidade do forno micro-ondas, incluindo a câmara de vácuo e o meio poroso; (II) apenas o meio poroso. As ondas eletromagnéticas, geradas pelo magnetron, propagam em ambos os domínios, enquanto os fenômenos de transporte de quantidade de movimento, calor e massa ocorrem apenas no interior do meio poroso.

Durante a realização dos experimentos o meio poroso era posicionado sobre a base da câmara de vácuo, conforme representado na Figura 3.2.1. Neste caso, a superfície inferior do meio poroso ficava em contato com a parede de polipropileno criando uma resistência ao escoamento das fases gasosa e líquida que deixavam o meio poroso por esta superfície. Para avaliar o efeito desta resistência de escoamento sobre a dinâmica do processo de secagem foram analisadas duas condições limites no modelo de secagem: (I) a extremidade inferior do meio poroso foi considerada aberta, ou seja, não há resistência ao escoamento; (II) esta mesma extremidade foi considerada fechada, ou seja, não há escoamento.

Figura 3.2.1 Representação esquemática do domínio tridimensional de cálculo, condições de contorno e mecanismos de transporte considerados no meio poroso.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.2.3.1 Modelo Eletromagnético

A distribuição dos campos eletromagnéticos foi determinada pelas equações de Maxwell do eletromagnetismo (Equações (3.2.1)-(3.2.4)) (SADIKU, 2012),

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}_s = j\omega\epsilon_0\epsilon_c\vec{E}_s \quad (3.2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_s = -j\omega\mu_0\vec{H}_s \quad (3.2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \epsilon_c\vec{E}_s = 0 \quad (3.2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_s = 0 \quad (3.2.4)$$

nas quais j é a unidade imaginária ($j = \sqrt{-1}$); ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f$, com f como a frequência de propagação das micro-ondas); μ_0 é a permeabilidade do espaço livre; ϵ_0 é a permissividade do espaço livre; ϵ_c é a permissividade relativa do meio de propagação ($\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon''$, com ϵ' como a constante dielétrica e ϵ'' como o fator de perda dielétrica); Os vetores campo elétrico (\vec{E}) e campo magnético (\vec{H}) foram definidos como funções harmônicas no tempo, expressos em termos de fasores (\vec{E}_s, \vec{H}_s), conforme as Equações (3.2.5) e (3.2.6).

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{E}_s(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (3.2.5)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{H}_s(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (3.2.6)$$

nas quais x, y e z são as coordenadas cartesianas do domínio de cálculo, t é o tempo e Re refere-se ao conjunto dos números reais.

As condições de contorno do modelo foram selecionadas para três condições distintas: (I) interface amostra-cavidade, cavidade-câmara de vácuo e câmara de vácuo-amostra; (II) interface cavidade-paredes do forno; e (III) porta de entradas das micro-ondas (porta de excitação).

Para modelar a condição de contorno (I), foi assumido que a componente tangencial do campo elétrico é contínua na interface entre os dois meios (SADIKU, 2012), conforme descrito pela Equação (3.2.7).

$$\mathbf{n} \times (\vec{E}_{1,s} - \vec{E}_{2,s}) = 0 \quad (3.2.7)$$

na qual, $\vec{E}_{1,s}$ e $\vec{E}_{2,s}$ são os fasores campo elétrico em cada um dos meios; e \mathbf{n} é o vetor unitário normal a superfície. Um caso particular da Equação (3.2.7) foi obtido quando as paredes do forno foram assumidas

como condutores elétricos perfeitos (condutividade elétrica, $\sigma \rightarrow \infty$), ou seja, a profundidade de penetração do campo tende a zero e o índice de reflexão tende a 1 (a onda incidente é completamente refletida), resultando na Equação (3.2.8) (condição de contorno II).

$$\mathbf{n} \times \vec{E}_s = 0 \quad (3.2.8)$$

Para a condição de contorno (III) foi considerado um guia de onda de seção transversal retangular. As dimensões do guia de onda permitem que a transmissão da onda ocorra apenas no modo transversal elétrico, TE_{10} (modo dominante para guias de onda retangular). No modo TE_{10} , o campo elétrico é perpendicular à direção de propagação da onda e segue a distribuição de meia onda senoidal conforme representado pela Equação (3.2.9) (onda propagando na direção positiva de z).

$$\vec{E}_s = \begin{pmatrix} 0 \\ E_0 \sin\left(\frac{\pi x^*}{a}\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.2.9)$$

na qual E_0 é a intensidade do campo elétrico na porta de excitação; a é o lado de maior dimensão do guia de onda retangular e x^* é a posição relativa à dimensão a , com origem em $a/2$. A potência média transmitida na porta de excitação (P_{in}) pode ser relacionada com a intensidade do campo elétrico (E_0) com a Equação (3.2.10).

$$P_{in} = \frac{E_0^2 ab}{4\eta_{TE}} \quad (3.2.10)$$

na qual a e b são as dimensões da seção transversal do guia de onda, com $a > b$; e η_{TE} é a impedância intrínseca da onda no modo transversal elétrico (Equação (3.2.11)), sendo função da frequência de corte do guia de onda (f_c) (Equação (3.2.12)).

$$\eta_{TE} = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (3.2.11)$$

$$f_c = \frac{3 \times 10^8}{2a} \quad (3.2.12)$$

Conhecida a distribuição dos campos eletromagnéticos, a potência dissipada na amostra por unidade de volume em cada posição do meio poroso é estimada através do teorema de Poynting (RAKESH et al., 2010).

$$Q_{MW}(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}_s|^2 \quad (3.2.13)$$

3.2.3.2 Modelo de Transporte Multifásico no Meio Poroso

O meio poroso, consistindo de uma fase sólida (vidro), uma fase líquida (água) e uma fase gasosa (vapor de água), foi idealizado como um meio contínuo. Os mecanismos de transporte considerados no modelo foram: fluxo resultante da presença de gradientes de pressão, fluxo capilar e condução de calor, conforme ilustrado na Figura 3.2.1.

A representação do meio poroso como um meio contínuo fictício foi baseado na noção do Volume Elementar Representativo, que permite definir as grandezas como médias espaciais (WHITAKER, 1977). O volume do meio poroso (V) foi representado matematicamente pelo volume ocupado pelas fases sólidas (V_s), líquida (V_l) e gasosa (V_v), conforme a Equação (3.2.14).

$$V = V_s + V_l + V_v \quad (3.2.14)$$

A porosidade do meio (\emptyset) foi definida como a fração do volume da amostra ocupada pelo volume dos poros (V_p) que são acessíveis às fases líquida e gasosa, conforme Equação (3.2.15).

$$\emptyset = \frac{V_p}{V} = \frac{V_v + V_l}{V} \quad (3.2.15)$$

A fração volumétrica dos poros ocupada por cada uma das fases fluidas foi definida como saturação de fase. A saturação da fase líquida (S_l) e a saturação da fase gasosa (S_v) são representadas pelas Equações (3.2.16) e (3.2.17), respectivamente, e a soma das saturações de cada fase corresponde à unidade (Equação 3.2.19) (NI, DATTA e TORRANCE, 1999).

$$S_l = \frac{V_l}{V_p} = \frac{V_l}{\phi V} \quad (3.2.16)$$

$$S_v = \frac{V_v}{V_p} = \frac{V_v}{\phi V} \quad (3.2.17)$$

$$S_l + S_v = 1 \quad (3.2.18)$$

Conservação da Quantidade de Movimento Linear

O transporte das fases fluidas através do meio poroso foi descrito pela Lei de Darcy. A velocidade de escoamento da fase gasosa (\vec{v}_v) resultante do gradiente de pressão (P) no meio poroso, pode ser escrita como

$$\vec{v}_v = -\frac{k_v}{\mu_v} \vec{\nabla}P \quad (3.2.19)$$

na qual μ_v e k_v são a viscosidade e a permeabilidade da fase gasosa (KAVIANY, 1995).

O transporte da fase líquida resulta do gradiente de pressão desenvolvido no meio e da interação da fase líquida com a fase sólida (efeito capilar). Para um meio poroso não saturado, a fase líquida pode escoar de uma região de maior concentração para uma região de menor concentração como resultado da diferença relativa entre as forças de adesão e coesão que atuam sobre as moléculas da fase líquida uma com as outras e com a fase sólida, respectivamente (KAVIANY, 1995). Geralmente, esse efeito é quantificado pela pressão capilar, p_c . Nestes casos, a velocidade da fase líquida (\vec{v}_l) descrita pela lei de Darcy, considera o gradiente de pressão obtido pela diferença entre pressão da fase gasosa e pressão capilar (Equação 3.2.20).

$$\vec{v}_l = -\frac{k_l}{\mu_l} \vec{\nabla}(P - p_c) \quad (3.2.20)$$

na qual μ_l e k_l são a viscosidade e a permeabilidade da fase líquida.

A permeabilidade de meios porosos não saturados pode ser obtida pelo produto da permeabilidade intrínseca (k_{in}) e a permeabilidade relativa (k_{re}) (KAVIANY, 1995).

$$k_l = k_{in,l}k_{re,l} \quad (3.2.21a)$$

$$k_v = k_{in,v} k_{re,v} \quad (3.2.21b)$$

nas quais $k_{in,l}$ e $k_{in,v}$ são a permeabilidade intrínseca do líquido e do gás em um meio totalmente saturado, respectivamente, e $k_{re,l}$ e $k_{re,v}$ são a permeabilidade relativa do líquido e do gás respectivamente. $k_{re,\alpha}$ é uma função da saturação da fase α e varia de 0, quando não há presença da fase α , para 1, quando o meio está totalmente saturado desta fase (KAVIANY, 1995).

Conservação da Massa

A concentração volumétrica da massa de água líquida (c_l) e da massa de vapor de água (c_v) no interior da amostra é definida de acordo com as Equações (3.3.22) e (3.3.23), respectivamente.

$$c_l = \frac{m_l}{V} = \rho_l S_l \emptyset \quad (3.2.22)$$

$$c_v = \frac{m_v}{V} = \rho_v S_v \emptyset \quad (3.2.23)$$

na quais m_l e m_v são a massa de água líquida e a massa de vapor de água respectivamente; e ρ_l e ρ_v são a massa específica da água líquida e do vapor de água. A água líquida foi idealizada como um fluido incompressível ($\rho_l = \text{constante}$) e vapor de água como um gás ideal (Equação (3.2.24)).

$$\rho_v = \frac{m_v}{V_v} = \frac{M_v P}{RT} \quad (3.2.24)$$

na qual M_v é a massa molar da água, R é a constante dos gases e T é a temperatura.

As equações da conservação da fase líquida e da fase gasosa no meio poroso são, respectivamente,

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{N}_l = -\dot{i} \quad (3.2.25)$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{N}_v = \dot{i} \quad (3.2.26)$$

nas quais \dot{I} é a taxa volumétrica de mudança de fase (evaporação/condensação); \vec{N}_l é o fluxo de água líquida e \vec{N}_v é o fluxo de vapor de água, definidos como

$$\vec{N}_l = \rho_l \vec{v}_l = -\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \vec{\nabla}(P - p_c) \quad (3.2.27)$$

$$\vec{N}_v = \rho_v \vec{v}_v = -\rho_v \frac{k_{in,v} k_{re,v}}{\mu_v} \vec{\nabla}P \quad (3.2.28)$$

O fluxo de água pode ser expresso utilizando um coeficiente de difusão capilar ($D_{c,l}$) (DATTA, 2007). Assumindo que a pressão capilar dependa apenas da concentração da fase líquida no meio poroso, a Equação (3.2.27) pode ser reescrita como

$$\vec{N}_l = -\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \vec{\nabla}P_l + \rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \frac{\partial p_l}{\partial c_l} \vec{\nabla}c_l \quad (3.2.29)$$

Definindo o coeficiente de difusão capilar, $D_{c,l}$, como

$$D_{c,l} = -\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \frac{\partial p_c}{\partial c_l} \quad (3.2.30)$$

o fluxo de água, \vec{N}_l , pode ser reescrito como

$$\vec{N}_l = -\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \vec{\nabla}P - D_{c,l} \vec{\nabla}c_l \quad (3.2.31)$$

Visando facilitar a resolução matemática das equações para o escoamento multifásico, a variação espacial da fase líquida foi obtida resolvendo a equação da conservação da massa (Equação (3.2.25)) em termos de sua saturação, S_l . O valor da saturação da fase gasosa foi estimado a partir de $S_g = 1 - S_l$.

$$\frac{\partial(\rho_l S_l \phi)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[-\rho_l \frac{k_{in,l} k_{re,l}}{\mu_l} \vec{\nabla}P - D_{c,l} \vec{\nabla}(\rho_l S_l \phi) \right] = -\dot{I} \quad (3.2.32)$$

A pressão local (P) é compartilhada por todas as fases, foi calculada pela equação da conservação da fase gasosa,

$$\frac{\partial[(M_v P/RT)S_v \phi]}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[-\frac{M_v P}{RT} \frac{k_{in,v} k_{rel,v}}{\mu_v} \vec{\nabla} P \right] = \dot{I} \quad (3.2.33)$$

A taxa de mudança de fase, \dot{I} , é distribuída espacialmente e foi modelada usando uma abordagem denominada de formulação em não equilíbrio. A formulação em não equilíbrio assume que a mudança de fase não ocorre instantaneamente, ou seja, não existe equilíbrio local durante a evaporação/condensação do vapor de água na fase gasosa e da água nos poros da amostra (HALDER et al., 2007). A expressão para taxa de mudança de fase em não equilíbrio utilizada para modelar a mudança de fase no meio poroso é dada por (HALDER et al., 2007).

$$\dot{I} = K_{evap} (p_{v,eq} - P) \frac{M_v}{RT} S_v \phi \quad (3.2.34)$$

na qual $p_{v,eq}$ é a pressão de vapor de equilíbrio e K_{evap} é um parâmetro empírico relativo à mudança de fase. Para altos valores de K_{evap} o tempo para mudança de fase é pequeno e quando K_{evap} é infinitamente grande a mudança de fase é instantânea, $p_{v,eq} \approx P$, ou seja, a formulação em equilíbrio é um caso especial da formulação em não equilíbrio (HALDER et al., 2007). Na literatura é possível encontrar uma ampla faixa de valores para K_{evap} , variando entre 10^5 e 10^{-1} s^{-1} (HALDER et al., 2007; OUSEGUI et al., 2010; CHEN et al., 2014; WARNING et al., 2012, 2015; ZHU et al., 2015). Zhang et al. (2005) (apud HALDER et al., 2007) estimaram o valor de K_{evap} para a água pura na ordem de 1 s^{-1} .

A pressão de vapor de equilíbrio ($p_{v,eq}$) é dada por,

$$P_{v,eq} = a_w P^{sat} \quad (3.2.35)$$

Na qual P^{sat} é a pressão de vapor de água saturada e pode ser obtida por relações termodinâmicas, tal qual a equação de Antoine, e a_w é a atividade de água.

O meio poroso utilizado neste estudo é um material não higroscópico, em outras palavras, não há água fisicamente ligada na fase sólida. Porém, as dimensões de tamanho de poro obtidas com um leito de microesferas de vidro *solda-lime* de diâmetro médio de 150 μm , resultam no fenômeno da condensação capilar, conforme reportado por Stoklosa et al. (2012). A Equação (3.2.36) foi ajustada para descrever os

dados fornecidos por Stoklosa et al. (2012) para prever os valores de atividade de água ($0,03 \leq a_w \leq 0,96$) em função da umidade em base seca ($0,00 \leq X_{b,s.} \leq 0,60$).

$$a_w = \exp[-5,01 \exp(-95,42 X_{b,s.})] \quad (3.2.36)$$

Conservação da Energia

A hipótese de existência de equilíbrio térmico local foi assumida, isto é, em cada posição do meio poroso todas as fases compartilham a mesma temperatura,

$$T_s = T_l = T_v = T \quad (3.2.37)$$

e a conservação da energia é descrita por uma única equação (Equação 3.2.38)),

$$(\rho c_p)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{N}_l c_{p,l} + \vec{N}_v c_{p,v}) \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (k_{ef} \vec{\nabla} T) - \lambda_{ev} \dot{I} + Q_{MW} \quad (3.2.38)$$

As propriedades efetivas do meio poroso foram definidas como propriedades médias, ponderadas pelas frações mássicas ou volumétricas de cada fase (NI, DATTA e TORRANCE, 1999),

$$(\rho c_p)_{ef} = (1 - \phi) \rho_s c_{p,s} + \phi (S_l \rho_l c_{p,l} + S_v \rho_g c_{p,v}) \quad (3.2.39)$$

$$k_{ef} = (1 - \phi) k_s + \phi (S_l k_l + S_v k_v) \quad (3.2.40)$$

nas quais c_p e k são o calor específico e a condutividade térmica de cada fase, respectivamente.

