



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**CINÉTICA DE AQUECIMENTO E SECAGEM, PROPRIEDADES
DIELÉTRICAS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADO AO
TRATAMENTO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO POR
MICROONDAS**

Arley Silva Rossi

Uberlândia - MG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**CINÉTICA DE AQUECIMENTO E SECAGEM,
PROPRIEDADES DIELÉTRICAS E SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL APLICADO AO TRATAMENTO DE
CASCALHO DE PERFURAÇÃO POR MICROONDAS**

Arley Silva Rossi

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde

**Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química da Universidade
Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários à
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Química.**

Uberlândia - MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R833c
2017 Rossi, Arley Silva, 1981-
Cinética de aquecimento e secagem, propriedades dielétricas e
simulação computacional aplicado ao tratamento de cascalho de
perfuração por microondas / Arley Silva Rossi. - 2017.
117 f. : il.

Orientador: Carlos Henrique Ataíde.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Descontaminação (de gases,
produtos químicos, etc.) - Teses. 3. Secagem - Teses. 4. Fluidos - Teses.
I. Ataíde, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

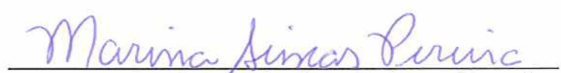
CDU: 66.0

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM JULHO DE 2017.


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(Orientador – PPGEQ/UFU)



Profa. Dra. Marina Seixas Pereira
(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Andersen dos Santos Moraes
(UNIUBE/Uberaba)



Prof. Dr. Nilson José Fernandes
(UFG/Regional Catalão/Engenharia de Produção)

DEDICATÓRIA

***A Deus e aos amigos espirituais
que sempre estiverem ao meu lado nessa jornada.***

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.”

Leonardo Da Vinci

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS:	i
LISTA DE TABELAS:	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivos	2
1.1.1 – Cálculo das propriedades dielétricas	3
1.1.2 – Cinética de aquecimento e secagem	3
1.1.3 – Simulação computacional da cinética de aquecimento	3
CAPÍTULO 2	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - Fluido e cascalho de perfuração	5
2.2 - Aquecimento via microondas	6
2.2.1 - Microondas para o tratamento de cascalho de perfuração	11
2.3 - Propriedades dielétricas	14
2.3.1 - Constante dielétrica (ϵ')	18
2.3.2 - Fator de perda dielétrica (ϵ'')	19
2.3.3 - Tangente de perdas ($\tan\delta$)	19
2.3.4 - Profundidade de penetração (D_p)	20
2.3.5 - Fatores que afetam as propriedades dielétricas dos materiais	21
2.3.6 - Trabalhos relacionados a propriedades dielétricas e microondas	24
2.4 - Simulação computacional	25
2.4.1 - Trabalhos relacionados a simulação em fornos microondas	27
CAPÍTULO 3	30
MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 - Propriedades Dielétricas	30
3.1.1 - Preparação das amostras para as medidas de propriedades dielétricas	31
3.1.2 - Determinação das propriedades dielétricas	33
3.2 - Cinética de aquecimento e secagem de cascalho	36
3.2.1 - Unidade experimental	36

3.2.2 - Materiais empregados.....	37
3.2.3 - Procedimento experimental.....	38
3.3 - Simulação eletromagnética	41
3.3.1 - <i>Hardware</i> e <i>software</i> utilizados	43
3.3.2 - Metodologia utilizada e hipóteses de estudo.....	43
3.3.3 - Desenvolvimento do algoritmo	44
3.3.4 - Simplificações aplicadas ao modelo.....	48
3.3.5 - Condições de contorno	48
3.3.6 - Propriedades dos materiais.....	49
3.3.7 - Malha computacional	49
CAPÍTULO 4.....	50
RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 - Propriedades dielétricas	50
4.2 - Cinética de aquecimento e secagem.....	60
4.3 - Simulação eletromagnética	70
4.3.1 - Simulação de propriedades dielétricas.....	70
4.3.2 - Simulação de cinética de aquecimento	80
CAPÍTULO 5.....	98
CONCLUSÃO	98
5.1 - Conclusões.....	98
5.1.1 - Propriedades Dielétricas	98
5.1.2 - Cinética de aquecimento e secagem	99
5.1.3 - Simulação eletromagnética	100
5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros	101
CAPÍTULO 6.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
APÊNDICE 1.....	108
APÊNDICE 2.....	111
APÊNDICE 3.....	115

LISTA DE FIGURAS:

Figura 2.1 - comprimento de onda no espectro eletromagnético.....	8
Figura 2.2 - Diagrama de ondas eletromagnéticas.....	8
Figura 2.3 - Mecanismo de aquecimento via microondas.....	9
Figura 2.4 - Polarização de moléculas polares sob ação de um campo elétrico.....	10
Figura 2.5 - Aquecimento por microondas e aquecimento convencional.....	10
Figura 2.6 - Interação das microondas com os materiais.....	16
Figura 2.7 - Mecanismo de resposta dos materiais dielétricos nas diferentes frequências do espectro eletromagnético.....	17
Figura 2.8 - Rotação e alinhamento dos dipolos sob orientação do campo elétrico.....	18
Figura 2.9 - Diagrama que define a tangente de perdas.....	20
Figura 2.10 - Frequência de relaxação para permissividade complexa.....	21
Figura 2.11 - Constante dielétrica da água pura em função da frequência em temperaturas.....	22
Figura 2.12 - Fator de perdas dielétrica da água pura em função da frequência em temperaturas.....	23
Figura 2.13 - Aquecimento de um processador acoplado em uma placa.....	26
Figura 2.14 - Módulo RF responsável pela parte eletromagnética do COMSOL.....	27
Figura 3.1 - Amostras variadas para análise de propriedades dielétricas.....	33
Figura 3.2 - Sensor Agilent para medição de propriedades dielétricas até 4,5GHz.....	34
Figura 3.3 - Analisador de rede com sonda específica para medidas de propriedades dielétricas.....	34
Figura 3.4 - Esquema da unidade experimental de aquecimento e secagem por microondas.....	36
Figura 3.5 - Forno para experimentos de bancada (a, b) e modelo computacional simplificado para simulações (c).....	41
Figura 3.6 - Vistas da cavidade do microondas (a) vista frontal, (b) vista superior, (c) vista isométrica e (d) corte simétrico.....	42
Figura 3.7 - Fluxograma do processo de acoplamento das Equações de Maxwell e Equação da Energia com permissividade constante.....	45
Figura 3.8 - Fluxograma do processo de acoplamento das Equações de Maxwell e Equação da Energia com permissividade variando com T.....	47

Figura 4.1 - Perfil da tangente de perdas com a frequência (à temperatura ambiente). (a) fluidos de perfuração, (b) bases orgânicas	50
Figura 4.2 - Perfil da tangente de perdas com a frequência, (a) parafina pura e recuperada, (b) olefina pura e recuperada.....	52
Figura 4.3 - Amostras puras e recuperadas de parafina e olefina respectivamente.....	52
Figura 4.4 - Perfil da tangente de perdas para as três faixas de tamanhos dos cascalhos, (a) frequência de 2,4 a 2,5GHz, (b) frequência de 2,45GHz.....	54
Figura 4.5 - Perfil da tangente de perdas com a temperatura das amostras, (a) frequência de 2,4 a 2,5GHz, (b) regressão linear da $\tan\delta$ em função da temperatura.....	55
Figura 4.6 - Propriedades dielétricas do cascalho puro e misturados com fluido olefina a temperatura ambiente, (a) constante dielétrica, (b) fator de perda dielétrica.....	57
Figura 4.7 - Profundidade de penetração em função da faixa de tamanho do cascalho (a) e da variação de temperatura (b).....	58
Figura 4.8 - Distribuição de tamanho (a) e da circularidade (b) do cascalho da perfuração de poços para as três faixas estudadas.....	59
Figura 4.9 - Curva de aquecimento para os compostos do conjunto de ensaios 1.....	60
Figura 4.10 - Variação da massa total de cascalho misturado com água, fluidos de perfuração e bases orgânicas puras.....	62
Figura 4.11 - Controle de temperatura.....	64
Figura 4.12 - Cinética de secagem da água presente no cascalho com fluidos (a), e secagem da fase orgânica presentes no cascalho com fluidos (b).....	65
Figura 4.13- Estrutura pouco porosa do cascalho de perfuração.....	67
Figura 4.14 - Formação rochosa do tipo folhelho.....	67
Figura 4.15 - Cinética de secagem para fluido de perfuração parafina (a), (c), (e) e olefina (b), (d), (f) e modelos de secagem ajustados em três diferentes temperaturas.....	70
Figura 4.16 - Geometria do forno e malha utilizada nas simulações computacionais.....	71
Figura 4.17 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para diferentes faixas granulométricas.....	72
Figura 4.18 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para diferentes faixas granulométricas.....	73
Figura 4.19 - Distribuição de temperatura ($^{\circ}C$) para diferentes faixas granulométricas.....	73
Figura 4.20 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para diferentes concentrações de fluido de perfuração.....	74
Figura 4.21 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para diferentes concentrações de fluido de perfuração.....	75
Figura 4.22 - Distribuição de temperatura ($^{\circ}C$) para diferentes concentrações de fluido de perfuração.....	76

Figura 4.23 - Regressão linear das propriedades dielétricas variando com a temperatura.	77
Figura 4.24 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para propriedades dielétricas variando com a temperatura.....	78
Figura 4.25 - Distribuição de densidade de potência (W/m ³) para propriedades dielétricas variando com a temperatura.....	79
Figura 4.26 - Distribuição de temperatura (°C) para propriedades dielétricas variando com a temperatura.....	80
Figura 4.27 - Regressão linear das propriedades dielétricas variando com a temperatura.	82
Figura 4.28 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de água pura.....	82
Figura 4.29 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para aquecimento da água pura.....	83
Figura 4.30 - Distribuição de densidade de potência (W/m ³) para aquecimento da água pura.....	84
Figura 4.31 - Distribuição de temperatura (°C) para aquecimento da água pura.....	85
Figura 4.32 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de fluidos de perfuração (a) parafina e (b) olefina.....	86
Figura 4.33 - Distribuição de campo elétrico (V/m) para fluidos de perfuração parafina e olefina.....	87
Figura 4.34 - Distribuição de densidade de potência (W/m ³) para fluidos de perfuração parafina e olefina.....	87
Figura 4.35 - Distribuição de temperatura (°C) para os fluidos de perfuração parafina e olefina.....	88
Figura 4.36 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de bases orgânicas puras (a) parafina e (b) olefina.....	89
Figura 4.37 - Distribuição de campo elétrico (V/m) para bases orgânicas puras.....	90
Figura 4.38 - Distribuição de densidade de potência (W/m ³) para bases orgânicas puras..	91
Figura 4.39 - Distribuição de temperatura (°C) para bases orgânicas puras.....	91
Figura 4.40 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de cascalho misturados com fluido (a) parafina e (b) olefina.....	92
Figura 4.41 - Distribuição de campo elétrico (V/m) para cascalho misturado com fluidos de perfuração.....	93
Figura 4.42 - Distribuição de densidade de potência (W/m ³) para cascalho misturados com fluidos de perfuração.....	94
Figura 4.43 - Distribuição de temperatura (°C) para cascalho misturados com fluidos de perfuração.....	94
Figura 4.44 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de cascalho puro.....	95

Figura 4.45 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para aquecimento de cascalho puro....	96
Figura 4.46 - Distribuição de densidade de potência (W/m ³) para aquecimento de cascalho puro.....	97
Figura 4.47 - Distribuição de temperatura (°C) para aquecimento de cascalho puro.....	97
Figura A1.1 - Remoção de contaminante com o tempo para várias distancias da fonte de microondas.....	109
Figura A1.2 - Extrapolação dos modelos de secagem para fluido parafina (a), (c), (e) e olefina (b), (d), (f) em três diferentes temperaturas.....	111
Figura A2.1 - Propriedades do ar banco de dados COMSOL.....	114
Figura A2.2 - Propriedades do disco metálico banco de dados COMSOL.....	114
Figura A2.3 - Propriedades da cavidade banco de dados COMSOL.....	115
Figura A2.4 - Propriedades da água banco de dados COMSOL.....	115
Figura A3.1 - Regressão linear da condutividade térmica da água variando com a temperatura.....	115
Figura A3.2 - Regressão linear da densidade da água variando com a temperatura.....	116
Figura A3.3 - Regressão linear da capacidade calorífica da água variando com a temperatura.....	117

LISTA DE TABELAS:

Tabela 3.1 - Resumo dos grupos de amostras para ensaios de propriedades dielétricas	31
Tabela 3.2 - Resumo do conjunto de ensaios de cinética de aquecimento e secagem de cascalho.....	38
Tabela 3.3 - Equações dos modelos de secagem.....	41
Tabela 4.1 - Propriedades dielétricas dos fluidos de perfuração e das bases orgânicas puras para frequência de 2,45GHz.....	51
Tabela 4.2 - Porcentagem de área de picos de cromatografia gasosa para bases orgânicas puras e recuperadas respectivamente.....	53
Tabela 4.3 - Propriedades dielétricas para o cascalho para as três faixas granulométricas a frequência de 2,45 GHz.....	54
Tabela 4.4 - Tangente de perdas ($\tan\delta$) para os ensaios das propriedades dielétricas com a temperatura.....	56
Tabela 4.5 - Propriedades dielétricas do cascalho com diferentes teores de fluido olefina na frequência de 2,45 GHz.....	57
Tabela 4.6 - Resultados da análise de fluorescência de Raio-X para amostra de cascalho puro.....	62
Tabela 4.7 - Massa total de cascalho misturado com vários materiais após operação de secagem.....	63
Tabela 4.8 - Parâmetros do modelo de Page.....	68
Tabela 4.9 - Parâmetros do modelo de Henderson-Pabis.....	68
Tabela 4.10 - Parâmetros do modelo MSM.....	69
Tabela 4.11 - Propriedades dielétricas para ensaios com variação de temperatura para frequência de 2,45GHz.....	78
Tabela 4.12 - Propriedades dielétricas para água pura versus temperatura.....	82
Tabela 4.13 - Propriedades dielétricas cascalho misturados com fluidos de perfuração.....	93
Tabela A1 - Propriedades dos materiais utilizados na simulação COMSOL.....	112
Tabela A2 - Condutividade térmica da água pura versus temperatura.....	115
Tabela A3 - Densidade da água pura versus temperatura.....	116
Tabela A4 - Capacidade calorífica da água pura versus temperatura	117

RESUMO

Cascalhos provenientes do processo de escavação e contaminados com fluidos de perfuração não aquosos são rejeitos da indústria do petróleo e tem ganhado bastante atenção, uma vez que as leis ambientais que controlam o seu descarte estão cada vez mais rigorosas. O aquecimento e a secagem por microondas, para promover a remoção desses contaminantes, tem sido estudado ao longo dos últimos anos e tem se mostrado uma tecnologia promissora. A cinética de aquecimento e secagem, bem como a interação do campo eletromagnético com o material a ser aquecido estão diretamente associadas as propriedades dielétricas. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades dielétricas do cascalho de perfuração e os aspectos fundamentais da cinética de aquecimento e secagem de cascalhos por microondas. Para compreender a influência dos principais componentes presentes nos cascalhos contaminados, avaliou-se individualmente curvas de aquecimento de componentes da mistura cascalho/fluido. Alguns modelos clássicos de secagem convencional de sólidos foram empregados com objetivo de descrever a cinética de remoção dos fluidos presentes nestes cascalhos contaminados. Por fim, o conhecimento das propriedades dielétricas e da cinética de aquecimento e secagem foi empregada em um processo de simulação eletromagnética. Com intuito de descrever qualitativamente a operação de aquecimento das misturas avaliadas no presente trabalho. Desta maneira, através dos resultados obtidos pôde-se compreender melhor a interação das propriedades dielétricas associadas a granulometria do cascalho, ou seja, quanto menor a faixa granulométrica maior é a capacidade de converter energia absorvida em calor. Para a concentração de contaminantes, através do fluido de perfuração, quanto maior concentração, maior seria a habilidade de transformar energia absorvida em calor. Por meio do estudo de cinética de aquecimento e secagem compreendeu-se aspectos importantes relacionados à interação da água com os componentes da mistura cascalho/fluido, bem como o aquecimento do sólido e transferência de energia por condução para bases orgânicas. O modelo que melhor se aproximou dos dados experimentais foi o Modelo de Secagem por Microondas-MSM (proposto por esse trabalho), descrevendo satisfatoriamente a operação de secagem dos fluidos de perfuração através do aquecimento via microondas. A simulação computacional mostrou uma forte ligação das propriedades dielétricas com a absorção de energia, através da formação do campo elétrico, e a dissipação dessa energia na forma de calor. Portanto, esses resultados são de grande relevância para o aprimoramento e desenvolvimento de melhorias na operação de tratamento de sólidos de perfuração por microondas, assegurando um tratamento rápido, eficaz com baixo custo energético.

Palavras chave: Descontaminação; Olefina; Parafina; Profundidade de penetração; COMSOL Multiphysics

ABSTRACT

Cuttings from the drilling process and contaminated with non-aqueous drilling fluids are tailings from the oil industry and have gained a attention as environmental laws that control their disposal are increasingly severe. Microwave heating and drying to promote the removal of these contaminants has been studied over the past few years and has been shown to be a promising technology. The kinetics of heating and drying, the penetration depth of electromagnetic radiation, as well as the interaction of the electromagnetic field with the material to be heated are directly associated with the dielectric properties. In addition, the mathematical modeling and numerical simulation of microwave heating and drying operations are strongly dependent on these properties. Thus, the present work aims to evaluate the dielectric properties of the drilling cuttings. Moreover, the present work also investigated the fundamental aspects of the kinetics of heating and drying of cuttings by microwave. To understand the influence of the major components present on the contaminated cuttings, heating curves of components of the cuttings/fluid mixture were individually evaluated. Some classical models of conventional drying of solids were used to describe the kinetics of removal of the fluids present in these contaminated cuttings. Finally, the knowledge of the dielectric properties and the kinetics of heating and drying of the cuttings was used in an electromagnetic simulation process. For this, commercial software was used in order to perform computational simulations to compare the calculated dielectric properties and qualitatively describe the heating operation of the blends evaluated in the present work. In this way, through the results obtained, it was possible to better understand the interaction of the dielectric properties associated to cuttings granulometry and the concentration of contaminants, through the drilling fluid. The kinetic study of heating and drying comprised important aspects related to the interaction of water with the components of the cuttings/fluid mixture, as well as the heating of the solid, evaporation of this water and entrainment of organic bases. The computational simulation showed a strong connection of the dielectric properties with the absorption of energy, through the formation of the electric field, and the dissipation of this energy in the form of heat. Therefore, these results are of great relevance for the improvement and development of improvements in the operation of microwave decontamination, ensuring a fast and effective treatment with low energy costs.

Keywords: Decontamination; Olefin; Paraffin; Penetration depth, COMSOL Multiphysics.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente, a técnica de escavação rotativa é a mais empregada na perfuração de poços de petróleo. O processo se baseia em comprimir a broca contra a rocha a ser perfurada, executando movimentos de rotação, gerando assim, o esmerilhamento da rocha. Estes fragmentos de rochas gerados no processo de perfuração são conhecidos como cascalho de perfuração e devem ser removidos dessa operação pelo fluido de perfuração, que entra pelo interior da broca e retorna à superfície, pelo espaço anular entre a coluna de perfuração e as paredes do poço, carreando consigo os cascalhos.

Em processos de exploração e perfuração de poços de petróleo o fluido de perfuração é basicamente utilizado com o objetivo de manter a estabilidade hidrostática do poço, resfriar a broca, lubrificar a coluna além de manter em suspensão os cascalhos gerados ao longo da perfuração, transportando-os até a superfície. Esses cascalhos, misturados com fluido de perfuração, constituem o resíduo da etapa de perfuração. Os sólidos derivados desse processo contém certa quantidade de base orgânica aderida, o que impede o seu descarte em alto mar. Deste modo, é inevitável a utilização de um equipamento que promova essa separação para ajustar os cascalhos aos parâmetros ambientais vigentes na legislação atual. No Brasil o IBAMA permite o descarte em alto mar dos cascalhos advindos da perfuração com fluido sintético, se a concentração mássica da base não aquosa for inferior a 6,9 % no caso de parafinas ou olefinas e 9,4 % no caso de ésteres (PEREIRA, 2010; PANISSET, 2014).

A centrífuga filtrante ou secador de cascalhos é na atualidade o equipamento responsável por promover essa descontaminação do cascalho proveniente da perfuração de poços. Mas, devido a algumas limitações quanto à segurança e eficiência, o presente equipamento trabalha no limiar da legislação ambiental vigente. Com o propósito de melhorar a descontaminação de cascalho de perfuração e ultrapassar as limitações da centrífuga filtrante, o processo de secagem térmica se mostra uma tecnologia viável. O aquecimento e secagem por microondas desponta,

na atualidade, como uma tecnologia inovadora para promover a descontaminação de cascalho com fluido de perfuração. Nos últimos anos vários trabalhos foram publicados nessa área e, em sua grande maioria, apresentam cascalhos com teores orgânicos residuais abaixo de 1% (em massa), tendo ainda a possibilidade de recuperação da fase orgânica e possível reutilização na formulação de novos fluidos de perfuração (PEREIRA, 2013; PETRI, 2014; SANTOS, 2014b; PANISSET, 2014).

Tradicionalmente, em processos térmicos, a energia é transferida através da condução, convecção e/ou radiação. A energia de microondas, por sua vez, é fornecida diretamente aos materiais por meio da interação molecular com o campo eletromagnético formado pelas radiações. A distribuição de temperatura interna de um material exposto a um aquecimento convencional é limitada por sua condutividade térmica, ao passo que no processo de aquecimento por microondas os elementos do material são aquecidos individualmente e instantaneamente (MEREDITH, 1998; POZAR, 2005).

Algumas limitações do processo de aquecimento por microondas, principalmente para o tratamento de resíduos sólidos gerados pela indústria do petróleo, podem ser minimizadas realizando estudos preliminares para obter as propriedades dielétricas desses materiais. Estes estudos são relevantes na medida que permitem entender e descrever a cinética de aquecimento e redução do teor de contaminantes desses materiais em função das propriedades dielétricas (LIU *et al.*, 2014).

O conhecimento de parâmetros ou aspectos fundamentais da cinética de aquecimento e secagem da mistura cascalho/fluido é de extrema importância, para conduzir a busca por condições operacionais mais favoráveis, que otimizem o processo de descontaminação de cascalho. Deste modo, a simulação computacional, apoiada no estudo de propriedades dielétricas e cinética de aquecimento e secagem, se tornar uma ferramenta indispensável no estudo e tratamento de cascalho de perfuração. Ou seja, estes dados podem ser utilizados para propor melhorias na operação de descontaminação destes sólidos via microondas, garantindo um tratamento mais eficiente e rápido com menor custo energético.

1.1 – Objetivos

O objetivo central do presente trabalho foi trazer novas melhorias para o processo de tratamento de cascalho de perfuração através da tecnologia de microondas. Para isso o

trabalho foi dividido em três partes. A primeira foi o estudo das propriedades dielétricas do cascalho de perfuração. A segunda foi o estudo dos aspectos fundamentais da cinética de aquecimento e secagem do cascalho de perfuração. E por fim, a simulação eletromagnética abordados as propriedades dielétricas e a cinética de aquecimento do cascalho de perfuração.

1.1.1 – Cálculo das propriedades dielétricas

Os experimentos realizados buscaram calcular e investigar as propriedades dielétricas de cascalho de perfuração, para avaliar suas implicações no tratamento via microondas. Foram realizados experimentos com fluidos de perfuração, bases orgânicas puras e recuperadas em processos de aquecimento e secagem por microondas. Investigou-se a influência da granulometria, da temperatura e da concentração de contaminante nas propriedades dielétricas do cascalho. Tendo como intuito obter esses valores de propriedades dielétricas para busca condições operacionais mais favoráveis, que otimizem o processo de descontaminação de cascalho.

1.1.2 – Cinética de aquecimento e secagem

Outro ponto explorado no presente trabalho visou estudar e entender os aspectos fundamentais da cinética de aquecimento e secagem de fluidos de perfuração a base de parafina e olefina e do cascalho de perfuração misturados com esses dois fluidos. Também foi investigado o comportamento individual do aquecimento e remoção das bases orgânicas e da água no processo de secagem utilizando microondas. Modelos clássicos de cinética de secagem convencional de sólidos (condução, convecção e/ou radiação) foram utilizados e parâmetros foram estimados com o objetivo de descrever a operação de secagem via microondas.

1.1.3 – Simulação computacional da cinética de aquecimento

Por fim, técnicas de simulação eletromagnética utilizando o *software COMSOL Multiphysics* também foram empregadas com interesse de comparar as propriedades dielétricas, inicialmente avaliadas, e descrever a cinética de aquecimento das misturas envolvidas no trabalho. Desta maneira, os resultados obtidos permitiram compreender alguns mecanismos envolvidos e algumas hipóteses importantes foram estabelecidas sobre a secagem do cascalho

de perfuração por microondas. Mais especificamente, foi possível compreender o papel dos principais componentes (água, bases orgânicas e sólidos) bem como a contribuição ou participação de cada um nas operações de aquecimento e secagem via microondas.

Os resultados obtidos neste trabalho, abordaram aspectos específicos relevantes e inovadores sobre novas contribuições para o tratamento de cascalhos oriundos da perfuração de poços aplicando microondas. Adicionalmente, os resultados apresentados neste trabalho foram úteis para a modelagem matemática e simulação numérica do aquecimento e secagem de cascalhos gerados na perfuração de poços de petróleo e gás.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Fluido e cascalho de perfuração

Os detritos de rocha gerados durante a operação de perfuração de um poço de petróleo ou gás natural são usualmente conhecidos como cascalho de perfuração, e são removidos continuamente, tendo como agente carreador o fluido de perfuração. Usualmente o fluido de perfuração é injetado por bombas pelo interior da coluna e retorna a superfície, pelo espaço anular entre a coluna de perfuração e as paredes do poço. Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, que tem como principal função a lubrificação da coluna e o resfriamento da broca, promover a limpeza do fundo do poço, além de transportar os cascalhos até a superfície do poço (DARLEY e GRAY, 1988).

Os fluidos de perfuração podem ser classificados de acordo com o tipo de fase contínua utilizada, podendo ser fluido de base aquosa, não-aquosa e fluidos aerados. Os fluidos de base não-aquosa são os mais utilizados atualmente no Brasil por apresentar diversas vantagens em relação aos outros tipos de fluidos, como menores problemas operacionais e baixos coeficientes de atrito. Os fluidos sintéticos de base não aquosa são emulsões invertidas (ou inversas), sendo constituídos de uma fase líquida contínua, formada por uma base orgânica insolúvel em água (hidrocarbonetos, éter, ester ou acetal), água e aditivos químicos para conceder maior estabilidade a emulsão. A razão base sintética ou orgânica e água (O/W) utilizada geralmente na formulação dos fluidos de base não-aquosa, varia entre 60/40(peso) e 75/25(peso). Essa razão é estabelecida para conceder determinadas características na viscosidade do fluido de perfuração (ASME, 2005).

Os fluidos de perfuração não aquosos [ou *Non-Aqueous Drilling Fluid (NADF)*] foram desenvolvidos para perfurações de poços de petróleo e gás sob condições de temperaturas e pressões elevadas, ou em contato com formações constituídas de rochas ativas, como as

formações de folhelhos argilosos, tipicamente encontrada em poços de petróleo nacionais. Podem ocorrer drásticas limitações técnicas e operacionais se fluidos aquosos, mais baratos, forem aplicados em operações de perfurações nessas condições (PETROBRAS, 2011)

Os fluidos sintéticos empregados neste trabalho foram dois tipos largamente utilizados nas operações de perfuração *onshore* pela PETROBRAS e são denominados pela empresa de BR-MUL. O primeiro emprega na formulação da emulsão inversa de uma n-parafina como base sintética (BR-MUL-parafina) e o segundo utiliza uma olefina interna linear como base sintética (BR-MUL-olefina). As razões base sintética ou orgânica e água (O/W) utilizadas na preparação de ambos os fluidos são 70/30 em peso. Maiores detalhes sobre cascalho, fluido de perfuração e suas particularidades podem ser encontradas nos trabalhos de PEREIRA (2010, 2013), SANTOS (2014b), PETRI (2014) e PANISSET (2014).

2.2 - Aquecimento via microondas

Microondas sendo utilizado para fins de aquecimento industrial teve suas primeiras aplicações após o período da primeira guerra mundial. Apesar de, muitas vezes, pareça se tratar de uma tecnologia recente, o primeiro microondas doméstico foi inventado logo após esse período de intenso conflito. Ademais, os principais conceitos sobre eletromagnetismo foram compreendidos a mais de 100 anos atrás, sendo os radares a primeira aplicação da tecnologia de microondas, os quais foram efetivamente desenvolvidos durante a segunda grande guerra (MUJUMDAR, 2007).

Em 1873, os principais fundamentos do eletromagnetismo foram desenvolvidos por Clerk Maxwell. A partir de considerações matemáticas, este cientista levantou hipóteses sobre a propagação de ondas eletromagnéticas e a ideia que a luz é uma forma de energia eletromagnética. Entretanto, somente após algum tempo Heinrich Hertz conseguiu validar a teoria proposta por Maxwell, a partir de uma série de experimentos (POZAR, 2005).

As equações de Maxwell (Eq. 2.1 a 2.4) são um grupo de equações diferenciais parciais que, juntamente com a lei da força de Lorentz compõem a base do eletromagnetismo e, desta forma, podem ser escritas como se segue (SILVESTER e FERRARI, 1996; VAZ, 2014). A lei de Faraday para indução ou lei da indução eletromagnética é baseada no eletromagnetismo, e relaciona a variação temporal dos campos magnéticos atravessando circuitos elétricos com o aparecimento de forças eletromotrizes nesses circuitos (Eq. 2.1)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Em que, \mathbf{E} é o campo elétrico (V/m) e \mathbf{B} é a densidade de fluxo magnético (Wb/m²). O sinal negativo é a contribuição de Heinrich-Lenz. A corrente induzida no circuito é de fato gerada por um campo magnético. Deste modo, o sentido da corrente é oposto da variação do campo eletromagnético que a gera (GRIFFITHS, 1999).

A Lei de Ampere afirma que o campo magnético poderia ser estabelecido através de correntes elétricas. Posteriormente Maxwell corrigiu esse postulado demonstrando que o campo magnético poderia ser criado através de correntes elétricas, e também, por campos elétricos que variam no tempo, como na Eq. 2.2 (GRIFFITHS, 1999).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2.2)$$

Em que, \mathbf{J} é a distribuição de corrente elétrica (A/m²), \mathbf{D} é a densidade de fluxo elétrico (C/m²) e \mathbf{H} representa a intensidade de campo magnético (A/m). Como em um campo magnético não existem cargas magnéticas, ou seja, as linhas de campo magnético não podem iniciar em um ponto, como no caso do campo elétrico. Assim, as linhas de campo magnético \mathbf{B} (T), são fechadas o que leva a crer que o fluxo por uma superfície fechada deve ser nulo, como mostrado na Eq. 2.3 (GRIFFITHS, 1999).

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

E por fim a lei de Gauss descreve a relação entre o fluxo de um campo elétrico e as respectivas cargas elétricas geradoras desse campo. Em que ρ é a densidade de carga total (C/m³).

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.4)$$

A relação das ondas eletromagnéticas é encontrada no espectro eletromagnético e cada onda é caracterizada por sua frequência e comprimento de onda. A energia de microondas é uma radiação eletromagnética não ionizante com frequências que variam de 300MHz a 300GHz e comprimento de onda entre 1mm e 1m respectivamente. Dentro do espectro eletromagnético, elas estão localizadas entre as ondas de infravermelho e radiofrequência, como mostrado na Figura 2.1.

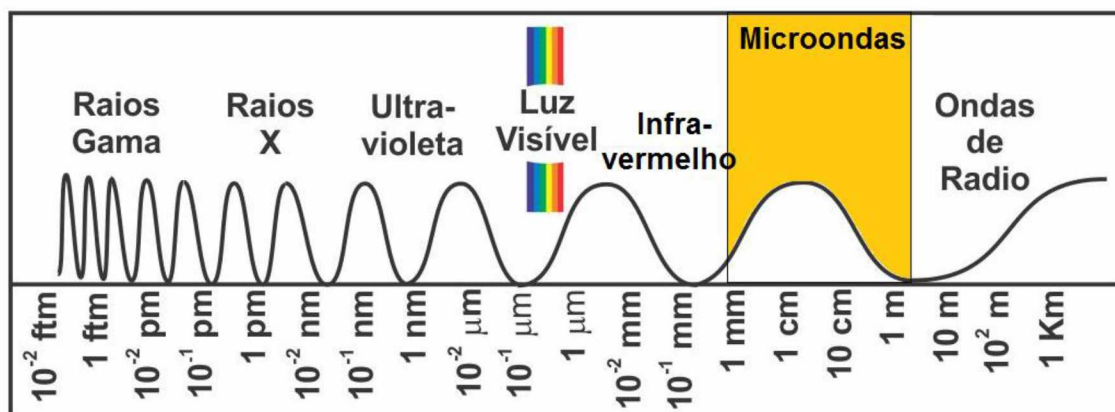


Figura 2.1 - Comprimento de onda no espectro eletromagnético. Adaptado de MEREDITY (1998).

Segundo MEREDITY (1998) toda onda eletromagnética é constituída de uma somatória de uma onda elétrica (E) e uma onda magnética (B) perpendiculares entre si e perpendiculares a direção de propagação, por este motivo são chamadas de ondas planas. O aquecimento por microondas ocorre a partir de uma oscilação do componente elétrico e magnético, o que leva a movimentação de íons, átomos e moléculas, aumentando assim a energia cinética desses componentes que, por sua vez, é convertida em energia térmica. A Figura 2.2 mostra o diagrama de ondas com seus respectivos componentes elétricos (E) e magnéticos (B).

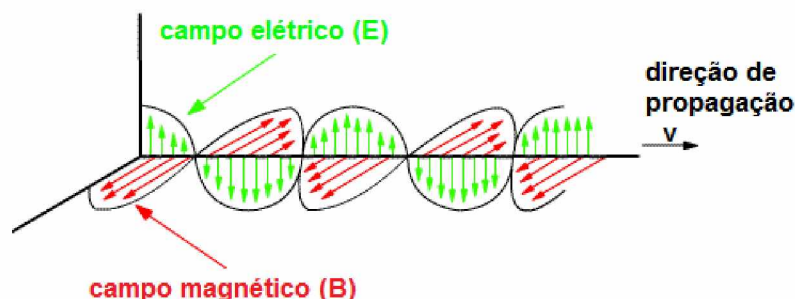


Figura 2.2 - Diagrama de ondas eletromagnéticas. Adaptado de MEREDITY (1998).

De acordo com HACKE (1999) a energia de microondas é produzida a partir da energia elétrica com uma eficiência de aproximadamente 50% para frequência de 2450MHz e 85% para 915MHz e suas principais vantagens são:

- ✓ Ocorre transferência de energia e não de calor;
- ✓ Aquecimento rápido e seletivo do material;
- ✓ Aquecimento sem contato físico;
- ✓ Alto nível de segurança e automação.