O termo $\lambda_{ev} \dot{I}$ contabiliza a geração volumétrica de energia térmica cedida ou absorvida na mudança de fase, onde λ_{ev} é o calor latente de vaporização. O termo Q_{MW} contabiliza a geração volumétrica de energia térmica proveniente do aquecimento eletromagnético (Equação 3.2.13)).

Condições Iniciais

Inicialmente, assumiu-se que o meio poroso estava saturado com fase líquida (Equação 3.2.41), que a temperatura inicial é especialmente homogênea (Equação 3.2.42) e que a pressão no interior do meio poroso

era igual à pressão observada experimentalmente no interior da câmara de secagem (Equação (3.2.43)).

$$\text{C.I. para Equação (3.2.32): } S_1 = S_{10} \quad (3.2.41)$$

$$\text{C.I. para Equação (3.2.33): } P = P_0^{\text{ch}} \quad (3.2.42)$$

$$\text{C.I. para Equação (3.2.38): } T = T_0 \quad (3.2.43)$$

Condições de Contorno

Para a equação da conservação da fase gasosa (Equação (3.2.33)) a pressão do gás na superfície da amostra foi prescrita, dada por

$$P = P^{\text{ch}} \quad (3.2.44)$$

na qual P^{ch} é a pressão da câmara de vácuo mensurada durante os experimentos de secagem.

Para a equação da conservação da fase líquida (Equação (3.2.32)), foi considerado que a água líquida pode ser empurrada para fora do meio poroso quando os gradientes de pressão interna forem suficientemente elevados para vencerem as forças capilares. Uma representação esquemática da condição de contorno, Equação (3.2.45) assumida para a conservação da fase líquida está ilustrada na Figura 3.2.1.

$$\text{Se } \mathbf{n} \cdot \vec{v}_1 \geq 0, \text{ então, } -D_{c,1} \vec{\nabla} c_1 = 0 \quad (3.2.45)$$

$$\text{Se } \mathbf{n} \cdot \vec{v}_1 < 0, \text{ então, } -\rho_1 \vec{v}_1 - D_{c,1} \vec{\nabla} c_1 = 0$$

Quando o produto interno do vetor velocidade da fase líquida (\vec{v}_1) com o vetor unitário normal a superfície do meio poroso (\mathbf{n}) for positivo, o fluxo mássico capilar é nulo, em outras palavras, a água é transportada para fora do meio poroso associado ao campo de velocidades (Figura 3.2.1). Realizando um balanço de massa na interface demonstra-se a condição de fluxo capilar nulo. Quando o produto interno do vetor velocidade da fase líquida (\vec{v}_1) com o vetor unitário normal a superfície do meio (\mathbf{n}) for negativo, o fluxo mássico total é nulo, ou seja, não há água líquida sobre a superfície do meio que possa escoar para o interior da amostra (Figura 3.2.1).

Para conservação da energia (Equação (3.2.38)) foi usada uma condição de contorno de Neumann, assumindo que o fluxo condutivo na superfície da amostra para a fase gasosa externa é zero. Todo calor do

meio poroso que chega até a superfície é transportado por condução na matriz sólida ou pelo escoamento das fases fluidas. Considerando a baixa pressão no interior da câmara de vácuo, a fase gasosa no interior da câmara atua como um isolante térmico ideal, ou seja, o calor é transportado para fora do meio poroso carregado pelo escoamento das fases fluidas (Figura 3.2.1). Um balanço de energia na superfície do meio poroso revela que é possível assumir um fluxo prescrito como condição de contorno para a conservação da energia.

$$\vec{\nabla}T = 0 \quad (3.2.46)$$

3.2.3.3 Propriedades físicas e parâmetros utilizados na resolução do modelo

Os parâmetros de entrada do modelo estão listados na Tabela 3.2.1.

Tabela 3.2.1 Parâmetros do modelo matemático tridimensional.

Parâmetros	Valores	Fonte
Condições Iniciais		
Temperatura, T_0 (K)	293,15	Mensurado
Pressão, P^{ch} (kPa)	10	Mensurado
Saturação fase líquida, S_{l0}	0,999	Assumido
Meio Poroso		
Raio, R (m)	0,030	Mensurado
Altura, H (m)	0,035	Mensurado
Porosidade, \emptyset	Tabela 3.1.1	Mensurado
Porosidade aparente, \emptyset_{ap}	Tabela 3.1.1	Mensurado
Eletromagnetismo		
Potência entregue, P_{in} (W)	698	Calculado
Frequência, f (MHz)	2450	
Constante dielétrica		
água, ϵ'_1	86,5-0,33(T-273,15)	Nelson e Datta (2001)
vidro, ϵ'_s	7,3	Bansal e Doremus (1986)
gás, ϵ'_v	1	Assumido
polipropileno, ϵ'_{pp}	2,4	Calculado Anexo A.
Constante de perda		
água, ϵ''_1	13,4-0,13(T-273,15)	Nelson e Datta (2003)

vidro, ε''_s	0,051	Bansal e Doremus (1986)
vapor, ε''_v	0	Assumido
polipropileno, ε''_{pp}	0	Assumido
Transporte		
Massa molar		
líquido, M_l (kg kmol ⁻¹)	18	Bejan (2004)
vapor, M_v (kg kmol ⁻¹)	18	Bejan (2004)
Massa específica		
líquido, ρ_l (kg m ⁻³)	1000	Bejan (2004)
vapor, ρ_v (kg m ⁻³)	Equação (3.2.24)	
vidro, ρ_s (kg m ⁻³)	2482	Mensurado
Calor específico		
líquido, $c_{p,l}$ (J/kgK)	4182	Bejan (2004)
vapor, $c_{p,v}$ (J/kgK)	1870	Bejan (2004)
vidro, $c_{p,s}$ (J/kgK)	870	Bansal e Doremus (1986)
Condutividade térmica		
líquido, k_l (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,59	Bejan (2004)
vapor, k_v (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,025	Bejan (2004)
vidro, k_s (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1,03	Bansal e Doremus (1986)
Permeabilidade intrínseca		
líquido, $k_{in,l}$ (m ²)	$4,92 \times 10^{-12}$	Mensurado
vapor, $k_{in,v}$ (m ²)	Eq. (3.1.44)	Jones e Owens (1980)
Permeabilidade relativa		
líquido, $k_{re,l}$	Eq. (3.1.45)	Verma et al. (1985)
vapor, $k_{re,v}$	Eq. (3.1.46)	Verma et al. (1985)
Coeficiente de difusão capilar, $D_{c,l}$ (m ² s ⁻¹)		
	Eq. (3.1.48)	Calculado a partir dos dados de She e Sleep (1998)
Viscosidade		
líquido, μ_l (Pa s)	$2,74 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{1735,5}{T}\right)$	McCabe et al. (2005)
vapor, μ_v (Pa s)	$0,017 \times 10^{-3} \left(\frac{T}{273}\right)^{0,35}$	McCabe et al. (2005)

Constante de evaporação, K_{evap} (s^{-1})	100	Assumido
Calor latente de vaporização, λ (J/kg)	$\frac{10^7}{2,385 \times 10^{-3} p^{0,4343} + 4,034}$	Elliott e Lira, (1999) apud Warming et al. (2012)
Pressão de saturação da água P^{sat} (Pa)	$10^3 \exp\left(16,3872 - \frac{3885,7}{T - 42,98}\right)$	Smith, Van Ness e Abbott, (2007)

A permissividade relativa complexa do meio poroso e o método para a determinação do valor da potência entregue pelo magnetron no forno estão apresentados a seguir.

Propriedades dielétricas

As propriedades dielétricas do meio poroso têm grande influência sobre a distribuição da temperatura no aquecimento micro-ondas. Essas propriedades são influenciadas pela temperatura e composição da amostra. Durante o processo de secagem, o teor de umidade da amostra é reduzido, a temperatura aumenta e há geração de vapor, que foi assumido como não absorvedor de energia eletromagnética. Para contabilizar as mudanças nas propriedades dielétricas do material foi utilizada a equação de Landau e Lifhitz, Looyeang (Equação (3.2.47)) (NELSON, 1991).

$$\epsilon_c^{1/3} = (1 - \emptyset)(\epsilon'_s - j\epsilon''_s)^{1/3} + S_1 \emptyset (\epsilon'_1 - j\epsilon''_1)^{1/3} + S_v \emptyset (\epsilon'_v - j\epsilon''_v)^{1/3} \quad (3.2.47)$$

Os valores da constante dielétrica, ϵ' , e da constante de perda, ϵ'' , de cada uma das fases estão sumarizados na Tabela 3.2.1. A equação de Landau e Lifhitz, Looyeang foi utilizada por Zhu et al. (2015) e Gulati et al. (2016) para simular o processo de secagem de batatas com micro-ondas e também para prever as propriedades dielétricas de pães por Liu, Tang e Moa (2009).

Potência Entregue pelo Magnetron

A potência entregue pelo magnetron (P_{in}) em um forno micro-ondas é inferior à potência nominal do sistema de geração. Um aspecto importante na simulação do processo é a definição da intensidade do campo elétrico na porta de excitação (E_0), ou seja, a real potência entregue pelo magnetron (P_{in}). Para esta determinação foi adotada a abordagem de Zhang e Datta (2003), que compara a potência absorvida

por uma carga de água aquecida no forno micro-ondas (determinada termodinamicamente a partir da variação da temperatura) e a potência total dissipada na carga calculada pelo modelo eletromagnético. Os experimentos de aquecimento de água foram realizados em quadruplicata utilizando uma massa de água de 2 kg. A P_{in} estimada de 698 W, aproximadamente 70 % do valor da potência nominal. Solstysiak, Erle e Celuch (2008) obtiveram valores de potência entregue entre 90 e 75% da potência nominal em dois fornos de micro-ondas domésticos. O Anexo A descreve em detalhes o método.

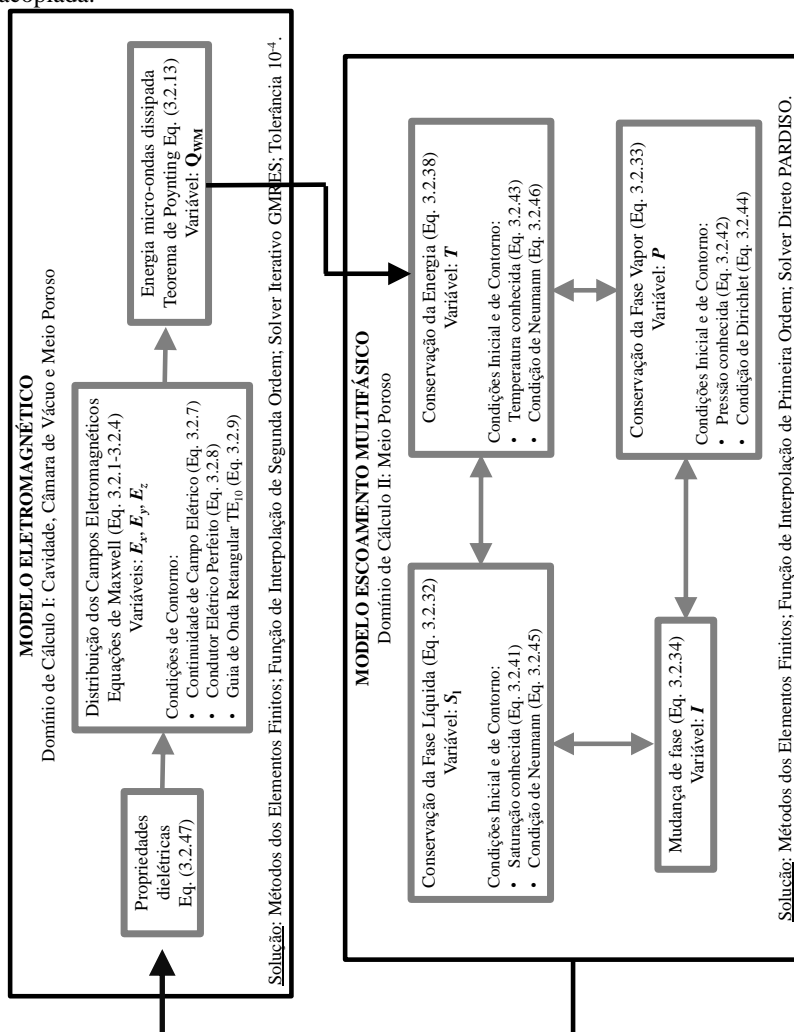
3.2.3.4 Resolução Numérica

Uma representação esquemática do domínio de cálculo tridimensional foi ilustrada na Figura 3.2.1. Os fenômenos eletromagnéticos e de transporte são completamente acoplados. O aquecimento por micro-ondas é contabilizado como um termo fonte na equação da conservação da energia e as propriedades dielétricas do meio poroso são funções da temperatura e do conteúdo de água. O aquecimento por micro-ondas é proporcional à intensidade dos campos elétricos locais e a distribuição dos campos, por sua vez, é definida pela impedância do sistema. O fluxograma esquemático da Figura 3.2.2 demonstra como as equações governantes dos fenômenos eletromagnéticos e de transporte estão acopladas e foram resolvidas.

O modelo matemático foi resolvido com o método dos elementos finitos utilizando o software comercial COMSOL Multiphysics® versão 5.3. O modelo eletromagnético foi resolvido numericamente de forma desacoplada do modelo de transporte multifásico em meio poroso. Conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3.2.2 as equações de Maxwell foram resolvidas, em termos das variáveis E_x , E_y e E_z , no domínio de Cálculo I (primeiro quadro do fluxograma). Conhecida a distribuição dos campos elétricos no interior do secador, era calculada a quantidade de energia micro-ondas dissipada no meio poroso, Q_{MW} . Essa quantidade de energia era contabilizada como o termo fonte na equação da conservação da energia e o modelo de transporte multifásico em meio poroso era resolvido no domínio de Cálculo II (segundo quadro do fluxograma). As equações da conservação da fase líquida, da fase gasosa e da energia foram resolvidas em termos da saturação da fase líquida (S_l), da pressão (P) e da temperatura (T), respectivamente, de forma totalmente acoplada, conforme proposto em trabalhos prévios (HALDER et al., 2007; RAKESH et al., 2012; CHEN et al., 2014; ZHU et al., 2015, WARNING et al., 2015). Conhecida a distribuição de

temperatura, pressão e conteúdo de umidade no meio poroso, os valores das propriedades dielétricas eram então atualizados e o modelo eletromagnético recalculado. Os resultados do modelo eletromagnético alimentavam novamente o modelo de transporte, com os resultados deste, atualizavam-se as propriedades dielétricas, ou seja, o processo de cálculo seguia um fluxo cíclico de informações em cada intervalo de tempo calculado.

Figura 3.2.2 Fluxograma esquemático da resolução numérica do modelo matemático. Os quadros em preto indicam que os modelos, eletromagnético e de transporte em meio poroso, foram resolvidos separadamente de forma desacoplada. Os quadros em cinza indicam as equações resolvidas em cada modelo. As setas em preto indicam a direção do fluxo de informação no ciclo de cálculo. As setas em cinza, no quadro do modelo eletromagnético, indicam a sequência de cálculos e as setas em cinza com duas pontas, no quadro do modelo de transporte indicam que as equações são resolvidas de forma acoplada.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

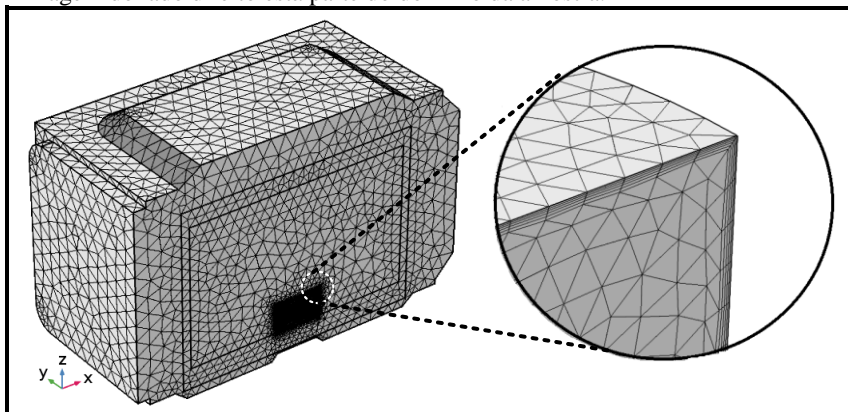
As equações de Maxwell do eletromagnetismo foram resolvidas na cavidade e na amostra utilizando o módulo *RF Module* com a interface *Frequency Domain*. As equações do modelo eletromagnético foram resolvidas utilizando o solver iterativo GMRES (*Generalized Minimal Residual Method*) com o pré-condicionador *geometric multigrid* e tolerância de 10^{-4} . As equações da conservação das fases líquida e gasosa foram resolvidas utilizando os módulos *Chemical Reaction Engineering Module* e *CFD Module* com as interfaces *Transport of Dilute Species* e *Darcy's Law*, respectivamente, e a conservação da energia foi resolvida com o módulo *Heat Transfer Module* na interface *Heat Transfer in Fluids*. As equações do modelo de escoamento multifásica em meio poroso foram resolvidas de forma acoplada utilizando o solver direto de resolução de sistemas lineares PARDISO. O método PARDISO é baseado nos métodos de decomposição LU. O problema transiente foi resolvido com método *Backward Differentiation Formula* (BDF) utilizando um passo de tempo adaptativo. Os métodos BDF são definidos por fórmulas de diferenciação *backward*, ou seja, estabelecidas no sentido contrário ao sentido da evolução da integração do problema de valor inicial.

O domínio do modelo foi discretizado utilizando elementos tetraédricos, com função de interpolação de segunda ordem para o modelo eletromagnético e funções de interpolação de primeira ordem para os modelos de transporte. A Figura 3.2.3 ilustra a malha utilizada na resolução do modelo. O software COMSOL Multiphysics® sugere a utilização de seis elementos com função de interpolação de segunda ordem por comprimento de onda (λ) para obter resultados do modelo eletromagnético independentes do tamanho da malha. Utilizando a Equação (3.2.48) (SADIKU, 2012) foi calculado o comprimento da onda eletromagnética na frequência de 2450 MHz, no ar, 12,24 cm, no polipropileno, 7,90 cm, e no meio poroso, variando entre 3 cm ($S_1 = 1$) e 6 cm ($S_1 = 0$). Dessa forma, foram definidos três tamanhos de elementos na geração da malha tetraédrica: no domínio do ar, o tamanho máximo do elemento foi de 2 cm, na câmara de polipropileno foi de 1,3 cm e no meio poroso foi de 0,3 cm com refino de malha na interface meio poroso/cavidade, conforme ilustrado na Figura 3.2.3. Um estudo de malha foi realizado no meio poroso e justifica a escolha de 0,3 cm para discretizar o domínio. A malha utilizada na resolução do modelo contou com 243 852 elementos, totalizando 1 762 671 graus de liberdade.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right]}} \quad (3.2.48)$$

Na qual, ε' é a constante dielétrica e ε'' é a constante de perda dielétrica do meio no qual a onda eletromagnética está propagando (ar, câmara de vácuo e meio poroso).

Figura 3.2.3 Representação da malha utilizada na resolução numérica do modelo matemático. Para ilustrar os diferentes tamanhos de elementos metade do domínio de cálculo está representado. Na imagem do lado esquerdo está o domínio incluindo cavidade, câmara de vácuo e amostra; e em detalhe na imagem do lado direito está parte do domínio da amostra.



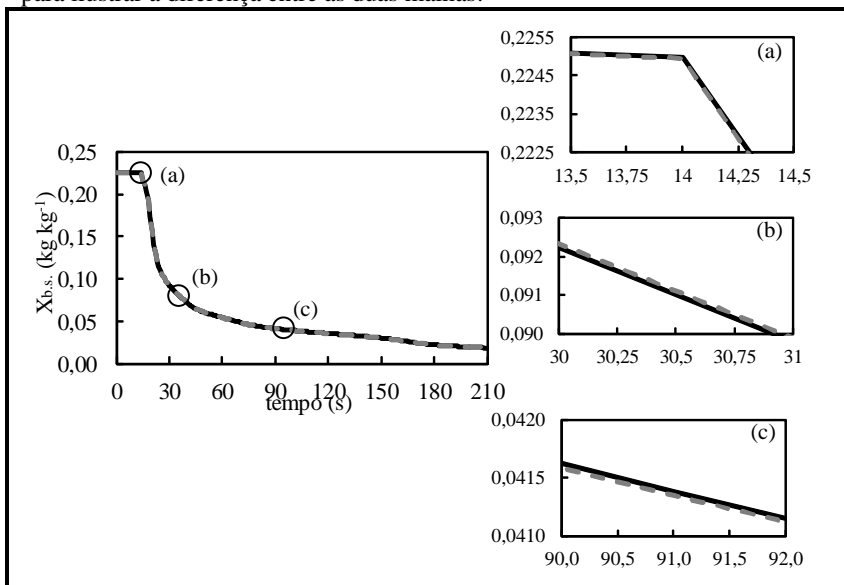
3.2.4 Resultados e Discussões

3.2.4.1 Estudo de Malha e Conservação Numérica da Massa

Uma análise de sensibilidade da malha está apresentada na Figura 3.2.4, na qual é comparada a solução numérica obtida com o domínio do meio poroso discretizado com elementos de 0,3 cm (243 852 elementos, totalizando 1 762 671 graus de liberdade) e de 0,2 cm (446 145 elementos, totalizando 3 317 857 graus de liberdade). Observou-se que a diferença relativa absoluta média do valor de $X_{b,s}$, obtido pela solução de cada umas das malhas propostas foi inferior a 0,2%. Além disso, o grande aumento do tempo de cálculo com o aumento do número de

divisões do domínio pode justificar a utilização de uma malha com menor resolução espacial. Em um processador Intel CORE i7-4790K com 32 GB de memória RAM, os tempos de cálculo são aproximadamente quatro vezes maiores quando o tamanho de elemento da malha no domínio do meio poroso passa de 0,3 cm (cerca de 80 horas) para 0,2 cm (319 horas). Utilizando uma malha com tamanho de elementos de 0,4 cm no meio poroso foi observada uma queda na velocidade de convergência da resolução numérica do modelo e em alguns casos a falta de convergência.

Figura 3.2.4 Cinética de secagem do meio poroso obtida com a resolução numérica do modelo utilizando elementos de malha no domínio de cálculo II (meio poroso) com tamanhos de 0,3 cm (linha preta) e 0,2 cm (linha cinza), respectivamente. São apresentados também, em detalhe, três pontos da curva para ilustrar a diferença entre as duas malhas.



Para verificar a conservação da massa durante a resolução numérica do modelo, a quantidade total de água remanescente no meio poroso (m_{H_2O}), após um intervalo de tempo ($\Delta t = t - t_0$) foi calculada pela Equação (3.2.49). Este valor foi comparado à massa inicial descontada da quantidade total de água que saiu pelas superfícies do meio poroso neste mesmo Δt (água líquida, Equação (3.2.50) e vapor de água, Equação (3.2.51)).

$$m_{H_2O} = \iiint \phi[\rho_l S_l + \rho_v(1 - S_l)] dV \quad (3.2.49)$$

$$m_{H_2O,l} = \int_{t_0}^t \left(\iint \rho_l \vec{v}_l dA \right) dt \quad (3.2.50)$$

$$m_{H_2O,v} = \int_{t_0}^t \left(\iint \rho_v \vec{v}_v dA \right) dt \quad (3.2.51)$$

Para o tempo de secagem $\Delta t = 210$ s, a diferença percentual no valor da massa de água remanescente no meio poroso foi de 0,89 %. Esse resultado é um indicativo de que implementação e a resolução numérica do modelo na plataforma de cálculo foram adequadas.

3.2.4.2 Dinâmica do processo de secagem

A Figura 3.2.5 apresenta os perfis de distribuição dos campos elétricos no interior da cavidade e no interior do meio poroso para a solução do Modelo I. Os resultados são referentes ao plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo (corte ilustrado na Figura 3.2.3).

Observa-se que os perfis de distribuição dos campos são continuamente modificados em ambos os domínios durante a secagem. A alteração do valor das propriedades dielétricas do meio poroso, provocada pelo aumento da temperatura e redução do conteúdo de água, é responsável pela modificação dos modos de ressonância desenvolvidos no interior da cavidade e da amostra. A Figura 3.2.6 apresenta a evolução temporal dos valores médios das propriedades dielétricas do meio poroso.

Além dos efeitos provocados pela modificação das propriedades dielétricas, os perfis de distribuição dos campos elétricos no interior da amostra dependem também de suas dimensões e geometria. Um fato bem conhecido do aquecimento micro-ondas é a concentração de dissipação de energia em arestas e no interior de amostras com superfície curvadas. Tal fenômeno é resultado da sobreposição das ondas eletromagnéticas criando *hot spots* (ZHANG et al., 2005a, 2005b). Conforme as dimensões de uma amostra aumentam, os efeitos provocados pelas sobreposições das ondas são atenuados. Para amostras de grandes dimensões as maiores intensidades de campo elétrico estão localizadas próximas da superfície e decrescem conforme a onda propaga em direção ao interior do meio (ZHANG e DATTA, 2005a; 2005b; AYAPPA et al., 1991; OLIVEIRA e FRANÇA, 2002). No

presente estudo, os efeitos de sobreposição de onda foram previstos pelo modelo eletromagnético e estão de acordo com os critérios propostos por Ayappa et al. (1991) e Oliveira e França (2002), que estimam dimensões críticas para a amostra, abaixo das quais, os efeitos de reflexão da onda no interior do meio dielétrico são importantes.

Figura 3.2.5 Distribuição dos campos elétricos, E (V/m), no interior da cavidade e no interior da amostra nos tempos de 10, 30 e 50 s do processo de secagem para o Modelo I. Resultados no plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo.

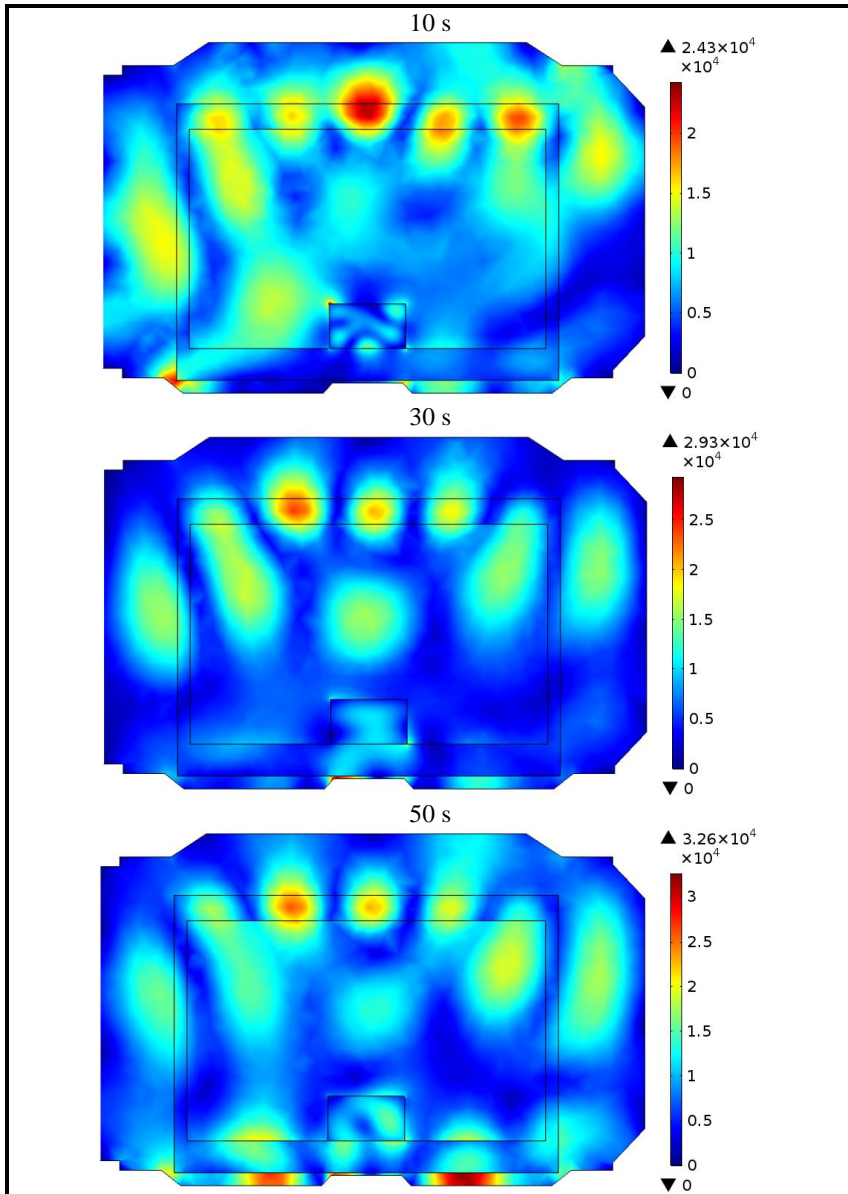
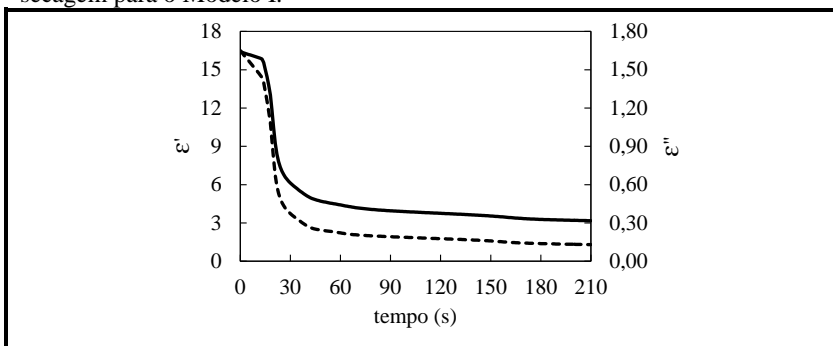


Figura 3.2.6 Valores médios da constante dielétrica, ϵ' (linha contínua), e da constante de perda, ϵ'' (linha tracejada), do meio poroso durante o processo de secagem para o Modelo I.



A evolução temporal da quantidade total de energia eletromagnética dissipada no meio poroso está apresentada na Figura 3.2.7. A tendência decrescente na quantidade de energia dissipada em função do tempo é resultado da redução do conteúdo de água e do aumento de temperatura do meio. Na mesma figura observa-se também a presença de picos de dissipação de potência. A quantidade de energia eletromagnética dissipada na amostra é proporcional à intensidade dos campos elétricos locais (SADIKU, 2010). Com a modificação da distribuição dos campos elétricos durante a secagem (Figura 3.2.5) há conseqüentemente a modificação dos perfis de dissipação de energia eletromagnética no meio poroso (Figura 3.2.8), levando a diferentes quantidades totais de energia dissipadas no meio durante a secagem. A energia micro-ondas total dissipada no meio poroso em função do tempo está ilustrada na Figura 3.2.7.

Figura 3.2.7 Quantidade total de energia eletromagnética dissipada no meio poroso durante o processo de secagem para o Modelo I.