Segundo METAXAS e MEREDITY (1993) em nível molecular existem vários mecanismos que contribuem para o aquecimento via microondas, contudo, os mecanismos dominantes em frequência de microondas são a condução iônica e a rotação dipolar (Figura 2.3).

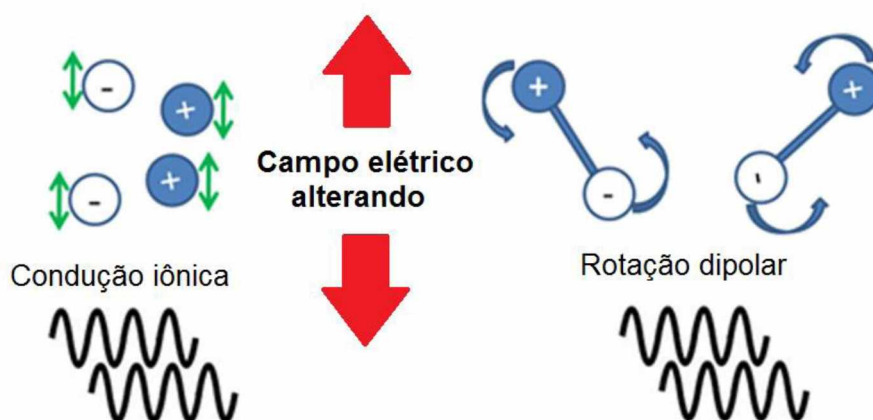


Figura 2.3 - Mecanismo de aquecimento via microondas. Adaptado de METAXAS e MEREDITY (1993).

- Condução iônica: ocorre principalmente quando os íons presentes em uma solução respondem a um campo elétrico aplicado e se deslocam. Desta forma, as colisões resultantes destes movimentos são convertidas em energia térmica.
- Rotação dipolar: Este mecanismo depende da existência de moléculas polares no material. Quando o campo elétrico é aplicado, as moléculas que possuem dipolo elétrico, tendem a se alinhar com o campo (Figura 2.4b). Assim, a polaridade do campo elétrico alterna 2450 milhões de vezes por segundo em fornos domésticos com frequência nominal de 2450MHz. Quando o campo que provocou a orientação dos dipolos moleculares é removido ocorrerá uma relaxação dielétrica, ou seja, as moléculas tenderão a voltar para o estado anterior (Figura 2.4a) dissipando a energia absorvida na forma de calor.

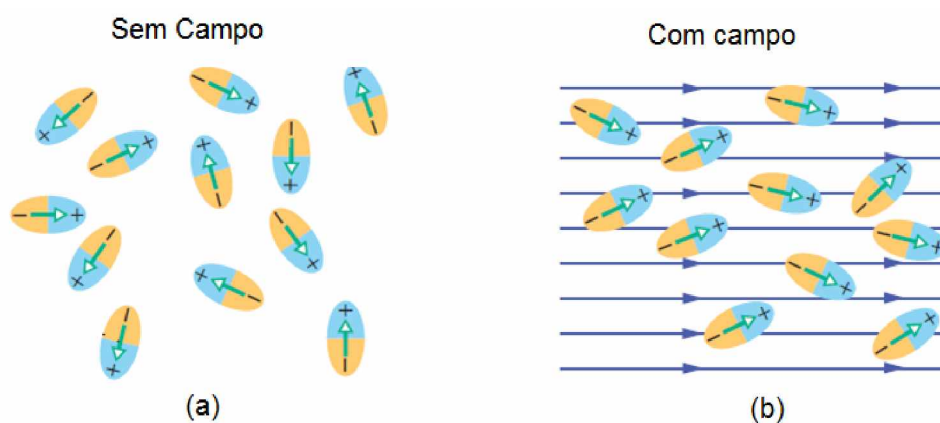


Figura 2.4 - Polarização de moléculas polares sob ação de um campo elétrico. Adaptado de METAXAS e MEREDITH (1993).

A organização do meio a ser aquecido sofre variação de acordo com a variação da intensidade das ondas eletromagnéticas incidentes nesse sistema. O aumento da taxa de choques e a fricção entre as moléculas geradas, a partir do alinhamento e desalinhamento das partículas, darão origem ao aquecimento do sistema (MEREDITH, 1998). Assim, o calor gerado, a partir do aquecimento via microondas, é resultado da transformação da energia cinética, associada a movimentação das moléculas (FORTUNY *et al.*, 2008).

Segundo MEREDITH (1998) e POZAR (2005) historicamente, em operações de aquecimento, a energia é transferida através da condução, convecção e/ou radiação. Por sua vez, a energia proveniente das microondas, é fornecida diretamente aos materiais por meio da interação molecular com o campo eletromagnético formado pelas radiações (Figura 2.5). O gradiente de temperatura interna de um material exposto a um aquecimento convencional é limitado por sua condutividade térmica, enquanto que na operação de aquecimento por microondas os componentes do material são aquecidos individualmente e instantaneamente.

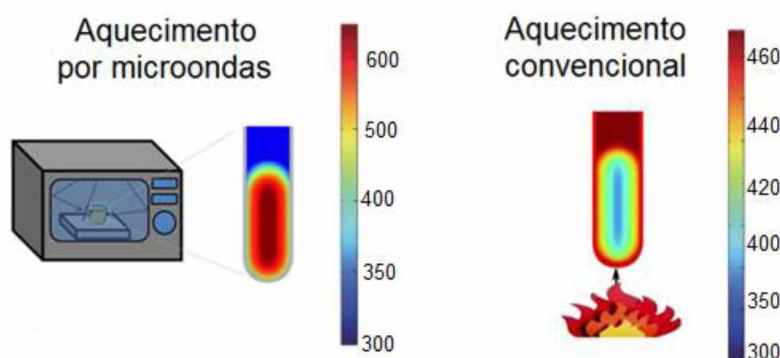


Figura 2.5 - Aquecimento por microondas e aquecimento convencional.

Por isso, o aquecimento do material sendo bombardeado por radiação, proveniente de microondas, somente ocorre onde existe moléculas que apresentam dipolo, e cujos os meios rotacionais estejam em ressonância com a radiação incidente. Desta forma, o aquecimento por microondas é seletivo, já que ele só ocorre ao redor dos locais onde existem moléculas capazes de converter esse tipo de radiação em aumento de temperatura. Além do mais, como a conversão de energia eletromagnética em energia térmica ocorre diretamente no material sendo aquecido, o aumento de temperatura é bem mais pronunciado quando comparado a métodos convencionais de aquecimento indireto (PANISSET, 2014).

2.2.1 - Microondas para o tratamento de cascalho de perfuração

A aplicação da tecnologia de microondas para tratamento de sólidos provenientes do processo de perfuração de poços de petróleo é relativamente nova. A legislação vigente na atualidade aponta que o teor aderido ao cascalho destas bases orgânicas não devem ultrapassar 6,9% em massa para ser descartado em alto mar (PEREIRA, 2010). Assim, esse novo tratamento desponta na atualidade atingindo valores residuais de teores orgânicos abaixo de 1% (em massa), existindo ainda, a possibilidade de recuperação e reutilização do fluido de perfuração.

Dois grupos de pesquisa têm se dedicado aos estudos de descontaminação de resíduos de perfuração utilizando o aquecimento via microondas. O primeiro grupo atuante na Europa liderado pelo pesquisador J. P. Robinson da Universidade de Nottingham já desenvolve pesquisas nessa área há algum tempo. O segundo grupo liderado pelo professor e pesquisador C. H. Ataíde da Universidade Federal de Uberlândia e orientador desse trabalho, tem se dedicado, nos últimos anos, aos estudos sobre o mesmo tema. Mais recentemente, um grupo italiano começou a desenvolver pesquisas sobre descontaminação de solos contaminados por hidrocarbonetos. A seguir são apresentados os principais resultados destes grupos de pesquisa.

SHANG *et. al.*, (2005) iniciaram os estudos utilizando a tecnologia de microondas como uma nova forma de descontaminação de materiais com fluido de perfuração base não-aquosa. Logo de início atingiram valores residuais de teores orgânicos abaixo do valor estipulado pela legislação vigente da época. Constataram ao final que a tecnologia de microondas é bastante promissora para esse fim.

Em 2006 SHANG *et al.*, (2006) realizaram um planejamento fatorial e mostraram que a potência aplicada e o tempo de aquecimento foram os principais fatores que afetaram a secagem via microondas. Além do mais, perceberam que um aumento no teor de água, na mistura cascalho/fluido de perfuração, melhorava a descontaminação, ou seja, poderia potencialmente aumentar a eficiência do processo.

ROBINSON *et al.*, (2009) desenvolveram uma unidade contínua de microondas para o tratamento de resíduos de perfuração no Mar do Norte. A unidade contava com uma potência de 15kW, podendo operar até numa vazão de 250kg/h de alimentação. Os resultados apontaram uma grande dependência no valor da potência aplicada e da velocidade da esteira, ou seja, do tempo de residência no interior do forno. Os autores ainda afirmaram que o processo em sistema contínuo pode ser até 10 vezes mais eficiente que um tratamento batelada.

Em 2012 o grupo liderado pelo pesquisador J. P. ROBINSON (ROBINSON *et al.*, (2012)) avaliaram a possibilidade de implantação de um sistema de agitação para o tratamento dos resíduos de perfuração. Segundo os autores, para um sistema batelada, os resultados apontaram que o uso do sistema de agitação aumentou a eficiência do processo de 40 para 90%. Segundo os autores o ganho na eficiência do processo ocorreu principalmente pela agitação mecânica aumentar a profundidade de penetração da radiação eletromagnética.

PEREIRA (2013) realizou um planejamento de experimentos, para estudar como as principais variáveis influenciaram no processo de tratamento de cascalho de perfuração por microondas. A pesquisadora concluiu que energia específica e massa possuem uma importância fundamental no tratamento. Outro detalhe aponta que quanto menor a contaminação do cascalho, maior será a remoção dessa base orgânica através do tratamento térmico. A autora ainda realizou ensaios em três diferentes temperaturas de controle e concluiu que o aumento de temperatura não contribuiu de maneira significativa para redução dos níveis residuais de fase orgânica.

SANTOS (2014a) deu prosseguimento aos estudos de PEREIRA (2013), avaliando outras situações no processo de descontaminação de sólidos de perfuração, utilizando microondas em um secador batelada. A autora estudou a influência da granulometria das partículas e a influência da altura do leito de cascalho no processo de secagem via microondas. Deste modo, concluiu-se que as partículas com maiores diâmetros influenciam positivamente no processo de secagem, pois melhora a porosidade do sistema, aumentando a profundidade de penetração das microondas. O aumento da altura do leito de cascalho contribui negativamente, pois diminuiu a penetração da radiação eletromagnética removendo menor quantidade de base orgânica contida

no cascalho. Por fim, a participação de um gás inerte, ocupando toda cavidade do forno, além de contribuir para segurança da operação de secagem, influenciou positivamente no processo de descontaminação, proporcionando um aumento na remoção da base orgânica.

PETRI (2014) trabalhou no mesmo forno microondas utilizado nesta Tese, com medidas de cavidade interna bem inferiores ao forno utilizado por PEREIRA (2013) e SANTOS (2014). Desta forma, o autor queria determinar a eficiência de um forno comercial batelada no tratamento de cascalho contaminado com fluidos de perfuração. A avaliação final do pesquisador aponta que o forno com dimensões menores foi muito mais eficiente do que o outro forno utilizado por PEREIRA (2013) e SANTOS (2014). Isto ocorreu, basicamente, por conta da construção do forno, que tem medidas de cavidades internas proporcionais ao comprimento de onda da radiação, garantido que suas paredes refletissem maior quantidade de ondas possíveis, sendo essa energia absorvida pela mistura a ser aquecida dentro da cavidade do forno. O autor ainda concluiu que a temperatura de operação do forno deve ser a mais próxima possível, da faixa de ebulição dos hidrocarbonetos presentes nos fluidos de perfuração, para garantir a máxima descontaminação do cascalho. Por fim, foi ainda adaptado um sistema de agitação, que garantiu uma melhora de quase 20% da eficiência de remoção das bases orgânicas, na operação de aquecimento e secagem, quando se comparado a uma operação sem agitação.

FALCIGLIA *et al.*, (2015) propuseram um processo de descontaminação eficaz de solos contaminados com hidrocarbonetos, usando aquecimento por microondas. Para isso, os autores desenvolveram um código computacional para simular os efeitos induzidos pelo tratamento via microondas. O modelo foi validado a partir de comparações com resultados de experimentos laboratoriais. Como a maioria dos hidrocarbonetos avaliados eram essencialmente transparentes às microondas, a energia absorvida, através da formação do campo elétrico, era distribuída por condução do solo para os hidrocarbonetos. Os autores perceberam mudanças progressivas nos valores das propriedades dielétricas dos solos contaminados, devido ao aumento de temperatura. Assim, os pesquisadores concluíram que o tratamento por microondas de solos contaminados com hidrocarboneto é bastante eficaz, obtendo remoção de contaminante variando de 50-99%, dependendo do tempo de exposição a radiação eletromagnética.

FALCIGLIA *et al.*, (2016) discutiram a remediação de solos contaminados com hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e nitro HPAs usando microondas. Os autores utilizaram um microondas em escala de bancada para realização dos experimentos, com intuito de investigar várias condições operacionais em busca de uma remoção mais eficiente do contaminante. Areia fina foi artificialmente misturada com HPAs e nitro-HPAs e irradiada por um

período de 5 a 60min aplicando potências que variavam de 250 a 1000W. Os resultados sugerem que as propriedades dos contaminantes, especialmente a polaridade, influenciam significativamente na temperatura máxima alcançada no processo, de aquecimento via microondas, ou seja, quanto mais polar o contaminante, maior a temperatura alcançada pela mistura, e maior será a remoção desse contaminante. Deste modo, os autores concluíram que os parâmetros cinéticos são bastante úteis para o estudo, do processo de descontaminação de solos contaminados com HPAs e nitro-HPAs.

Por fim, ROSSI *et al.*, (2016) realizaram um trabalho para investigar os aspectos fundamentais da cinética de aquecimento e secagem, de sólidos provenientes do processo de perfuração via microondas. Os autores se preocuparam em compreender o papel que cada componente (bases orgânicas, água e sólidos) apresenta na operação de secagem por microondas. Adicionalmente, modelos clássicos de secagem foram empregados, com objetivo de descrever a cinética de remoção de fluidos de perfuração do cascalho. Finalmente, técnicas de simulação eletromagnéticas foram empregadas, como mais uma ferramenta, para se entender e descrever a cinética de aquecimento dos fluidos avaliados no trabalho.

2.3 - Propriedades dielétricas

Toda a onda de natureza eletromagnética tem a mesma velocidade no vácuo, diferindo em si apenas pelo comprimento de ondas (λ). E essa propriedade diminui à medida que ocorre o incremento na frequência de oscilação, e pode ser calculado pela Eq. 2.5.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.5)$$

λ_0 = comprimento de onda no vácuo (m)

c = velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s)

f = frequência de oscilação do campo (Hz)

Para uma frequência fixa de interesse 2450MHz, tem-se um comprimento de onda de aproximadamente 12,24cm. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas em um material depende das suas características e é dado por:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu_{\text{abs}} \epsilon_{\text{abs}}}} \quad (2.6)$$

V = velocidade da onda eletromagnética no material (m/s)

μ_{abs} = permeabilidade magnética do material (H/m)

ϵ_{abs} = permissividade elétrica do material (F/m)

No caso de vácuo temos:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.7)$$

μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

ϵ_0 = permissividade elétrica no vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)

Segundo DATTA *et al.*, (2005) e SALEMA *et al.*, (2013) a permissividade elétrica de um material, caracteriza a sua interação com o campo elétrico, ao passo que a permeabilidade magnética, descreve a habilidade do material de interagir com um campo magnético. Deste modo, como os cascalhos e fluidos avaliados no presente trabalho, não são magnéticos então a permeabilidade magnética destes materiais pode ser considerada igual a 1.

A absorção de energia pelo material depende da permissividade relativa (ϵ_r), que é uma expressão complexa, formada por uma parte real denominada constante dielétrica (ϵ'), e uma parte imaginária denominada de fator de perda dielétrica (ϵ''). A permissividade relativa ou permissividade complexa expressa a habilidade de um determinado material absorver e dissipar energia quando submetido ao aquecimento via microondas (HACKE, 1999).

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.8)$$

A parte real da equação 2.8 está ligada a capacidade de um material armazenar energia através da formação de um campo elétrico, ou seja, armazena energia em resposta a um campo elétrico oscilante, gerado dentro da cavidade do forno. A parte imaginária representa a habilidade desse material dissipar toda essa energia absorvida, através do campo elétrico, em calor (DATTA *et al.*, 2005; SALEMA *et al.*, 2013). Nota-se, que a permissividade complexa, bem como a constante dielétrica e o fator de perdas dielétricas, são adimensionais pois estes são definidos em relação ao vácuo (NELSON, 2010).

O aquecimento de materiais, aplicando a tecnologia de microondas é uma operação física, e depende fortemente da propagação das ondas eletromagnéticas. Quando essas ondas incidem sobre o material, elas podem ser refletidas, transmitidas e/ou absorvidas (VENKATESH e RAGHAVAN, 2005). Assim, as propriedades dielétricas definem a cinética de aquecimento de um determinado material, quando exposto a rádio frequência ou às microondas. As propriedades dielétricas dependem da temperatura e da frequência do campo elétrico exposto, mas também de algumas propriedades físico-químicas do material, dentre as quais podem incluir sua composição química e densidade (GOYETTE *et al.*, 1990; NELSON, 2010).

Segundo SHANG *et al.*, (2006) existem três classificações universais para o desempenho de materiais frente a ação das microondas (Figura 2.6).

1 - Materiais transparentes: as microondas passam pelo material com pouca absorção (baixo fator de perdas dielétrica). Exemplo vidro.

2 - Materiais opacos: as microondas são refletidas pelo material e não são absorvidas. Exemplo metais.

3 - Materiais absorventes: as microondas são absorvidas com base na intensidade do campo eletromagnético e o fator de perda dielétrica. Exemplo água.

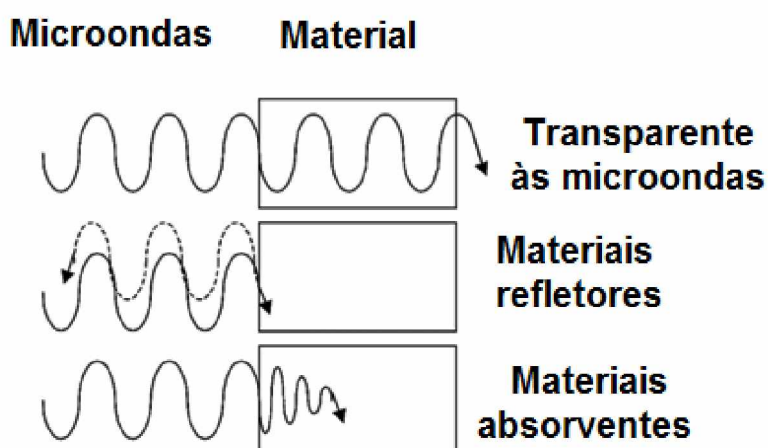


Figura 2.6 - Interação das microondas com os materiais. Adaptado de SHANG *et al.*, (2006).

O processamento por microondas tem algumas vantagens em tratamentos de materiais que contenham misturas de material absorvente e transparente. As microondas são absorvidas pelas substâncias com alto fator de perda dielétrica (absorventes), e passam através dos componentes com baixo fator de perda dielétrica (transparentes), resultando em um aquecimento seletivo. Neste caso, economias significativas de energia são possíveis, uma vez que o material

dielétrico pode ser aquecido sem que ocorra o aquecimento de toda a matriz (SHANG *et al.*, 2006).

O campo elétrico oscilante da radiação eletromagnética absorvida, ocasiona a polarização do material, como no caso de um capacitor sujeito a corrente elétrica alternada. Parte da energia é absorvida pelo material ocasionando um incremento na sua temperatura. Desta forma, a distribuição e a absorção de ondas eletromagnéticas no material são descritas pelas equações de Maxwell para o eletromagnetismo, a partir das quais pode-se chegar a taxa de geração de calor por unidade de volume dentro do material (Eq. 2.9) cujo aumento de temperatura é proporcional ao fator de perdas dielétricas (DATTA *et al.*, 2005; SAXENA e CHANDRA, 2011).

$$q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (2.9)$$

q = Taxa volumétrica de geração de calor ou densidade de potência (W/m^3)

E = Intensidade do campo elétrico (V/m^2)

Com já comentado anteriormente, em nível molecular, os dois principais mecanismos que contribuem para o aquecimento dielétrico, em frequência de microondas, são a condução iônica e a rotação dos dipolos (Figura 2.7).

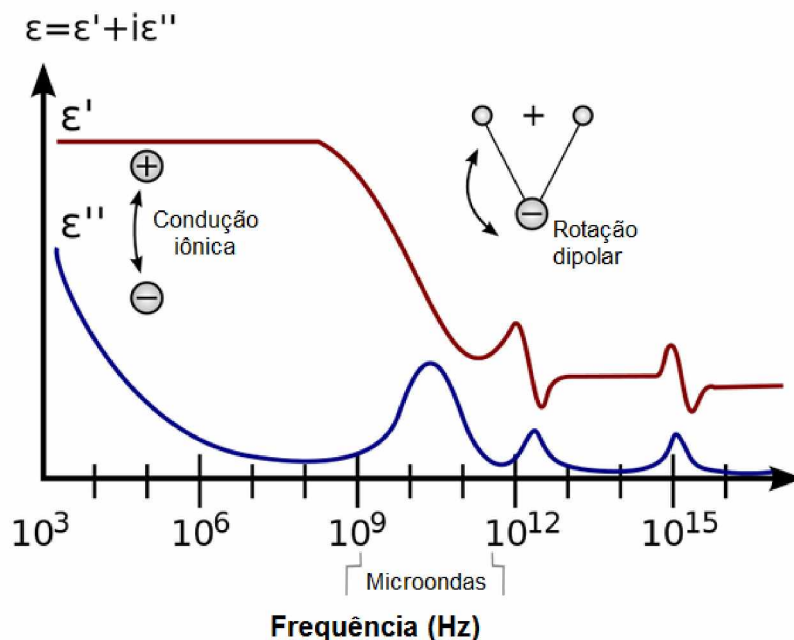


Figura 2.7 - Mecanismo de resposta dos materiais dielétricos nas diferentes frequências do espectro eletromagnético. Adaptado de AGILENT TECHNOLOGIES, 2011.

A absorção das microondas no material aumenta com seu conteúdo iônico. Assim, a quantidade de microondas absorvida, devido a condução iônica, pode ser descrita como uma parte do fator de perdas dielétrica (ϵ''), embora não seja uma perda dielétrica propriamente dita (BUFFLER, 1995). O mecanismo de rotação dipolar depende, exclusivamente, das moléculas polares no material. No caso do presente trabalho, esse mecanismo é dominante, pela forte presença de água na mistura cascalho/fluido de perfuração. Um dipolo elétrico é formado por duas cargas opostas unidas e separadas por uma distância. Em condições normais, as moléculas de água se encontram orientadas de acordo com os dipolos vizinhos, mas na presença de um campo elétrico elas tendem a se alinhar a ele. Este mecanismo está ilustrado na Figura 2.8.

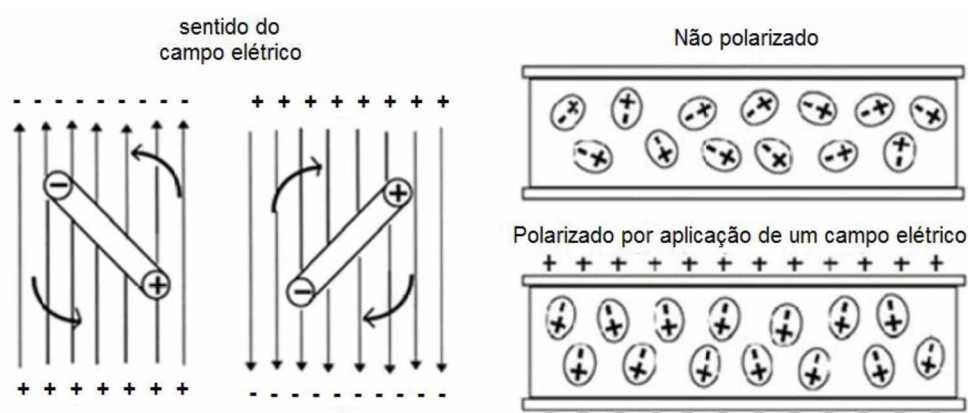


Figura 2.8 - Rotação e alinhamento dos dipolos sob orientação do campo elétrico. Adaptado de TEWARY, 2007.

O polo positivo experimenta uma força na direção do campo e o polo negativo na direção oposta. A energia gerada pela movimentação dessas moléculas, a partir do alinhamento e desalinhamento, de acordo com o campo elétrico oscilante, produz um aumento de temperatura final do material (BASAK, 2007; MULEY e BOLDOR, 2013; TEWARY, 2007).

2.3.1 - Constante dielétrica (ϵ')

A constante dielétrica se relaciona com a capacidade de um material armazenar energia através da formação de campo elétrico, ou seja, esse material funciona como um capacitor acumulando energia em resposta a um campo elétrico aplicado. Em frequências muito baixas (menores que 10^9Hz) ou muito altas (maiores que 10^{15}Hz) a constante dielétrica se torna um

valor constante (ver Figura 2.7). Essa propriedade geralmente diminui com o incremento da frequência (DATTA, 2005; NELSON, 2010; SAXENA e CHANDRA, 2011).

2.3.2 - Fator de perda dielétrica (ϵ'')

O fator de perda dielétrica indica a habilidade que o material possui de dissipar a energia absorvida na forma de calor. Assim, esta propriedade está associada com a capacidade do material absorver, transmitir e refletir energia eletromagnética. Na frequência de interesse para o presente trabalho, o fator de perda dielétrica é formado por dois componentes: a perda por dipolos e a perda por condução iônica. Em soluções com presença de sais, o fator de perda por condução iônica é o mecanismo dominante. Já em soluções onde não existe forte presença de sais o fator de perda dipolar se torna o mecanismo predominante (DATTA, 2005; NELSON, 2010; SAXENA e CHANDRA, 2011). O fator de perda dielétrica devido a estes dois componentes pode ser expresso com na Eq. 2.10.

$$\epsilon'' = \epsilon_d'' + \epsilon_\sigma'' \quad (2.10)$$

ϵ_d'' = Fator de perda dipolar (-)

ϵ_σ'' = Fator de perda iônico (-)

2.3.3 - Tangente de perdas ($\tan \delta$)

A tangente de perdas, que é também conhecida como fator de dissipação, fornece uma indicação de como a energia armazenada no material através do campo elétrico, é dissipada na forma de calor (DATTA, 2005; NELSON, 2010; SALEMA, 2013). A tangente de perdas é definida como (Eq. 2.11).

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.11)$$

$\tan \delta$ = tangente de perdas (-)

O ângulo (δ) mostrado na Figura 2.9, descreve a diferença de fase entre o campo elétrico e a polarização do material. Desta forma, quanto maior for essa diferença de fase, maior é a conversão de energia elétrica em calor.

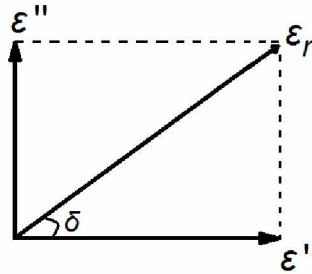


Figura 2.9 - Diagrama que define a tangente de perdas.

2.3.4 - Profundidade de penetração (D_p)

A profundidade de penetração da radiação eletromagnética em um material, depende da sua constante dielétrica e do fator de perdas dielétrica, e pode ser definida como a profundidade na qual a o fluxo de energia apresenta uma queda de e^{-1} (0,3678) do seu valor da superfície do material (MEREDITH, 1998). A profundidade de penetração tem comportamento dependente do comprimento de onda, que por sua vez está ligado a frequência do campo. Segundo DATTA (2005) e VENKATESH e RAGHAVAN (2005) a profundidade de penetração pode ser calculada pela Eq. 2.12, derivada das leis de Maxwell para o eletromagnetismo:

$$D_p = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{2\varepsilon'}} \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2\right]^{0,5} - 1}} \quad (2.12)$$

Se $\varepsilon'' \leq \varepsilon'$ a Eq. 2.12 pode ser simplificada para Eq. 2.13:

$$D_p = \frac{\lambda\sqrt{\varepsilon'}}{2\pi\varepsilon''} \quad (2.13)$$

D_p = profundidade de penetração (m)

Em termos gerais, a profundidade de penetração é atenuada exponencialmente como função da distância de penetração dentro da amostra. Deste modo, D_p não significa uma profundidade onde não ocorre aquecimento, mas mostra que a energia penetrada até essa

profundidade é de 63,22% do total, o restante foi dissipado na superfície do material (PETRI, 2014).

2.3.5 - Fatores que afetam as propriedades dielétricas dos materiais

As propriedades dielétricas são influenciadas por muitas variáveis, entre as mais significativas se encontram: frequência do campo e temperatura. Para o caso de materiais compostos de misturas, além das duas variáveis iniciais podemos citar: concentração e granulometria do material.

As propriedades dielétricas, da maioria dos materiais, variam consideravelmente com a frequência de oscilação do campo elétrico aplicado. Esta dependência das propriedades dielétricas é devida à polarização consequente da orientação dos dipolos com o campo elétrico aplicado. Em altas frequências, as moléculas polares têm dificuldade em acompanhar a oscilação do campo o que gera uma queda acentuada na permissividade complexa (Figura 2.10). Quando a frequência de oscilação do campo supera a capacidade de resposta dos dipolos, estes deixam de acompanhar o campo e cai a transferência de energia para o material dielétrico. O ponto máximo do fator de perda dielétrica (ϵ'') é definido como frequência de relaxação (f_{rel}) ou frequência crítica (BUFFLER, 1995; VENKATESH E RAGHAVAN, 2005; NELSON, 2010).

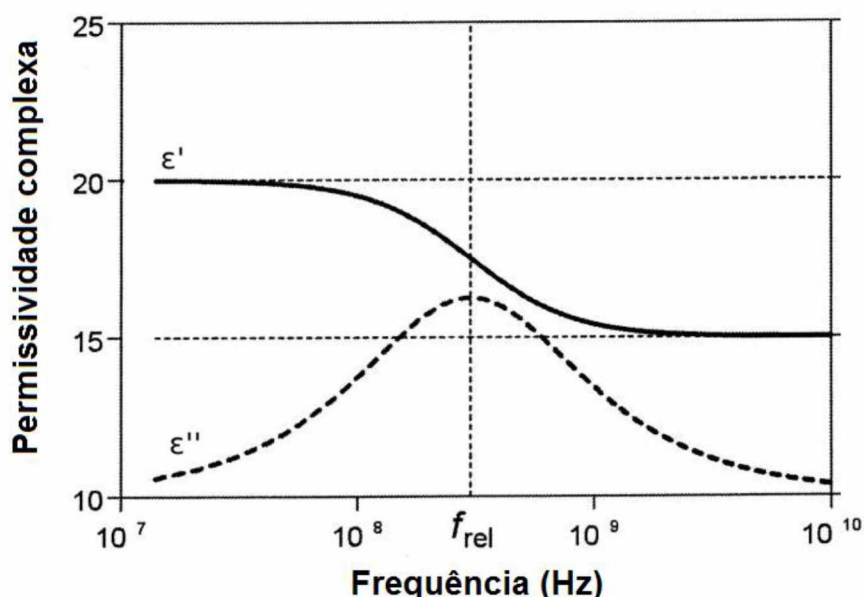


Figura 2.10 - Frequência de relaxação para permissividade complexa. Adaptado de BUFFER, 1995.

Para experimentos envolvendo aquecimento via microondas, que ocorrem em uma determinada frequência fixa de interesse (2,45GHz) não se consegue perceber essa grande variação da permissividade complexa com a frequência.

As propriedades dielétricas apresentam um comportamento dependente da temperatura. As variações dessas propriedades são resultados das modificações que o material experimenta no processo de aquecimento tais como: alterações na agitação molecular na mobilidade dos íons devido a fusão de certos componentes da mistura do material aquecido. Desta forma, a constante dielétrica normalmente diminui com o incremento da temperatura em baixas frequências de microondas, como observado na Figura 2.11 para água pura. Este comportamento é apresentado para materiais sob aquecimento com alto conteúdo de água (BUFFLER, 1995; NELSON e TRABELSI, 2012)

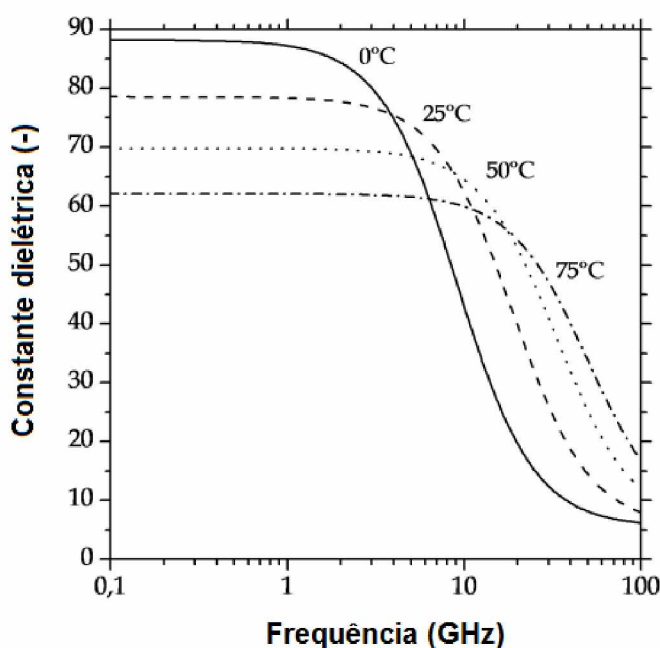


Figura 2.11 - Constante dielétrica da água pura em função da frequência em temperaturas.
Adaptado de BUFFER, 1995.

De outra forma, o fator de perdas dielétrica aumenta com o incremento da temperatura, em baixas frequências de microondas devido a condutividade iônica. E diminui com o aumento da temperatura para frequência de interesse de aquecimento via microondas (2,45GHz). Esse fenômeno ocorre devido a dispersão de água livre, como mostrado na Figura 2.12. A perda por

rotação dipolar diminui com a temperatura, enquanto a perda por migração iônica aumenta com a temperatura em frequências de 915 e 2450MHz (BUFFLER, 1995; NELSON e TRABELSI, 2012).