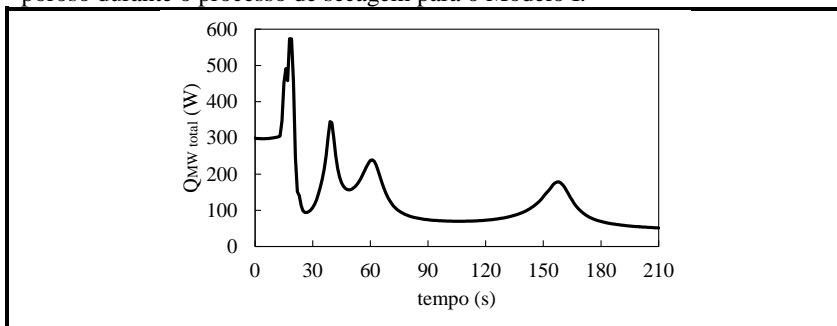
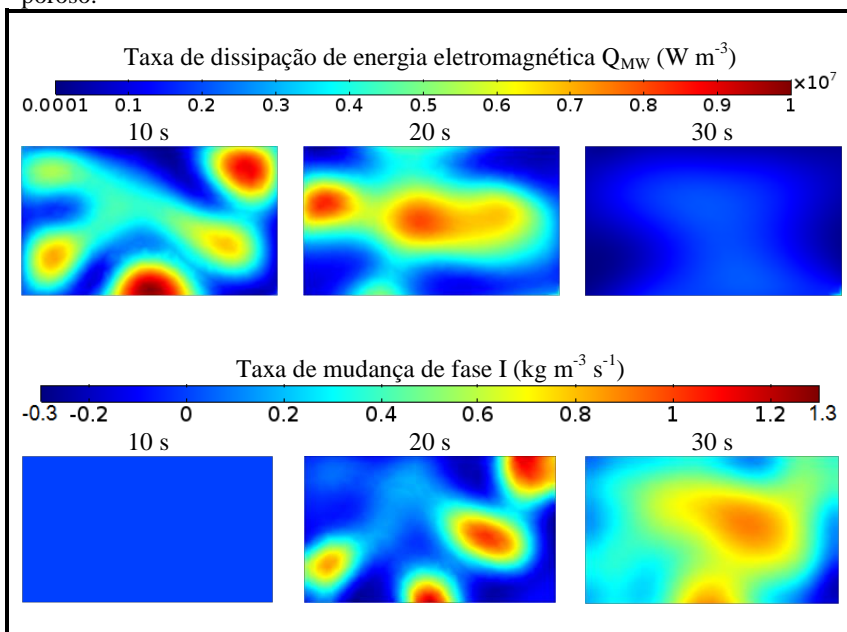


Figura 3.2.8 Perfis da taxa de dissipação de energia eletromagnética, Q_{MW} ($W\ m^{-3}$) e da taxa de mudança de fase I ($kg\ m^{-3}\ s^{-1}$) no interior da amostra em diferentes tempos do processo de secagem para a solução do Modelo I. Resultados no plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo do meio poroso.

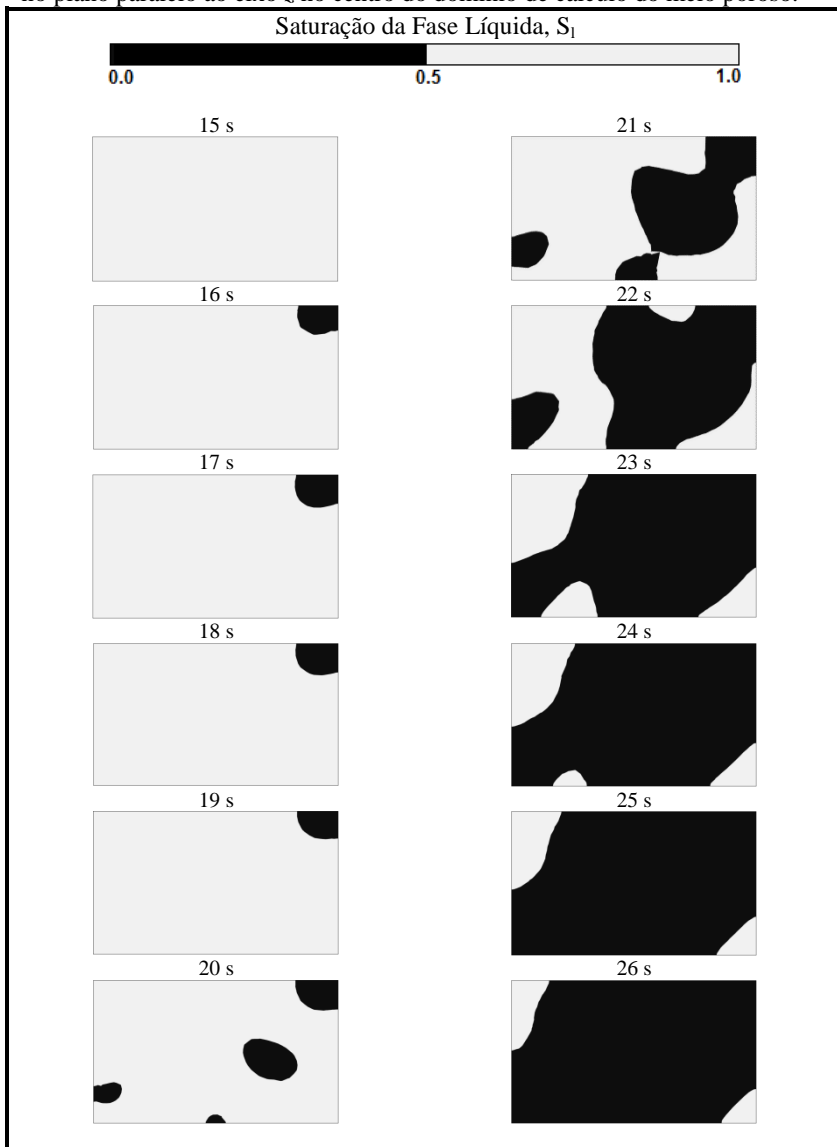


Na secagem com micro-ondas a mudança de fase ocorre no interior do meio poroso seguindo os perfis de dissipação de energia. Na Figura 3.2.8 estão apresentados os perfis da taxa de mudança de fase do

plano paralelo ao eixo z no centro do meio poroso. Observa-se que os perfis das taxas de mudança de fase apresentam regiões onde ocorre a evaporação da água ($\dot{I} > 0$) e regiões onde ocorre a condensação do vapor ($\dot{I} < 0$). O vapor de água gerado nos pontos de maior dissipação de energia é transportado por diferença de pressão para uma região de menor temperatura onde acaba condensando ($\dot{I} < 0$). Esse fenômeno também foi previsto por Rakesh et al. (2012) na simulação do processo de aquecimento de batatas em fornos de micro-ondas. No decorrer da secagem as regiões de condensação de vapor desaparecem em virtude do aumento da temperatura do meio poroso acima da temperatura de saturação da água e a intensidade da evaporação decresce em virtude da redução do conteúdo de umidade.

Em processos de secagem de meios porosos é frequente a presença de uma frente de evaporação (LAURINDO e PRAT, 1998). Porém, na secagem com micro-ondas a vácuo, pode haver várias frentes de secagem e estas não são evidentes, pois a dinâmica da mudança de fase (condensação e vaporização) é mais complexa quando comparada aos processos clássicos de secagem. A Figura 3.2.9 apresenta a evolução das frentes de secagem no interior do meio poroso. Quando o valor de $S_1 > 0,5$ a região foi definida como molhada e quando o valor de $S_1 < 0,5$ a região foi definida como seca. Observa-se que, até 19 s de processo, a frente de secagem se localiza no canto superior direito da imagem do meio poroso. A partir dos 20 s são observadas frentes de secagem em diferentes regiões do meio (superfície e interior do meio). Essas frentes acabam se fundindo ao longo da secagem.

Figura 3.2.9 Representação das frentes de secagem do meio poroso. Resultados no plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo do meio poroso.



A Figura 3.2.10 e a Figura 3.2.11 apresentam os perfis de temperatura, saturação da fase líquida e pressão no interior do meio

poroso para a solução do Modelo I (superfície inferior do meio poroso aberta) e para a solução do Modelo II (superfície inferior do meio poroso fechada), respectivamente. Nestas figuras observa-se que as maiores reduções do conteúdo de umidade ocorrem nos locais em que há maior dissipação de energia e consequente maior aumento de temperatura. Em virtude do aumento da temperatura ocorre a evaporação da água líquida e aumento da pressão no interior do meio poroso. O aparecimento dos gradientes de pressão promove o escoamento das fases fluidas no meio. Em alimentos sólidos esse aumento da pressão interna é responsável também pela deformação da matriz porosa do material (MONTEIRO, CARCIOFI e LAURINDO, 2016). Comparando a Figura 3.2.10 com a Figura 3.2.11 observa-se as diferenças nos perfis de temperatura, de saturação da fase líquida e de pressão obtidos para cada formulação de modelo. Para o Modelo I, o incremento de pressão ocorre próximo ao centro geométrico da amostra e para o Modelo II, o incremento de pressão é maior e ocorre próximo a base da amostra. O maior aumento de pressão é resultado da menor área disponível para o escoamento das fases fluidas para fora do meio poroso. Na base do meio poroso observa-se que há uma maior redução do conteúdo de umidade e maior aumento de temperatura no Modelo II comparado ao Modelo I. A diferença entre os Modelos I e II fica mais evidente ao comparar a temperatura média e a saturação média do meio poroso calculado pelos dois modelos (Figura 3.2.12). Na Figura 3.2.12 está ilustrada a evolução temporal da diferença entre a temperatura média e a saturação média calculada pelo Modelo I menos o do Modelo II. Observa-se que a diferença na temperatura chega à ordem $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a diferença de saturação da fase líquida à ordem de 0,025.

Figura 3.2.10 Perfis de temperatura, saturação da fase líquida e pressão no interior do meio poroso nos tempos de 10, 20 e 30 s. Os resultados foram previstos pelo Modelo I. Resultados no plano paralelo ao eixo z no centro do domínio de cálculo do meio poroso.

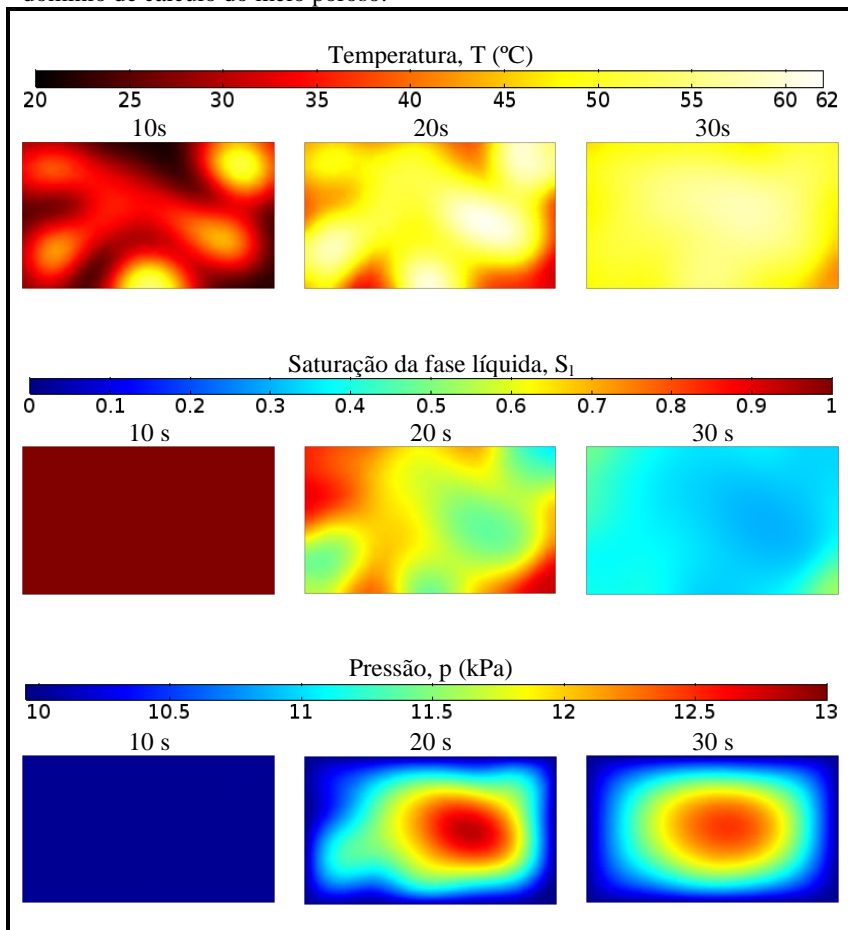


Figura 3.2.11 Perfis de temperatura, saturação da fase líquida e pressão no interior do meio poroso nos tempos de 10, 20 e 30 s. Os resultados foram previstos pelo Modelo II.

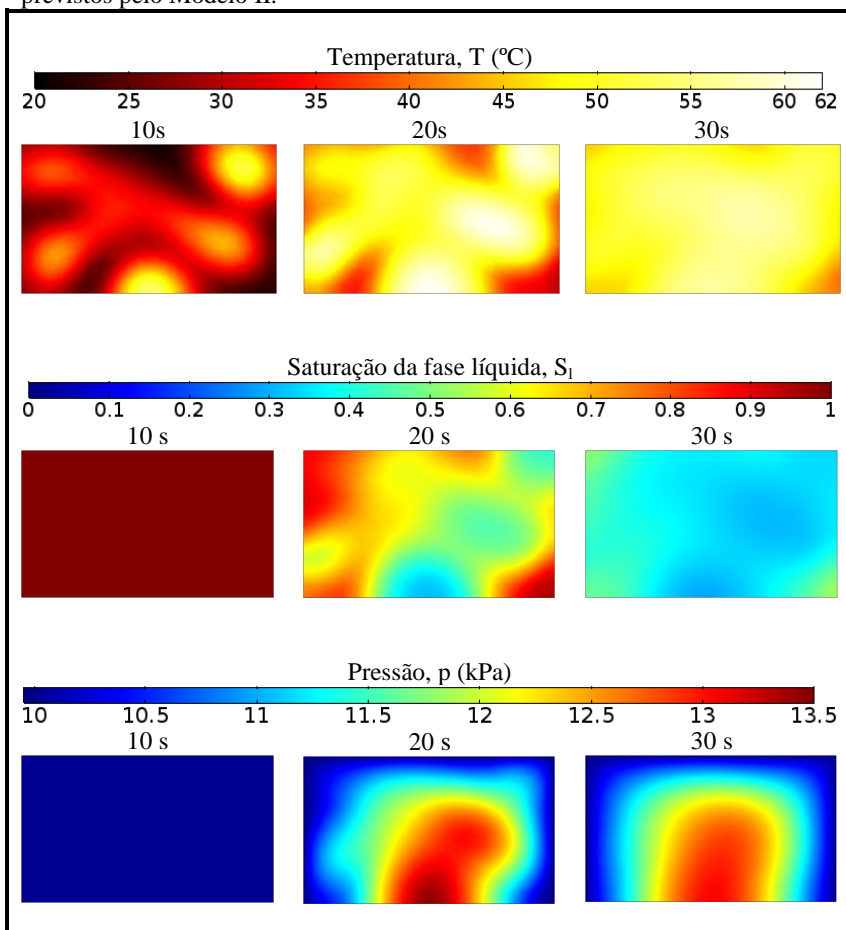
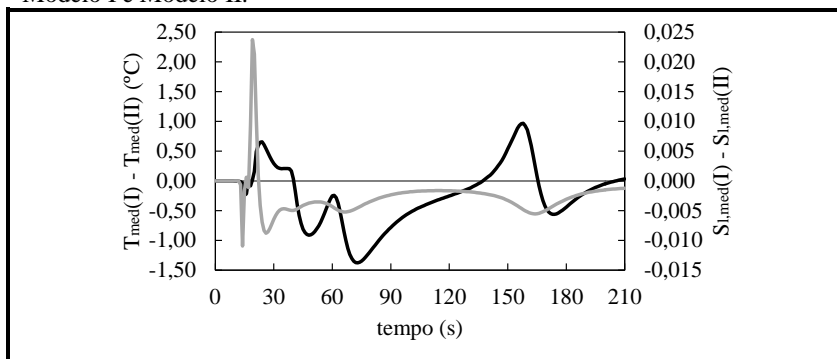


Figura 3.2.12 Perfis temporais da diferença entre a temperatura média (T_{med} , linha preta) e saturação média da fase líquida (S_{med} , linha cinza) previstas pelo Modelo I e Modelo II.

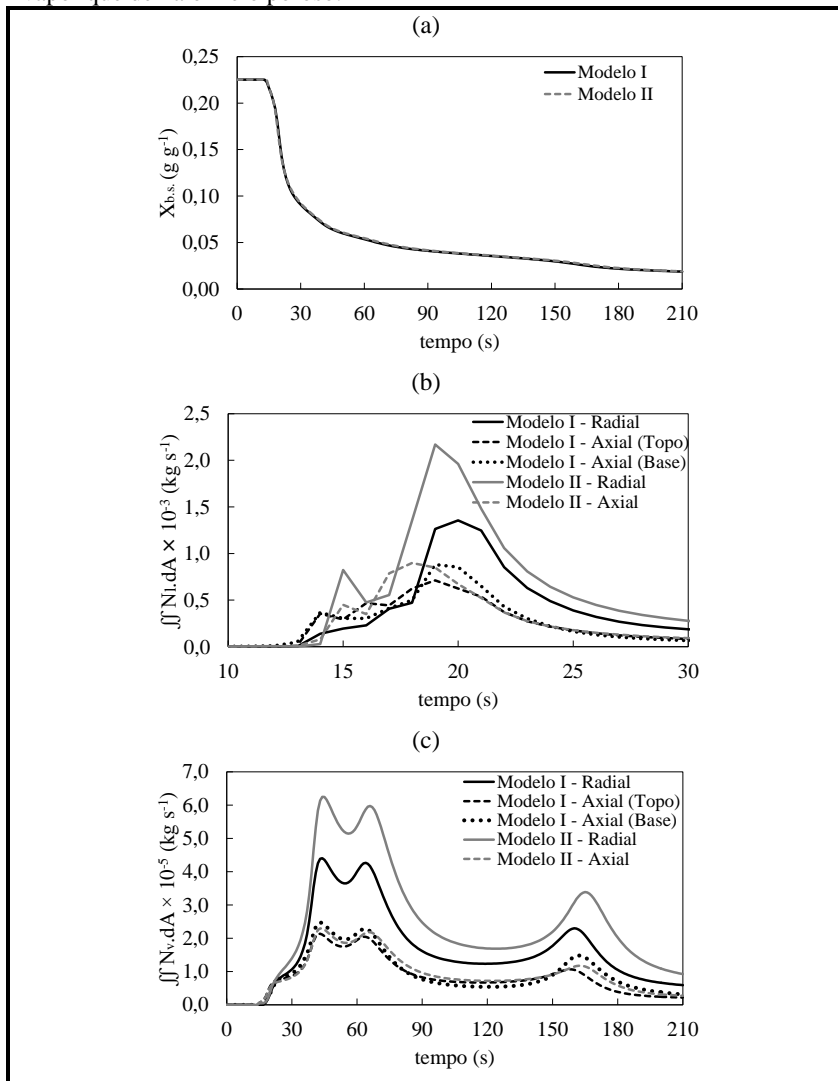


As cinéticas de secagem, umidade *vs.* tempo, obtidos com os Modelos I e II estão apresentadas na Figura 3.2.13 (a). Observa-se que as curvas obtidas com ambos os modelos são muito semelhantes e que apresentam três fases. As fases podem ser distinguidas contabilizando os fluxos de água líquida e de vapor que deixam o meio poroso. Na primeira fase, ocorre o aumento da temperatura do meio poroso até aproximadamente a temperatura de saturação da água na pressão do ambiente sem haver redução do conteúdo de água. Atingida a temperatura de saturação, há geração de vapor e aumento da pressão interna, que deslocam a fase líquida para fora do meio poroso. A taxa de escoamento da água líquida que deixa o meio poroso está na ordem de grandeza de $10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$ (Figura 3.2.13 (b)) e se estendem até aproximadamente 50 s de processo, enquanto a taxa de escoamento da água na forma vapor está na ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ kg s}^{-1}$ e se estende durante todo o processo (Figura 3.2.13 (c)). A segunda fase da cinética de secagem é caracterizada pelo elevado conteúdo de água líquida que deixa o meio poroso (drenagem), resultando em rápida redução de $X_{b,s}$. (Figura 3.2.13 (a)). No intervalo entre os instantes 40 e 50 s de processo, o valor das taxas de escoamento da água líquida e do vapor que deixam o meio poroso se aproximam e, ao final deste intervalo, a drenagem da água passa a ser preferencialmente na forma de vapor. Após os 50 s, as taxas de escoamento da água líquida tendem a zero e o transporte de umidade para fora do meio poroso é exclusivamente na forma de vapor de água, caracterizando a terceira fase da cinética de secagem. Durante os primeiros 210 s de processo,

cerca de 77 % da água que deixou o meio poroso estava na forma líquida e 23 % estava na forma vapor.

Quando a superfície inferior do meio poroso é fechada, cerca de 70 % da água líquida deixa a amostra através da superfície radial, enquanto no modelo com superfície aberta, esse valor é de cerca de 46 %. Porém, quanto a superfície inferior é aberta, cerca de 54 % do total da água líquida deixa o meio poroso pelas extremidades axiais e para o modelo com superfície inferior aberta essa quantidade é de 30 %. Os dois efeitos, aumento da pressão no Modelo I e a maior área superficial para drenagem no Modelo II, levam a valores globais de secagem muito próximos.

Figura 3.2.13 Dados cinéticos da secagem do meio poroso. (a) Umidade vs. tempo previsto pelos Modelos I e II; (b) Taxas de escoamento da água na forma líquida que deixa o meio poroso; (c) Taxa de escoamento da água na forma vapor que deixa o meio poroso.



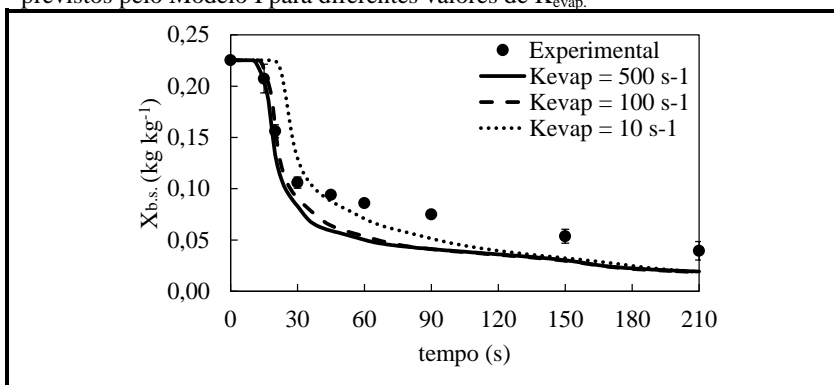
3.2.4.3 Validação Experimental e Análise Paramétrica

Nesta seção, os parâmetros de processo e algumas propriedades físicas do meio poroso foram analisados numericamente e os resultados comparados aos dados experimentais da cinética de secagem.

Constante de mudança de fase

Na Figura 3.2.14 estão ilustradas as cinéticas de secagem previstas pelo Modelo I com valores de K_{evap} de 10, 100 e 500 s^{-1} . O modelo matemático descreveu bem os dados experimentais, prevendo uma fase inicial, na qual não há redução do conteúdo de umidade, seguida por uma fase com elevada velocidade de remoção de água e uma terceira fase com menor velocidade de remoção de água.

Figura 3.2.14 Dados cinéticos da secagem do meio poroso, unidade *vs.* tempo previstos pelo Modelo I para diferentes valores de K_{evap} .

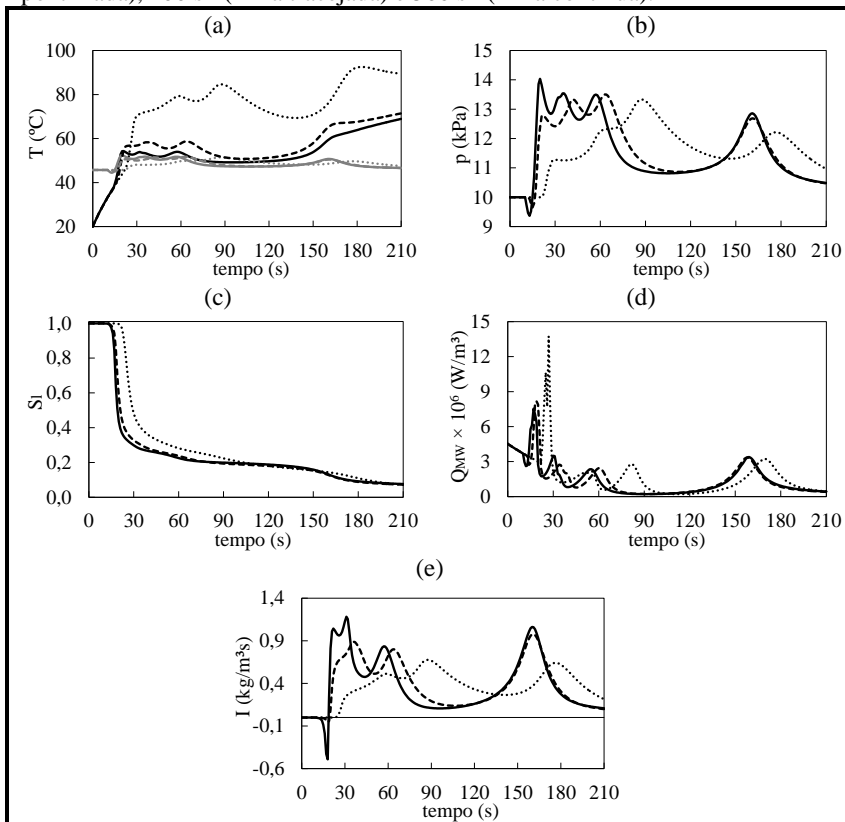


Observa-se na Figura 3.2.14 que o modelo superestimou a redução do conteúdo de umidade do meio poroso comparado aos dados experimentais. Esse resultado pode ser justificado por uma limitação da metodologia experimental. Para obter os valores de umidade *vs.* tempo, o meio poroso saturado era primeiramente submetido à pressão subatmosférica de 10 kPa e, então, iniciado o fornecimento de energia eletromagnética. Após um determinado intervalo de tempo, a pressão da câmara era reestabelecida até a pressão atmosférica e a massa do meio poroso era medida. Quando a pressão da câmara de vácuo é reestabelecida, o volume da fase gasosa no interior da amostra é reduzido e parte da água líquida que havia sido empurrada para fora do meio poroso, mas ainda está em contato com superfície, pode ser

drenada para o interior (LAURINDO et al., 2007; CARCIOFI, PRAT e LAURINDO, 2012; CARCIOFI et al., 2015) O modelo matemático não contempla a dinâmica da pressão no interior da câmara de vácuo (redução e restabelecimento da pressão atmosférica) e considera que a água uma vez empurrada para fora do meio poroso não pode mais retornar, ou seja, não contempla o acúmulo de água sobre a superfície.

A Figura 3.2.15 apresenta os perfis temporais de temperatura, pressão, saturação da fase líquida, taxa de aquecimento eletromagnético e taxa de mudança de fase no centro geométrico do meio poroso para os diferentes valores de K_{evap} . O parâmetro K_{evap} está associado com a velocidade na qual a mudança de fase ocorre, quando o seu valor é pequeno, o tempo necessário para a mudança de fase aumenta e menor é a velocidade de redução de conteúdo de umidade da amostra. Observa-se na Figura 3.2.15 (a) que quanto menor o valor da K_{evap} maior é a diferença entre a temperatura de saturação local da água e a temperatura do meio. A temperatura da saturação é função da pressão local (Figura 3.2.15 (b)). Com a redução do conteúdo de unidade no ponto (Figura 3.2.15 (c)), a diferença de temperatura aumenta, pois há redução da intensidade das taxas de mudança de fase (Figura 3.2.15 (d)), atenuando os efeitos de resfriamento evaporativo, enquanto a matriz sólida permanece dissipando energia eletromagnética (Figura 3.2.15 (e)). Os picos que aparecem nos perfis de temperatura, dissipação de energia micro-ondas, taxas de mudança de fase e de pressão apresentados na Figura 3.2.15 são resultado da modificação na distribuição dos campos eletromagnéticos durante a secagem.

Figura 3.2.15 (a) Perfis temporais de temperatura (linhas na cor preta) e de temperatura de saturação da água (linhas na cor cinza), (b) de pressão, (c) de saturação da fase líquida, (d) de taxa de mudança de fase e (e) de dissipação de energia eletromagnética no centro geométrico do meio poroso. Os resultados foram obtidos com o Modelo I para diferentes valores de K_{vap} : 10 s^{-1} (linha pontilhada), 100 s^{-1} (linha tracejada) e 500 s^{-1} (linha contínua).



Permeabilidade da Fase Líquida

Foram considerados valores de permeabilidade intrínseca dentro da faixa de valores observados experimentalmente para as amostras em estudo (10^{-12} e 10^{-11} m^2). Quanto menor a permeabilidade intrínseca do meio poroso, maior é a resistência ao escoamento das fases fluidas e, conseqüentemente, menor é a velocidade de secagem da amostra. Conforme pode ser observado nos resultados ilustrados na Figura 3.2.16(a), para os valores de permeabilidade intrínseca considerados na

simulação, não foram observadas variações significativas nas cinéticas de secagem.

Potência micro-ondas (P_{in})

Na seção 3.2.3.3 do presente estudo, foi determinado que cerca de 70 % do valor da potência nominal do magnetron é entregue pelo magnetron (698 W). Em uma simulação de um meio fictício puramente composto de água líquida com as mesmas dimensões do meio poroso em análise, observou-se que eram dissipados nesta água 310 W dos 698 W entregues à cavidade. Este valor dissipado (310 W) é corroborado pelos valores observados experimentalmente seguindo o método apresentado na seção 3.1.3.7 deste texto (entre 301,4 e 378,3 W). Assim, os valores de P_{in} avaliados foram de 664,82 W e 834,441 W, resultando na dissipação de 301,4 W e 378,3 W, respectivamente. Conforme esperado, observa-se que, quanto maior a potência micro-ondas utilizada no processo de secagem, maior é a velocidade de redução do conteúdo de água do meio poroso (Figura 3.2.16(b)).

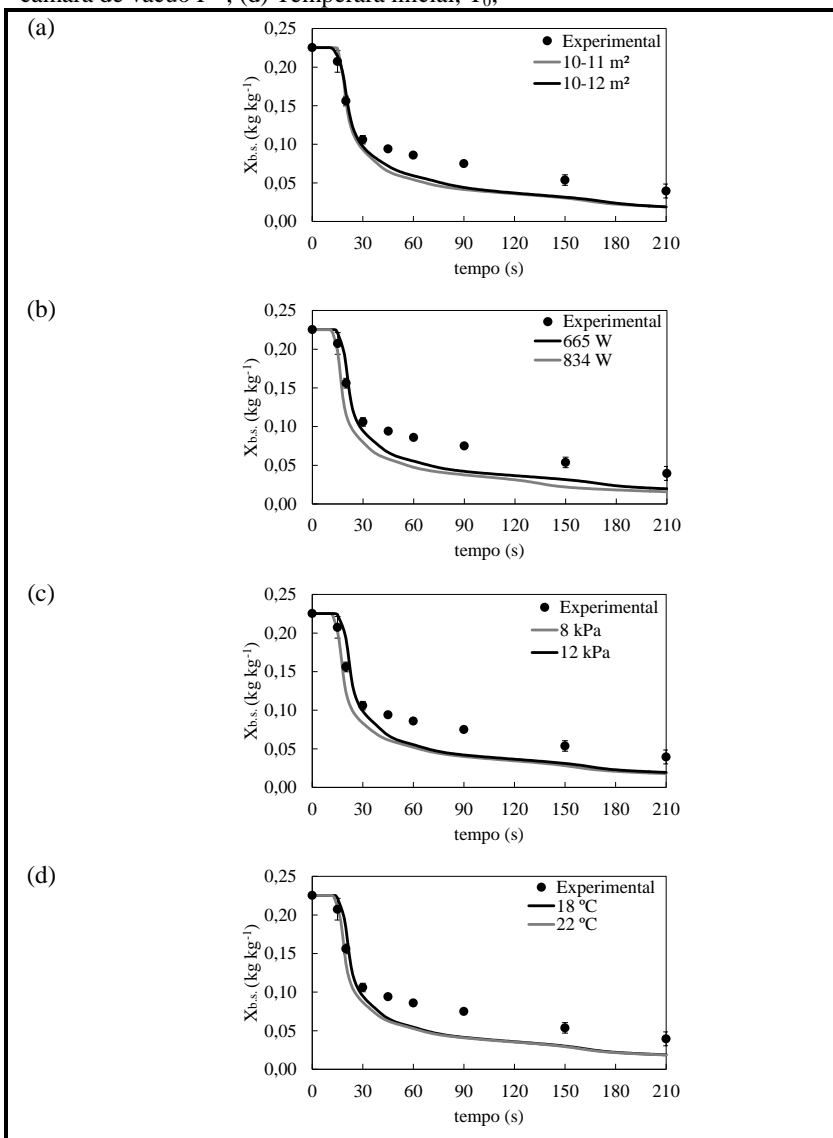
Pressão da câmara de vácuo

Para avaliar o efeito de possíveis variações de pressão na câmara de vácuo durante a secagem, foram consideradas duas condições limites: a secagem ocorrendo a 8 kPa e a 12 kPa. Ao reduzir a pressão da câmara de vácuo há também a redução da temperatura de saturação da água. Assim, uma quantidade menor de energia é necessária para iniciar o processo de mudança de fase, levando a redução do tempo de duração da primeira fase de secagem, conforme apresentado na Figura 3.2.16(c).