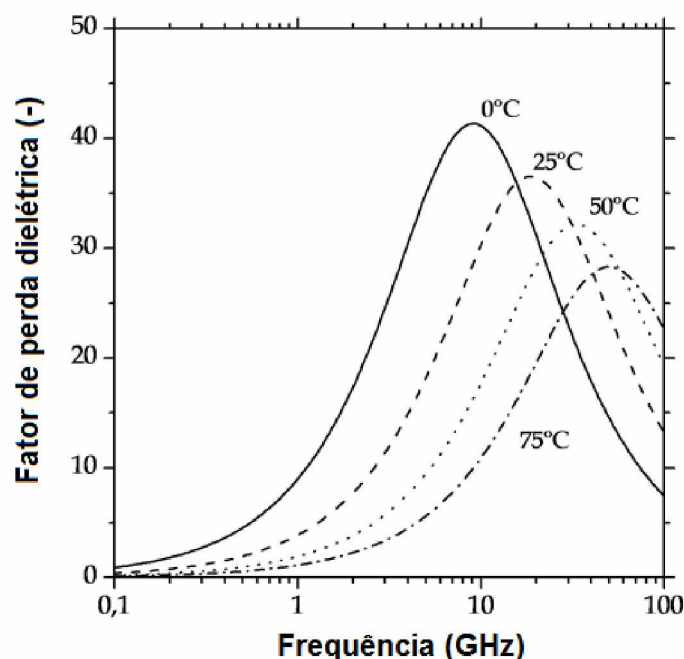


Figura 2.12 - Fator de perdas dielétrica da água pura em função da frequência em temperaturas. Adaptado de BUFFLER, 1995.

O comportamento da profundidade de penetração, com o aumento da temperatura, depende da composição do material. Para produtos com baixa condutividade iônica, a profundidade de penetração aumenta com o incremento da temperatura, em baixas frequências de microondas. De outro modo, a D_p diminui em frequências na faixa de 500 a 1000MHz, para materiais com alta condutividade iônica (BUFFLER, 1995; NELSON e TRABELSI, 2012).

As propriedades dielétricas também são afetadas pela relação massa volume interagido com o campo elétrico aplicado, o qual é mais perceptível em materiais particulados. A constante dielétrica apresenta uma relação quase linear com a densidade. Materiais com alta permeabilidade, ou seja, alto conteúdo de ar ocupando os espaços vazios apresentam baixos valores de suas propriedades dielétricas (BUFFLER, 1995; VENKATESH E RAGHAVAN, 2004; NELSON e TRABELSI, 2012).

As propriedades dielétricas de qualquer produto são determinadas, principalmente pela sua composição química e sua estrutura física. O conteúdo de água e sais minerais influenciam, consideravelmente, a resposta de um material a um campo elétrico oscilatório aplicado. Deste modo, quantidade de água livre no material é fundamental para a operação de aquecimento via microondas, pois a água é um composto com alta capacidade de absorção de energia eletromagnética. Desta forma, maior quantidade de água contida no material melhora o processo de aquecimento devido ao aumento do fator de perda dielétrica (ϵ''). Contudo, a profundidade de penetração diminui com a umidade, pois a presença de água cria uma película impermeável no leito da mistura. Assim, a adsorção de energia se mantém, majoritariamente, na superfície do material (BUFFLER, 1995; VENKATESH E RAGHAVAN, 2004; NELSON e TRABELSI, 2012).

Por fim, o tamanho do material a ser submetido em aquecimento por microondas é importante, em relação ao comprimento de onda e a profundidade de penetração. As dimensões físicas da amostra, não devem ultrapassar o dobro da profundidade de penetração das microondas. Este procedimento diminui a formação de áreas frias no interior do material, garantindo, um aquecimento mais homogêneo (TEWARY, 2007).

2.3.6 - Trabalhos relacionados a propriedades dielétricas e microondas

Existe uma infinidade de trabalhos na literatura a respeito de propriedades dielétricas, sendo sua maioria voltadas para engenharia de alimentos, devido à importância dessas propriedades para a indústria alimentícia. Para a indústria petrolífera, essas propriedades tem uma importância fundamental, principalmente para compreender a cinética de aquecimento e secagem via microondas (LIU *et al.*, 2014). Essas propriedades podem ser utilizadas para propor melhorias, na operação de secagem, por microondas, de sólidos contaminados, remanescentes do processo de escavação de poços de petróleo, garantindo um tratamento mais eficiente e rápido com menor custo energético (ROSSI *et al.*, 2016).

SHANG *et al.*, (2007) realizaram um estudo a respeito das propriedades dielétricas dos componentes do fluido de perfuração. Foi observado que a água era o componente mais dielétrico presente na mistura, e justamente por isso tinha um papel fundamental no processo de aquecimento via microondas. Por fim, os autores perceberam que essa água, presente no fluido de perfuração, era responsável por grande parte do araste de base orgânica, ao final do processo de aquecimento e secagem.

As propriedades dielétricas, calculadas nesse trabalho de SHANG em 2007, foram utilizadas pelo grupo na maioria dos seus trabalhos subsequentes, sempre com o objetivo de investigar, entender e propor melhorias, na operação de descontaminação de cascalho provenientes de poços de petróleo. Outro trabalho importante do grupo foi em 2014, onde ROBINSON *et al.*, (2014) observaram o mecanismo de quebra de emulsões óleo/água, através do aquecimento por microondas. Verificou-se, que o tratamento por radiação eletromagnética, diminui o tempo de separação de fases em até 90%, ao se comparar com métodos usuais. Tal fato ocorreu devido a uma mudança razoável das propriedades dielétricas da fase aquosa, ocasionada pelo aquecimento rápido e seletivo promovido pelas microondas.

PEREIRA *et al.*, (2015) realizaram um trabalho de cinética de aquecimento e secagem, utilizando um forno microondas, com cavidade interna de aproximadamente 100x60x35cm e 6 magnétrons, totalizando 6kW de potência total. Os autores utilizaram as propriedades dielétricas da mistura cascalho/fluido de perfuração, como mais uma ferramenta para entender a operação de secagem e aquecimento via microondas. Deste modo, os autores entenderam, que a operação de secagem ocorria em fases distintas, e a presença de água no sistema, era essencial para remoção eficiente dos contaminantes orgânicos.

Por fim, PETRI *et al.*, (2015) caracterizaram o material de trabalho, utilizando os dados de propriedade dielétricas da água e dos fluidos de perfuração parafina e olefina. Desta maneira, os autores perceberam que os valores da constante dielétrica e o fator de perdas dielétrica, para ambos os fluidos, eram similares. Assim, a ação da radiação eletromagnética, sob os dois fluidos de perfuração, eram muito próximas e também razoavelmente menor quando se comparada a ação das microondas em um sistema contendo somente água pura.

2.4 - Simulação computacional

A definição clássica aponta que simulação fundamenta-se em utilizar formalizações em computadores, tais como especificações ou expressões matemáticas, com o objetivo de imitar uma operação ou processo do mundo real. Desta forma, para ser realizada uma simulação, é necessário obter um modelo computacional condizente com a situação real que deseja explorar. Assim, a modelagem computacional é simplesmente o estudo do comportamento de sistemas reais através do exercício de modelos (BATEMAN e HARREL, 2005; FREITAS FILHO, 2008; CHWIF e MEDINA, 2014).

Para o presente trabalho, foram realizadas algumas simulações eletromagnéticas, com objetivo de entender e exemplificar a aplicação das propriedades dielétricas, e a cinética de aquecimento no tratamento de sólidos contaminados, provenientes da perfuração de poços de petróleo e gás. Para isso, utilizou-se o *software* COMSOL *Multiphysics* versão 5.0 que possui uma plataforma dedicada a resolução de problemas eletromagnéticos em geral.

O COMSOL *Multiphysics* possui um ambiente interativo, para modelagem e resolução de todo tipo de problema científico e de engenharia. A Figura 2.13 é um exemplo da utilização do *software*, mostrando os principais momentos da simulação da operação de aquecimento de um processador acoplado em uma placa, sujeito a dissipação de calor, através da passagem de corrente elétrica.

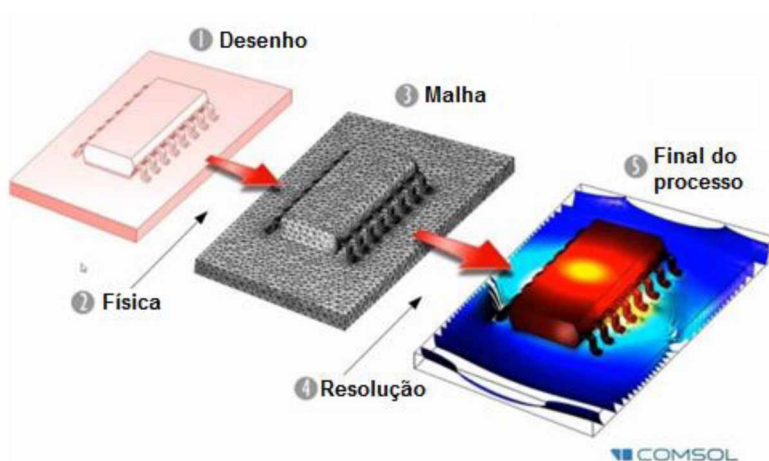


Figura 2.13 - Aquecimento de um processador acoplado em uma placa. Fonte COMSOL, 2015.

O Módulo RF (*Radio Frequency Module*) é responsável pela parte eletromagnética do *software*, que envolve o projeto de antenas, guias de ondas e cavidades de fornos. Simulando a propagação e o comportamento ressonante da radiação eletromagnética. As simulações eletromagnéticas oferecem a possibilidade de determinar efeitos físicos que não seriam diretamente apreciáveis em um experimento (COMSOL, 2015). A Figura 2.14 mostra um exemplo do uso do Módulo RF no COMSOL *Multiphysics*.

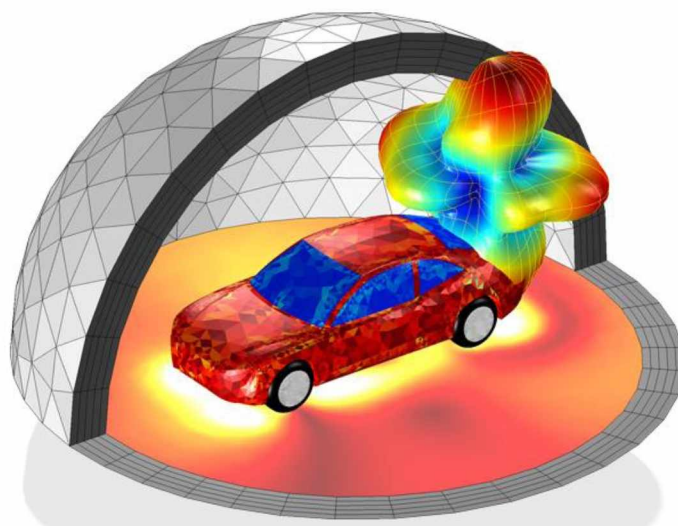


Figura 2.14 - Módulo RF responsável pela parte eletromagnética do COMSOL. Fonte COMSOL, 2015.

O exemplo da Figura 2.14 mostra a formação do campo eletromagnético, criado por uma antena FM, localizada no para-brisa traseiro do carro. O ar em volta do automóvel foi estagnado em uma redoma para uma visualização perfeita do fenômeno.

2.4.1 - Trabalhos relacionados a simulação em fornos microondas

ROBINSON *et al.*, (2010) efetuaram simulações eletromagnéticas, para avaliar as melhores condições de operação do forno microondas, em um processo de descontaminação de sólidos, provenientes da perfuração de poços de petróleo. Os autores utilizaram o *software Quick-Wave 3D* para investigar a influência dos seguintes fatores: geometria do guia de ondas, dimensão da cavidade interna e distância entre o leito e o emissor de radiação microondas. Através das propriedades dielétricas calculas em trabalhos anteriores, e do auxílio do simulador, os autores calcularam o campo elétrico (V/m) e a densidade de potência (W/m³). Estes valores foram importantes para propor melhorias nos equipamentos, e aumentar a eficiência no processo de tratamento de cascalho em um forno contínuo.

DEV *et al.*, (2012) consideraram a radiação microondas como uma alternativa favorável para pasteurização de ovos, após a simulação do processo de aquecimento via microondas utilizando um modelo de elementos finitos. Devido a heterogeneidade do ovo, os autores utilizaram propriedades dielétricas variando com a temperatura para dois sistemas diferentes:

clara e a gema do ovo. Para as simulações eletromagnéticas foi utilizado o *software* COMSOL *Multiphysics* versão 3.4. As simulações computacionais foram confrontadas com experimentos laboratoriais com grande proximidade. Deste modo, a partir do perfil de temperatura gerado pelo simulador, os autores calcularam o tempo mínimo necessário para obter o processo de pasteurização de ovos utilizando microondas.

VAZ *et al.*, (2014) perceberam que processos de aquecimento por microondas são altamente sensíveis a variabilidade da frequência de operação, levando a incertezas associadas as medidas de permissividade complexa. Os autores consideraram o acoplamento das equações de Maxwell, e a equação do calor dependente do tempo, para simulações de alta temperatura, em aquecimento via microondas, de um material cerâmico. Os autores utilizaram o simulador COMSOL *Multiphysics* para gerar os perfis de temperatura e campo elétrico do sistema avaliado. Desta forma, perceberam que pequenas variações da frequência de operação causaram distúrbios consideráveis na formação do campo elétrico. Por fim, os autores concluíram que as incertezas nas medidas só possuem um impacto significativo na parte imaginária da permissividade complexa, para altas temperaturas do material cerâmico.

BUTTRESS *et al.*, (2016) trabalharam com um forno de microondas contínuo, para a remoção de hidrocarboneto de sólidos com várias concentrações de contaminações diferentes. O objetivo central do trabalho foi avaliar e caracterizar a formação do campo elétrico no interior da cavidade, e entender a interação do campo com a matéria prima que era aquecida. Para isso, os autores utilizaram o simulador COMSOL *Multiphysics*, com o auxílio de propriedades dielétricas, calculadas em trabalhos anteriores, e determinaram a intensidade do campo elétrico em um plano vertical. Desta maneira, a ferramenta de simulação foi bastante útil, para estabelecer as melhores condições de processamento da operação e determinar a eficiência do processo.

O grupo liderado pelo Pesquisador Jiajia Chen, desde 2012, desenvolve pesquisas na área de modelagem para aquecimento via microondas de vários alimentos congelados. Em um trabalho publicado em 2014 foi avaliado apenas a transferência de energia no alimento, em pequenos tempos de aquecimento. A partir desse estudo, os autores perceberam a necessidade de incorporar mais físicas ao sistema, para tornar a modelagem mais robusta, e assim obter respostas mais fidedignas e próximas ao processo de aquecimento real.

Em 2016 CHEN *et al.*, (2016) realizaram um novo trabalho de simulação computacional, para aquecimento, via microondas, do purê de batata congelado, aplicando transporte de energia

e massa. Os autores perceberam que o ato de aquecer um alimento congelado, através de microondas, envolvia múltiplos aspectos físicos. Os pesquisadores utilizaram o *software* COMSOL *Multiphysics*, acoplado ao *software* MATLAB, para resolução das equações matemáticas. Os autores partiram das equações de Maxwell, para o eletromagnetismo, acoplada a conservação de energia. A Lei de Darcy foi utilizada para descrever o fluxo do fluido através do meio poroso no alimento. Além disso, a conservação da massa de água foi avaliada através das mudanças de fase de fusão e evaporação. Por fim, os autores perceberam uma boa aproximação dos dados experimentais e os simulados, entendendo ser fundamental a incorporação de modelagens físicas, que descrevem o processo de aquecimento via microondas de maneira mais realista.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Propriedades Dielétricas

O presente trabalho foi dividido em duas fases: A primeira etapa foi a preparação das amostras no Laboratório de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), a segunda etapa compreendeu as medições, propriamente ditas, e foram realizadas no Laboratório de Telecomunicações da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), sob supervisão do Professor Ronaldo Martins. Todos os materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram cedidos pela empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS). Os cascalhos utilizados são provenientes da Central de Tratamento de Resíduo de Carmópolis no estado de Sergipe.

A carga de cascalho recebido continha uma pequena quantidade de água, variando entre 7 e 9% (peso), e uma fração mássica de contaminante orgânico, entre 6 e 8% (peso). Para a remoção completa da fase orgânica presente no cascalho, o mesmo foi submetido a operações sucessivas de extração com álcool isopropílico PA. Nessa etapa de limpeza das amostras, empregou-se extratores Soxhlet, e em seguida os sólidos foram submetidos à secagem em estufa a 105°C por 24h, para remoção completa da fase líquida dos sólidos (água e resíduo de álcool isopropílico) obtendo, ao final, um cascalho isento de fase orgânica e água, que foi denominado de cascalho puro.

Os fluidos de perfuração olefina e parafina foram desenvolvidos pela Petrobras e são largamente empregados nas operações de perfuração da empresa. O fluido de perfuração de base olefina possui em sua composição 43,36% de olefina e 27,06% de água, enquanto o fluido base parafina tem composição de 39,39% de parafina e 28,20% de água. O restante dos componentes, para fechar o balanço de massa, para ambos os fluidos são aditivos ou componentes específicos de cada tipo de fluido. As bases orgânicas olefina e parafina são

utilizadas na fabricação e formulação dos respectivos fluidos de perfuração, e no presente trabalho, serão denominadas como bases orgânicas puras. Deste modo, os dois fluidos de perfuração, bem como as amostras das duas bases orgânicas puras, foram doados pela Estação de Fluidos unidade de Macaé, no estado do Rio de Janeiro.

3.1.1 - Preparação das amostras para as medidas de propriedades dielétricas

Para facilitar o entendimento dos ensaios realizados, as amostras foram divididas em quatro grupos como segue na Tabela 3.1. O primeiro grupo, destinou-se a estudar as propriedades dielétricas dos fluidos de perfuração e também das bases orgânicas puras. No segundo grupo, investigou-se a influência da distribuição de tamanho dos cascalhos (três faixas de tamanhos). No terceiro, analisou-se a influência da temperatura das amostras nas propriedades dielétricas de cascalhos. O último grupo, estudou a influência do teor de concentração do fluido perfuração no cascalho.

Tabela 3.1 - Resumo dos grupos de amostras para ensaios de propriedades dielétricas

Grupo 1	Amostras líquidas	Fluido de perfuração olefina Fluido de perfuração parafina Base orgânica pura olefina Base orgânica pura parafina Base orgânica recuperada olefina Base orgânica recuperada parafina
Grupo 2	Influência da granulometria	Cascalho de $212 < d_{\#} < 300\mu\text{m}$ Cascalho de $106 < d_{\#} < 212\mu\text{m}$ Cascalho de $50 < d_{\#} < 106\mu\text{m}$
Grupo 3	Influência da temperatura	30°C 80°C 130°C 180°C
Grupo 4	Influência da concentração	0% (sem contaminação) 9% de fluido olefina 14% de fluido olefina 24% de fluido olefina

As amostras do grupo 1 compreendem as amostras líquidas dos fluidos de perfuração olefina e parafina. Seguido pelas amostras de bases orgânicas puras olefina e parafina e suas respectivas bases orgânicas recuperadas em processos de aquecimento e secagem via

microondas. Essas amostras recuperadas foram utilizadas para uma possível comparação com suas respectivas bases orgânicas puras. Para isso foram realizados testes de cromatografia gasosa (equipamento SHIMADZU modelo GC/MS QP 2010 Plus).

As amostras do grupo 2 correspondem aos ensaios com variação da granulometria dos cascalhos. Uma determinada quantidade de cascalhos de perfuração limpo, foi submetida ao peneiramento, obedecendo o limite do equipamento de análise das propriedades dielétricas, empregado nos ensaios (Agilent modelo 85070E) que suporta, no máximo, partículas com diâmetro de 300 µm. As faixas granulométricas foram escolhidas de acordo com as peneiras padronizadas (série Tyler), existentes no laboratório. Uma faixa mais grossa, compreendendo cascalho de $212 < d_{\#} < 300\mu\text{m}$. Uma faixa intermediária de $106 < d_{\#} < 212\mu\text{m}$, e por fim uma faixa mais fina, compreendendo cascalhos de $50 < d_{\#} < 106\mu\text{m}$. As três faixas de tamanhos de cascalhos, foram devidamente misturadas, manualmente com 20% de fluido de perfuração olefina (20% peso).

Buscando melhor compreender o efeito da distribuição de tamanho e forma das partículas nas propriedades dielétricas, as três faixas de cascalhos foram submetidas a um equipamento de análise dinâmica (DIA), tridimensional (3D) de alta resolução com processamento digital (CAMSIZER® fabricado pela *Retsch Technology GmbH*). A partir dessas imagens foi possível determinar as distribuições de tamanho e forma de cada amostra. A dimensão característica da partícula utilizada foi calculada de acordo com o diâmetro mínimo de Martin (DM_{min}). Numa determinada direção, a partícula é dividida em duas áreas projetadas iguais e a menor corda que liga os dois pontos separando essas áreas é o diâmetro mínimo de Martin. (ALLEN, 1997; CARDOSO *et al.*, 2013). Com relação as características de distribuição de fator de forma das amostras de cascalhos, foi determinada a circularidade dos cascalhos de perfuração. A circularidade (C) é um valor adimensional e pode ser calculada de acordo com a Eq. 3.1 segundo ISO 9276-6.

$$C = \sqrt{\frac{4\pi A}{P^2}} \quad (3.1)$$

Em que, P é o perímetro e A a área do elipsoide de mesma área projetada da partícula, respectivamente.

As amostras do grupo 3 correspondem a experimentos com variação da temperatura. Uma determinada quantidade de cascalho, previamente limpo e seco foi misturada manualmente com 20% de fluido olefina (20% peso) para serem avaliadas nas determinadas temperaturas: 30°C,

80°C, 130°C e 180°C. Respeitando, mais uma vez, a limitação do equipamento utilizado nas medidas das propriedades dielétricas que suporta temperaturas de no máximo 200°C. Todas as amostras foram analisadas em potes de vidro borosilicato com tampa como na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Amostras variadas para análise de propriedades dielétricas.

As amostras do grupo 4 correspondem aos ensaios com variação da concentração de fluido de perfuração misturado ao cascalho. Uma determinada quantidade de cascalhos, previamente seco e limpo, foi misturada manualmente com fluido olefina nas proporções (massa) a seguir: 0% (sem contaminação), 9%, 14%, 24%.

Segundo relatórios da PETROBRAS, dados de campo de perfuração de petróleo e gás indicam que o teor máximo de contaminação de cascalho por fluido de perfuração fica em torno de 24%. Os testes utilizando concentração de fluido constante foram todos realizados com fluido do tipo olefina, devido ao fato, desse fluido ser, atualmente, o mais aplicado nas operações de perfuração *onshore* da Petrobras. Isso ocorre porque esse fluido possuir maior biodegradabilidade comparado ao fluido base parafina.

3.1.2 - Determinação das propriedades dielétricas

Para realizar as medidas de propriedades dielétricas das amostras, foi empregado a técnica de cabo coaxial aberto com varredura de frequência através de um sensor. Deste modo, o sensor utilizado foi o Agilent modelo 85070E (Figura 3.2), que é dedicada à medição de substâncias líquidas e pastosas com frequências menores que 4,5GHz devido a limitação do analisador de rede (AGILENT TECHNOLOGIES, 2011).



Figura 3.2 - Sensor Agilent para medição de propriedades dielétricas até 4,5GHz. Fonte AGILENT TECHNOLOGIES, 2011.

A permissividade complexa, que compreende a constante dielétrica (ϵ') e fator de perda dielétrica (ϵ''), são calculadas pelo analisador de rede, a partir da medida do coeficiente de reflexão do material, em contato com a ponta do sensor. A amplitude do sinal refletido é medida pelo equipamento com ajuda do *software* específico que acompanha o sensor. Essa medida é expressa em termos de permissividade relativa complexa (FRANCO *et al.*, 2015). No caso, o analisador de rede é comandado por um computador, mediante um programa específico através de uma porta GPIB, cujo esboço de montagem é mostrado na Figura 3.3.

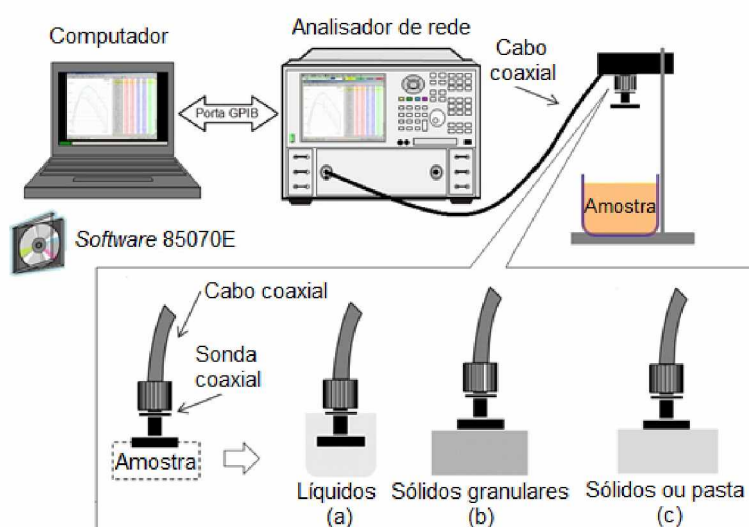


Figura 3.3 - Analisador de rede com sonda específica para medidas de propriedades dielétricas.

Inicialmente foi necessário realizar a calibração do dispositivo empregado nas medidas das propriedades dielétricas. O seguinte procedimento foi utilizado: analisador de rede ficou ligado por cerca de uma hora para completa estabilização de todos os sinais, em seguida escolheu-se a faixa de frequência que se desejava trabalhar, preferencialmente entre 2 e 3 GHz. Posteriormente, ar e água deionizada, em uma temperatura conhecida, foram analisados de acordo com as recomendações do fabricante, com ajuda de um kit específico para essa finalidade. Após a calibração, testes preliminares para medidas de propriedades dielétricas da água destilada e do álcool anidro PA foram realizados, e os valores obtidos, foram comparados com valores reportados na literatura.

A partir da confirmação dos dados de calibração, o equipamento estava apto para medidas de propriedades dielétricas à temperatura ambiente. Para as amostras líquidas, contendo fluidos de perfuração e bases orgânicas puras e recuperadas, a homogeneização foi feita manualmente com bastão de vidro e, em seguida, realizada a medição das propriedades dielétricas mergulhando-se a ponta do sensor nas amostras (ver Figura 3.3a). Para os ensaios com variação da granulometria dos cascalhos as medições foram efetuadas com o sensor na superfície das amostras, por se tratar de amostras composta por sólidos granulares (Figura 3.3b).

Para os experimentos realizados com a variação da concentração de fluido de perfuração adicionado ao cascalho, o seguinte procedimento foi adotado. Como se tratava de misturas com teores de fluido distintos (apenas cascalho, suspensões mais diluídas e pastas mais concentradas) a homogeneização completa das misturas fluido e cascalhos foram realizadas. As medições das propriedades dielétricas das amostras homogêneas foram feitas inserindo rapidamente o sensor nas superfícies das amostras (Figura 3.3c). Para os experimentos realizados com variação da temperatura, foi utilizado uma estufa elétrica para o aquecimento das amostras. A temperatura da mistura foi registrada em um termômetro infravermelho (Minipa modelo MT320). Desta forma, ao se atingir a temperatura desejada, as medições das misturas homogêneas foram efetuadas com o sensor na superfície das amostras.

3.2 - Cinética de aquecimento e secagem de cascalho

3.2.1 - Unidade experimental

O equipamento de aquecimento e secagem por microondas utilizado no presente trabalho pertence a marca *SHARP®* modelo R-23GT com potência total de 1600W divididos em dois magnétrons, frequência nominal de 2,45GHz e cavidade interna com medidas 330x330x210mm. O forno possui um disco giratório metálico, localizado na parte superior da cavidade, responsável pela distribuição das ondas eletromagnéticas do guia de ondas superior. O equipamento ainda dispõe de um sistema de exaustão, responsável pela eliminação completa de vapor gerado na cavidade do forno. Foram realizadas algumas adaptações com o objetivo de coletar dados importantes nos ensaios, como a instalação de termopares, para monitorar as temperaturas do vapor e do leite, e também um transmissor de pressão, para informar a pressão no interior da cavidade. Além disso, foi instalado também um sistema de injeção de gás inerte (N_2) e ar comprimido. A Figura 3.4 mostra um esquema da unidade de aquecimento e secagem com todas as adaptações realizadas.

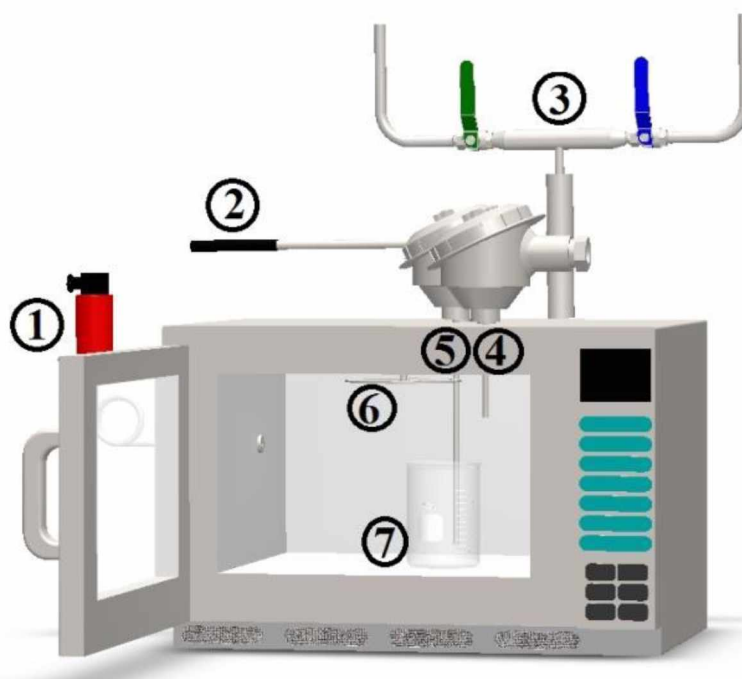


Figura 3.4 - Esquema da unidade experimental de aquecimento e secagem por microondas

Em que;

- 1 - Manômetro transmissor de pressão NOVUS modelo TP-691 com faixa de -1 a +1bar;
- 2 - Anemômetro de fio quente TSI PLUS modelo 8386 com faixa 1.27 a 78.7 ft/min;

- 3 - Válvulas para alimentação de gás inerte (N₂) e ar comprimido;
- 4 - Termopar K ALUTAL faixa de 60 a 200°C para medidas de temperatura do vapor;
- 5 - Termopar K ALUTAL faixa de 35 a 550°C para medidas de temperatura do leito;
- 6 - Disco giratório metálico;
- 7 - Recipiente de borosilicato para aquecimento e secagem das amostras.

O gás inerte tem como principal função manter a atmosfera do forno livre de gases inflamáveis, evitando assim, o risco de possíveis acidentes. Um controlador de temperatura do tipo *on/off* foi adaptado ao sistema (PETRI *et al.*, 2015), a fim de se realizar determinados testes com controle da temperatura. Para isso, determina-se um valor de *set point*, e o equipamento mantém essa temperatura ligando e desligando automaticamente os magnétrons do microondas.

3.2.2 - Materiais empregados

Os materiais utilizados nesse trabalho foram:

- 1 - Fluidos de perfuração à base de parafina e olefina interna;
- 2 - Cascalho de perfuração;
- 3 - Bases orgânicas puras de parafina e olefina interna;
- 4 - Água de torneira;
- 5 - Kit retorta marca FANN de 50 mL modelo 210463.

Os itens de 1 a 3 foram fornecidos pela empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), os cascalhos utilizados são provenientes da Central de Tratamento de Resíduo de Carmópolis, no estado do Sergipe. A carga de cascalho recebido continha uma pequena quantidade de água variando entre 7 e 9% (massa), e uma fração mássica de contaminante orgânico entre 6 e 8%. Para a remoção completa da fase orgânica presente no cascalho, o mesmo foi submetido a operações sucessivas de extração com álcool isopropílico PA. Nessa etapa de limpeza das amostras, empregou-se extratores Soxhlet e em seguida os sólidos foram submetidos à secagem em estufa a 105°C por 24h, para remoção completa da fase líquida dos sólidos (água e resíduo de álcool isopropílico), obtendo ao final, um cascalho isento de fase orgânica e água, que foi denominado de cascalho puro.

Os dois fluidos de perfuração virgens, bem como, as amostras das duas bases orgânicas empregadas nas formulações desses fluidos (parafina pura e olefina pura), foram doados pela Estação de Fluidos unidade de Macaé no estado do Rio de Janeiro. Para estimativa do teor de água e fase orgânica utilizou a técnica de retorta, equipamento largamente empregado na indústria de petróleo.

O procedimento de retorta, consiste em adicionar uma massa conhecida da amostra do material em uma célula apropriada com 50ml de capacidade, e essa amostra de material é então submetida à temperatura de $400 \pm 40^\circ\text{C}$. Deste modo, todos os componentes voláteis são evaporados, passam por um condensador e são coletados em uma proveta, e os volumes de água e base orgânica são medidos. A fase sólida restante na célula é também pesada e assim é possível determinar o teor de água e fase orgânica presente no cascalho avaliado.

3.2.3 - Procedimento experimental

Três diferentes conjuntos de ensaios foram realizados nesse trabalho com objetivo de aquecer e/ou secar o material (Tabela 3.2). A massa de material utilizada em todos os ensaios experimentais foi de 400g, ou seja, independente da quantidade de fluido de perfuração, base orgânica pura ou água misturada ao cascalho de perfuração a massa final avaliada nos experimentos foi de 400g e todos os testes foram realizados em duplicata.

Tabela 3.2 - Resumo do conjunto de ensaios de cinética de aquecimento e secagem de cascalho

Conjunto de ensaios 1	Cinética de aquecimento	Água Fluido de perfuração olefina Fluido de perfuração parafina Base orgânica pura olefina Base orgânica pura parafina Cascalho de perfuração puro
Conjunto de ensaios 2	Secagem do cascalho sem controle de temperatura	Cascalho + água Cascalho + fluido de perfuração olefina Cascalho + fluido de perfuração parafina Cascalho + base orgânica pura olefina Cascalho + base orgânica pura parafina
Conjunto de ensaios 3	Secagem do cascalho com controle de temperatura	Cascalho + fluido olefina à 150°C (1 a 8 min) Cascalho + fluido parafina à 150°C (1 a 8 min) Cascalho + fluido olefina à 200°C (1 a 8 min) Cascalho + fluido parafina à 200°C (1 a 8 min) Cascalho + fluido olefina à 250°C (1 a 8 min) Cascalho + fluido parafina à 250°C (1 a 8 min)

No conjunto de ensaios 1, foi avaliada a cinética de aquecimento da água, fluidos de perfuração, bases orgânicas puras e cascalho de perfuração puro. O objetivo desse procedimento foi investigar e comparar o comportamento de cada componente frente a ação das microondas. Para isso, o procedimento experimental, envolveu aquecer 400g de cada material separadamente durante certo tempo. Desta forma, foi obtida a curva temperatura e tempo para cada material. Devido a particularidade de cada amostra o tempo de aquecimento não foi exatamente o mesmo. Os teores de óxidos do cascalho puro foram determinados através da técnica de Fluorescência de Raio X (XRF Bruker modelo S8 Tiger).