Temperatura inicial do meio poroso

A temperatura inicial da amostra, T_0 , foi assumida ser igual à temperatura do fluido de impregnação. Nos experimentos de saturação do meio poroso os valores da temperatura da água ficaram compreendidos entre 18 e 22 C. Quanto maior a temperatura inicial do meio poroso, menor é a quantidade de energia necessária para iniciar a evaporação da água presente na amostra. Esse comportamento está ilustrado na Figura 3.2.16(d), onde a o meio poroso com temperatura a maior temperatura apresenta o menor tempo de duração da primeira fase da cinética secagem.

Figura 3.2.16 Dados cinéticos da secagem: umidade vs. tempo para o meio poroso previsto pelo Modelo I considerando diferentes valores de: (a) permeabilidade intrínseca, $k_{in,I}$; (b) Potência micro-ondas, P_{in} ; (c) pressão da câmara de vácuo P^{ch} ; (d) Temperatura inicial, T_0 ;



3.2.5 Conclusões

A formulação matemática proposta nesse estudo permitiu avaliar detalhadamente a dinâmica do processo de secagem para diferentes condições operacionais. O modelo foi capaz de descrever a evolução temporal da distribuição dos campos eletromagnéticos no interior do forno e do meio poroso, sendo possível quantificar a distribuição espacial das taxas de dissipação de energia micro-ondas, de mudança de fase (evaporação/condensação), e os perfis de temperatura, umidade e pressão durante a secagem.

As características físicas e químicas de um material desidratado dependem da velocidade e intensidade do aquecimento e da remoção do conteúdo de umidade durante a secagem. Neste sentido, o modelo pode ser utilizado, por exemplo, para definir as condições de processo para obter o material desidratado com as características desejadas, ou também no projeto de secadores, reduzindo assim, tanto custos com a construção de protótipos como também com realização de ensaios experimentais.

4 CONCLUSÕES

O modelo matemático proposto nessa tese é capaz de descrever a dinâmica do processo de secagem de meios porosos rígidos em um secador de micro-ondas a vácuo. Os fenômenos eletromagnéticos são acoplados aos fenômenos de transporte multifásico em meio poroso para um domínio de cálculo tridimensional. O modelo matemático permite avaliar quantitativamente a evolução temporal e espacial da temperatura, conteúdo de água, pressão, taxas de dissipação de energia micro-ondas e de mudança de fase (condensação e evaporação) no interior do meio poroso e também a distribuição dos campos eletromagnéticos no interior do secador (cavidade e meio poroso).

O modelo matemático foi validado com dados experimentais da cinética de secagem de um meio poroso rígido. O meio poroso obtido através da sinterização de microesferas de vidro é reutilizável e evita a variabilidade da amostra (antes, durante e ao final da secagem), melhorando a reprodutibilidade dos experimentos. O método proposto para a impregnação a vácuo do meio poroso com água (saturação) e para a obtenção dos dados de perda de umidade em função do tempo (cinética de secagem) são facilmente executáveis e podem ser úteis na investigação experimental de outros processos de secagem.

A versão simplificada (modelo bidimensional) e a versão completa do modelo (modelo tridimensional) descreveram adequadamente os dados experimentais da cinética de secagem. Entretanto, o modelo bidimensional não é capaz de descrever a dinâmica distribuição dos campos eletromagnéticos no interior do secador durante a secagem. Esse fenômeno está intimamente relacionado com a composição, temperatura, geometria, dimensão do meio poroso e geometria da cavidade, portanto, quando desejar-se obter informações mais detalhadas do processo de secagem o modelo tridimensional deve ser selecionado. Por outro lado, por demandar baixo recurso computacional para a resolução numérica, o modelo bidimensional pode ser uma alternativa para obter informações de forma mais rápida acerca do processo.

Análises paramétricas de ambas as formulações do modelo (bi e tridimensional) demonstraram que alterações nos valores que definem as condições de processo, como a pressão de vácuo, potência de micro-ondas e temperatura inicial do meio poroso, e nos valores das propriedades físicas do modelo, como a permeabilidade, a difusão capilar e a constante de mudança de fase, alteram a dinâmica da

secagem. Deste modo, para obter previsões confiáveis deve-se determinar acuradamente os valores de desses parâmetros.

A formulação matemática do modelo de meio poroso considera a fase sólida rígida, neste caso, o modelo deve ser utilizado estritamente para estudar processos de secagem de materiais que não sofram grandes deformações durante a desidratação. Quando a deformação do meio poroso for um fenômeno relevante é necessário incluir na formulação matemática os balanços de conservação do momento na matriz sólida do meio.

Com base no apresentado neste trabalho, é possível afirmar que as ferramentas nele desenvolvidas são úteis e aplicáveis à compreensão e a melhoria de processos nos quais estejam envolvidos: o aquecimento com radiação micro-ondas e o escoamento multifásico em meio poroso, como é o caso da secagem de alimentos sólidos utilizando micro-ondas a vácuo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBALLO, J.R.; CAMPAÑONE, L. A.; MASCHERONI, R. H. Numerical Simulation of Heat, Mass and Momentum Transfer during the Microwave Drying of Osmodehydrated Porous Material. Publicado nos Anais do 2014 COMSOL Conference in Curitiba.

ARBALLO, J.R.; CAMPAÑONE, L.A.; MASCHERONI R.H. Modeling of Microwave Drying of Fruits. Part II: Effect of Osmotic Pretreatment on the Microwave Dehydration Process. **Drying Technology: An International Journal**, v. 30, n. 4, p. 404-415, 2012.

AYAPPA, K.G.; CRAPISTE, G.; DAVIS, H.T.; DAVIS, E.A.; GORDON, J. Microwave heating: an evaluation of power formulations. **Chemical Engineering Science**, v. 46, p. 1005-1016, 1991.

AYAPPA, K.G.; DAVIS, H.T.; BARRINGER, S.A.; DAVIS, E.A. Resonant microwave power absorption in slabs and cylinders. **AIChE Journal**, v. 43, p. 615-624, 1997

BANSAL, N.P.; DOREMUS, R.H. **Handbook of glass properties**. Orlando: Academic Press, Inc. 1986.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York, NY: American Elsevier Publishing Company, Inc. 1972.

BEJAN, A. **Convective heat transfer**. 3a ed. New York: J. Wiley & Sons, 2004.

BILECKA, I.; NIEDERBERGER, M. Microwave chemistry for inorganic nanomaterials synthesis. **Nanoscale**, v. 2, p. 1358-1374, 2010.

CARCIOFI, B. A. M.; PRAT, M.; LAURINDO, J. B. Dynamics of vacuum impregnation of apples: Experimental data and simulation resulting using a VOF model. **Journal of Food Engineering**, v. 113, p. 337-343, 2012.

CARCIOFI, B. A. M.; TELEKEN, J. T.; BERTELLI, V. Z.; PRAT, M.; LAURINDO, J. B. Experimental approach to evaluate the influence of characteristic length on the Dynamics of biphasic flow in vacuum impregnation. **Chemical Engineering Science**, v. 137, p. 875-883, 2015.

CHEN, J.; PITCHAI, K.; BIRLA, S.; NEGAHBAN, M.; JONES, D.; SUBBIAN, J. Heat and mass transport during microwave heating of mashed potato in domestic oven – model development, validation and sensitivity analysis. **Journal of Food Science**, v. 79, p. 1991-2004, 2014.

CHEN, J.; PITCHAI, K.; JONES, D.; SUBBIAH J. Effect of decoupling electromagnetics from heat transfer analysis on prediction accuracy and computation time in modeling microwave heating of frozen and fresh mashed potato. **Journal of Food Engineering**, v. 144, p. 45-57, 2015.

CHEN, X.D.; MUJUMDAR, A.S. **Drying Technologies in Food Processing**. 1ed., Oxford: John Wiley & Sons Ltda, 2008.

CUSSLER, E.L. **Diffusion: mass transfer in fluid systems**. 3ed. Cambridge, MA: Cambridge University, 2009.

DATTA, A.K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 80-95, 2007.

DATTA, A.K., RAKESH, V. Principles of Microwave Combination Heating. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 12, 24-39, 2013.

DATTA, A.K.; ANATHESWARAN, R.C. **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.

DATTA, A.K.; van der SMAN, R.; GULATI, T.; WARNING, A. Soft matter approaches as enablers for food macroscale simulation. **Faraday Discussions**, v. 158, p. 435-459, 2012.

DHALL, A.; HALDER, A.; DATTA, A.K. Multiphase and multicomponent transport with phase change during meat cooking. **Journal of Food Engineering**, v. 113, p. 299-309.

DU, G.; WANG, S.; CAI, Z. Microwave drying of wood strands. **Drying Technology An International Journal**, v. 23, n. 12, 2005.

DUAN, Z.; JIANG, L.; WANG, J.; YU, X., WANG. Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, n. 4, p. 472-476, 2011.

ERRIGUIBLE, A.; BERNADA, P.; COUTURE, F.; ROQUES, M.A. Simulation of vacuum drying by coupling models. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 46, p. 1274-1285, 2007.

GEANKOPLIS, C.J. **Transport process and separation process principles**. 4ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

GEEDIPALLI, S.S.R.; RAKESH, V.; DATTA, A.K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. **Journal of Food Engineering**, v. 83, p. 359-368, 2007.

GULATI, T.; ZHU, H.; DATTA, A.K. Coupled electromagnetics, multiphase transport and large deformation model for microwave drying. **Chemical Engineering Science**, v. 156, p. 206-228, 2016.

GULATI, T.; ZHU, H.; DATTA, A.K. Coupled electromagnetics, multiphase transport and large deformation model for microwave drying. **Chemical Engineering Science**, v. 156, p. 206-228, 2016.

GULATI, T.; ZHU, H.; DATTA, A.K.; HUANG, K. Microwave drying of spheres: Coupled electromagnetics-multiphase transport modeling with experimentation. Part: II: Model validation and simulation results. **Food and Bioproducts Processing**, v. 96, p. 326-337, 2015.

HALDER, A.; DHALL, A., DATTA, A.K. An improved, easily implementable porous media based model for deep fat frying. Part I: Model Development and Input parameters. **Food and Bioproducts Processing**, v. 85, p. 209-219, 2007.

HUANG, J.; ZHANG, M.; ADHIKARI, B.; YANG, Z. Effect of microwave air spouted drying arranged in two and three-stages on the drying uniformity and quality of dehydrated carrot cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 177, p. 80-89, 2016.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JIANG, J.; DANG, L.; YUENSIN, C.; TAN, H.; PAN, B.; WEI, H. Simulation of microwave thin layer drying process by a new theoretical model. **Chemical Engineering Science**, v. 162, p. 69-76, 2017.

JONES, F.O.; OWENS, W.W. A laboratory Study of Low-Permeability Gas Sands. **Journal of Petroleum Technology**, 1631-1640, 1980.

KAVIANY, M. **Principles of heat transfer in porous media**. 2a ed. New York: Springer, 1995.

KOUMOUTSAKOS, A.; AVRAMIDIS, S.; HATZIKIRIAKOS, S.G. Radio frequency vacuum drying of wood. I Mathematical model. **Drying Technology: An International Journal**, v. 19, p. 65-84, 2001.

KUMAR, C., JOARDDER, M.U.H., FARRELL, T.W., M.A. KARIM. Multiphase porous media model for intermittent microwave convective drying (IMCD) of food. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 104, p. 304-314, 2016a.

KUMAR, C., JOARDDER, M.U.H., FARRELL, T.W., MILLAER, G.J., KARIM, M.A. Mathematical model for intermittent microwave convective drying of food materials. **Drying Technology: An International Journal**, v. 34, p. 962-973, 2016b.

LAURINDO, J. B.; PRAT, M. Numerical and experimental network study of evaporation in capillary porous media. Drying rates. **Chemical Engineering Science**, v. 53, n. 12, p. 2257-2269, 1998.

LAURINDO, J. B.; STRINGARI, G. B.; PAES, S. S.; CARCIOFI, B. A. M. Experimental determination of the dynamics of the vacuum impregnation of apples. **Journal of Food Science**, v. 72, E470-E475, 2007.

LI, X., ZHANG, B.; LI, W. Microwave-Vacuum Drying of Wood: Model Formulation and verification. **Drying Technology: An International Journal**, v. 26, p. 1382-1397, 2008.

LIN, Y.; ANANTHESWARAN, R.C.; PURI, V.M. Finite Element Analysis of Microwave Heating of Solid Foods. **Journal of Food Engineering**, v. 25, p. 85-112, 1995.

LIU, Y.; TANG, J., MOA, Z. Analysis of bread dielectric properties using mixture equations. **Journal of Food Engineering**, v. 93, p. 72-79, 2009.

LU, L.; TANG, J.; LIANG, L. Moisture distribution in spherical foods in microwave drying. **Drying Technology: An International Journal**, v. 16, p. 503-524, 1998.

MAIER, C.; CALAFUT, T. **Polypropylene The Definitive User's Guide and Databook**. Norwich, NY: Plastics Design Library. 1998.

MALAFRONTI, L.; LAMBERTI, G.; BARBA, A.A.; RAAHOLT, B.; HOLTZ, E.; AHRNÉ, L. Combined convective and microwave assisted drying: Experiments and modeling. **Journal of Food Engineering**, v. 112, p. 304-312, 2012.

MARRA, F.; De BONIS, M.V.; RUOCCO, G. Combined microwaves and convection heating: A conjugate approach. **Journal of Food Engineering**, v. 97, p. 31-39, 2010.

McCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*, 7th ed. McGraw-Hill, Boston, 2005.

MEISSNER, T.; WENTZ, F.J.; The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 42, n. 9, p. 1836-1849, 2004.

METAXAS, A. C.; R. J. MEREDITH. **Industrial Microwave Heating**. Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1983.

MONTEIRO, R. L.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 117, p. 1-11, 2016.

MONTEIRO, R.L.; CARCIOFI, B.A.M.; MARSAIOLI, A.; LAURINDO, J.B. How to make a microwave vacuum dryer with turntable. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 276-284, 2015.

NELSON, S. O. Dielectric properties of agricultural products measurements and applications. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 26, n. 5, p. 845-869, 1991.

NELSON, S. O.; DATTA, A.K., 2001. Dielectric properties of food materials and electric field interactions. In: DATTA, A.K., ANANTHESWARAN, R.C. **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. Marcel Dekker, New York, p. 66-114.

NI, H.; DATTA, A.K.; TORRANCE, K.E. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 42, p. 1501-1512

OLIVEIRA, M.E.C.; FRANCA, A.S. Microwave heating of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v. 53, p. 347-359, 2002.

OLIVEIRA, M.E.C.; FRANCA, A.S. Microwave heating of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v. 53, p. 347-359, 2002.

ORTIZ-JEREZ, M.J.; GULATI, T., DATTA, A.K.; OCHOA-MARTÍNEZ, C.I. Quantitative understanding of refractance window drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 237-253, 2015.

OUSEGUI, A.; MORESOLI, C., DOSTIE, M.; MARCOS, B. Porous multiphase approach for baking process – Explicit formulation of evaporation rate. **Journal of Food Engineering**, v. 100, p. 535-544, 2010.

OZKAN, I.A.; AKBUDAK, B.; AKBUDAK, N. Microwave drying characteristics of spinach. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 2, p. 577-583, 2007.

PERRÉ, P.; TURNER, I.W. A dual-scale model for describing drier and porous medium interactions. **AIChE Journal**, v. 52, p. 3109-3117.

PITCHAI, K.; CHEN, J.; BIRLA, S.; GONZALEZ, R.; JONES, D.; SUBBIAH, J. A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: development and validation. **Journal of Food Engineering**, v. 128, p. 60-71, 2014.

PU, Y.; SUN, D. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualization of moisture content distribution. **Biosystems Engineering**, v. 156, p. 108-119, 2017.

PU, Y.; SUN, D. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualization of moisture content distribution. **Biosystems Engineering**, v. 156, p. 108-119, 2017.

RAKESH, V.; DATTA, A.K. Microwave puffing: determination of optimal conditions using a coupled multiphase porous media – Large deformation model. **Journal of Food Engineering**, v. 107, p. 152-163, 2011

RAKESH, V.; DATTA, A.K.; WALTON, H.; McCARTHY, K.L.; McCARTHY, M.J. Microwave combination heating: coupled electromagnetics – multiphase porous media modeling and MRI experimentation. **AIChE Journal**, v. 58, p. 1262-1278, 2012.

RAKESH, V.; SEO, Y.; DATTA, A.K.; McCARTHY, K.L.; McCARTHY, M.J. Heat transfer during microwave combination heating: computational modeling and MRI experiments. **AIChE Journal**, v. 56, p. 2468-2478, 2010.

RANJBARAN, M.; ZARE, D. Simulation of energetic and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. **Energy**, v. 59, p. 484-493, 2013.

RESURRECTION, F.P.; LUAN, D.; TANG, J.; LIU, F.; TANG, Z.; PEDROW, P.D.; CAVALIERI, R. Effect of changes in microwave frequency on heating patterns of foods in a microwave assisted thermal sterilization system. **Journal of Food Engineering**, v. 105, p. 99-105, 2015.

SADIKU, M.N.O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5^a ed. Porta Alegre: Bookman, 2012.

SALAGNAC, P.; GLOUANNEC, P.; LECHARPENTIER, D. Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, p. 4479-4489, 2004.

SANGA, E.C.M.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V. Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material. **Chemical Engineering and Processing**, v. 41, p. 487-499, 2002.

SCAMAN, C.H.; DURANCE, T.D.; DRUMMOND, L.; SUN, D. **Combined Microwave Vacuum Drying**. In: SUN, D. *Emerging*

Technologies for Food Processing, 2 ed. London: Elsevier Academic Press, 2014.

SHE, H.Y.; SLEEP, B.E. The effect of temperature on capillary pressure-saturation relationships of air-water and perchloroethylene-water systems. **Water Resources Research**, vol. 34, p. 2587-2597, 1998.

SIPAHIOGLU, O.; BARRINGER, S.A. Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash, and moisture content. **Journal of Food Science**, v. 68, p. 234-239, 2003.

SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOTT, M.M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 7a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SOLSTYSIAK, M.; ERLE, U.; MALGORZATA, C. Load curve estimation for microwave ovens: experiments and electromagnetic modelling. In 17th Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2008.

STOKLOSA, A. M.; LIPASEK, R. A.; TAYLOR, L.S.; MAUER, L.J. Effects of storage conditions, formulation, and particle size on moisture sorption and flowability of powders: A study of deliquescent ingredient blends. **Food Research International**, v. 49, n. 2, p. 783-791, 2012.

TANIKAWA, W.; SHIMAMOTO, T. Comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, v. 46, p. 229-238, 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.

TORRES, S.S.; JOMAA, W.; PUIGGALI, J.R.; AVRAMIDIS, S. Multiphysics modeling of vacuum drying of wood. **Applied Mathematical Modeling**, v. 35, p. 5006-5016, 2011.

TURNER, I.W.; JOLLY, P.C. Combined microwave and convective drying of a porous material. **Drying Technology: An International Journal**, v. 9, p. 1209-1269, 1991.

TURNER, I.W.; PERRÉ P. Vacuum drying of wood with radiative heating: II. Comparison between theory and experiment. **AIChE Journal**, v. 50, p. 108-118, 2004.

VERMA, A.K.; PRUESS, K., TSANG, C. F.; WITHESSPOON, P.A. A study of two-phase concurrent flow of steam and water in an unconsolidated porous medium. Apresentado em National Heat Transfer Conference, Denver, 4 de Agosto de 1985.

VONGPRADUBCHAI, S.; RATTANADECHO, P. The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, n. 5, p. 997-1003, 2009.

WALDE, S.G.; BALASWAMY, K.; VELU, V.; RAO, D.G. Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*). **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 3, p. 271-276, 2002.

WANG, R.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A.S. Effects of vacuum and microwave freeze drying on microstructure and quality of potato slices. **Journal of Food Engineering**, v. 101, n. 2, p. 131-139, 2010.

WANG, Z.H.; SHI, M.H. Microwave freeze drying characteristics of beef. **Drying Technology An International Journal**, v., 17, n. 3, 1999.

WARNING, A.; DHALL, A.; MITREA, D., DATTA, A.K. Porous media based model for deep-fat vacuum frying potato chips. **Journal of Food Engineering**, v. 110, p. 428-440, 2012.

WARNING, A.D.; ARQUIZA, J.M.R., DATTA, A.K. A multiphase porous medium transport model with distributed sublimation front to simulate vacuum freeze drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 94, p. 637-648, 2015.

WHITAKER, S. Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying. **Advances in Heat Transfer**, v. 13, p. 119-203, 1977.

ZHANG, H.; DATTA, A.K. Heating concentrations of microwaves in spherical and cylindrical foods. Part One: in Planes waves. **Food and Bioproducts Processing**, v. 83, p. 6-13, 2005a.

ZHANG, H.; DATTA, A.K. Heating concentrations of microwaves in spherical and cylindrical foods. Part Two: in a Cavity. **Food and Bioproducts Processing**, v. 83, p. 14-24, 2005b.

ZHANG, H.; DATTA, A.K. Microwave power absorption in single- and multiple-item foods. **ICHEM E**, v. 81, p. 257-265, 2003.

ZHANG, M; TANG, J.; MUJUMDAR, A.S.; WANG, S. Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, p. 524-534, 2006.

ZHANG, Z.; KONG, N. Nonequilibrium thermal dynamic modeling of porous medium vacuum drying process. **Mathematical Problems in Engineering**, 2012.

ZHU, H.; GULATI, T.; DATTA, A.K.; HUANG, K. Microwave drying of spheres: coupled electromagnetics-multiphase transport modeling with experimentation. Part I: Model development and experimental methodology. **Food and Bioproducts Processing**, v. 96, p. 314-325, 2015.

ANEXO A - ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA CURVA DE CARGA DE UM FORNO DE MICRO-ONDAS

Resumo

Neste estudo a curva de carga de um forno de micro-ondas doméstico foi determinada numericamente, por meio de da resolução das equações de Maxwell do eletromagnetismo, e comparada com resultados experimentais, obtidos usando o método recomendado pela *International Electrochemical Commission* (IEC). O modelo matemático descreveu adequadamente os dados experimentais, mas apresentou pouca sensibilidade quando a relação de aspecto volume da carga de água/volume de cavidade do forno foi inferior a 10^{-2} .

Palavras-chave: Micro-ondas, Curva de Carga, Equações de Maxwell, Simulação Numérica.

INTRODUÇÃO

Dada a praticidade e a velocidade do aquecimento de alimentos, os fornos de micro-ondas têm se tornado itens cada vez mais comuns nas cozinhas do mundo inteiro. Os alimentos são caracterizados por apresentar baixos valores de condutividade térmica e a radiação eletromagnética na frequência das micro-ondas penetra no alimento e dissipa energia na forma de calor elevando rapidamente a temperatura do mesmo (DATTA e RAKESH, 2012).

O principal inconveniente da utilização de fornos de micro-ondas é a falta de uniformidade do aquecimento. Segundo o teorema de Poynting, a quantidade de energia dissipada no material dielétrico é proporcional à intensidade do campo elétrico local ao quadrado, ou seja, o aquecimento micro-ondas segue o padrão de distribuição dos campos eletromagnéticos desenvolvidos no interior do forno (SADIKU, 2012).

A distribuição dos campos eletromagnéticos depende de inúmeros fatores incluindo: composição, forma, dimensões e localização do alimento no interior do forno, geometria e dimensões da cavidade, e a frequência de propagação da onda. O uso de ferramentas computacionais, baseadas na resolução numérica das equações de Maxwell do eletromagnetismo, permite obter informações detalhadas sobre a distribuição dos campos em fornos de micro-ondas e podem ser úteis no projeto desses sistemas.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da relação de aspecto volume do meio a ser aquecido/volume da cavidade do forno de micro-ondas na quantidade de energia eletromagnética dissipada no meio. Para isto foram utilizadas as equações de Maxwell, para prever a distribuição dos campos eletromagnéticos no forno de micro-ondas, e o teorema de Poynting para contabilizar a quantidade total de energia dissipada no meio. Os resultados numéricos foram validados utilizando os resultados experimentais de uma curva de carga obtida no forno em estudo. Uma curva de carga ilustra a potência dissipada em cargas de água como uma função do volume dessas cargas, e é considerada uma medida de desempenho do forno de micro-ondas (SOLTYSIAK, ERLE e MALGORZATA, 2008).

MATERIAIS E MÉTODOS

Procedimento Experimental

Os experimentos foram realizados em um forno de micro-ondas doméstico Electrolux, modelo – MEX55, com volume de cavidade de 45 dm³. O forno foi operado na potência nominal máxima de 1000 W (magnetron operando de forma contínua) gerando micro-ondas na frequência de 2450 MHz.

A potência dissipada nas cargas de água foi determinada termodinamicamente a partir da variação da temperatura, seguindo o método da *International Electrotechnical Commission* (IEC). Para este procedimento uma determinada massa de água (m_l) era acondicionada em béqueres (m_b), tomando os valores da temperatura da água e do béquer ao início (T_0) e ao final (T_f) do aquecimento micro-ondas. A potência dissipada (P_{exp}) era então calculada pela Equação (A.1) (SOLTYSIAK, ERLE e MALGORZATA, 2008):

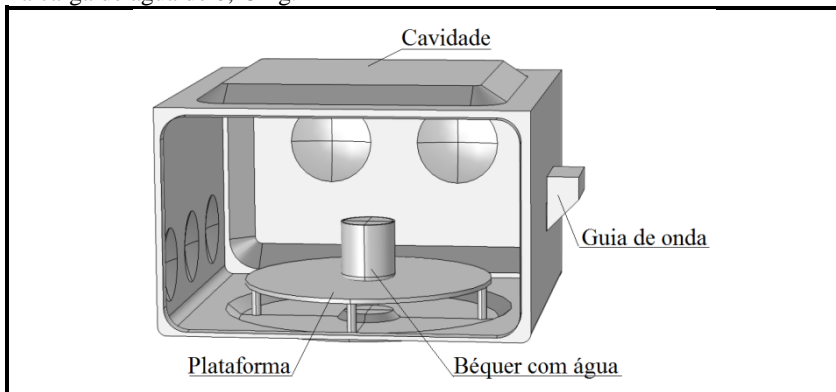
$$P_{exp} = \frac{c_{p,l}m_l(T_f - T_0) + c_{p,b}m_b(T_f - T_0)}{\Delta t} \quad (A.1)$$

na qual $c_{p,l}$ e $c_{p,b}$ são os calores específicos da água e do béquer, respectivamente; e Δt é o intervalo de tempo de aquecimento.

Foram utilizadas oito cargas de água (2 kg, 1,5 kg, 1 kg, 0,8 kg, 0,5 kg, 0,4 kg, 0,25 kg e 0,15 kg) acondicionadas em béqueres de borossilicato de diferentes volumes de acordo com a massa utilizada em cada medida (2 dm³, 1 dm³, 0,6 dm³, 0,25 dm³ e 0,15 dm³). As amostras

eram posicionadas no centro da cavidade sobre uma plataforma de polipropileno de 4 cm de altura (Figura A.1). O aquecimento de cada volume da água era conduzido até ser observada uma variação de aproximadamente 10 a 12 °C na temperatura. Esse procedimento foi adotado buscando reduzir os efeitos da temperatura sobre o valor das propriedades dielétricas da água e sobre as perdas de energia por evaporação. Ao final de todos os ensaios, a água era agitada com uma haste de vidro e as medidas de temperatura eram tomadas utilizando um termômetro de mercúrio. Os ensaios para cada carga de água foram repetidos quatro vezes.

Figura A1. Domínio de cálculo tridimensional do modelo eletromagnético para a carga de água de 0,15 kg.



Fone: Desenvolvido pelo autor.

Procedimento Numérico

A distribuição dos campos eletromagnéticos no interior do forno micro-ondas foi obtida resolvendo as equações de Maxwell do eletromagnetismo. O domínio de cálculo inclui a cavidade do forno, a plataforma de polipropileno, o béquer e a carga de água (Figura A.1). As paredes da cavidade foram consideradas condutores elétricos perfeitos e a excitação do forno foi modelada através de um guia de onda retangular transmitindo energia no modo transversal elétrico, TE₁₀. A potência total dissipada na água foi calculada pela Equação (A.2), que consiste de uma integral de volume da potência dissipada no domínio da água.

$$P_{\text{cal}} = \iiint \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}_s|^2 dV \quad (\text{A.2})$$

A Tabela A.1 sumariza os valores das propriedades dielétricas dos materiais utilizados na resolução numérica do modelo e os valores do comprimento de onda para cada material.

Tabela A1. Propriedades dielétricas da água, borossilicato e polipropileno.

Material	Propriedades dielétricas relativas		
	ϵ'	ϵ''	$\lambda(\text{cm})^*$
Ar	1	0	12,245
Água (20°C) ^a	78,7	10,7	1,377
Água (30°C) ^a	75,7	8,0	1,405
Água (40°C) ^a	72,6	6,2	1,436
Polipropileno (PP) ^b	2,2-2,6	0	8,255
Borossilicato ^c	4,05	0	6,085

^aMeissner e Wentz (2004); ^bFaixa de valores estudados (PP puro apresenta um valor de constante dielétrica de aproximadamente 2,3 e um valor de constante de perda na ordem de 10^{-4} (MAIER e CALAFUT, 1998)); ^cBasal e Doremus 1986; *Calculado (Equação 3.2.48).

As equações de Maxwell podem ser escritas em termos do vetor fasor campo elétrico, \vec{E}_s , na forma de uma equação vetorial da onda (Equação (A.3)).

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}_s) - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 (\epsilon' - j\epsilon'') \vec{E}_s = 0 \quad (\text{A.3})$$

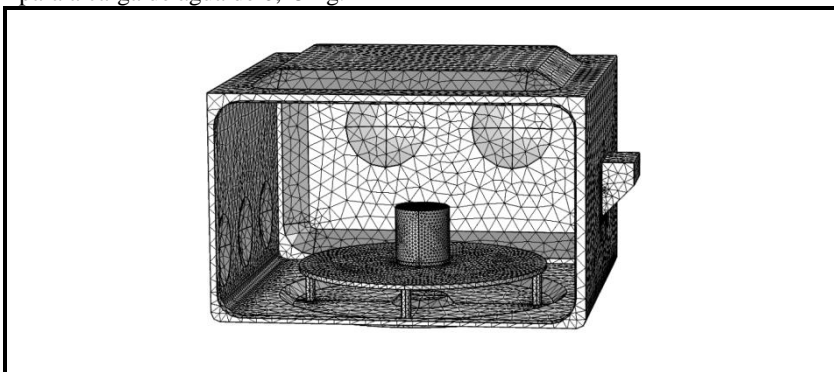
A Equação A.3 foi resolvida com o método dos elementos finitos utilizando o módulo de radiofrequência (*RF module*) do *software* comercial COMSOL Multiphysics® versão 5.3. A resolução dos sistemas lineares foi obtida utilizando o solver iterativo dos Resíduos Mínimos Generalizados (GMRES) com o pré-condicionador *geometric multigrid* e critério de convergência de 10^{-4} . O domínio computacional foi discretizado utilizando elementos tetraédricos com função de interpolação de segunda ordem, contendo 10 nós por elemento.