No conjunto de ensaios 2, foi realizada a secagem de cascalho misturado com água, bases orgânicas puras e fluidos de perfuração até que não ocorresse mais variação da massa com o tempo. Esses experimentos foram conduzidos com medidas de massa a cada minuto, ou seja, a cada minuto a operação de secagem era parada para pesagem da massa. O teor de água e fase orgânica foi medido apenas no início e final de cada experimento, pelo método da retorta. O objetivo desse procedimento, visou estudar a cinética de secagem do cascalho misturado com esses diferentes componentes, sem controle de temperatura. Os ensaios foram realizados com 400g de cascalho de perfuração misturado com 20% de água, bases orgânicas puras e fluidos de perfuração (20% peso). Desta maneira, foram obtidas curvas da variação da massa versus tempo de aquecimento, para todas as misturas avaliadas. Esses resultados permitiram compreender como cada componente interfere na variação da massa final, frente a ação das microondas.

No conjunto de ensaios 3, foi realizada a secagem de cascalho misturados com os dois fluidos de perfuração em diferentes tempos, aplicando o controle de temperatura. O objetivo principal desses ensaios foi verificar a remoção de água e fase orgânica, individualmente ao longo do tempo, em diferentes temperaturas de controle. Para isso, realizou-se a secagem de 400g de cascalho misturado com 20% de fluido de perfuração (20% peso), em diferentes tempos (1 a 8 min) com controle de temperatura em 150, 200 e 250°C.

Os teores de água e fase orgânica foram medidos no início e no final de cada experimento. Este conjunto de ensaios, viabilizou o ajuste de curvas que relacionam o adimensional de umidade, em função do tempo de aquecimento, segundo modelos clássicos de secagem. Estes modelos são frequentemente reportados na literatura, e usualmente empregados na secagem convencional de sólidos.

Utilizando o cascalho puro foi avaliada a Microscopia Eletrônica de Varredura (Carl Zeiss, modelo EVO MA10). Também foi realizada uma análise de área superficial, volume e dimensão média dos poros através do método B.E.T (Brunauer, Emmett and Teller) em um Porosímetro ASAP, Modelo 2020 da Micrometrics. Esses testes foram efetuados para se compreender como esses fluidos de perfuração interagem com a estrutura física do cascalho.

O objetivo principal do aquecimento e secagem via microondas é a remoção eficiente dos contaminantes orgânicos, presentes no cascalho de perfuração. Para isso, utilizou-se modelos de secagem convencionais, para descrever a remoção dos fluidos de perfuração. O teor adimensional de fluido à base de parafina [Teor de Fluido Parafina (TFP)] e o teor adimensional de fluido à base de olefina [Teor de Fluido Olefina (TFO)] podem ser representados pelas Eq. 3.2 e 3.3, respectivamente.

$$TFP = \frac{X_{fp} - X_{fp}^*}{(X_0)_{fp} - X_{fp}^*} \quad (3.2)$$

$$TFO = \frac{X_{fo} - X_{fo}^*}{(X_0)_{fo} - X_{fo}^*} \quad (3.3)$$

Em que, X_{fp} e X_{fo} representa o teor de fluido base parafina e olefina respectivamente em um tempo específico, $(X_0)_{fp}$ e $(X_0)_{fo}$ representa o teor inicial de fluidos parafina e olefina contidos na mistura respectivamente, e X_{fp}^* e X_{fo}^* representam o teor de fluidos base parafina e olefina no equilíbrio, o qual nesse caso foi assumido como zero. Esse valor foi atribuído através de uma extrapolação dos modelos cinéticos, que representam o aquecimento e secagem de fluidos de perfuração, para um tempo experimental superior a 60 minutos (Apêndice 1).

Dentre os vários modelos cinéticos descritos na literatura dois foram escolhidos para caracterizar a remoção dos fluidos de perfuração do presente trabalho. Os modelos semi empíricos de Page e de Henderson-Pabis (PAGE, 1949; HENDERSON e PABIS, 1961). Adicionalmente, um modelo foi proposto, partindo da combinação dos modelos anteriores mencionados, com a adição de mais um parâmetro. O modelo proposto foi chamado de Modelo de Secagem por Microondas (MSM).

Os parâmetros dos modelos foram estimados através do *software* Statistica® através de regressões não lineares, usando o método numérico de Gauss-Newton para resolução. Foi

avaliado o Teor de Fluido Parafina e Olefina (TFP e TFO) com o tempo de secagem. Os modelos utilizados são mostrados na Tabela 3.3, e foram escolhidos por apresentarem resultados satisfatórios em outros trabalhos reportados na literatura, que aplicaram a tecnologia de microondas para secagem de diferentes materiais (LI *et al.*, 2011; PILAI, 2013; TAHMASEBI *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2015).

Tabela 3.3 - Equações dos modelos de secagem

Modelos	Equações
Page	$x = \exp(-kt^n)$
Henderson-Pabis	$x = A \exp(-kt)$
MSM	$x = A \exp(-kt^B)$

x =TFP ou TFO; t = tempo de secagem.

Os parâmetros do modelo de Page são n (adimensional) e k (s^{-n}), para o modelo de Henderson-Pabis são A (adimensional) e k (s^{-1}) e, finalmente, para o modelo MSM são A e B (adimensionais) e k (s^{-B}). Para todos os modelos k representa a constante da taxa de secagem de fluidos de perfuração.

3.3 - Simulação eletromagnética

Para a análise de simulação computacional foi empregado o forno de microondas já descrito nesse trabalho, da marca SHARP® com potência de 1600W, distribuídos em dois guias de ondas, posicionados na vertical do equipamento. Para o processo de aquecimento, utilizou-se a mesma massa de 400g da mistura cascalho mais fluidos de perfuração. A Figura 3.5 exibe a estrutura do forno em que foram realizados os experimentos de bancada, bem como o modelo desenvolvido no *software* COMSOL para realização das simulações eletromagnéticas.

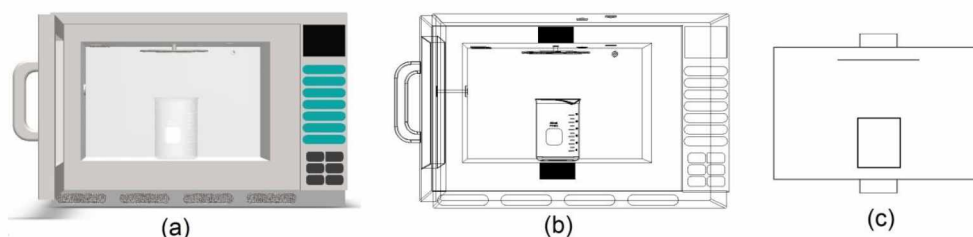


Figura 3.5 - Forno para experimentos de bancada (a, b) e modelo computacional para simulações (c)

A Figura 3.5a mostra a parte interna da cavidade do forno microondas utilizado nesse trabalho. A Figura 3.5b exibe o posicionamento dos guias de ondas na vertical do forno, exatamente no centro da cavidade. Para que não ocorra interferência destrutiva das microondas, o disco giratório fica posicionado no centro da cavidade, exatamente em baixo do guia de ondas superior, distribuindo essas ondas e garantindo que o centro da cavidade receba maior parte das microondas. A Figura 3.5c evidência a cavidade interna do forno, os dois guias de onda, o disco metálico e a mistura a ser aquecida. Este modelo foi desenvolvido diretamente no *software* COMSOL *Multiphysics* e utilizado nas simulações eletromagnéticas deste trabalho.

A Figura 3.6 mostra algumas características importantes e as principais dimensões do modelo desenvolvido no simulador.

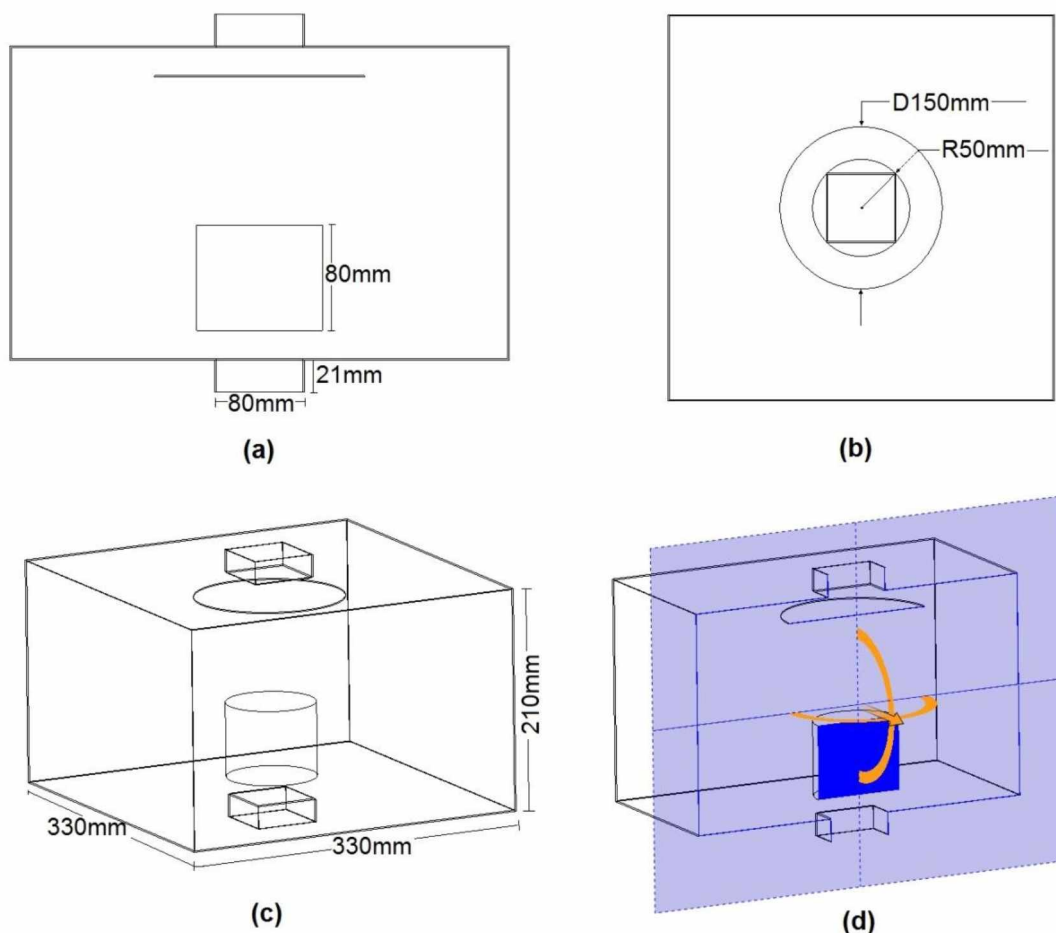


Figura 3.6 - Vistas da cavidade do microondas (a) vista frontal, (b) vista superior, (c) vista isométrica e (d) corte simétrico.

As vistas frontal, superior e isométrica (Figura 3.6a, b, c) mostram como a geometria do forno em questão é simétrica. Devido a essa simetria apresentada, os testes de simulação computacional foram realizados utilizando apenas a metade do forno, diminuindo assim, o esforço computacional (Figura 3.6d). Testes preliminares foram realizados com o forno completo e em corte para garantir a confiabilidade dos resultados.

Percebe-se que a cavidade tem uma secção quadrada e a altura do guia de ondas é proporcional à altura da cavidade (Figura 3.6a). Isto foi devidamente dimensionado pelo fabricante para garantir que não ocorresse absorção de microondas pelas paredes do forno. Deste modo, suas paredes devem coincidir com os nós das microondas fazendo com que ocorra reflexão, e assim o material a ser aquecido, consiga absorver maior quantidade de energia disponível.

3.3.1 - Hardware e software utilizados

Foi utilizado um *notebook* marca Dell modelo P39F Inspiron 15 com processador Intel® Core™ i7 memória RAM 16GB, com frequência de processamento de 2,6GHz. O *software* utilizado para modelagem e simulação foi o COMSOL *Multiphysics* versão 5.0. O programa possui ferramentas de construção de modelos que permitem a resolução de diversos problemas científicos e de engenharia, dividida em vários módulos, cada um orientado a um tipo de fenômeno físico diferente. Para resolução dos modelos do presente trabalho, o COMSOL *Multiphysics* utiliza, exclusivamente o método de elementos finitos.

3.3.2 - Metodologia utilizada e hipóteses de estudo

A modelagem numérica de aquecimento via microondas inclui o acoplamento de dois fenômenos físicos; eletromagnetismo e transferência de calor. O simulador COMSOL disponibiliza o módulo *Microwave Heating* (mh), que é parte integrante do modulo geral *Radio Frequency Module* (RF Module). Trata-se de um modulo específico para aquecimento via microondas, onde são resolvidas as equações de eletromagnetismo e de transferência de calor. A equação de Maxwell é resolvida para determinar a distribuição de campo elétrico em uma cavidade de microondas (Eq. 3.4).

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) - \frac{\omega^2}{c} (\epsilon' - \epsilon'' j) \vec{E} = 0 \quad (3.4)$$

\vec{E} é a intensidade do campo elétrico [V/m], ω é a frequência de onda angular [$2\pi f$, rad/s], μ é a permeabilidade relativa do material e c é a velocidade da luz no espaço (3×10^8 m/s). A intensidade do campo elétrico obtido, a partir, da Eq. 3.4 e as propriedades dielétricas do material, são necessárias para se calcular a potência volumétrica gerada, devido a exposição por microondas de acordo com a Eq. 3.5 (SALVI *et al.*, 2011; VAZ *et al.*, 2014; GU *et al.*, 2017)

$$Q = \sigma |\vec{E}|^2 = 2\pi\epsilon_0\epsilon'' f |\vec{E}|^2 \quad (3.5)$$

Q é a densidade de potência, ou seja, a energia absorvida pela amostra por unidade de volume [W/m^3], σ é a condutividade elétrica do material [S/m], ϵ_0 é a permissividade no espaço livre ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m) e f é a frequência [Hz]. Ainda é necessário resolver a equação do balanço de energia para calcular a distribuição de temperatura do material devido a condução e convecção (Eq. 3.6).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \nabla T = k \nabla^2 T + Q \quad (3.6)$$

Em que, \vec{u} [m/s] é o vetor velocidade que faz parte do termo de transferência de calor por convecção, não utilizado nos modelos da simulação desse trabalho, k [W/mK] que é a condutividade térmica, C_p é a capacidade calorífica [J/kgK] e ρ é a densidade [kg/m³]. As variáveis dependentes do módulo e resolvidas no presente trabalho são o gradiente de temperatura T (°C) da mistura a ser aquecida e a distribuição do campo elétrico \vec{E} [V/m] na cavidade do sistema (SALVI *et al.*, 2011; VAZ *et al.*, 2014; GU *et al.*, 2017).

3.3.3 - Desenvolvimento do algoritmo

Para valores de permissividade complexa constantes, ou seja, sem variação com a temperatura, primeiramente determina-se a temperatura inicial do sistema a ser aquecido e a potência dos magnétons do microondas. Todos os testes iniciaram à temperatura ambiente ($T \cong 25^\circ C$) e a potência nominal em cada fonte foi de 800W. As equações de Maxwell são resolvidas calculando-se a distribuição de campo elétrico (Eq. 3.4) e a densidade de potência

(Eq. 3.5) de acordo com as propriedades dielétricas do material. Assim, o termo de geração de energia, obtido pela Eq. 3.5 é utilizado para resolver a equação do balanço de energia (Eq. 3.6), com base nas propriedades físicas e térmicas do cascalho aquecido, obtendo assim, o gradiente de temperatura final da amostra. Deste modo, a equação de transferência de calor é resolvida até que o tempo proposto para o aquecimento seja atingido. A Figura 3.7 exibe o fluxograma resumido do processo de simulação com permissividade complexa constante.

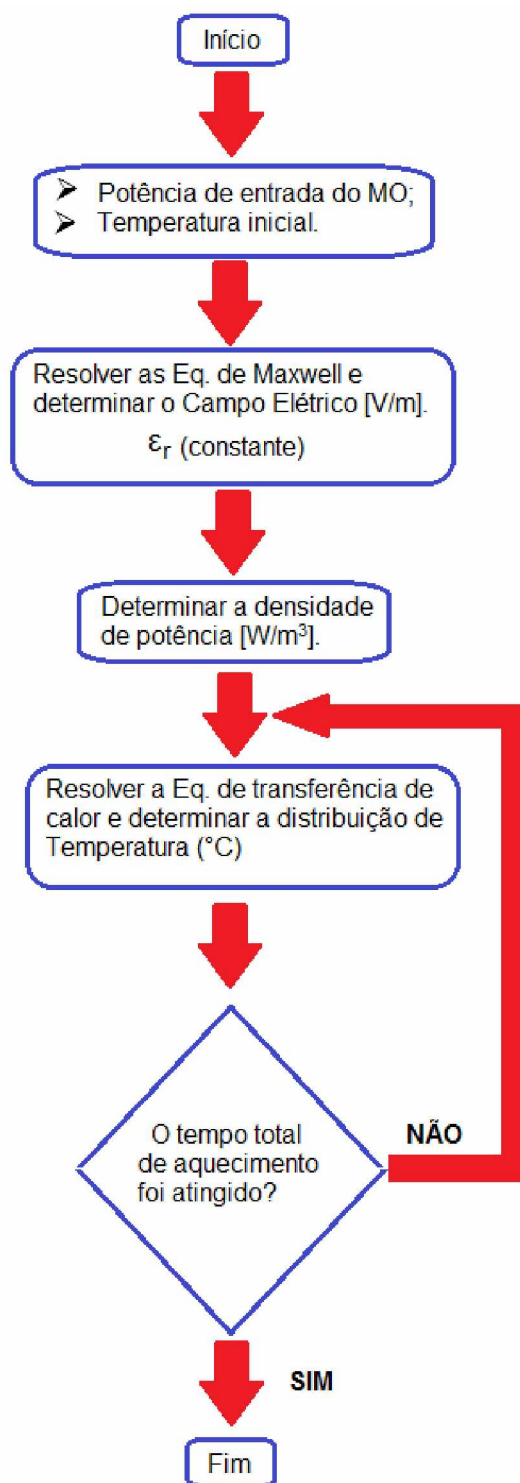


Figura 3.7 - Fluxograma do processo de acoplamento das Equações de Maxwell e Equação da Energia com permissividade constante

Levando em consideração que a maioria das propriedades dielétricas foram calculadas a temperatura constante, isso resulta em um mesmo campo elétrico para todos os passos temporais em uma análise transiente. Desta forma, o cálculo do perfil de temperatura sob essa mesma análise tem apenas o objetivo de entender a cinética de aquecimento da mistura bem como uma possível comparação com os dados experimentais.

Para valores de permissividade complexa variando com a temperatura, foi realizado um ajuste matemático para se definir qual a melhor curva que representaria determinado conjunto de pontos. Desta maneira, existe uma conexão entre as variáveis, que se dá pelo acoplamento das equações 3.4, 3.5 e 3.6 através dos termos \vec{E} , ϵ'' e Q . Assim, o campo elétrico foi calculado, principalmente através das propriedades dielétricas do material, e sua atenuação é originada pelo termo complexo da permissividade (fator de perda dielétrica ϵ'') que é, principalmente, utilizado para calcular a energia eletromagnética dissipada no material na forma de calor, cujo valor é o termo Q . Portanto, esse termo é utilizado para calcular um novo perfil de temperatura, o que pode levar a mudanças no valor da permissividade complexa ϵ_r , quando esta é função da temperatura, alterando, assim, o campo elétrico obtido no próximo passo temporal. Quando os desvios de propriedades dielétricas forem inferiores a 5% termina-se o ciclo para o cálculo da distribuição de campo elétrico do sistema. A equação de transferência de calor foi resolvida até que o tempo proposto para o aquecimento fosse atingido. A Figura 3.8 exhibe o fluxograma resumido do processo de simulação com permissividade complexa variando com a temperatura.

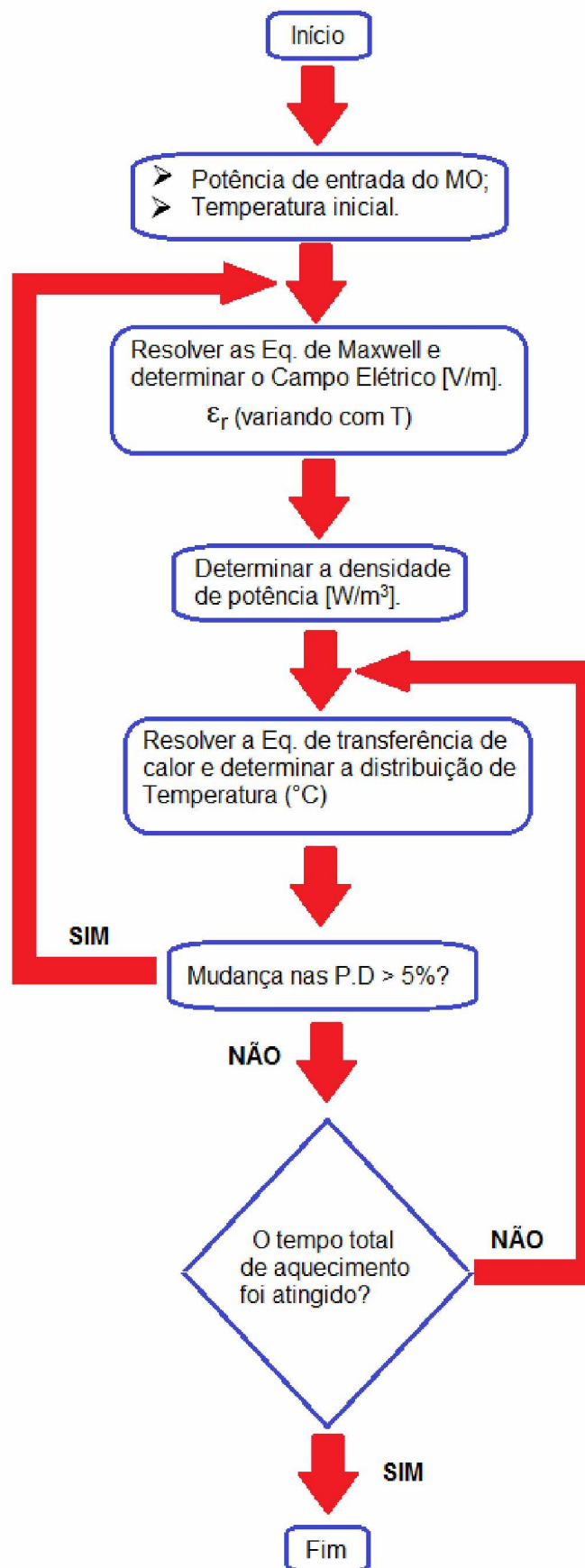


Figura 3.8 - Fluxograma do processo de acoplamento das Equações de Maxwell e Equação da Energia com permissividade variando com T

3.3.4 - Simplificações aplicadas ao modelo

Devido as dificuldades de se obter experimentalmente e na literatura as propriedades das misturas avaliadas no presente trabalho, todas as propriedades foram tomadas como constantes, ou seja, sem variação com a temperatura. Como exemplo a condutividade térmica [W/mK], e o calor específico [KJ/Kg°C] foram utilizados através de valores médio encontrado em diversas tabelas na literatura. Maiores informações sobre essas propriedades podem ser encontradas no Apêndice 2 deste trabalho.

3.3.5 - Condições de contorno

Foi aplicado uma condição de contorno chamada condição do condutor elétrico perfeito (*Perfect Electric Conductor*), utilizada para desconsiderar a formação do campo elétrico na parede do forno, sendo descrita pela Eq. 3.7.

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0 \quad (3.7)$$

Em que, \vec{n} é o vetor normal à superfície, desta forma, o campo elétrico na parede do forno tem módulo igual a zero (COMSOL, 2015). Essa condição de contorno é aplicada para garantir que as paredes da cavidade coincidam com os nós das microndas, fazendo com que a parede reflita maior quantidade de ondas possíveis para a região central da cavidade.

Condição de paredes adiabáticas, ou seja, é utilizada para simplificações das fronteiras externas das geometrias consideradas no modelo utilizado, pois a troca térmica com o meio externo não é importante nesse caso (Eq. 3.8).

$$-\vec{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (3.8)$$

A face onde as microondas são geradas e propagadas, através do guia de ondas para o sistema, é denominada de porta de entrada (*Port*). O modo de propagação do guia de ondas foi configurado com uma entrada retangular, do tipo TE₁₀. Usualmente é o modo permitido em fornos comerciais comuns, e largamente utilizado na literatura em trabalhos de aquecimento com fornos microondas (DEV *et al.*, 2012; VAZ *et al.*, 2014; GU *et al.*, 2017).

3.3.6 - Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais da cavidade do forno utilizado no modelo computacional como foram todas retiradas do banco de dados do próprio *software* COMSOL *Multiphysics*. Entretanto, as propriedades da mistura cascalho/fluido de perfuração, por se tratar de uma mistura complexa, foram feitas algumas simplificações e as propriedades foram estimadas através de aproximações de misturas com propriedades conhecidas. Maiores detalhes, sobre cada propriedade, podem ser encontrados no Apêndice 2 deste trabalho.

3.3.7 - Malha computacional

Foi empregada uma malha computacional do tipo tetraédrica com tamanhos máximos de elementos (S_{\max}) aplicando o critério de Nyquist (Eq. 3.9), muito utilizado em problemas eletromagnéticos em geral (SALVI *et al.*, 2011; VAZ *et al.*, 2014).

$$S_{\max} = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon'\mu}} \quad (3.9)$$

Em que λ é comprimento de onda (m), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), f é a frequência de oscilação do campo (Hz), ϵ' é a constante dielétrica do material e μ é permeabilidade magnética do material (H/m).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Propriedades dielétricas

A Figura 4.1 apresenta a tangente de perdas ($\tan\delta$) para os fluidos de perfuração e bases orgânicas puras referentes as amostras do grupo 1 (Tabela 3.1). É importante ressaltar que $\tan\delta > 0,1$ indica que o material possui grande facilidade de sofrer aquecimento por microondas.

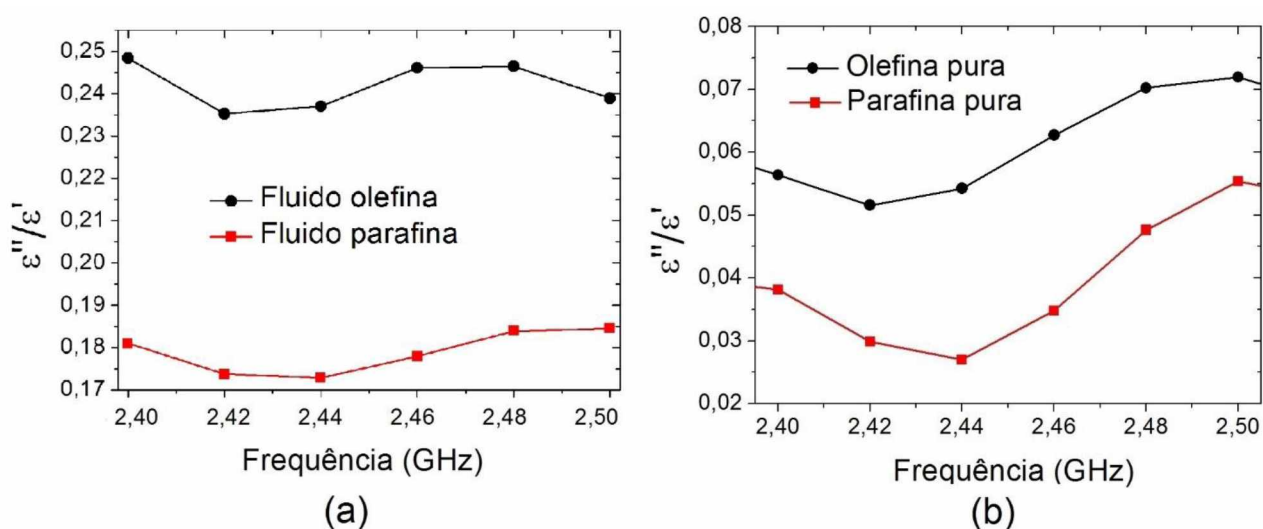


Figura 4.1 - Perfil da tangente de perdas com a frequência (à temperatura ambiente). (a) fluidos de perfuração, (b) bases orgânicas puras

Nota-se, que os dois fluidos exibem valores relativamente próximos das propriedades dielétricas, o que indica um processo de remoção similar das duas bases orgânicas por microondas (Figura 4.1a). Para as bases orgânicas puras, também se percebe a mesma tendência, sendo os valores de $\tan\delta$, para olefina pouco superiores aos valores de parafina pura

(Figura 4.1b). Essas diferenças observadas nos valores das propriedades dielétricas, tanto para os fluidos de perfuração quanto para as bases orgânicas puras podem ser explicadas pela maneira, levemente diferente, que a olefina reage frente as microondas. Em testes de aquecimento realizados com as bases orgânicas puras constatou-se que a olefina atingiu, no mesmo tempo de aquecimento, uma temperatura final um pouco superior que a parafina (cerca de 15°C a mais). Deste modo, a olefina é pouco menos transparente que a parafina, frente a ação das microondas. Esse fato, também pode ser comprovado nos resultados apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades dielétricas dos fluidos de perfuração e das bases orgânicas puras para frequência de 2,45GHz.

	fluido olefina	fluido parafina	Olefina pura	Parafina pura
ϵ'	8,191	8,037	2,577	2,536
ϵ''	1,979	1,409	0,151	0,078
ϵ''/ϵ'	0,241	0,175	0,058	0,031

A incidência do campo elétrico sobre o material, a ser aquecido via microondas, é determinada pela constante dielétrica e neste caso é levemente maior para o fluido de perfuração olefina, $\epsilon' \cong 8,2$ ao passo que para o fluido de perfuração parafina $\epsilon' \cong 8,04$. Fato semelhante ocorre para ϵ' das bases orgânicas puras. A dissipação de energia na forma de calor é a contribuição do fator de perda dielétrica (ϵ''). Este valor também é superior tanto no fluido olefínico quanto na base orgânica olefina, quando comparados com os valores respectivos do fluido e da base pura parafínica.

A Figura 4.2 exibe a tangente de perdas referentes as amostras do grupo 1, onde foi realizada uma comparação entre valores da $\tan\delta$ das bases orgânicas puras e devidamente recuperadas após testes de aquecimento e secagem de cascalho de perfuração em microondas.

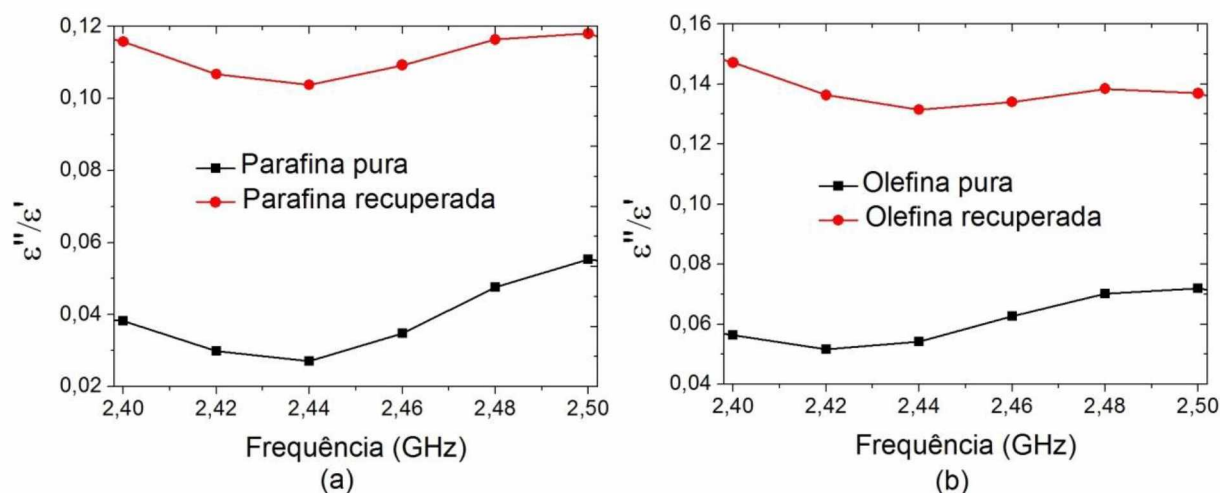


Figura 4.2 - Perfil da tangente de perdas com a frequência, (a) parafina pura e recuperada, (b) olefina pura e recuperada

Percebeu-se razoável diferença nos valores de tangente de perdas para ambos os pares de compostos puros e recuperados (Figura 4.2a e b). Os valores observados apontam que tanto a parafina quanto a olefina recuperada alcançaram valores superiores quando comparados com suas respectivas bases orgânicas puras. Deste modo, o aquecimento por microondas causa alguma mudança em algumas propriedades destes compostos, ainda que a estrutura molecular e suas respectivas cadeias carbônicas não sejam bruscamente alteradas, como já mencionado em trabalhos anteriores (SANTOS, 2014b e PETRI, 2014). A Figura 4.3 exibe as amostras dos pares de compostos puros e recuperados.



Figura 4.3 - Amostras puras e recuperadas de parafina e olefina respectivamente

Para comparação e entendimento de suas respectivas cadeias carbônicas foi realizada uma análise em um cromatógrafo gasoso, acoplado em um espectrômetro de massas, para os compostos de parafina e olefina pura e recuperadas. Os resultados são apresentados em porcentagem de áreas de picos, que é proporcional a fração mássica de cada componente

(Tabela 4.2). A parafina recuperada após testes de aquecimento e secagem, via microondas, apresentou a mesma cadeia de alcanos lineares, com faixa de carbonos variando entre C₁₂ e C₁₆ e temperaturas de ebulição na faixa de 173 a 289°C. A diferença principal entre a base pura e a recuperada está na redistribuição da cadeia carbônica com os principais alcanos (C₁₄ e C₁₅) alterando suas concentrações mássicas, mas mantendo a estrutura da cadeia carbônica sem modificações significativas.

Tabela 4.2 - Porcentagem de área de picos de cromatografia gasosa para bases orgânicas puras e recuperadas respectivamente

		Parafina pura	Parafina recuperada	Olefina pura	Olefina recuperada
Alcanos	C₁₀H₂₂	0	0	4,95	0
	C₁₂H₂₆	1,88	4,17	0	0,2
	C₁₃H₂₈	3,07	8,76	0	0,73
	C₁₄H₃₀	77,75	67,28	0	2,04
	C₁₅H₃₂	15,5	17,48	0	1,17
	C₁₆H₃₄	1,23	2,04	0	0
Alcenos	C₁₆H₃₂	0,57	0,27	95,05	72,96
	C₁₈H₃₆	0	0	0	22,9

Para a olefina pura e recuperada observou-se também algumas pequenas alterações. A olefina pura apresentou apenas a presença de um alcano - decano (C₁₀H₂₂) com a porcentagem de aproximadamente 5%. O restante, ou seja, 95%, é composto do alceno linear - hexadeceno (C₁₆H₃₂). Para olefina recuperada, sugere-se que ocorreu uma conversão térmica do alceno C₁₆H₃₂, levando a formação de novos alcanos de cadeia linear, variando entre C₁₂ a C₁₅. Além do mais, a conversão térmica do decano (C₁₀H₂₂) juntamente com o hexadeceno pode ter contribuído para a formação do alceno com maior cadeia carbônica, C₁₈H₃₆. Além do mais, essa conversão térmica, ou uma possível reação química entre bases orgânicas e os constituintes do cascalho; pode ser a principal razão pela coloração mais escurecida das amostras recuperadas, sobretudo na amostra recuperada de olefina (Figura 4.3).