Para problemas de propagação de ondas eletromagnéticas, o manual do *software* sugere a utilização de aproximadamente 10 elementos lineares por comprimento de onda para obtenção de resultados independentes do tamanho da malha. Utilizando funções de interpolação de maior ordem, o número de elementos exigidos por comprimento de onda é menor. O comprimento da onda no ar é de 12,24 cm, no polipropileno é de 8,25 cm e na água de 1,4 cm (Tabela A.1). Dessa forma, foram definidos diferentes tamanhos de elementos na geração da malha tetraédrica: no domínio do ar, o tamanho máximo do

elemento foi de 2 cm, na plataforma foi de 1,3 cm e na água foi de 0,2 cm (0,15 e 0,25 kg), 0,3 cm (0,4, 0,5, 0,8 e 1 kg) e 0,4 cm (1,5 e 2 kg). A Figura A.2 ilustra a malha utilizada para resolução do modelo.

Os cálculos foram realizados com um processador Intel CORE i7-4790K com 32 GB de memória RAM. O tempo aproximado de cálculo: com maior número de elementos, 2 kg (738 803 elementos), foi de 9 minutos e com o menor número de elementos, 0,15 kg (248 770 elementos), foi de 2 minutos.

Figura A.2 Ilustração da malha utilizada para a resolução numérica do modelo para a carga de água de 0,15 kg.



Fonte: Desenvolvido pelo autor

A potência entregue pelo magnetron (P_{in}) em um forno micro-ondas é inferior à potência nominal do sistema de geração. Um aspecto importante na simulação do processo é a definição da intensidade do campo elétrico na porta de excitação (E_0), ou seja, a real potência entregue pelo magnetron (P_{in}). Para esta determinação foi adotada a abordagem de Zhang e Datta (2003), que compara a potência absorvida por uma carga de água aquecida no forno micro-ondas (determinada termodinamicamente a partir da variação da temperatura) e a potência total dissipada na carga calculada pelo modelo eletromagnético. O experimento de aquecimento da carga de água de 2 kg foi utilizada para determinar P_{in} . O modelo eletromagnético para a carga de água de 2 kg foi resolvido para um valor arbitrário de potência entregue pelo forno (P_{in}') e a potência total dissipada na carga de água foi então calculada ($P_{cal,2kg}$, Equação (A.2)). Utilizando a Equação (A.4), com os valores de potência dissipada na água medida experimentalmente ($P_{exp,2kg}$,

Equação (A.1)) e aquela calculada pelo modelo eletromagnético ($P_{\text{cal},2\text{kg}}$, Equação A.2), o valor da potência entregue pelo forno (P_{in}) foi definido.

$$P_{\text{in}} = P_{\text{in}} \cdot \frac{P_{\text{exp},2\text{kg}}}{P_{\text{cal},2\text{kg}}} \quad (\text{A.4})$$

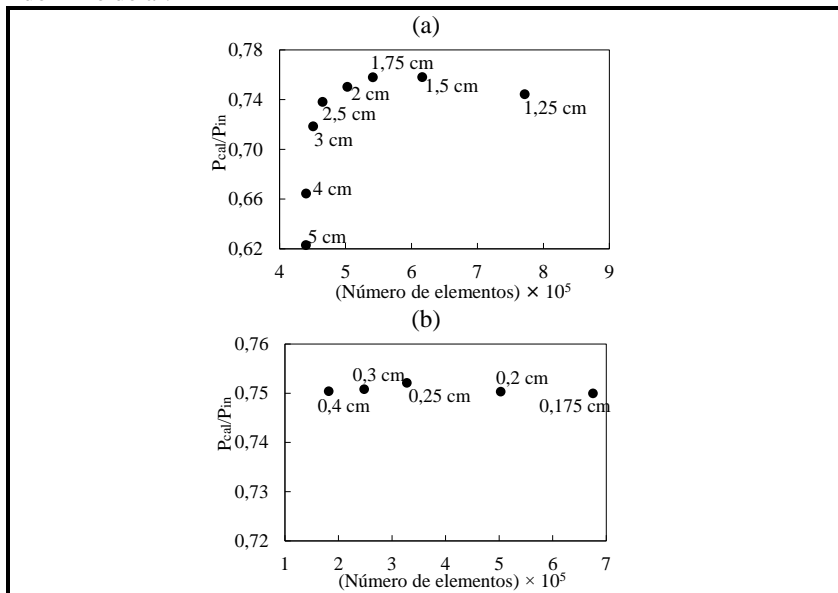
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estudo de Malha

A potência dissipada na água foi utilizada como critério para o estudo de malha, essa variável também foi utilizada por Geedipalli, Rakesh e Datta (2007) e Rakesh et al. (2010). Na Figura A.3 estão ilustrados os valores de potência dissipada na amostra de 0,15 kg para diferentes valores de tamanho de malha no domínio do ar e no domínio da água. Os resultados foram apresentados em termos da relação P_{cal}/P_{in} .

Na Figura A.3 (a) estão apresentados os valores de P_{cal}/P_{in} obtidos variando o tamanho da malha no domínio do ar entre 5 até 1,5 cm e mantendo fixa em 0,2 cm no domínio da água. Observa-se que para valores inferiores a 2 cm a relação P_{cal}/P_{in} apresenta um comportamento assintótico. Na Figura A.3 (b) estão apresentados os valores de P_{cal}/P_{in} obtidos variando o tamanho da malha no domínio da água entre 0,175 até 0,4 cm e mantendo fixa em 2 cm no domínio ar. Para a faixa de tamanho de malha utilizada no domínio da água, os valores calculados da potência relativa não foram afetados. Esses resultados justificam a seleção dos tamanhos de malha utilizados nesse estudo.

Figura A.3 Estudo de malha realizado com o modelo incluindo a carga de 0,15 kg. (a) Efeito do tamanho do elemento no domínio do ar, fixando o tamanho do elemento em 2 mm no domínio da água. (b) Efeito do tamanho do elemento no domínio da água, fixando o tamanho do elemento em 2 cm no domínio do ar.



Potência entregue pelo Magnetron

Utilizando a abordagem de Zhang e Datta (2003) foi estimada que cerca de 70% do valor da potência nominal, 1000 W, era entregue pelo forno micro-ondas. O valor estimado foi de 698 W. Solstysiak, Erle e Celuch (2008) obtiveram valores de potência entregue pelo forno entre 90 a 75% da potência nominal em dois fornos domésticos. Para simular a curva de carga do forno de micro-ondas o valor de P_{in} de 698 W foi utilizado.

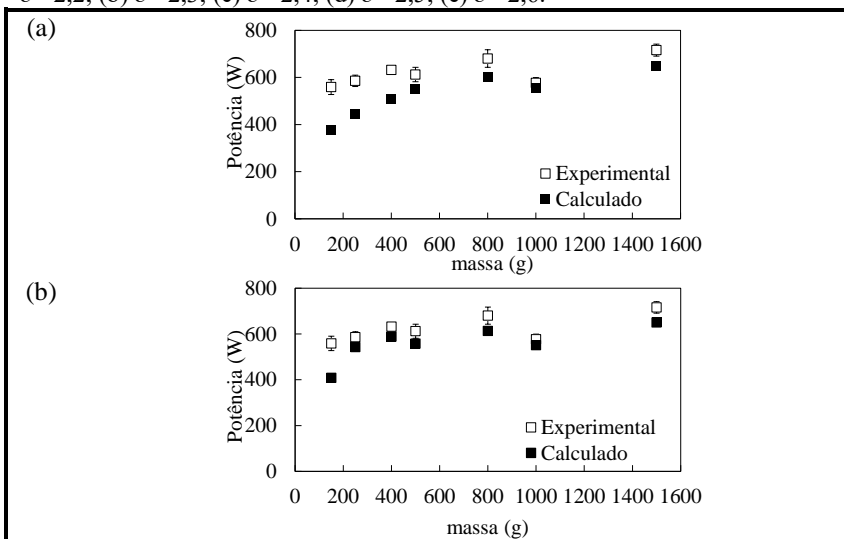
Curvas de Carga

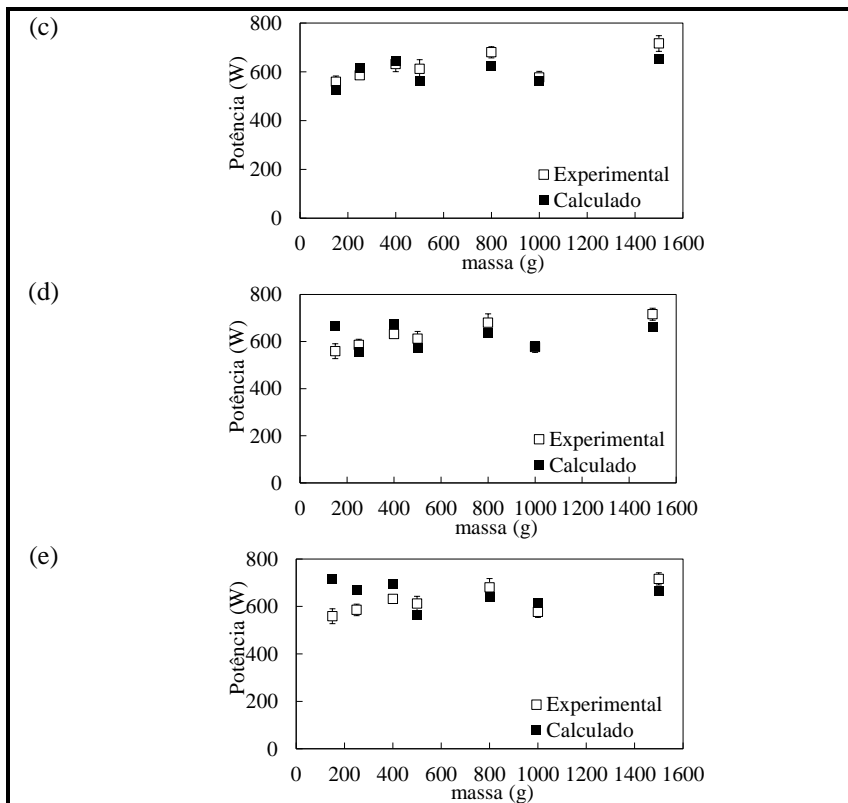
A Figura A.4 ilustra os resultados experimentais da potência dissipada na água com os resultados calculados através do modelo eletromagnético. Nas simulações foram utilizadas as propriedades dielétricas da água em 30 °C e variou-se o valor da constante dielétrica da plataforma de suporte da amostra. Foi considerado que o valor da

constante dielétrica da plataforma de polipropileno utilizado pode variar de 2,2 a 2,6. Apesar da pequena variação no valor de ϵ' a precisão do modelo foi fortemente afetada, principalmente para as amostras de menor volume (Figura A.4). Os resultados indicam que o valor da propriedade dielétrica da plataforma possa estar próximo a 2,4, pois para este valor o erro relativo entre os valores experimentais e calculados foi inferior a 10 % para cada volume de carga e o erro relativo médio ficou abaixo de 6,5 %.

Deve ser destacado ainda que, uma parcela dos erros observados entre medida experimental e simulação numérica pode ocorrer pela simplificação assumida na concepção do modelo. Os fenômenos de transferência de calor e quantidade de movimento foram desconsiderados. Durante o processo de aquecimento há pontos de sobreaquecimento no interior da carga de água que levam ao aparecimento de correntes de convecção natural resultante do aumento da força de empuxo nas porções de fluido aquecidas.

Figura A.4 Previsão das curvas de carga do forno doméstico utilizando diferentes valores para a constante dielétrica do material da plataforma. (a) $\epsilon'=2,2$; (b) $\epsilon'=2,3$; (c) $\epsilon'=2,4$; (d) $\epsilon'=2,5$; (e) $\epsilon'=2,6$.





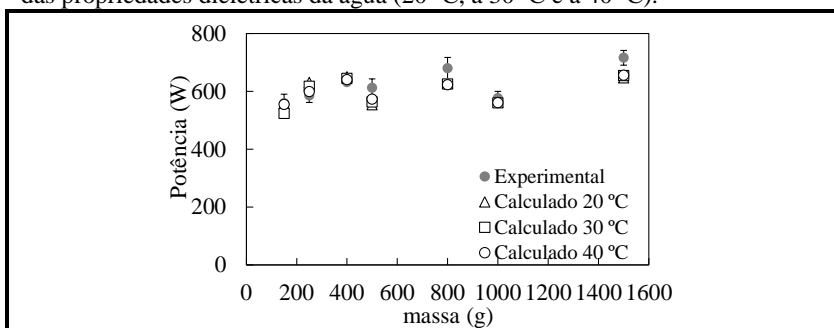
Os resultados ilustrados na Figura A.4 evidenciam também a menor sensibilidade do modelo para amostras pequenas. Quanto menor o valor da relação Volume Carga / Volume da Cavidade menos preciso foi o modelo. Quando o valor dessa relação esteve na ordem de 10^{-2} (1,5, 0,8, 0,6 e 0,5 kg) o modelo descreveu adequadamente os valores experimentais e as previsões geradas foram independentes do valor da constante dielétrica da plataforma de polipropileno.

Solstysiak, Erle e Celuch (2008) também observaram que a precisão das previsões geradas pelo modelo eletromagnética diminuiu a medida que o tamanho da amostra se torna menor. Segundo Solstysiak, Erle e Celuch (2008), o fato pode estar relacionado à frequência de propagação das ondas eletromagnéticas no interior do forno. As simulações foram conduzidas considerando a frequência de operação do magnetron constante em 2,45 GHz, entretanto, durante os experimentos essa frequência pode variar (± 50 MHz, especificação do produto). A

distribuição dos campos eletromagnéticos no aquecimento micro-ondas depende dos modos de ressonância no interior da cavidade do forno. Cada modo tem uma frequência correspondente. Uma pequena mudança na frequência pode resultar em um modo de ressonância diferente, o que pode levar a mudanças nos padrões de aquecimento (RESURRECCION et al., 2015). A frequência emitida por um magnetron em um forno micro-ondas depende de dois parâmetros: voltagem cátodo-ânodo e a impedância de saída do magnetron, que é definida pela carga que está na cavidade, potência de operação do magnetron e idade de aparato (RESURRECCION et al., 2015). Portanto, é plausível que possam ocorrer mudanças na frequência durante o aquecimento das cargas e tal variável não foi considerada no modelo.

Para avaliar o efeito da temperatura da água, simulações foram conduzidas utilizando as propriedades dielétricas a 20, 30 e 40°C (Tabela A.1). Conforme pode ser observado na Figura A.5 esse parâmetro teve pouco efeito sobre as previsões geradas pelo modelo.

Figura A.5 Previsão da curva de carga do forno doméstico utilizando o valor da constante dielétrica do material da plataforma igual a 2,4 e diferentes valores das propriedades dielétricas da água (20 °C, a 30 °C e a 40 °C).



CONCLUSÃO

Um modelo matemático baseado nas equações de Maxwell do eletromagnetismo foi utilizado para simular a curva de carga de um forno de micro-ondas doméstico. O modelo eletromagnético descreveu adequadamente os dados experimentais, com valores de erro relativo médio, entre calculado e experimental, abaixo de 6,5 %. O estudo revelou também que quando a relação de aspecto volume de carga / volume de cavidade foi inferior a 10^{-2} aumentou a imprecisão das previsões do modelo. Este resultado pode estar relacionado à frequência

de propagação das ondas no interior da cavidade, entretanto tal fenômeno ainda deve ser mais bem estudado.