Deste modo, apesar da conversão térmica ocorrida na olefina as cadeias carbônicas de ambas bases orgânicas recuperadas continuam a apresentar os principais hidrocarbonetos necessários para formulação dos fluidos de perfuração. Não foi identificado a formação de nenhum composto aromático tóxico, ou seja, esses fluidos recuperados não apresentaram nenhuma alteração significativa, não impedindo o seu uso e/ou reaproveitamento para preparação de novos fluidos de perfuração.

A Figura 4.4 apresenta os testes realizados a temperatura ambiente, para avaliar a influência da faixa granulométrica nas propriedades dielétricas referentes as amostras do grupo 2 (Tabela 3.1).

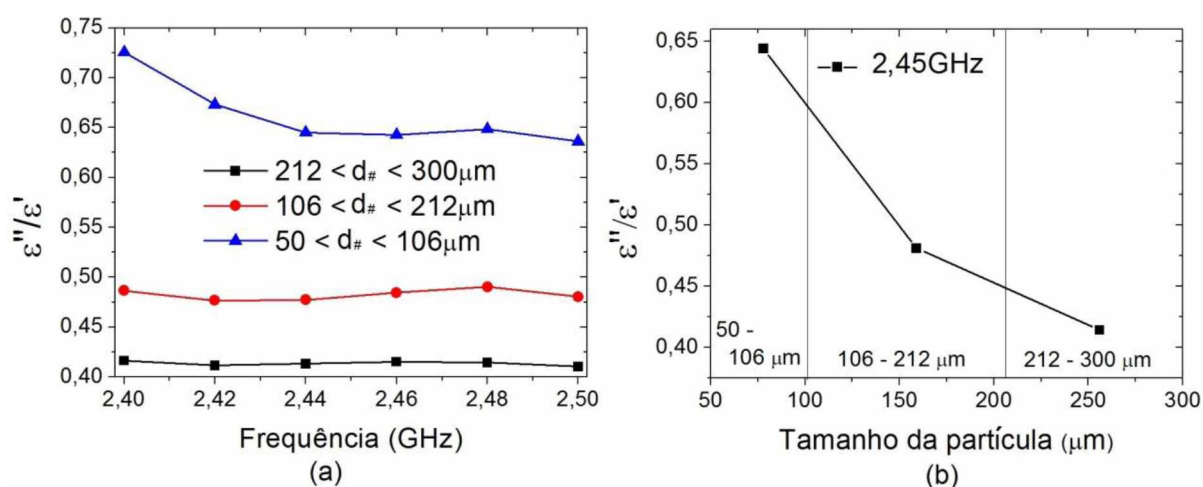


Figura 4.4 - Perfil da tangente de perdas para as três faixas de tamanhos dos cascalhos, (a) frequência de 2,4 a 2,5GHz, (b) frequência de 2,45 GHz.

Estes testes foram realizados a temperatura ambiente e com uma mesma concentração de fluido de perfuração olefina (20% peso), variando apenas a faixa de tamanho das partículas das amostras. Constatou-se que o cascalho com menor faixa granulométrica tem maior tangente de perdas na faixa de frequência analisada (Figura 4.4a), ou seja, esse cascalho possui maior capacidade de converter energia absorvida em calor. Esse fato também pode ser comprovado observando os dados da Tabela 4.3 para a frequência de interesse de 2,45GHz.

Tabela 4.3 - Propriedades dielétricas para o cascalho para as três faixas granulométricas a frequência de 2,45 GHz.

	50<d#<106μm	106 <d#<212μm	212<d#<300μm
ϵ'	6,057	7,064	7,392
ϵ''	3,901	3,397	3,061
ϵ''/ϵ'	0,644	0,481	0,414

Embora a quantidade de energia armazenada na mistura através do campo elétrico, ϵ' , ser menor no cascalho de menor diâmetro de partícula ($\epsilon' \cong 6,06$), o fator de perda dielétrica ϵ'' , que é responsável pela energia dissipada na forma de calor dentro do material, é maior ($\epsilon' \cong 3,90$) comparando-se as outras granulometrias (Tabela 4.3). Essas diferenças entre as duas propriedades apontam que o cascalho mais fino, além de possuir maior superfície específica de contato, possui maior habilidade de transformar energia absorvida através da formação do

campo elétrico em calor. A Figura 4.4b mostra os valores de tangente de perdas para a frequência de interesse de 2,45GHz. Desta forma, a medida que o tamanho médio das partículas de cascalhos aumenta a tangente de perdas diminui. Isso aponta que os cascalhos de dimensões maiores tem uma defasagem na capacidade de transformar energia absorvida em calor, se comparados com cascalhos com menor diâmetro de partícula.

A Figura 4.5 mostra os testes realizados para determinar a influência da temperatura nas propriedades dielétricas referentes as amostras do grupo 3 (Tabela 3.1).

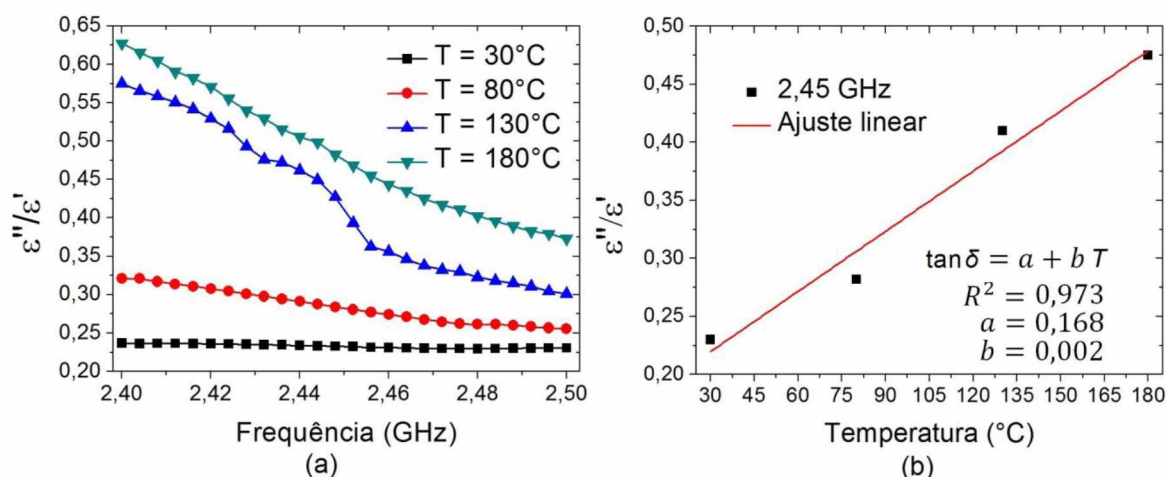


Figura 4.5 - Perfil da tangente de perdas com a temperatura da amostras, (a) frequência de 2,4 a 2,5GHz, (b) regressão linear da $\tan \delta$ em função da temperatura.

Todas as curvas apresentam uma tendência similar, com decréscimo da tangente de perdas com o incremento da frequência, exceto para curva com temperatura de 30°C que se manteve, praticamente, constante na faixa de frequência analisada (Figura 4.5a). Mantendo a frequência em 2,45GHz, foi observado que o aumento da temperatura promove um aumento gradual na tangente de perdas, ou seja, com o acréscimo da temperatura o material se torna melhor condutor de energia e, conseqüentemente, a capacidade de converter essa energia absorvida em calor também aumenta, sobretudo na faixa de frequência de interesse.

Os resultados da Tabela 4.4 mostram também que uma pequena variação da frequência de 2,4 para 2,5GHz levaram a uma queda significativa (superior a 40%) nos valores da $\tan \delta$, para os ensaios com temperaturas mais elevadas (130°C e 180°C).

Tabela 4.4 - Tangente de perdas ($\tan\delta$) para os ensaios das propriedades dielétricas com a temperatura.

	30°C	80°C	130°C	180°C
2,4 GHz	0,236	0,321	0,574	0,627
2,45 GHz	0,232	0,282	0,410	0,475
2,5 GHz	0,230	0,255	0,301	0,372
% redução	2,70	20,46	47,61	40,58

Uma possível razão para explicar esse fenômeno pode estar ligada ao fato de que as duas amostras com maiores temperaturas (130 e 180°C) a remoção da água por ebulição é consideravelmente maior quando comparado às duas amostras de menor temperatura (30 e 80°C), devido ao fenômeno da evaporação. Desta maneira, essa baixa quantidade de água, sobretudo nas duas amostras de maior temperatura, pode ter colaborado para essa grande variação nos valores de $\tan\delta$ na faixa de frequência analisada de 2,4 a 2,5GHz.

Como fornos de microondas facilmente ultrapassam as temperaturas utilizadas neste estudo, e o limite da sonda de análise de propriedades dielétricas (AGILENT modelo 85070E) é de 200°C, foi realizado uma regressão linear (Figura 4.5b) utilizando a frequência pontual de 2,45GHz motivada pelo fato de ser a frequência utilizada em fornos microondas em geral. A melhor regressão linear, considerando os resultados experimentais obtidos, forneceu um $R^2 = 97,3\%$. Esse ajuste não tem a intenção de fornecer valores exatos, por extrapolação, das propriedades dielétricas numa faixa mais elevada de temperatura, apenas uma estimativa aproximada caso tais valores das propriedades sejam necessários.

É importante salientar que nem sempre um aquecimento rápido e brusco é sinal de uma boa remoção da fase orgânica. Resultados anteriores reportados na literatura mostram que para alcançar uma remoção mais eficiente do componente orgânico presente no cascalho deve-se promover um aquecimento do sólido de forma mais suave e controlada. Assim, a água contida no fluido de perfuração não evapora de maneira brusca e pode, deste modo, remover por arraste uma maior quantidade de componente orgânico contido no cascalho (PEREIRA *et al.*, 2014ab; SANTOS *et al.*, 2014a; PETRI *et al.*, 2015; ROSSI *et al.*, 2016).

A Figura 4.6 refere-se aos testes de influência da concentração de contaminante nas propriedades dielétricas à temperatura ambiente. As amostras do grupo 4 (Tabela 3.1) continham cascalho de perfuração misturados com 0, 9, 14 e 24% (peso) de fluido de perfuração olefina respectivamente. Os resultados experimentais obtidos mostraram uma variação pronunciada nos valores da constante dielétrica e do fator de perda dielétrica (Figura 4.6a e 4.6b), para o cascalho puro quando comparado com cascalhos com 24% de fluido de perfuração.

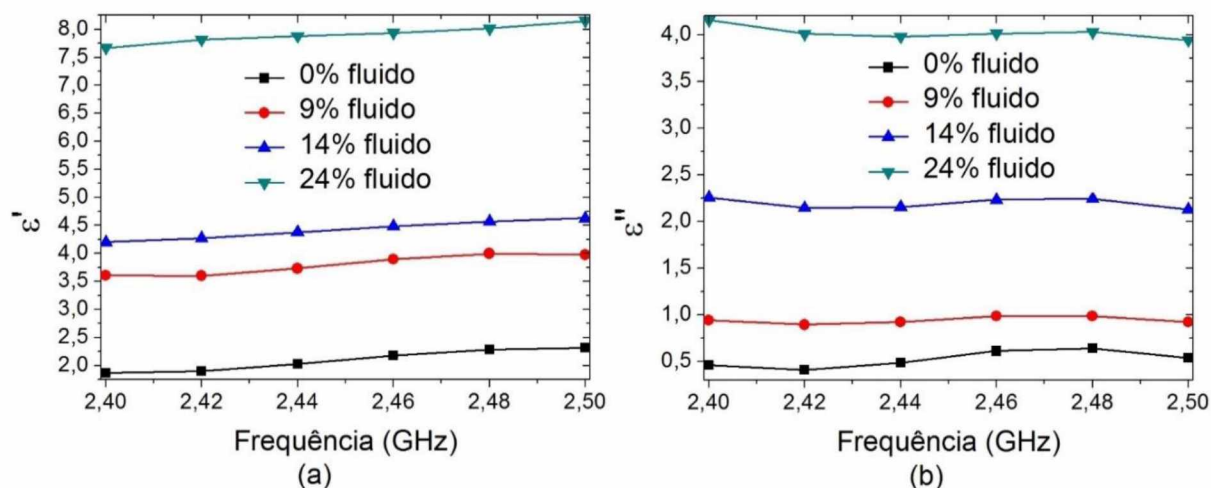


Figura 4.6 - Propriedades dielétricas do cascalho puro e misturados com fluido olefina a temperatura ambiente, (a) constante dielétrica, (b) fator de perda dielétrica.

A constante dielétrica ϵ' expressa a quantidade de energia armazenada no material através do campo elétrico. Desta maneira, nota-se, que a constante dielétrica do cascalho com 24% de fluido de perfuração olefina, é superior as demais concentrações (Figura 4.6a). Esses resultados indicam a ocorrência de um campo elétrico mais intenso nas misturas mais concentradas com o fluido de perfuração. Deste modo, a intensidade do campo elétrico na amostra de cascalhos com maior concentração de fluido de perfuração é aproximadamente 3,5 vezes superior quando comprado com o cascalho puro, sobretudo na faixa de frequência de interesse. A Tabela 4.5 apresenta os valores das propriedades dielétricas dos cascalhos puro e misturados com fluido de perfuração.

Tabela 4.5 - Propriedades dielétricas do cascalho com diferentes teores de fluido olefina na frequência de 2,45 GHz.

	Cascalho puro	Cascalho + 9%	Cascalho + 14%	Cascalho + 24%
ϵ'	2,101	3,815	4,430	7,908
ϵ''	0,547	0,953	2,192	3,995
ϵ''/ϵ'	0,26	0,25	0,49	0,51

A Figura 4.6b exhibe os resultados de fator de perda dielétrica (ϵ'') para as amostras analisadas com variação do teor de fluido de perfuração. Como mencionado anteriormente, esta medida expressa a energia dissipada na forma de calor de um determinado material. Assim, o cascalho concentrado com 24% de fluido de perfuração é a mistura com maior capacidade de absorver energia através do campo elétrico e transformá-la em calor, quando comparado com

os outros cascalhos. A explicação para esse resultado, refere-se a quantidade de água contida em cada amostra, uma vez que a massa e a temperatura das misturas foram mantidas constante, o que variou foi a quantidade de contaminante no cascalho. Desta maneira, a mistura contendo 24% (peso) de fluido perfuração contava com aproximadamente 12% (peso) de água. Neste caso a água é o principal componente a sofrer a polarização do dipolo. Tal mecanismo é o principal responsável pelo aquecimento via microondas em sistemas que contenham substâncias polares, neste sentido, o dipolo é uma característica natural do material dielétrico.

Na Figura 4.7 são apresentados os valores de profundidade de penetração (D_p) para as três faixas de tamanhos de cascalhos investigadas (Figura 4.7a). A Figura 4.7 mostra também a variação da profundidade de penetração com a temperatura empregada nos testes (Figura 4.7b). No cálculo da profundidade de penetração foram utilizadas as Eq. 2.12 e 2.13 e os dados experimentais de constante dielétrica (ϵ') e fator de perdas dielétrica (ϵ''). Sendo ambas propriedades função da frequência de radiação.

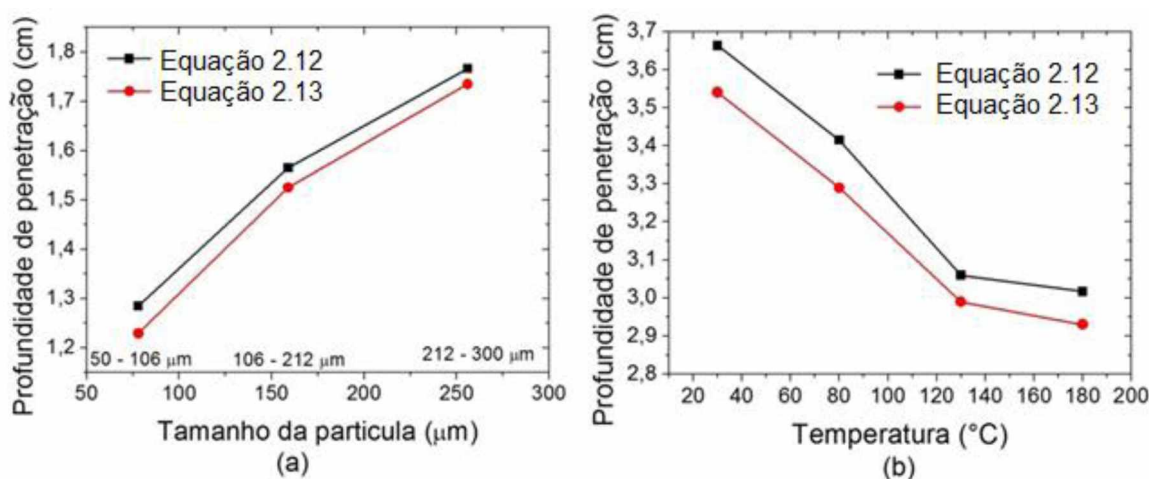


Figura 4.7 - Profundidade de penetração em função da faixa de tamanho dos cascalhos (a) e da variação de temperatura (b).

Tomando a frequência de radiação em um valor fixo de 2,45GHz temos um comprimento de onda (λ) da ordem de 12,24cm. Deste modo, para a figura 4.7a, o cascalho de perfuração com menor faixa de tamanho apresentou menor profundidade de penetração, isto se deve ao fato de o cascalho ter maior superfície de contato e menor porosidade, fazendo com que a maior parte da energia seja dissipada mais próximo a superfície do leito. Para o cascalho com maior diâmetro de partícula ocorre exatamente o contrário, como esse cascalho possui menor superfície de contato, isto gera uma maior porosidade do leito facilitando a penetração das

microondas e atingindo uma profundidade de penetração superior quando comparado ao material menos poroso.

Para a Figura 4.7b a profundidade de penetração diminui à medida que a temperatura aumenta. Esse comportamento pode estar ligado ao fato de que em temperaturas médias ($T < 100^{\circ}\text{C}$) existe ainda certa quantidade de água onde ocorre o fenômeno da polarização do dipolo, que é o principal mecanismo de aquecimento por microondas. Já em temperaturas mais elevadas ($T > 100^{\circ}\text{C}$) esse mecanismo está menos presente, diminuindo, a intensidade de penetração das ondas sobre o material e mantendo um aquecimento mais considerável na superfície do leito. Este fato reafirma os resultados dos trabalhos de BUFFER (1995), NELSON e TRABELSI (2012). Os autores afirmaram que a profundidade de penetração diminui com aumento da temperatura para materiais com condutividade iônica considerável. Desta maneira, cascalho de perfuração é formado, em grande parte, por sais o que garante uma condutividade iônica relevante.

A Figura 4.8 ilustra as distribuições de tamanho dos cascalhos oriundos da perfuração de poços de petróleo (Figura 4.8a), e a distribuição de circularidade dos mesmos (Figura 4.8b). Ambos obtidos através do CAMSIZER® nas três faixas de tamanho estudadas neste trabalho.

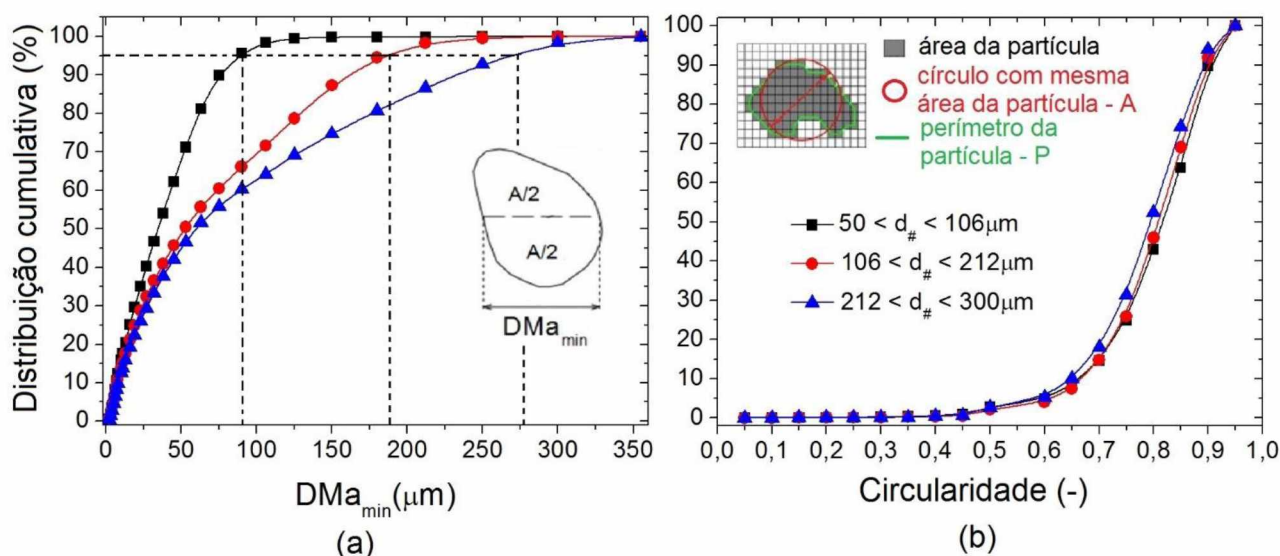


Figura 4.8 - Distribuição de tamanho (a) e da circularidade (b) dos cascalhos de perfuração para as três faixas estudadas

A Figura 4.8a mostra que os resultados obtidos, pela análise dinâmica de imagem, estão de acordo com as amostras originais dos testes, ou seja, a maioria das partículas se enquadram em suas respectivas faixas de tamanho (D_{95}). Os resultados encontrados para distribuição de forma (Figura 4.8b) indicam que em termos de esfericidade as partículas são praticamente equivalentes, a real diferença se dá no tamanho das partículas, ou seja, partículas maiores

formam um leito mais poroso ou mais permeável e, esse fato explica a maior profundidade de penetração encontrada para cascalhos com partículas maiores (Figura 4.7a).

Para atenuar esse problema da profundidade de penetração e garantir uma operação de aquecimento e secagem, por microondas, mais homogênea, recomenda-se o uso de um sistema de mistura do leito de cascalhos durante a secagem. Experimentos conduzidos por PETRI *et al.*, (2015), verificaram que a agitação mecânica levou a um aumento de até 17% na eficiência da remoção do componente orgânico no cascalho de perfuração misturados com fluido parafina.

4.2 - Cinética de aquecimento e secagem

A Figura 4.9 mostra as curvas de aquecimento de vários compostos referentes ao conjunto de ensaios 1 (Tabela 3.2). A curva de aquecimento da água apresenta comportamento clássico, com patamar de evaporação em 100°C.

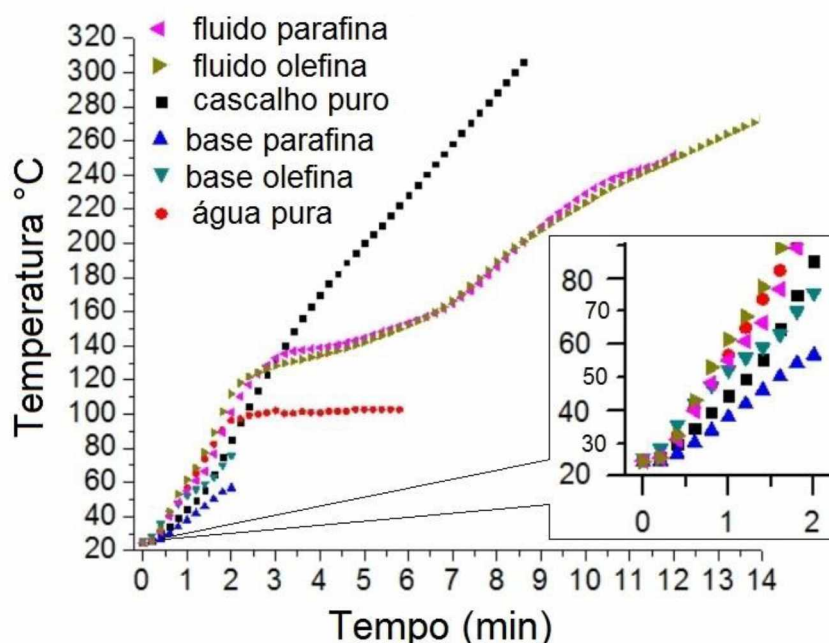


Figura 4.9 - Curva de aquecimento para os compostos do conjunto de ensaios 1.

Nota-se que os dois fluidos de perfuração, apesar de possuírem bases orgânicas diferentes, mostraram uma cinética de aquecimento bastante semelhante, isso ocorre, provavelmente, pela proximidade de suas propriedades dielétricas (Tabela 4.1). Nas curvas de aquecimento de ambos os fluidos de perfuração, observa-se uma inclinação aproximadamente

constante entre 0 e 2 minutos, em que neste intervalo ocorre aquecimento de todo o material (água, fase orgânica e aditivos). Entre, aproximadamente, 2 a 7 minutos ocorre a evaporação de grande parte da água com possível arraste de base orgânica. A partir de 7 minutos, ocorre aquecimento dos aditivos presentes nos fluidos de perfuração e estes, por sua vez, transferem por condução, energia às bases orgânicas iniciando o processo de evaporação das mesmas. Devido a pequena diferença nas propriedades dielétricas dos compostos orgânicos, o teste para o fluido parafina atingiram cerca de 12 minutos e para fluido olefina 14 minutos.

Espera-se que para tempos de aquecimentos superiores aos obtidos experimentalmente, as curvas de aquecimento sofram uma nova inflexão, à medida que a temperatura aumente, neste ponto ocorreria a evaporação das bases orgânicas contidas no fluido de perfuração. Uma vez que, a faixa de ebulição de ambas as bases orgânicas são: parafina, entre 173 e 289°C, e olefina, entre 268 e 367°C.

Como esperado as bases orgânicas puras não sofreram aquecimento considerável, pois possuem $\tan\delta < 0,1$, ou seja, são transparentes frente a ação das microondas. Deste modo, a maioria das ondas incidentes no material são refletidas novamente para o emissor de ondas eletromagnéticas. Entretanto, existe a suspeita que esse aquecimento sofrido pelas bases orgânicas puras, é devido a troca térmica, ocorrida por condução, através do termopar instalado para medir a temperatura do leito. Este equipamento tem um revestimento metálico de proteção e acaba sendo um ponto quente (*hot spot*). Deste modo, essa dúvida poderá ser verificada através do estudo de simulação eletromagnética, apresentado na próxima seção do presente trabalho. Mesmo assim, a olefina apresentou uma pequena diferença na temperatura final (cerca de 15°C a mais), comparando-se a parafina pura em um mesmo tempo de aquecimento (zoom da Figura 4.9). Isso mostra que a olefina é menos transparente frente a ação das microondas.

Ainda foi realizado o aquecimento do cascalho puro e observou uma taxa de aquecimento bem superior, em relação aos demais materiais analisados. Esta taxa de aquecimento mais elevada, está associada ao elevado teor de óxidos metálicos, sobretudo de ferro e alumínio presentes nesse cascalho, como pode ser visto na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados da análise de fluorescência de Raio-X para amostra de cascalho puro.

Óxidos	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	SiO ₂	Br	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	BaO	Cl	SO ₃	outros
	11,52	16,61	0,69	12,61	39,96	3,82	3,11	3,00	2,13	1,14	0,81	0,43	4,17

A Tabela 4.6 mostra os resultados de fração mássica de óxidos presente no cascalho puro, através da análise de fluorescência de Raio-X. Observou-se que aproximadamente 28% da amostra contém óxidos de ferro e alumínio (Fe_2O_3 e Al_2O_3), os quais são excelentes condutores de energia na forma de calor.

A Figura 4.10 mostra os resultados obtidos referentes ao conjunto de ensaios 2 (Tabela 3.2), ou seja, a cinética de variação de massa total, das amostras das misturas de cascalhos com água, fluidos de perfuração parafina e olefina e bases orgânicas puras. Para o cascalho misturado com bases orgânicas puras não houve praticamente remoção alguma, visto que na primeira fase da cinética de aquecimento a água tem um papel fundamental no arraste do componente orgânico e aquecimento da mistura. Neste caso, as bases orgânicas eram puras (isentas de água), além disso, o cascalho não atingiu temperaturas elevadas o bastante para transferir, por condução, a energia necessária para o início do processo de evaporação das bases orgânicas.

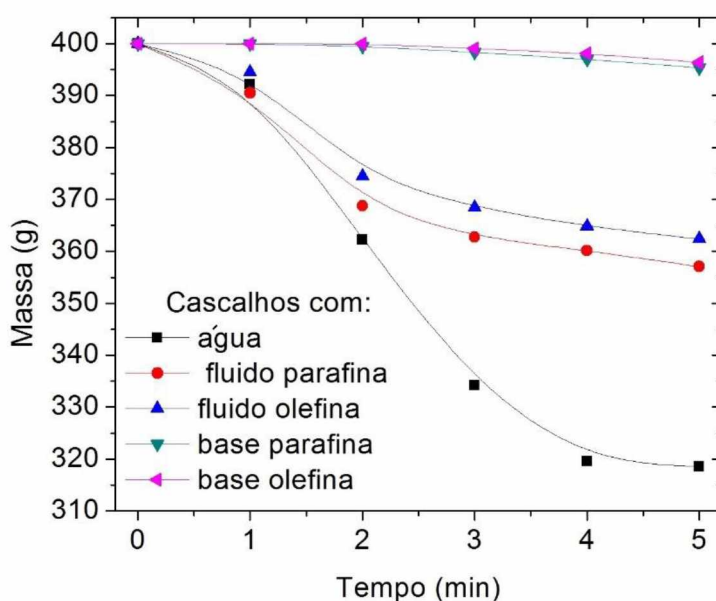


Figura 4.10 - Variação da massa total de cascalho misturado com água, fluidos de perfuração e bases orgânicas puras.

Para as misturas contendo cascalho/água e cascalho/fluidos de perfuração o comportamento observado foi semelhante. A diferença, porém, está na taxa com que esses componentes são removidos dos cascalhos. Para cascalho misturado apenas com água, em cerca de 5 minutos, o líquido foi praticamente todo removido da mistura. Para cascalhos misturados com fluido parafina, neste mesmo intervalo de tempo, a maior parte da água foi

evaporada e a remoção de fase orgânica ficou em torno de 46% (ver Tabela 4.7). Como também pode ser observada na Tabela 4.7, a temperatura final do material foi de aproximadamente 209°C, portanto a remoção do material orgânico, por evaporação, não foi elevada visto que a faixa de ebulição da parafina é de 173 a 289°C. Assim, nota-se também que uma parcela da remoção de material orgânico deve-se, sobretudo, ao arraste pela evaporação da água.

Fato semelhante ocorreu com o cascalho misturado com fluido olefina. Ao final do tempo de aquecimento, grande parte da água foi evaporada e a remoção de fase orgânica ficou em torno de 31%. Neste ensaio, a temperatura final do material foi de 202°C, muito abaixo da faixa de temperatura de ebulição dos compostos olefínicos (268 a 367°C). Deste modo, a remoção de olefina deve-se, sobretudo, ao arraste pela evaporação da água.

Tabela 4.7 - Massa total de cascalho misturado com vários materiais após operação de secagem

Massa (g)	Cascalho misturado com:									
	Água		fluido parafina		fluido olefina		Parafina pura		Olefina pura	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Água	80	1,15	34,20	2,08	29,44	4,48	-	-	-	-
Fase Orgânica	-	-	46,64	25,17	47,84	32,94	83,40	78,77	86,60	83,2
Temperatura final (°C)	144		209		202		185		201	

Esses resultados mostram também que para um mesmo nível de energia (ou tempo de secagem), a remoção de parafina é mais intensa que a de olefina. Isto se deve, sobretudo, às diferenças entre suas propriedades físico-químicas, como peso molecular e faixa de temperatura de ebulição.

Os testes a seguir foram realizados com controle de temperatura, desta forma, a temperatura do leito foi mantida por um controlador automático do tipo *ON/OFF*. O controle foi realizado dentro de um range de +/- 10°C. A Figura 4.11 mostra a temperatura do leito mantida a 150, 200 e 250°C durante experimentos provenientes do conjunto de ensaios 3.

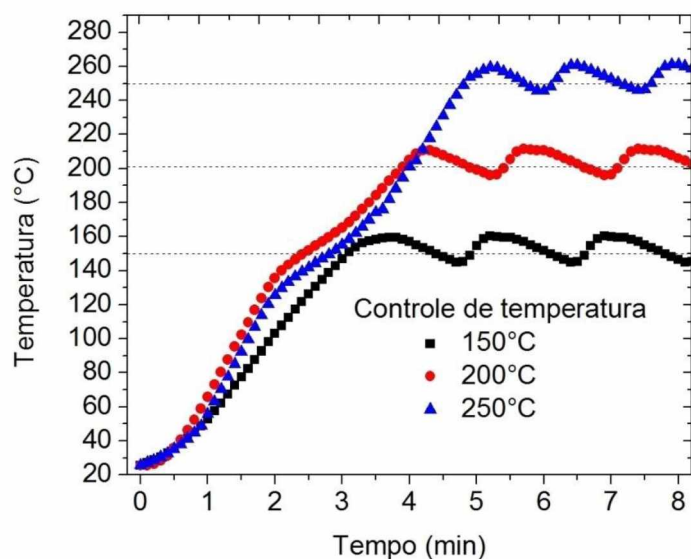


Figura 4.11 - Controle de temperatura

A Figura 4.12 ilustra a cinética de secagem, por microondas, da água presente no cascalho misturado com fluidos parafina e olefina (Figura 4.12a), e também da fase orgânica presentes nestas mesmas misturas (Figura 4.12b). Estes resultados experimentais são provenientes do conjunto de ensaios 3.

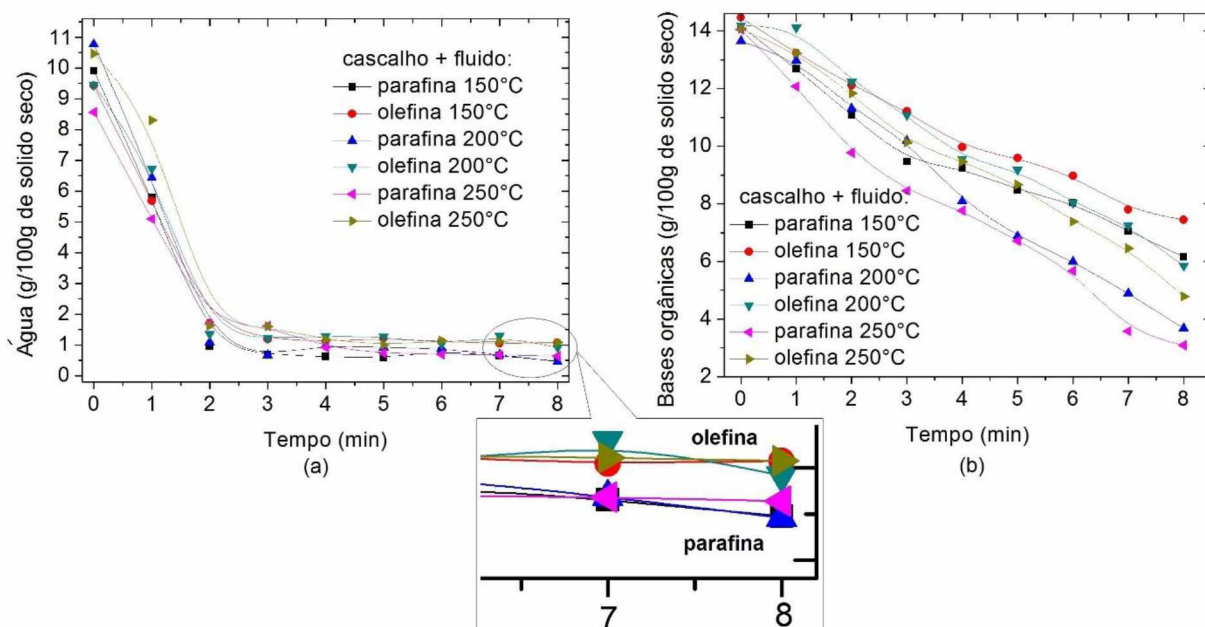


Figura 4.12 - Cinética de secagem da água presente no cascalho com fluidos (a), e secagem da fase orgânica presentes no cascalho com fluidos (b)

No caso da evaporação da água presente nos cascalhos misturados com fluidos de perfuração (Figura 4.12a), embora o comportamento seja muito semelhante para ambos os fluidos, observa-se que a remoção da água quando o cascalho está misturado com fluido olefina é menor em relação ao cascalho misturado com fluido parafina. Isto ocorre devido as propriedades físico-químicas das bases orgânicas onde a olefina possui maior peso molecular e maior temperatura de ebulição. Já para uma mesma base orgânica (olefina ou parafina) a temperatura de controle não influencia na taxa de remoção. Esse comportamento ocorre, devido ao fato que todas as temperaturas de controle avaliadas, são superiores a temperatura de ebulição da água.

Para a secagem dos componentes orgânicos (Figura 4.12b) a curva da cinética de remoção, dessas bases orgânicas presentes nos fluidos são semelhantes, diferindo apenas na taxa da remoção. Tanto o teor de parafina quanto o de olefina, decrescem a uma taxa aproximadamente constante, na secagem de cascalho e fluido. Ao contrário da cinética de remoção da água, a temperatura de controle neste caso, embora não influencie o comportamento, altera a taxa de remoção da fase orgânica. Para uma mesma base orgânica (parafina ou olefina), a remoção com controle de temperatura a 250°C é mais efetiva que a 150°C, por exemplo.

Comparando agora a remoção das duas bases à mesma temperatura, nota-se que a parafina é removida de forma um pouco mais intensa que a olefina. A taxa secagem de cascalho de perfuração misturado com fluido parafina e temperatura de controle de 150°C tem praticamente o mesmo desempenho, em termos de remoção de fase orgânica, que a secagem de cascalho misturado com fluido olefina e temperatura de controle de 200°C. Essa diferença entre as duas bases orgânicas fica evidente na análise de suas respectivas cadeias carbônicas. Enquanto a parafina é composta por hidrocarbonetos com cadeias de 10 a 13 carbonos, a olefina, por sua vez, possui cadeias de 15 a 18 carbonos além da insaturação presente em suas cadeias. Tais características alteram as propriedades físico-químicas, dentre elas a faixa de ebulição de cada base orgânica.

Fato interessante na Figura 4.12b aponta que o arraste das bases orgânicas pela água não foi muito relevante nesse caso. Desta maneira, o mecanismo dominante é o próprio aquecimento da matriz de cascalho e esse cascalho, por condução térmica, transfere energia suficiente para a ebulição das bases orgânicas parafina e olefina. Deste modo, observa-se uma taxa decrescente próxima a linearidade para todos os tempos de aquecimento.

Essa remoção eficiente das bases orgânicas, através do tratamento via microondas, é favorecida pela estrutura pouco porosa do cascalho em questão. Para comprovar esse questionamento foi determinado a área superficial dos poros do cascalho, através do método B.E.T. Este método baseia-se no fenômeno da adsorção multicamada, através do gás nitrogênio, a uma dada pressão relativa (ALLEN, 1997). A partir da análise de área superficial porosa do cascalho, pode-se inferir que esse material possui uma estrutura pouco porosa da ordem $\pm 6,5553 \text{ m}^2/\text{g}$, com volume médio dos poros de $\pm 0,0323 \text{ cm}^3/\text{g}$ e diâmetro médio dos poros de $\pm 12,8993 \text{ nm}$.

Além do mais, essa característica pouco porosa fica evidente em algumas imagens geradas pela MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura). Desta forma, podemos inferir que o cascalho de perfuração é uma estrutura pouco porosa (Figura 4.13), ou seja, estimasse que os fluidos de perfuração apenas revestem esse cascalho, formando uma película superficial. Caso o cascalho apresentasse uma estrutura mais porosa, esse fluido de perfuração poderia penetrar nos poros, dificultando assim, sua remoção pelo tratamento via microondas.

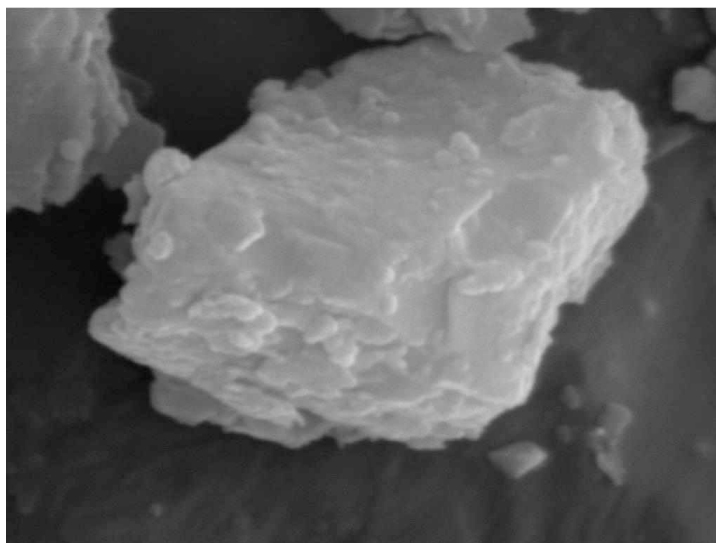


Figura 4.13- Estrutura pouco porosa do cascalho de perfuração.

Na figura 4.14, nota-se que estes cascalhos utilizados nos experimentos, via microondas, são provenientes de rochas sedimentares argilosas, frequentemente conhecidas como folhelhos. Essa formação rochosa é tipicamente encontrada em perfurações de poços nacionais, e em geral possuem um aspecto maciço, compactado e endurecido.

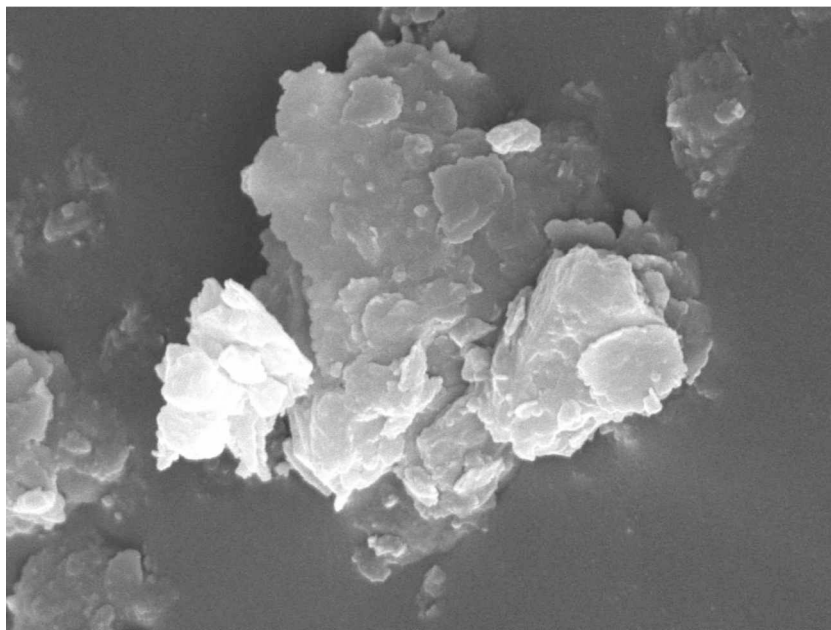


Figura 4.14 - Formação rochosa do tipo folhelho.

Os resultados obtidos no conjunto de ensaios 3 também foram utilizados para análise da secagem de fluido de perfuração por microondas. Deste modo, as curvas de teor fluido de perfuração presente nos cascalhos versus tempo foram ajustadas segundo três modelos de cinética de secagem convencional. As curvas dos teores adimensionais de fluido base parafina (TFP) e de fluido base olefina (TFO), obtidos a partir das Eq. 3.2 e 3.3, versus tempo, foram ajustadas de acordo com os modelos de Page, Henderson-Pabis e MSM. Os parâmetros estimados por regressão não linear são mostrados nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10 a seguir, bem como o quadrado do coeficiente de correlação (R^2) e nível de significância (p -value).

Tabela 4.8 - Parâmetros do modelo de Page

		TFP		TFO	
		Parâmetros	p -value	Parâmetros	p -value
150°C	k	$0,3812 \pm 0,0506$	0,0001	$0,3146 \pm 0,0315$	0,0000
	n	$0,5915 \pm 0,0861$	0,0002	$0,5920 \pm 0,0633$	0,0001
	R^2	0,9631		0,9785	
200°C	k	$0,3161 \pm 0,0352$	0,0000	$0,2512 \pm 0,0445$	0,0008
	n	$0,8138 \pm 0,0733$	0,0000	$0,7663 \pm 0,1106$	0,0002
	R^2	0,9833		0,9562	
250°C	k	$0,2718 \pm 0,0482$	0,0008	$0,2689 \pm 0,0541$	0,0017
	n	$0,7385 \pm 0,1116$	0,0003	$0,6503 \pm 0,1253$	0,0013
	R^2	0,9630		0,9392	

Tabela 4.9 - Parâmetros do modelo de Henderson-Pabis

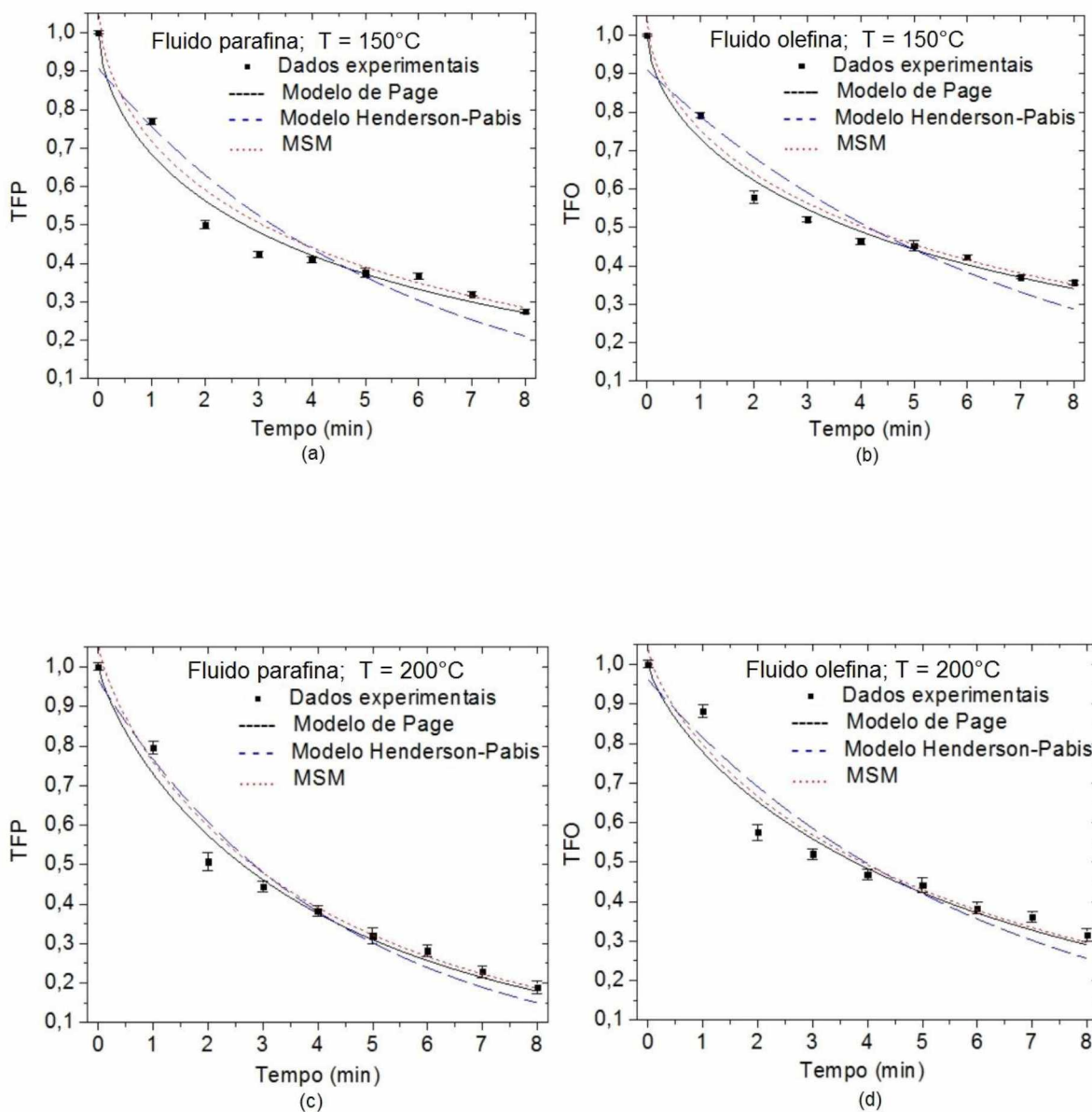
		TFP		TFO	
		Parâmetros	<i>p-value</i>	Parâmetros	<i>p-value</i>
150°C	A	0,9070 ± 0,0653	0,0000	0,9100 ± 0,0519	0,0000
	k	0,1822 ± 0,0257	0,0001	0,1442 ± 0,0180	0,0001
	R ²	0,8896		0,9067	
200°C	A	0,9664 ± 0,0401	0,0000	0,9611 ± 0,0503	0,0000
	k	0,2328 ± 0,0374	0,0000	0,1655 ± 0,0377	0,0001
	R ²	0,9714		0,9344	
250°C	A	0,9477 ± 0,0528	0,0000	0,9351 ± 0,0617	0,0000
	k	0,1685 ± 0,0190	0,0001	0,1396 ± 0,0205	0,0003
	R ²	0,9284		0,8736	

Tabela 4.10 - Parâmetros do modelo MSM

		TFP		TFO	
		Parâmetros	<i>p-value</i>	Parâmetros	<i>p-value</i>
150°C	A	1,0595 ± 0,0521	0,0000	1,0376 ± 0,0358	0,0000
	k	0,3893 ± 0,0723	0,0016	0,3211 ± 0,0469	0,0004
	B	0,5847 ± 0,1005	0,0011	0,5852 ± 0,0754	0,0002
	R ²	0,9733		0,9796	
200°C	A	1,0505 ± 0,0402	0,0000	1,0374 ± 0,0570	0,0000
	k	0,3246 ± 0,0510	0,0007	0,2647 ± 0,0679	0,0079
	B	0,8033 ± 0,0884	0,0001	0,7471 ± 0,1339	0,0014
	R ²	0,9895		0,9769	
250°C	A	1,0301 ± 0,0597	0,0000	1,0282 ± 0,0663	0,0000
	k	0,2801 ± 0,0729	0,0085	0,2834 ± 0,0823	0,0137
	B	0,7274 ± 0,1368	0,0018	0,6332 ± 0,1484	0,0052
	R ²	0,9733		0,9402	

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9, considerando o quadrado do coeficiente de correlação e o valor *p*, o modelo de Page foi o que melhor descreve a operação de secagem de ambos os fluidos de perfuração, nas três temperaturas avaliadas. Partindo-se de uma combinação dos dois primeiros modelos, e a incorporação do terceiro parâmetro (modelo MSM) viabilizou melhor ajuste dos dados experimentais, quando comparado aos dois modelos clássicos anteriormente avaliados, como mostrou os dados da Tabela 4.10.

Deste modo, como o fluido de perfuração parafina possui cadeia carbônica menor e também menor faixa de temperatura de ebulição, esse fluido será removido mais efetivamente, quando comparado ao fluido de perfuração olefina. A Figura 4.15 mostra o teor de fluido de perfuração em função do tempo para ambos os fluidos de perfuração e os modelos de secagem com os parâmetros ajustados nas três temperaturas estudadas nesse trabalho.



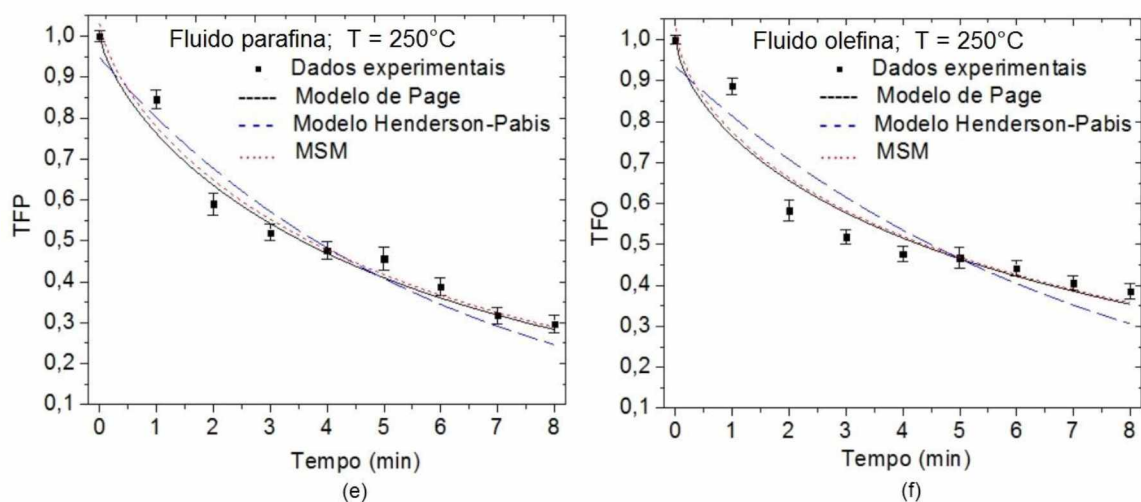


Figura 4.15 - Cinética de secagem para fluido parafina (a), (c), (e) e olefina (b), (d), (f) e modelos de secagem ajustados em três diferentes temperaturas.

O comportamento observado na secagem de cascalhos misturados com os dois fluidos foi semelhante. A diferença, todavia, está na taxa com que esses fluidos são removidos. Para todos os testes o teor residual de parafina foi inferior ao de olefina (Figura 4.15). Isto se deve ao fato do maior peso molecular da olefina em relação à parafina.

4.3 - Simulação eletromagnética

4.3.1 - Simulação de propriedades dielétricas

Utilizando o *software* comercial COMSOL *Multiphysics* e os dados das tabelas de propriedades dielétricas, presentes nesse trabalho, foram realizadas simulações numéricas, para avaliar o efeito das propriedades dielétricas na operação de aquecimento e secagem de cascalho de perfuração. Todos os testes dessa secção foram realizados com frequência de 2,45GHz e tempo computacional de 300s. É importante salientar que as simulações numéricas realizadas, para o estudo de propriedades dielétricas, não foram confrontadas com valores experimentais. Estas simulações foram conduzidas com o propósito de mostrar que os valores das propriedades dielétricas, das misturas cascalhos fluido de perfuração, obtidas neste trabalho, descrevem qualitativamente, de modo satisfatório algumas variáveis importantes na operação de aquecimento de cascalho de perfuração via microondas.

A Figura 4.16 exibe a geometria do forno utilizado nas simulações, bem como a malha computacional. Esta malha computacional foi aplicada em todo volume da cavidade e possui o formato triangular no plano (2D) e formato tetraédrico no volume (3D) com tamanho máximo de elementos obedecendo o critério de Nyquist (Eq. 3.9). Um maior refinamento da malha computacional foi empregado, exatamente na região onde a amostra do material, a ser aquecido, era acondicionado no forno (detalhe em azul da Figura 4.16). O objetivo principal do refinamento ou subdivisão era aumentar o número de elementos nessa região local devido a maior complexidade e conferir maior confiabilidade nos resultados numéricos.

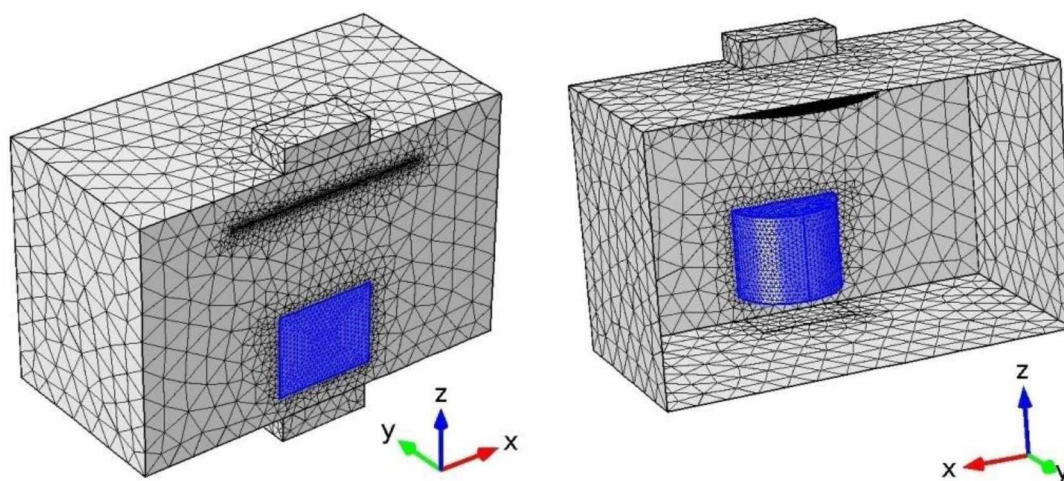


Figura 4.16 - Geometria do forno e malha utilizada nas simulações computacionais

A construção do modelo computacional acompanhou o tamanho real da cavidade do forno. Deste modo, o modelo foi dimensionado para que suas paredes coincidam com os nós das microondas, garantindo assim com que ocorresse maior nível de reflexão das ondas. Desta forma, o material que está sendo aquecido absorverá maior quantidade de energia disponível. Assim, observou-se a formação de um campo elétrico com padrões simétricos em todas as simulações realizadas no presente trabalho, indicando que tanto o forno comercial quanto o modelo computacional tem dimensões adequadas, garantindo maior eficiência do processo de aquecimento.

A Figura 4.17 descreve a distribuição do campo elétrico (V/m) para a operação de aquecimento da mistura cascalho e fluido de perfuração, para avaliar a influência da faixa granulométrica, utilizando como referência, os dados fornecidos pela Tabela 4.4.

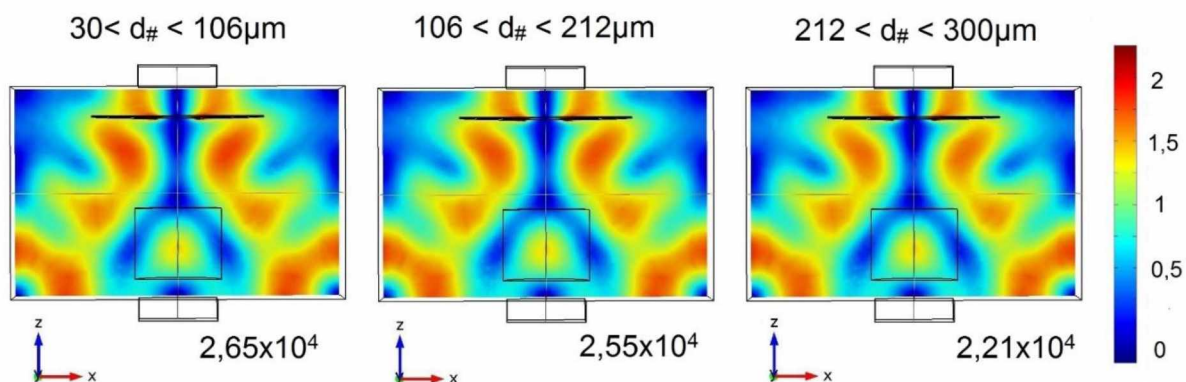


Figura 4.17 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para diferentes faixas granulométricas.

As simulações foram realizadas para o mesmo tempo computacional, variando-se apenas as propriedades dielétricas do cascalho, de acordo com sua faixa granulométrica. Cascalho com menor tamanho de partícula apresentou maior tangente de perdas segundo a Tabela 4.4. Isto também se reflete na absorção de energia por esse material, através do campo elétrico que posteriormente será convertida em energia térmica. Por outro lado, o cascalho com maior granulométrica absorveu menos energia na forma de campo elétrico, o que garantiu um aquecimento menos eficiente desse cascalho ao final da operação de aquecimento, como mostra a Figura 4.17.

A Figura 4.18 apresenta a distribuição de potência por unidade de volume (W/m^3), responsável pela energia absorvida pelas amostras através da formação do campo elétrico e posteriormente dissipada na forma de calor.

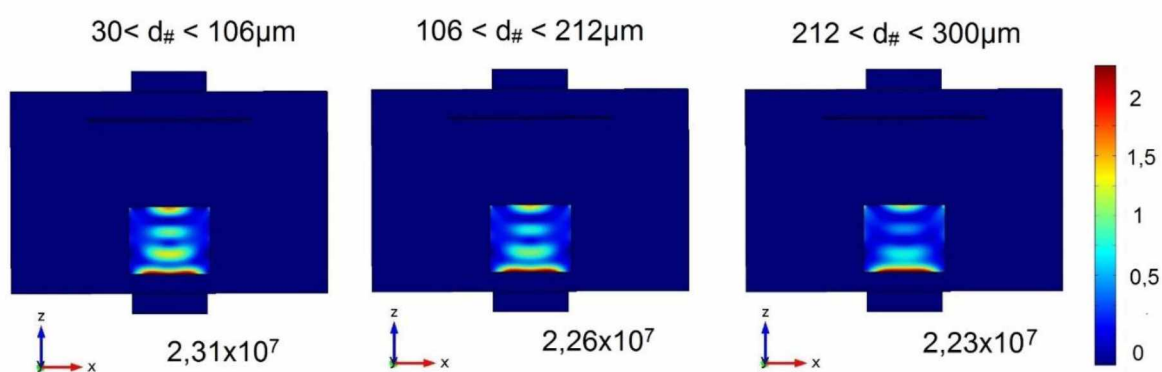


Figura 4.18 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para diferentes faixas granulométricas.

Observando as três distribuições de potência, nota-se uma pequena diferença no padrão de oscilação entre as amostras, e que todas possuem uma região de máxima energia na base das amostras. Essa região indica que o aquecimento ocorre de forma mais acentuada na parte inferior de cada amostra, quando comparada com a parte superior. Deste modo, o cascalho com menor faixa granulométrica garantiu uma maior absorção de energia a partir da formação do campo elétrico e, conseqüentemente, atingirá temperaturas maiores quando se comparado as outras faixas de tamanho de partículas. A Figura 4.19 mostra a distribuição de temperatura para diferentes faixas granulométricas.

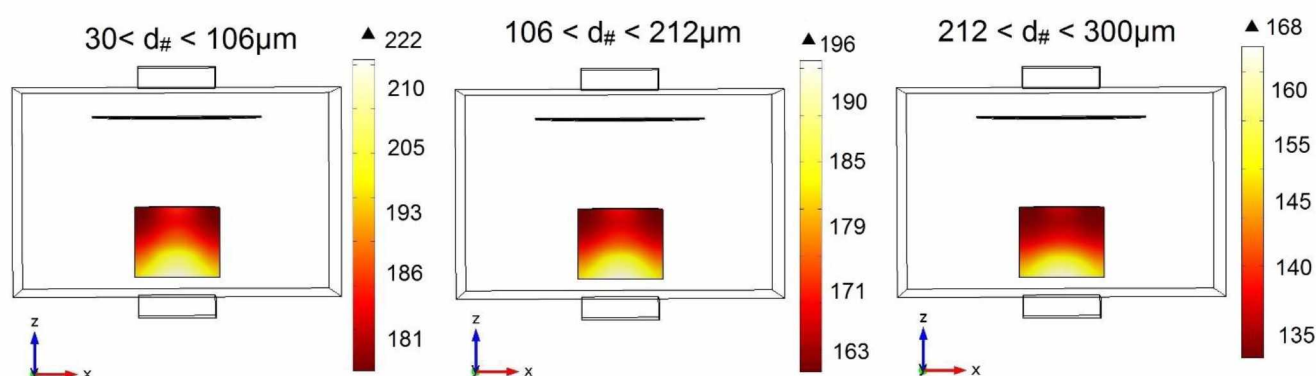


Figura 4.19 - Distribuição de temperatura (°C) para diferentes faixas granulométricas.

Ainda que a constante dielétrica, ϵ' , apresenta um valor menor para o cascalho de menor diâmetro de partícula, o fator de perda dielétrica ϵ'' , que é responsável pela energia dissipada na forma de calor dentro do material, é maior (Tabela 4.4). Assim, o cascalho mais fino, além de possuir maior superfície específica de contato, consegue absorver maior quantidade de energia por volume (Figura 4.18), e dissipar essa energia na forma de calor. Para o cascalho com maior faixa granulométrica ocorre o oposto, esse material possui maior ϵ' mas não consegue dissipar toda essa energia absorvida em calor, atingindo assim, a menor temperatura final dentre as três faixas avaliadas (Figura 4.19).

A Figura 4.20 descreve a distribuição do campo elétrico (V/m) para a operação de aquecimento da mistura cascalho e fluido de perfuração, para avaliar a influência da concentração de contaminantes, utilizando como referência, os dados fornecidos pela Tabela 4.6.

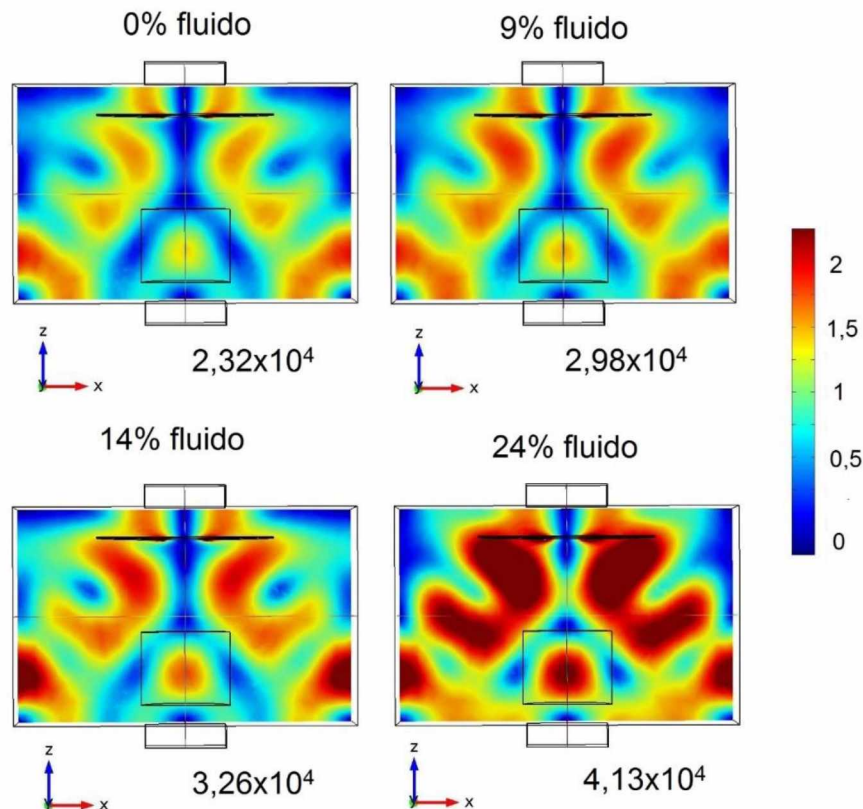


Figura 4.20 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para diferentes concentrações de fluido de perfuração

As propriedades dielétricas foram avaliadas variando apenas a concentração de contaminante misturados ao cascalho. Assim, as simulações eletromagnéticas foram realizadas, para o mesmo tempo computacional, variando-se apenas os valores das propriedades dielétricas da mistura cascalho fluido. De acordo com a Tabela 4.6 a constante dielétrica, ϵ' , é maior para a mistura com maior concentração. Essa propriedade indica a quantidade de energia armazenada no material através do campo elétrico. Deste modo, fica claro, a partir das simulações computacionais efetuadas, que o cascalho com maior concentração de fluido olefina (24% em peso), obteve o maior valor de campo elétrico (V/m), quando se comparado a outras contaminações menores. Isto indica que esse cascalho tem maior probabilidade de transformar essa energia absorvida através da formação do campo elétrico em energia térmica.

A Figura 4.21 apresenta a distribuição de potência por unidade de volume (W/m³), ou seja, a energia absorvida pelas amostras e posteriormente dissipada na forma de calor.

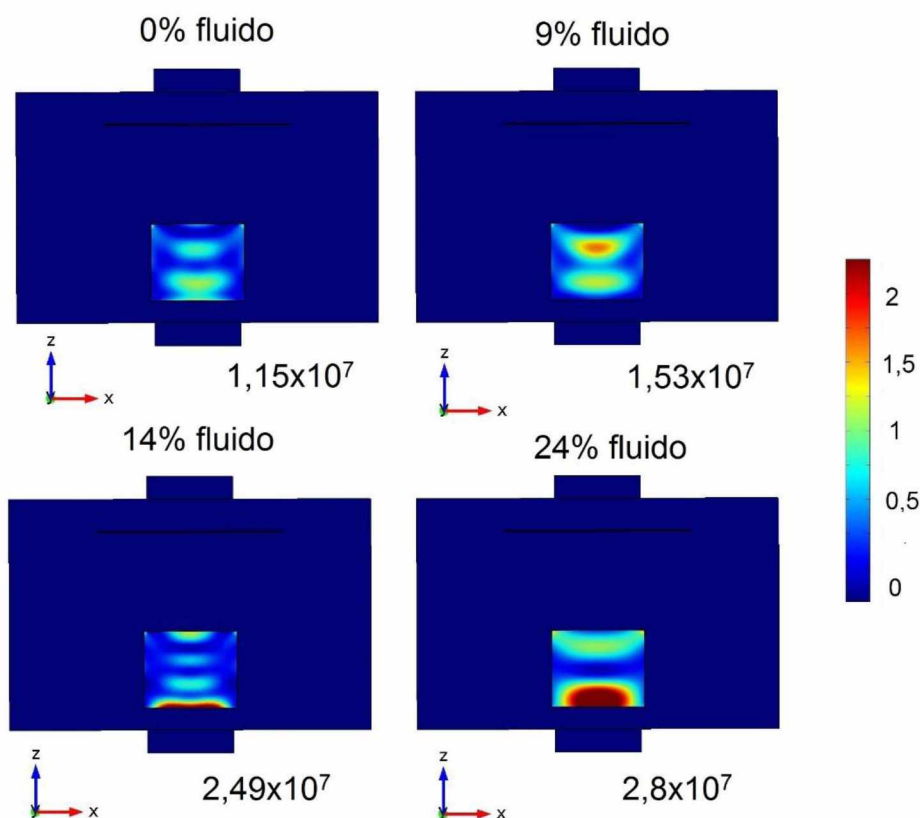


Figura 4.21 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para diferentes proporções de mistura de fluido de perfuração

Analisando todas as distribuições de densidade de potência (Figura 4.21) percebe-se uma diferença razoável no padrão de oscilação das amostras, desta forma, o cascalho puro, ou seja, com 0% de fluido conseguiu absorver menos da metade da energia, por unidade de volume que o cascalho mais concentrado, com 24% de fluido. Assim, para um mesmo volume de cascalho, quanto maior a concentração de contaminante, maior será a energia que essa amostra conseguirá absorver, concordando com os dados de propriedades dielétricas já avaliados no presente trabalho.

É interessante perceber que até a contaminação de 9% de fluido a distribuição de energia, nas duas amostras iniciais é mais ou menos regular, em todo volume da amostra. A partir de 14% de contaminação observa-se uma forte concentração energética na base das amostras, mostrando que ali será a região de máxima temperatura. A Figura 4.22 mostra a distribuição de temperatura para diferentes concentrações de fluido.

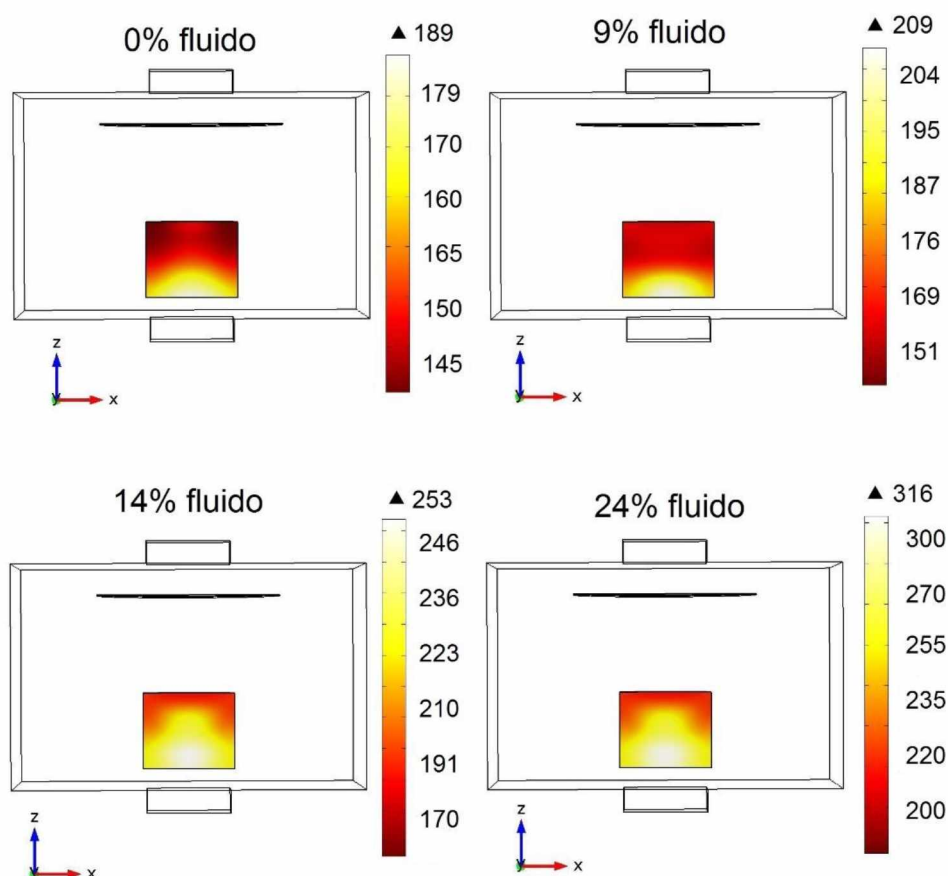


Figura 4.22 - Distribuição de temperatura (°C) para diferentes concentrações de fluido

De acordo com a Tabela 4.6, a amostra com cascalho misturado com 24% (em peso) de fluido, possui maior fator de perda dielétrica (ϵ''), propriedade essa que representa a energia dissipada na forma de calor de um determinado material. A simulação numérica da distribuição de temperatura (Figura 4.22), mostrou exatamente isso, ou seja, cascalho com maior concentração de contaminante consegue absorver maior quantidade de energia através do campo elétrico (Figura 4.20), e dissipar essa energia na forma de calor. Observou-se ainda que o padrão de densidade de potência avaliado na Figura 4.21 foi mantido, tendo as misturas com maior concentração de contaminante (14 e 24% fluido) uma região com forte concentração energética localizada na base das amostras. Essa foi a região com maior temperatura alcançada pelas amostras (Figura 4.22).

Para determinar a influência da temperatura nas propriedades dielétricas do cascalho de perfuração, foi realizado simulações numéricas com as propriedades dielétricas variando com a temperatura, seguindo os dados da Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Propriedades dielétricas para ensaios com variação de temperatura para frequência de 2,45GHz.

	30°C	80°C	130°C	180°C
ϵ'	5,112	4,174	2,511	1,947
ϵ''	1,189	1,178	1,030	0,925

Desta forma, foi realizado uma regressão linear com cada propriedade dielétrica separadamente (Figura 4.23). O principal objetivo dessa ferramenta foi obter uma equação, onde pudesse prever os valores das propriedades dielétricas com a variação da temperatura, para realizar a simulação da operação de aquecimento do cascalho misturado com 20% de fluido olefina, obtendo, ao final, valores mais próximos de um experimento convencional de aquecimento.

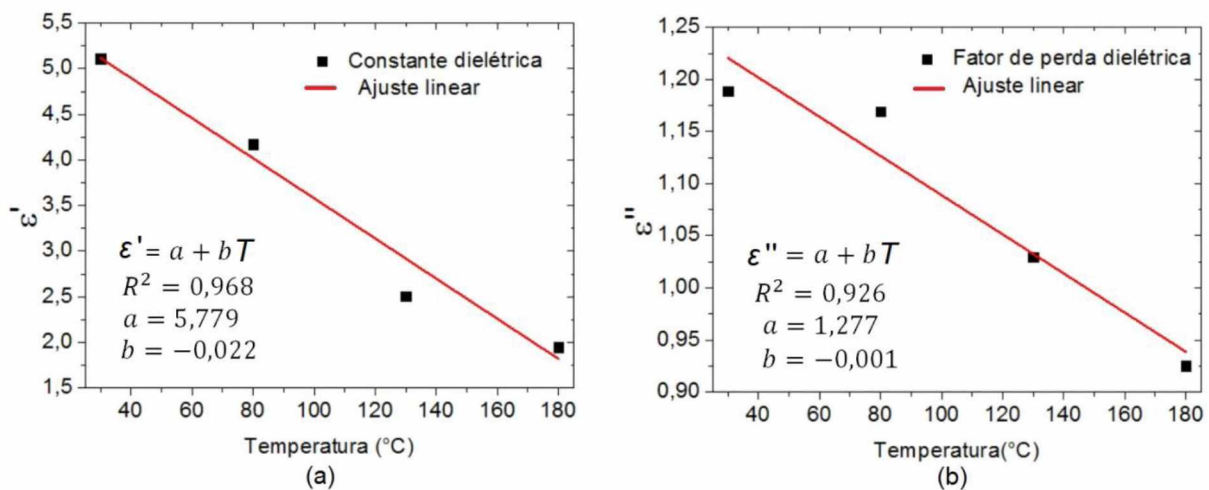


Figura 4.23 - Regressão linear das propriedades dielétricas variando com a temperatura.

A melhor regressão linear, considerando os resultados experimentais obtidos, forneceu um quadrado coeficiente de correlação ou $R^2 = 96,8\%$ para a constante dielétrica (ϵ') e $R^2 = 92,6\%$ para o fator de perda dielétrica (ϵ''). A permissividade complexa obtida tem a forma (Eq. 4.1):

$$\epsilon_r = (5,779 - 0,022T) - (1,277 - 0,001T)j \quad (4.1)$$

Assim, a equação complexa foi inserida no *software* COMSOL, seguindo o fluxograma da Figura 3.8, com permissividade complexa variando com a temperatura. É importante elucidar que esse ajuste não tem a intenção de fornecer valores exatos, por interpolação ou extrapolação, das propriedades dielétricas variando com a temperatura. O objetivo principal é ilustrar, de maneira qualitativa, a simulação eletromagnética usando propriedades com variação de

temperatura, podendo, assim, gerar valores mais aproximados do comportamento real da operação de aquecimento do cascalho de perfuração.

A Figura 4.24 descreve a distribuição do campo elétrico (V/m) para a operação de aquecimento da mistura cascalho e fluido de perfuração, para avaliar a influência da temperatura nas propriedades dielétricas.

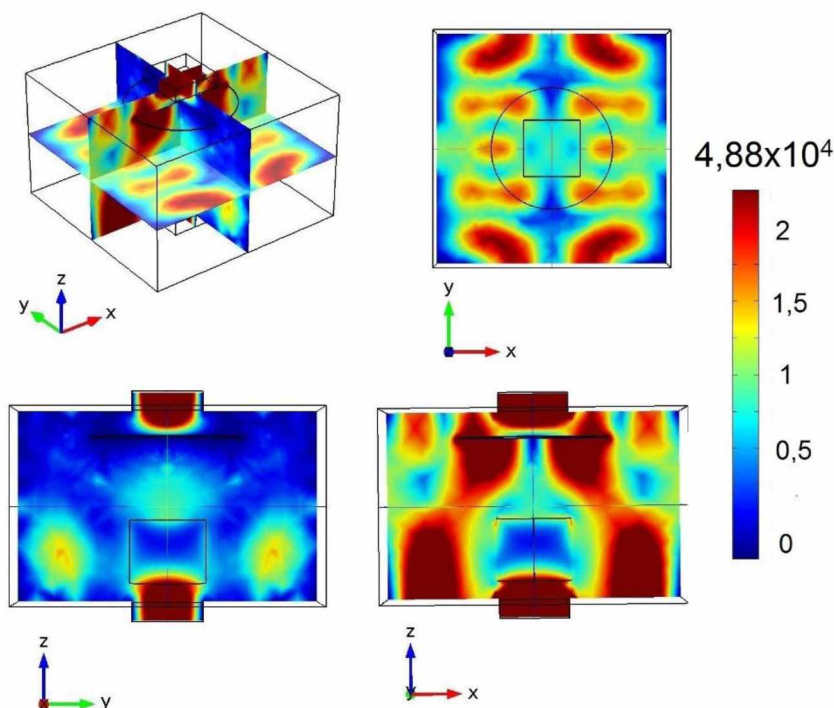


Figura 4.24 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para propriedades dielétricas variando com a temperatura.

O campo elétrico obtido (V/m) apresentou valor superior aos demais obtidos até o presente momento, isto se deve ao fato, que agora as propriedades dielétricas variam com a temperatura, gerando valores maiores para a tangente de perdas ($\tan\delta$), com o aumento da temperatura. A vista isométrica do forno mostra toda distribuição do campo elétrico na cavidade do equipamento. A vista superior (plano xy) exhibe a distribuição simétrica do campo elétrico e mostra que na região central a defasagem de campo elétrico é maior que nas extremidades. As vistas yz e xz também mostram essa grande variação nos valores de campo elétrico. Uma possível explicação para esse fenômeno pode estar associada ao disco metálico, posicionado abaixo do guia de ondas superior, responsável por distribuir as ondas eletromagnéticas dentro da cavidade. Esse disco possui uma velocidade angular constante e tem como objetivo, direcionar as ondas

eletromagnéticas para a região central da cavidade, na simulação computacional essa rotação não foi considerada.

A Figura 4.25 apresenta a distribuição de energia por unidade de volume (W/m^3), ou seja, a energia absorvida pela amostra e posteriormente dissipada na forma de calor.

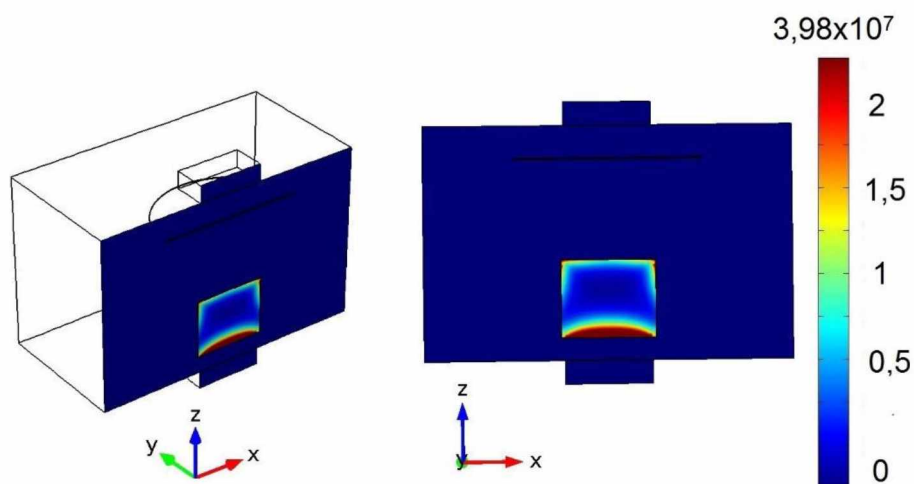


Figura 4.25 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para propriedades dielétricas variando com a temperatura.

Com o campo elétrico gerou um alto valor (Figura 4.24), comparando-se a outras simulações realizadas, a energia absorvida através do campo elétrico também foi superior, e isso pode ser observado no perfil de densidade de potência (Figura 4.25) atingido pela amostra. Foi observado uma forte região energética na base da amostra, apontando que nessa região o aquecimento seria mais pronunciado, obtendo valores de temperaturas superiores as demais regiões. A Figura 4.26 mostra a distribuição de temperatura para propriedades dielétricas variando com a temperatura.

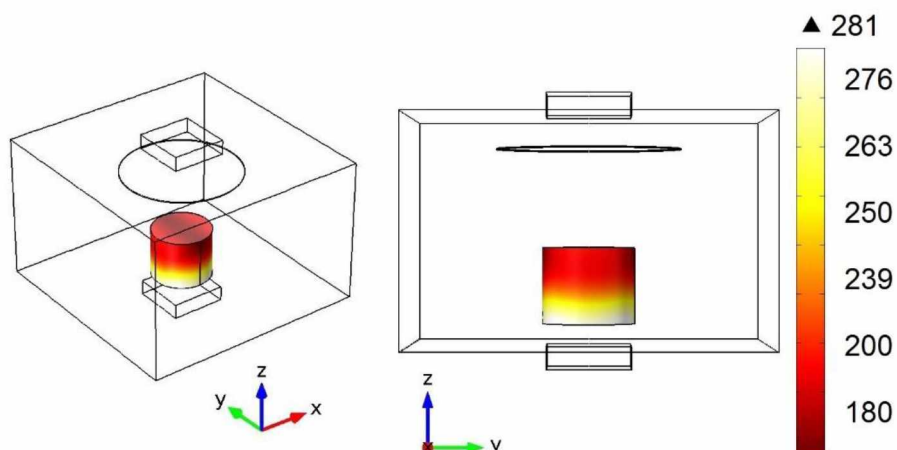


Figura 4.26 - Distribuição de temperatura (°C) para propriedades dielétricas variando com a temperatura.

O aumento da temperatura promove um aumento gradual na tangente de perdas, ou seja, com o acréscimo da temperatura o material se torna melhor condutor de energia e, conseqüentemente, a capacidade de converter essa energia absorvida em calor também aumenta (Figura 4.26). A densidade de potência apontou uma forte concentração de energia, absorvida através do campo elétrico, localizada na parte inferior da amostra (Figura 4.25). Desta forma, essa energia foi dissipada na forma de calor gerando temperaturas nessa região maiores que no restante da amostra. Neste caso específico o aquecimento por microondas ocorrerá, de forma mais pronunciada, na parte inferior da amostra.

4.3.2 - Simulação de cinética de aquecimento

Utilizando o *software* comercial COMSOL *Multiphysics* e os dados das tabelas de propriedades dielétricas presentes nesse trabalho, foram realizadas simulações numéricas, após os experimentos de cinética de aquecimento referentes aos dados do conjunto de ensaios 1 (Figura 4.9), para o aquecimento de fluidos de perfuração, bases orgânicas puras, água e cascalho puro. Adicionalmente, foi realizada a simulação de um processo de aquecimento de cascalho de perfuração misturados com fluidos parafina e olefina.

As simulações eletromagnéticas foram conduzidas nos mesmos intervalos de tempo e frequência de microondas dos ensaios experimentais para uma comparação mais específica. Desta maneira, vale a pena ressaltar que as simulações numéricas foram utilizadas neste trabalho como mais uma ferramenta na busca e entendimento do processo de aquecimento e

secagem de cascalhos de perfuração. Assim, o principal objetivo foi descrever variáveis operacionais mais importantes, na operação de aquecimento de cascalho de perfuração, como: campo elétrico, densidade de potência e temperatura final da mistura.

Para a simulação computacional da operação de aquecimento da água pura, via microondas, foi utilizado como base os dados extraídos do trabalho de SALVI *et al.*, (2011). Os autores calcularam algumas propriedades da água pura variando com a temperatura dentre elas a constante dielétrica e o fator de perda dielétrica. As demais propriedades como condutividade térmica, densidade e capacidade calorífica podem ser encontradas no Apêndice 3 deste trabalho.

Para a operação de aquecimento da água pura, via microondas, foram realizadas simulações eletromagnéticas com as propriedades dielétricas variando com a temperatura, seguindo os dados da Tabela 4.12 extraída de SALVI *et al.*, (2011).

Tabela 4.12 - Propriedades dielétricas para água pura versus temperatura

	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C
ϵ'	80,1	69,74	57,99	44,86	37,78
ϵ''	12,12	11,49	9,2	5,24	2,64

Deste modo, foi realizado uma regressão linear com cada propriedade dielétrica separadamente (Figura 4.27). O principal objetivo dessa ferramenta foi obter uma equação onde pudesse prever os valores das propriedades dielétricas com a variação da temperatura, para realizar a simulação da operação de aquecimento da água pura, obtendo, ao final, valores mais próximos de um experimento convencional de aquecimento via microondas.

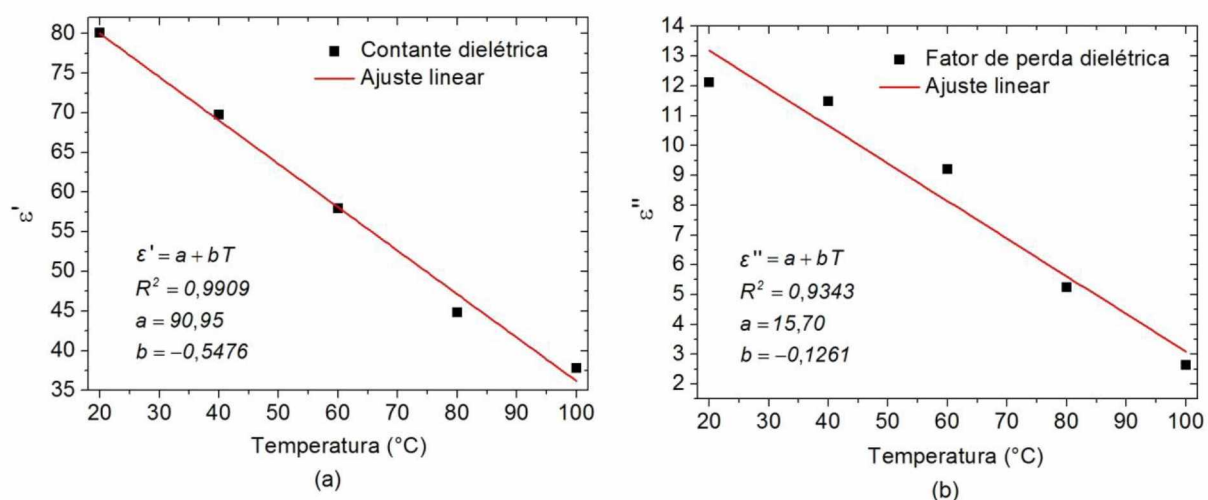


Figura 4.27 - Regressão linear das propriedades dielétricas variando com a temperatura.

A melhor regressão linear, considerando os resultados obtidos por SALVI *et al.*, (2011), forneceu um quadrado coeficiente de correlação ou $R^2 = 99,1\%$ para a constante dielétrica (ϵ') e $R^2 = 93,4\%$ para o fator de perda dielétrica (ϵ''). A permissividade complexa obtida tem a forma (Eq. 4.2.):

$$\epsilon_r = (90,95 - 0,5476T) - (15,70 - 0,1261T) j \quad (4.2)$$

Assim, a equação complexa foi inserida no *software* COMSOL, seguindo o fluxograma da Figura 3.8, com permissividade complexa variando com a temperatura. Desta forma, a Figura 4.28 exibe as curvas de aquecimento experimental e simulada para a operação de aquecimento da água pura.

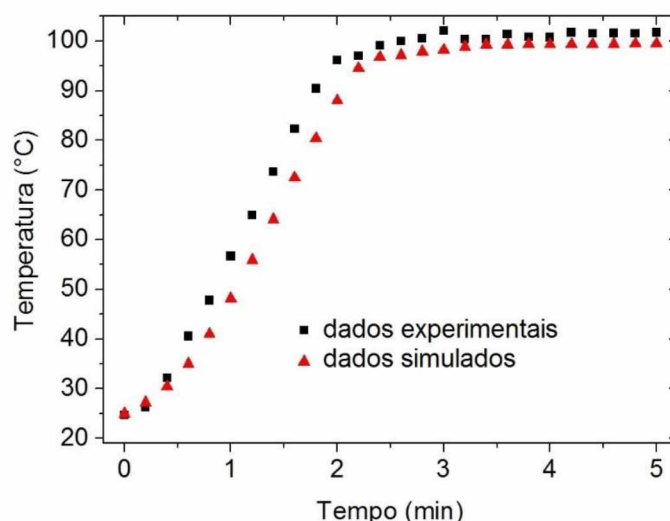


Figura 4.28 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de água pura

Empregando o mesmo tempo dos ensaios experimentais e simulados com água pura (5 minutos), observa-se uma boa concordância entre valores simulados e experimentais. Apesar do modelo computacional não levar em conta a formação das correntes de convecção, a partir do aquecimento via microondas, a variação das propriedades dielétricas com a temperatura, bem como de outras propriedades físicas foram levadas em consideração. Deste modo, os resultados obtidos pela simulação eletromagnética, apresentam boa concordância com os valores experimentais, mostrando que o modelo computacional, desenvolvido no presente trabalho, descreve com eficiência a operação de aquecimento via microondas. A Figura 4.29 mostra a distribuição do campo elétrico (V/m) para a operação de aquecimento, via microondas, da água pura.

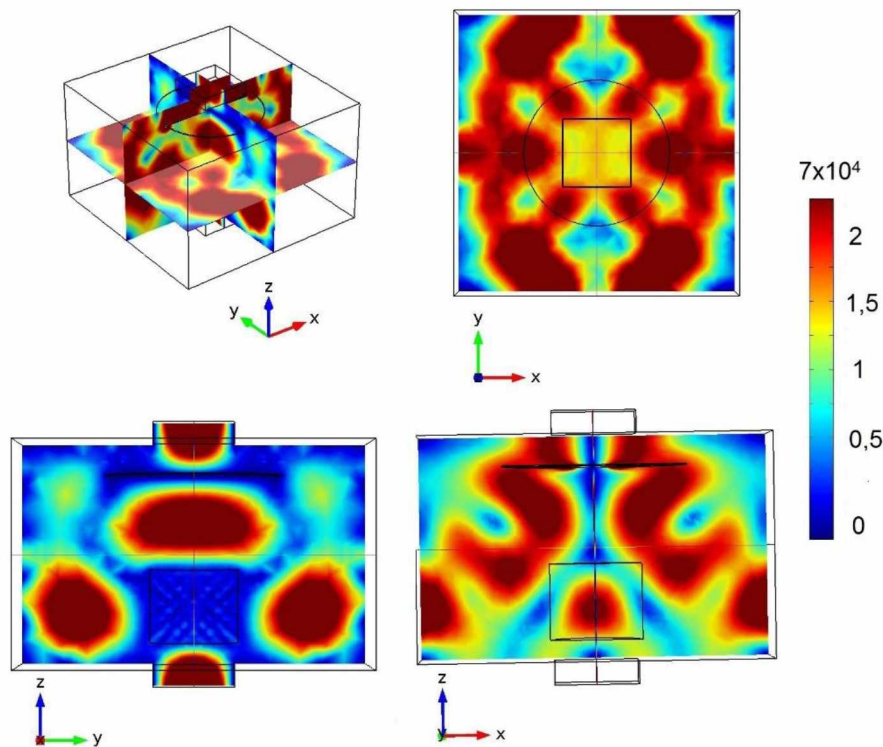


Figura 4.29 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para aquecimento da água pura

A vista isométrica do forno descreve toda distribuição do campo elétrico na cavidade do equipamento. É perceptível a variação acentuada do campo elétrico em determinadas partes do forno. A vista superior (plano xy) exhibe a distribuição simétrica do campo elétrico sob toda cavidade, entretanto as vistas laterais (vista yz e xz) apontam uma grande defasagem de campo elétrico na região onde se localiza a amostra a ser aquecida. Como já mencionado anteriormente, uma possível explicação para esse fenômeno, está ligado ao disco metálico, posicionado abaixo do guia de ondas superior, incumbido por distribuir as ondas eletromagnéticas dentro da cavidade. Esse disco possui uma velocidade angular constante, e tem como objetivo direcionar as ondas eletromagnéticas para a região central da cavidade. Devido à dificuldade de implementação na simulação, essa rotação não foi considerada.

O valor encontrado para campo elétrico (Figura 4.29) é o maior valor até o presente momento. De fato, isso já era esperado por se tratar do aquecimento de água pura. Neste caso a água é o principal componente a sofrer polarização do dipolo. Esse mecanismo é o principal responsável pelo aquecimento via microondas em sistemas que contenham substâncias polares, neste sentido, o dipolo é uma característica natural do material dielétrico.

A Figura 4.30 apresenta a distribuição de energia por unidade de volume (W/m^3), ou seja, a energia absorvida pela amostra e posteriormente dissipada na forma de calor.

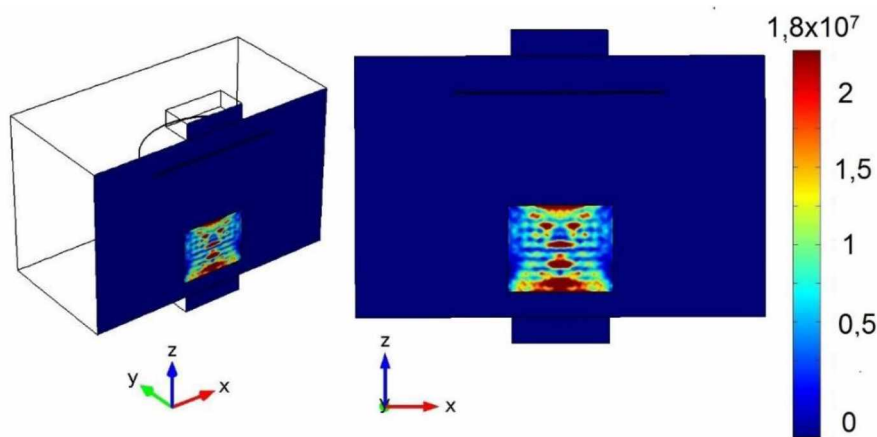


Figura 4.30 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para aquecimento da água pura

Nota-se, uma distribuição de energia mais uniforme sobre todo o volume da amostra. Deste modo, as regiões de maiores densidades de potência estão localizadas sob um plano central na vertical da amostra, sugerindo que o aquecimento se dará do centro para periferia. A Figura 4.31 apresenta a distribuição de temperatura para a o aquecimento de água com propriedades dielétricas variando com a temperatura. Percebeu-se que a ferramenta simulação eletromagnética descreveu com ótima precisão a operação de aquecimento da água via microondas.

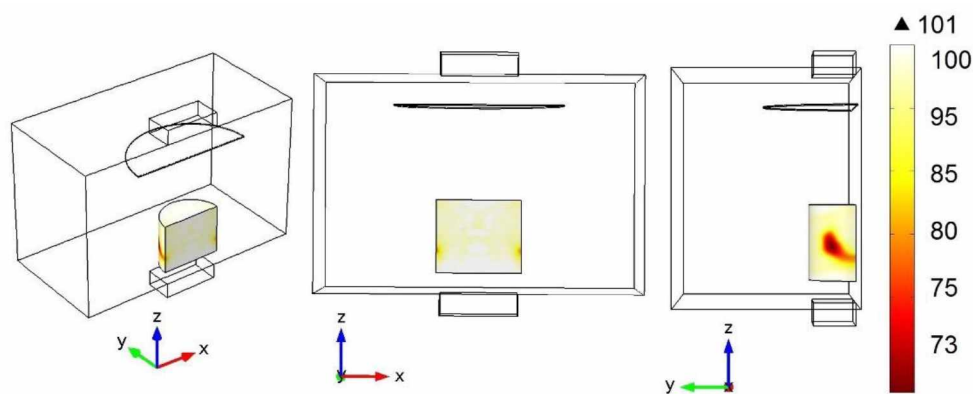


Figura 4.31 - Distribuição de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para aquecimento da água pura

A simulação computacional aponta que o aquecimento ocorre, como sugerido, da região central para a periferia da amostra, mostrando uma grande uniformidade, da temperatura final, na operação de aquecimento via microondas. Entretanto, algumas partes das bordas da amostra ainda apresentaram regiões com temperaturas variando entre, aproximadamente, 75 a 95 $^{\circ}\text{C}$.

Essa variação de temperatura pode ser explicada pela formação das correntes de convecção, que em um experimento convencional de aquecimento, via microondas, é observado, deixando a temperatura da água praticamente sem variação de temperatura. Contudo, para a simulação eletromagnética do presente trabalho não foi considerada.

A Figura 4.32 mostra as curvas de aquecimento dos fluidos de perfuração parafina e olefina experimentais, bem como, os valores da simulação computacional do aquecimento de ambos os fluidos. O tempo de simulação numérica foi idêntico aos ensaios experimentais, com 12 minutos para fluido parafina e 14 minutos para fluido olefina. Essa diferença no tempo de execução dos experimentos, para ambos os fluidos, ocorreu devido a diferenças nas propriedades dielétricas dos fluidos, causando, assim, um maior número de reflexão de ondas eletromagnéticas na operação de aquecimento dos fluidos de perfuração. Isso fez com que os magnétrons sofressem um superaquecimento, ocorrendo o desligamento do forno por uma medida de segurança do próprio equipamento. Assim, o aquecimento até o limite do equipamento para o fluido parafina foi de 12 minutos e para o fluido olefina foi de 14 minutos.

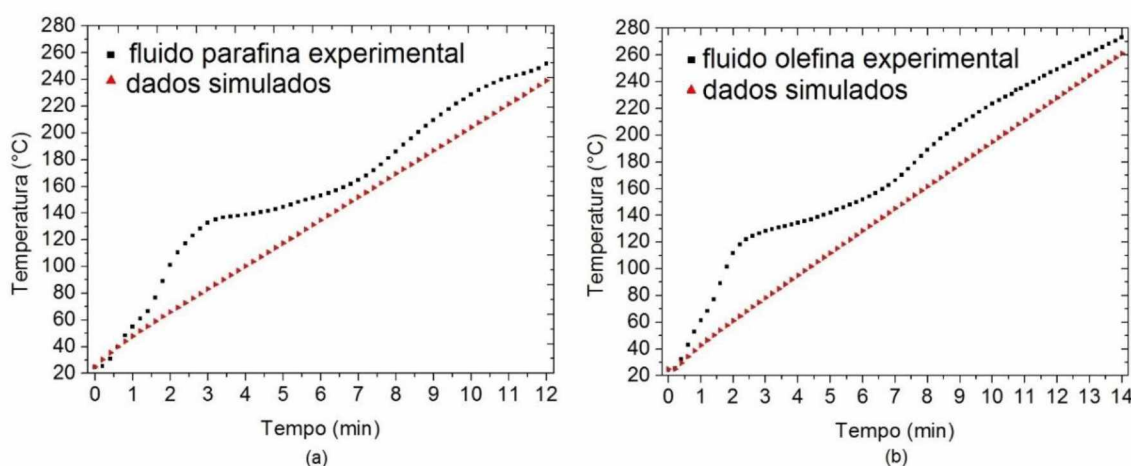


Figura 4.32 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de fluidos (a) parafina e (b) olefina

Para as simulações computacionais da cinética de aquecimento dos fluidos foram utilizadas propriedades dielétricas da Tabela 4.1 obtidas em temperatura constante. Nota-se que os dois fluidos de perfuração, apesar de possuírem bases orgânicas diferentes, apresentam cinética de aquecimento similares. Entretanto, os valores das simulações computacionais da cinética de aquecimento apresentaram divergências quando comparados com os dados experimentais, devido principalmente, a algumas simplificações adotadas nos cálculos computacionais.

As propriedades físicas utilizadas nos cálculos como capacidade calorífica, condutividade térmica, densidade e permissividade relativa variam com a temperatura, entretanto nas simulações numéricas os valores foram assumidos como constantes. Essas simplificações foram adotadas, exclusivamente, em decorrência da dificuldade de encontrar na literatura, dados experimentais e/ou correlações confiáveis para a previsão dessas propriedades físicas para fluidos de perfuração com a temperatura. Apesar das dificuldades encontradas houve uma boa previsão dos valores simulados quando comparados aos experimentais, com diferença nos valores finais de temperatura variando entre 10 a 20°C. Desta forma, estima-se que essa diferença de temperatura entre valores reais e simulados diminua, ao se trabalhar com propriedades físicas com valores mais fidedignos.

A Figura 4.33 descreve a distribuição do campo elétrico (V/m) para a operação de aquecimento dos dois fluidos de perfuração. As simulações numéricas mostram a formação de um campo elétrico com padrões simétricos para os dois fluidos analisados. Foi ainda observada uma diferença nos valores finais de campo elétrico para os dois fluidos, isso deve-se a diferença nas propriedades dielétricas (Tabela 4.1). Assim, o fluido olefina absorve maior quantidade de energia armazenada no material através da formação do campo elétrico que posteriormente será convertida em energia térmica.

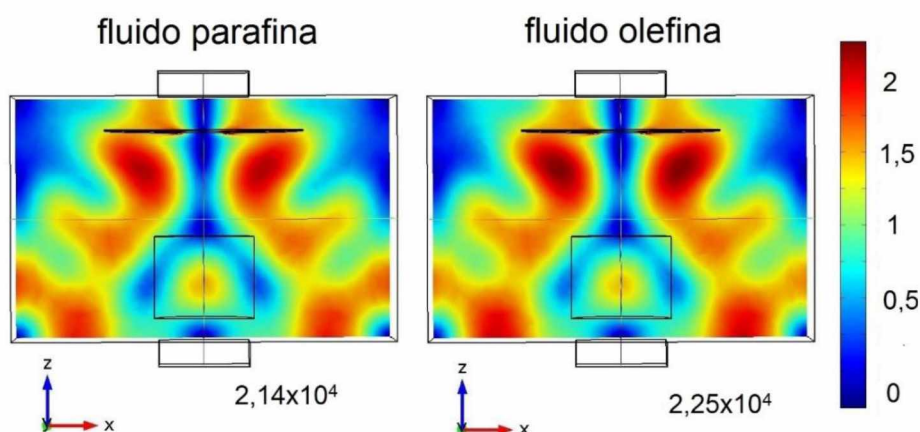


Figura 4.33 - Distribuição de campo elétrico (V/m) para fluidos parafina e olefina

A Figura 4.34 mostra a distribuição de potência por unidade de volume (W/m^3) responsável pela energia absorvida pelas amostras através do campo elétrico e posteriormente dissipada na forma de calor. Observando as duas distribuições de potência, nota-se uma pequena diferença no padrão de oscilação entre os dois fluidos de perfuração. Diferente das simulações anteriores a região de máxima energia está localizada na parte central das amostras. Tal fato mostra, que

ambos os fluidos atuam como cavidade ressonante para a distribuição de microondas, isto é, grande parte da energia disponível, na forma de campo elétrico, é absorvida pelos fluidos e o restante é refletido e volta através dos guias de ondas até as antenas dos magnétrons.

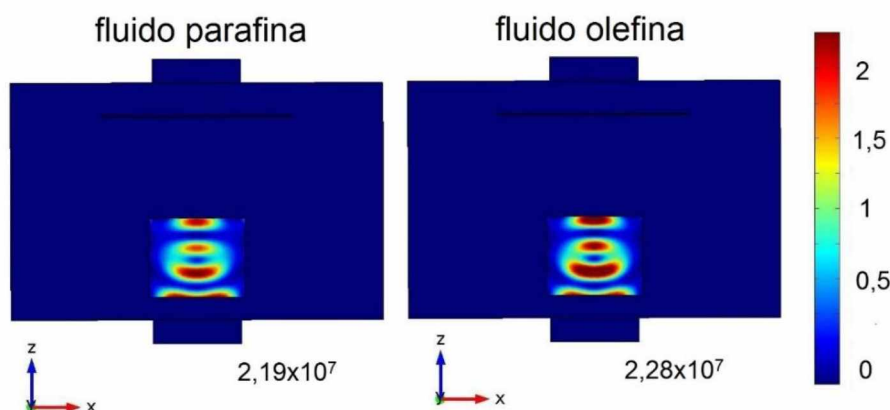


Figura 4.34 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para fluidos parafina e olefina

A pequena diferença entre as duas distribuições de potência está ligada a formação do campo elétrico, ou seja, o fluido olefina possui permissividade complexa (Tabela 4.1) um pouco superior que o fluido parafina. Desta maneira, o fluido olefina consegue absorver um pouco mais de energia através da formação do campo elétrico e posteriormente converter em energia térmica. A Figura 4.35 apresenta a distribuição de temperatura para os dois fluidos de perfuração encontrados nesse trabalho. Como os fluidos tem bases orgânicas com propriedades aproximadas o gradiente de temperaturas nas amostras (diferença entre mínima e máxima) para cada fluido, foi de aproximadamente 30°C .

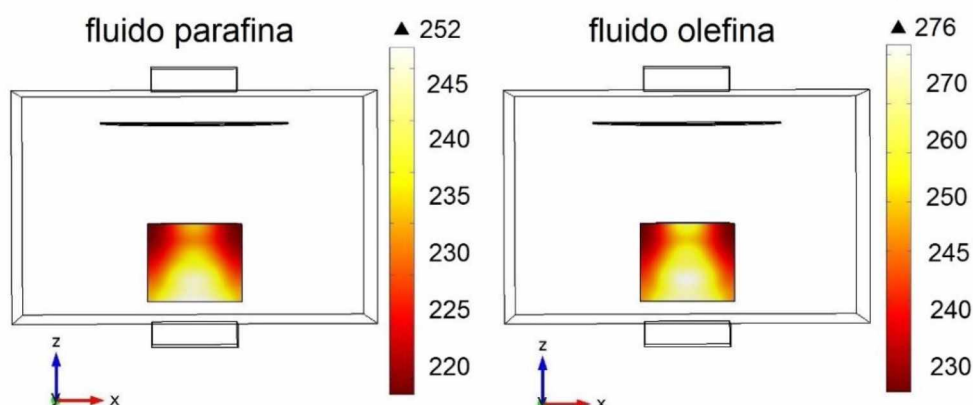


Figura 4.35 - Distribuição de temperatura ($^\circ\text{C}$) para os fluidos parafina e olefina.

Utilizou-se em todas as simulações eletromagnéticas a mesma condição inicial: temperatura inicial da amostra de 25°C, frequência 2,45GHz e potência nominal de 1600W. O perfil de temperatura foi bem similar. A diferença final registrada, entre os dois fluidos, foi de pouco mais de 20°C isso ocorreu principalmente porque o tempo computacional para a operação de aquecimento com o fluido parafina foi 12 minutos ao passo que para o fluido olefina foi de 14 minutos, acompanhando os dados experimentais (Figura 4.32). Adicionalmente, existe uma pequena diferença no fator de perda dielétrica ϵ'' dos fluidos (Tabela 4.1) propriedade essa que representa a medida de energia dissipada na forma de calor no interior do material.

O perfil de temperatura estava diretamente relacionado à densidade de potência de cada amostra, que por sua vez, estava associada à formação do campo elétrico. Desta forma, verifica-se uma região de máxima temperatura próxima ao centro das amostras de fluidos. Este foi o ponto de maior densidade energética (Figura 4.34). Assim, para essas amostras de fluidos de perfuração avaliadas, o aquecimento ocorre no sentido do núcleo para a periferia como mostrado na Figura 4.35.

A Figura 4.36 mostra as curvas de aquecimento das bases orgânicas puras parafina e olefina experimentais, bem como, os valores da simulação computacional do aquecimento de ambas as bases. Os ensaios experimentais duraram cerca de dois minutos, para cada amostra. Esse tempo de aquecimento foi pequeno devido ao alto grau de reflexão das ondas eletromagnéticas, causando o superaquecimento dos magnétrons. Deste modo, o tempo de simulação computacional foi idêntico justamente para haver uma comparação direta dos valores obtidos.

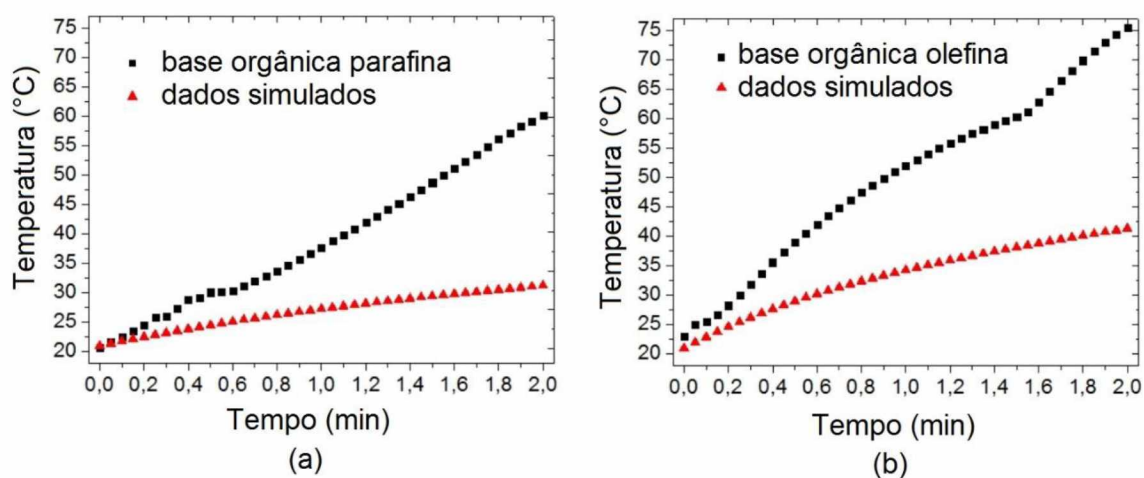


Figura 4.36 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de bases orgânicas puras (a) parafina e (b) olefina

Para as simulações computacionais da cinética de aquecimento das bases orgânicas puras, novamente foram utilizadas propriedades dielétricas da Tabela 4.1 obtidas à temperatura constante. Como previsto, as bases orgânicas puras não sofrem um aquecimento relevante quando se compara com seus respectivos fluidos de perfuração, que nesse mesmo tempo experimental (cerca de 2min) as temperaturas já atingiam cerca de 90°C.

A grande diferença registrada entre valores experimentais e os obtidos através da simulação computacional (Figura 4.36) apontam que o aquecimento sofrido pelas bases orgânicas, nos testes experimentais, pode estar associado ao aquecimento do termopar responsável por medir a temperatura do leite. Este equipamento tem um revestimento metálico de proteção e acaba sendo um ponto quente (*hot spot*). Para dirimir essa dúvida foi realizado um pequeno teste experimental de aquecimento das bases orgânicas puras com e sem a presença do termopar com medida de temperatura ao final da operação usando termômetro analógico.

Após o experimento foi constatado uma diferença de temperatura de aproximadamente 25°C, entre as bases orgânicas com e sem a presença do termopar. Praticamente a diferença percebida na Figura 4.36, ou seja, o metal que reveste o termopar causa uma influência intrusiva no sistema prejudicando a medida real de temperatura. Desta forma, como as moléculas das bases orgânicas puras possui momento dipolo praticamente nulo ($\tan\delta < 0,1$), isto é, dificilmente sofrem aquecimento por microondas. O contato com a haste de metal aquecido por condução térmica acaba transferindo pequena fração da energia para as amostras. A Figura 4.37 mostra a distribuição do campo elétrico (V/m) para a operação de aquecimento das bases orgânicas puras parafina e olefina.

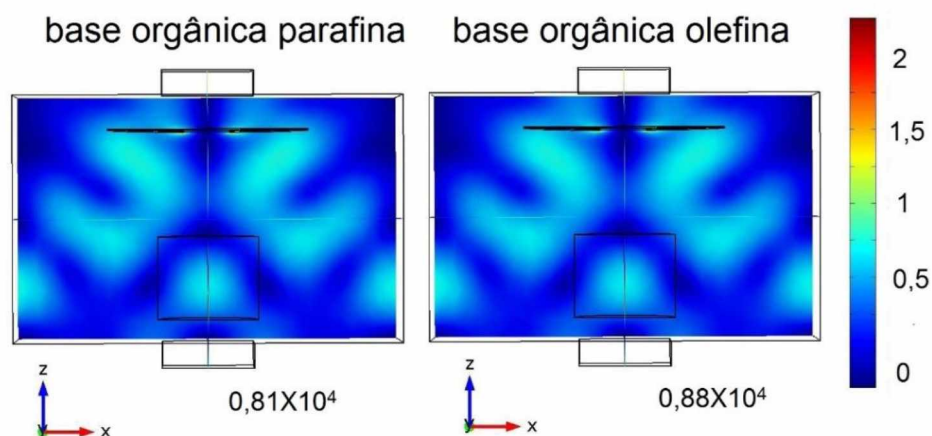


Figura 4.37 - Distribuição de campo elétrico (V/m) para bases orgânicas puras

Como esperado os valores de campo elétrico foram bastante inferiores quando se comparados a outras misturas simuladas. Esse baixo valor de campo elétrico reflete a baixa absorção de energias das amostras devido a suas características transparentes ($\tan\delta < 0,1$) frente a ação de microondas. Mesmo assim, o campo elétrico formado sob a amostra de base orgânica olefina foi levemente superior indicando que a olefina é menos transparente frente a ação de microondas, quando se comparada a base orgânica parafina. A Figura 4.38 mostra a distribuição de potência por unidade de volume (W/m^3), responsável pela energia absorvida pelas amostras através do campo elétrico e posteriormente dissipada na forma de calor.

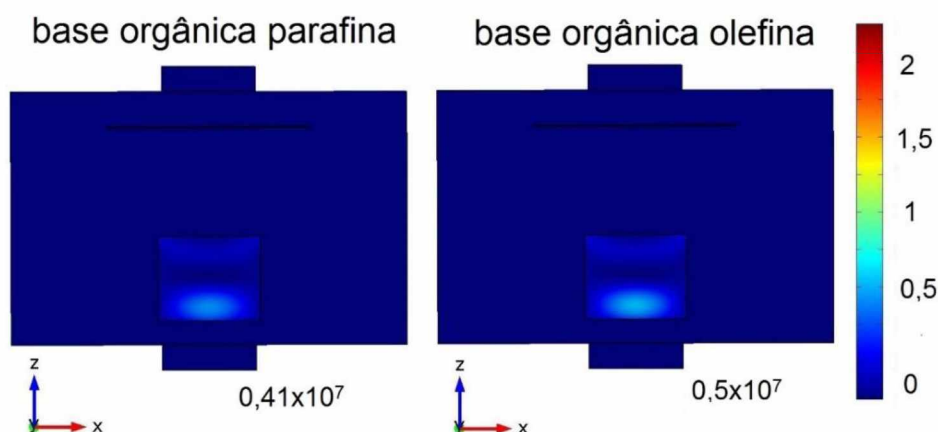


Figura 4.38 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para bases orgânicas puras

Baixos níveis de energia absorvida (W/m^3) foram registrados nas simulações para as diferentes bases orgânicas (Figura 4.38), quando se compara com valores dos respectivos fluidos. A absorção de energia, através da formação do campo elétrico, para os fluidos foi 4 vezes superior as respectivas bases orgânicas puras.

Esse fenômeno ocorre, sobretudo, pela presença de água na formulação dos fluidos de perfuração que é o principal componente a sofrer a polarização do dipolo, esse mecanismo é o principal responsável pelo aquecimento via microondas em sistemas que contenham substâncias polares, neste sentido, o dipolo é uma característica natural do material dielétrico. Já para as bases orgânicas puras, isentas de água, o mecanismo da polarização do dipolo não é verificado. A Figura 4.39 apresenta a distribuição de temperatura para as duas bases orgânicas puras avaliadas.

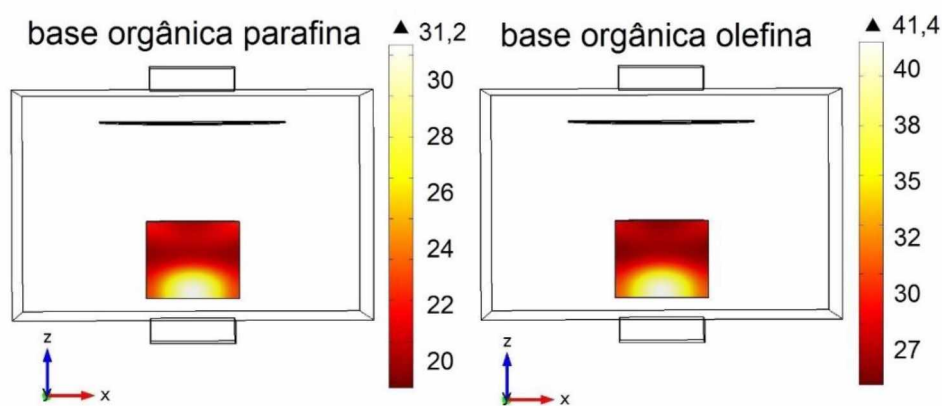


Figura 4.39 - Distribuição de temperatura (°C) para bases orgânicas puras.

A baixa temperatura final atingida pelas amostras (Figura 4.39) é reflexo da baixa absorção de energia através do campo elétrico (Figura 4.37), que, por sua vez, está intimamente ligada com a permissividade complexa de cada amostra. De acordo com a Tabela 4.1 a amostra de base orgânica olefina possui maior fator de perda dielétrica (ϵ''), propriedade essa que caracteriza a energia dissipada na forma de calor de um determinado material. Desta forma, a simulação computacional mostrou exatamente isso, a amostra contendo base orgânica olefina apresentou um valor de temperatura final pouco superior, comparado a amostra de base orgânica parafina, concordando, assim, com os ensaios experimentais.

A Figura 4.40 mostra as curvas de aquecimento dos cascalhos misturados com 20% de fluido de perfuração parafina e olefina respectivamente, bem como, os valores da simulação numérica do aquecimento de ambas as misturas.

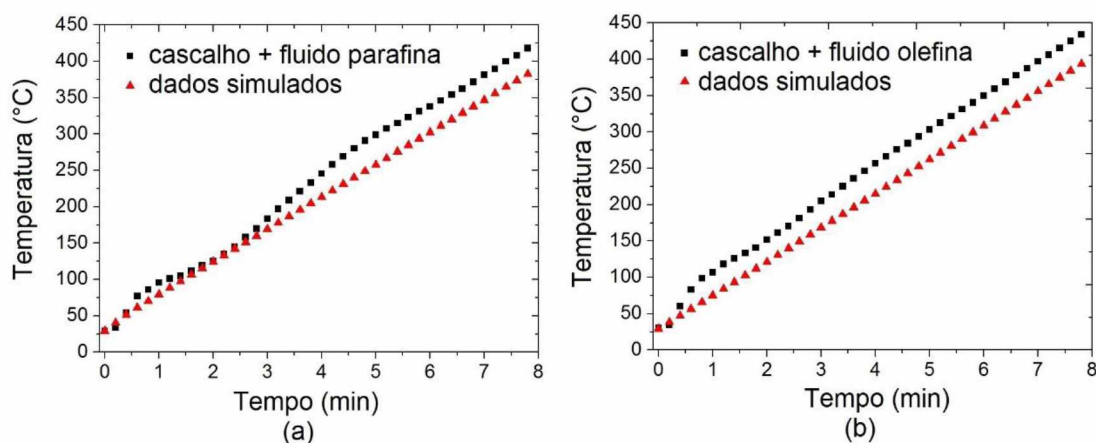


Figura 4.40 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de cascalho misturados com fluido (a) parafina e (b) olefina.

Os ensaios experimentais duraram cerca de 8 minutos, para cada amostra respectivamente. Este tempo de aquecimento foi mais que o suficiente para garantir a evaporação das bases orgânicas contida nos fluidos de perfuração. Para as simulações computacionais da cinética de aquecimento dos cascalhos misturados com os fluidos parafina e olefina, foram utilizados as propriedades dielétricas da Tabela 4.13 obtidas em temperatura constante.

Tabela 4.13 - Propriedades dielétricas cascalho misturado com fluidos		
	Cascalho + fluido parafina	Cascalho + fluido olefina
ϵ'	7,422	7,967
ϵ''	2,521	3,329

Os valores das simulações computacionais, da cinética de aquecimento do cascalho apresentaram divergências, quando comparados com os dados experimentais, devido principalmente, a algumas simplificações adotadas nos cálculos computacionais e já comentadas nesse trabalho. Percebe, que apesar da divergência entre os dados experimentais e simulados, há uma boa interação entre os valores. Para esse trabalho foram utilizadas propriedades aproximadas das misturas reais, apenas com objetivo de uma comparação qualitativa dos resultados obtidos. Com a implementação futura de propriedades físico-químicas e térmicas mais fidedignas essa diferença entre os valores experimentais e simulados tende a diminuir.

A Figura 4.41 descreve a distribuição do campo elétrico (V/m) para a operação de aquecimento dos cascalhos misturados com 20% de fluidos. As simulações numéricas mostram a formação de um campo elétrico com padrões simétricos para as duas misturas avaliadas.

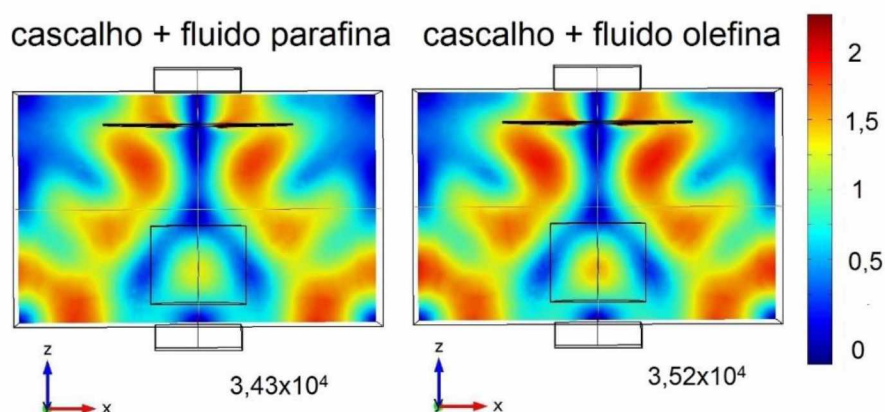


Figura 4.41 - Distribuição de campo elétrico (V/m) para cascalho misturados com fluidos de perfuração.

Foi ainda observada uma pequena diferença nos valores finais de campo elétrico, para as duas misturas de cascalho, isso deve-se, principalmente, a diferença nas propriedades dielétricas (Tabela 4.14) das amostras. Assim, o cascalho misturado com fluido olefina tem maior probabilidade de absorver energia através da formação do campo elétrico que posteriormente será convertida em energia térmica.

A Figura 4.42 mostra a distribuição de potência por unidade de volume (W/m^3), responsável pela energia absorvida pelas amostras através do campo elétrico e posteriormente dissipada na forma de calor. Observando as duas distribuições de potência nota-se uma pequena diferença no padrão de oscilação entre as duas amostras, com uma região de máxima energia localizada na parte inferior das misturas. Assim, existe uma maior concentração de densidade energética nessa região que, conseqüentemente, irá irradiar para as outras regiões das amostras.

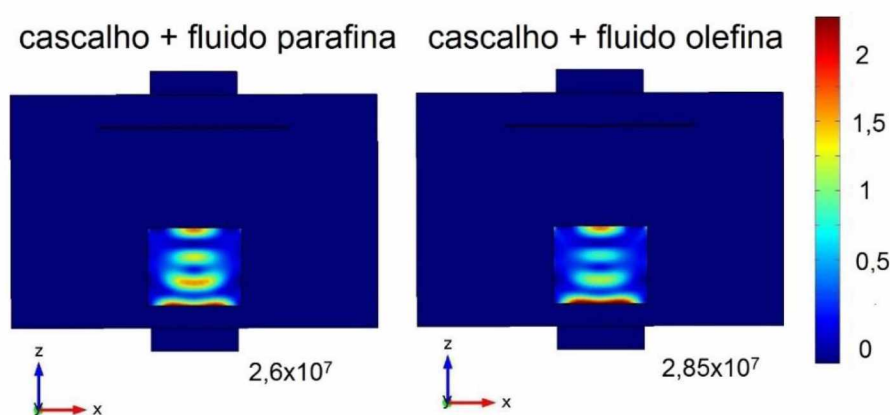


Figura 4.42 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para cascalho misturados com fluidos.

Ainda foi observado uma pequena diferença nos valores referentes as distribuições de potência (Figura 4.42), com valores superiores para mistura cascalho/fluido olefina. Esta diferença está associada à formação do campo elétrico, que por sua vez, está ligada ao valor da permissividade complexa (Tabela 4.13). Assim, a mistura cascalho/fluido olefina possui maior constante dielétrica (ϵ'), propriedade responsável pela absorção de energia através da formação de campo elétrico.

A Figura 4.43 apresenta a distribuição de temperatura para as duas misturas de cascalhos com fluidos. Concordando com a Figura 4.42, a região mais quente, nas misturas, está localizada na parte de inferior. Região essa indicada pela maior densidade de potência.

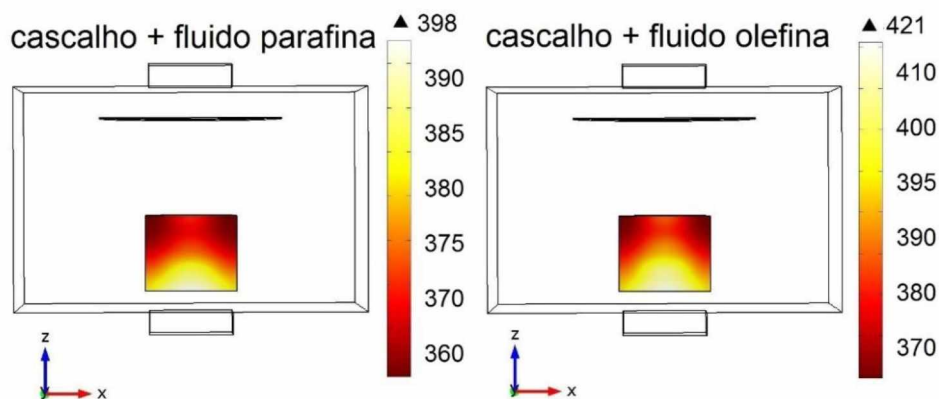


Figura 4.43 - Distribuição de temperatura (°C) para cascalho misurados com fluidos

Para um mesmo tempo de simulação computacional (8 minutos) obteve-se temperaturas diferentes para cada mistura. Isto ocorre, principalmente, devido as propriedades dielétricas das misturas (Tabela 4.13). Como o fator de perdas dielétrica (ϵ'') é superior para a mistura contendo fluido olefina, essa mistura possui maior capacidade de dissipar energia absorvida em calor. Desta forma, a diferença final de temperatura foi de aproximadamente 20°C, praticamente a mesma diferença encontrada nos ensaios experimentais para as amostras.

A Figura 4.44 mostra as curvas de aquecimento experimental e simulado para a operação de aquecimento de cascalho puro, ou seja, sem a contaminação de fluidos de perfuração. Para as simulações computacionais da cinética de aquecimento dos cascalhos puros, foram utilizadas as propriedades dielétricas da Tabela 4.6 obtidas em temperatura constante.

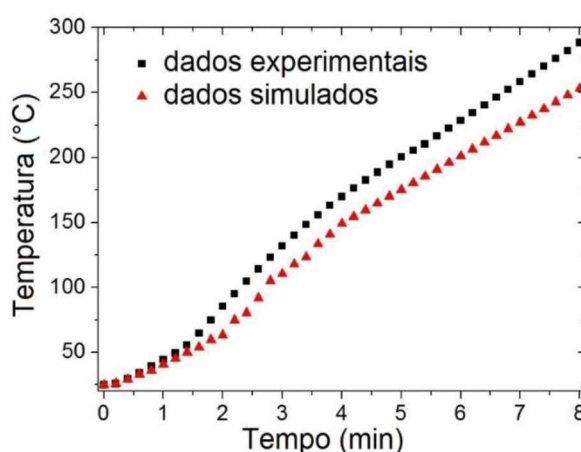


Figura 4.44 - Dados experimentais e simulados para aquecimento de cascalho puro

Utilizando o mesmo tempo dos ensaios experimentais com cascalho misturados com fluidos de perfuração (Figura 4.40) percebe-se, nitidamente, a diferença nos valores finais de

temperatura para os ensaios experimentais e simulação numérica de ambos os testes. Para cascalho misturados com fluidos a temperatura final foi cerca de 400 a 450°C. Para o cascalho puro a temperatura final foi de aproximadamente 290°C. Essas diferenças estão associadas a propriedades dielétricas de cada amostra. E, desta maneira, quanto mais concentrada a amostra, maior será sua permissividade complexa e maior será sua temperatura final.

Para os primeiros 1,5 minutos, os dados simulados se comportam bem próximos aos dados dos ensaios experimentais (Figura 4.44). Isto ocorre, pois até esse ponto, as propriedades dielétricas não variam muito com a variação da temperatura. De 1,5 até 8 minutos ocorre uma variação maior da permissividade complexa, destoando os valores entre dados dos ensaios experimentais e simulação computacional. Apesar dessa relativa diferença entre valores reais e simulados a diferença final de temperatura foi de aproximadamente 40°C. Deste modo, com a aplicação de propriedades dielétricas variando com a temperatura, para o cascalho puro, a diferença nos valores finais de temperatura será menor. A Figura 4.45 descreve a distribuição do campo elétrico (V/m) para a operação de aquecimento de cascalho puro.

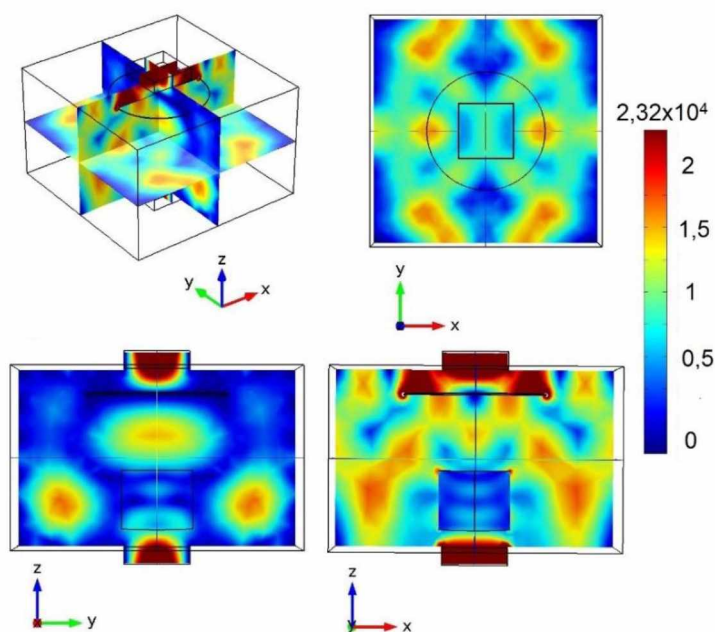


Figura 4.45 - Distribuição do campo elétrico (V/m) para aquecimento de cascalho puro.

A vista isométrica do forno mostra toda distribuição do campo elétrico na cavidade do equipamento. A vista superior (plano xy) exhibe a distribuição simétrica do campo elétrico sob toda cavidade. As vistas yz e xz apontam uma grande variação na distribuição do campo elétrico sob a cavidade. Mais uma vez o responsável por este fenômeno foi o disco metálico, posicionado abaixo do guia de ondas superior, incumbido por distribuir as ondas eletromagnéticas dentro da

cavidade. Esse disco possui uma velocidade angular constante e tem como objetivo direcionar as ondas eletromagnéticas para a região central da cavidade. Devido à dificuldade de implementação na simulação essa rotação não foi considerada.

Interessante perceber que os valores encontrados nessa simulação são idênticos aos testes realizados sob diferentes contaminações de fluidos (Figura 4.20). Isso indica que a simulação eletromagnética segue o mesmo padrão ou tendência dos testes experimentais. Ou seja, quanto maior o nível de concentração do cascalho com fluido de perfuração, maior será os valores obtidos através da formação do campo elétrico, e consequentemente, maior a energia dissipada na forma de calor. Isso sempre ocorrerá por conta do aumento de concentração de água na mistura cascalho/fluido. Neste caso a água é o principal componente a sofrer polarização do dipolo.

A Figura 4.46 apresenta a distribuição de energia por unidade de volume (W/m^3), isto é, a energia absorvida pela amostra e posteriormente dissipada na forma de calor.

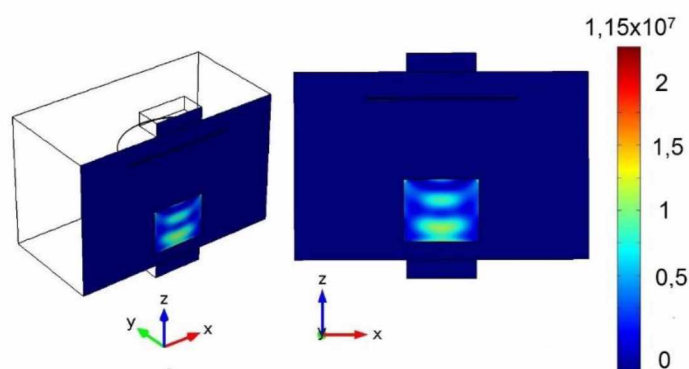


Figura 4.46 - Distribuição de densidade de potência (W/m^3) para aquecimento de cascalho puro.

Nota-se, uma região de máxima energia localizada na parte inferior da amostra. Esta região indica que o aquecimento se dará de forma mais pronunciada nesse local e posteriormente sendo irradiado para outras partes das amostras. Ainda foi observado uma grande diferença nos valores de densidade de potência, para simulação de aquecimento de cascalho puro (Figura 4.46), quando se comparado a valores da simulação de aquecimento de cascalho misturados com fluidos de perfuração (Figura 4.42). A absorção de energia pelo cascalho puro foi menos da metade quando comparada à absorção de energia do cascalho misturado com 20% de fluidos de perfuração. Isto ocorre, mais uma vez, pela presença de água contida no fluido, elevando os valores de permissividade complexa da mistura. A Figura 4.47 apresenta a distribuição de temperatura da amostra para aquecimento de cascalho puro.

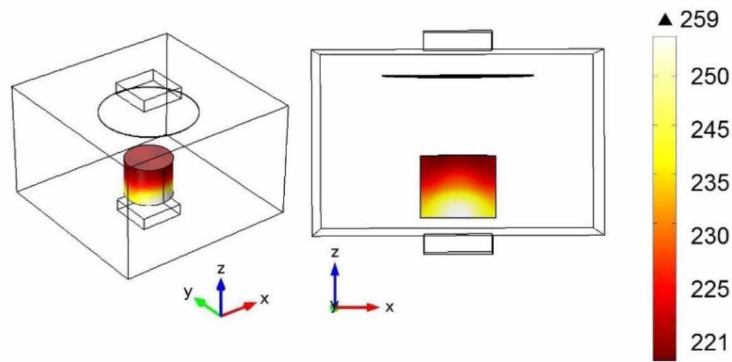


Figura 4.47 - Distribuição de temperatura (°C) para aquecimento de cascalho puro.

De acordo com a discussão anterior, a região mais quente na mistura, está localizada na parte de inferior. Região essa indicada pela maior densidade de potência (Figura 4.46). Comparando-se com a simulação computacional realizada, para avaliar as propriedades dielétricas nas diferentes contaminações de fluidos (Figura 4.22), a diferença final de temperatura foi de aproximadamente 80°C. Para as simulações eletromagnéticas realizadas na Figura 4.22 onde o tempo computacional foi de 300s, ou seja, 5 minutos. Já para a simulação numérica para o aquecimento de cascalho puro (Figura 4.47), o tempo computacional foi de 8 minutos, respeitando os dados experimentais (Figura 4.44).

Quando se compara os valores finais de temperatura para cascalhos misturados com fluidos (Figura 4.43), e cascalho puro (Figura 4.47), para um mesmo tempo de simulação computacional, nota-se uma variação considerável da temperatura. Este processo ocorre, sobretudo, pela presença de água na mistura cascalho mais fluidos de perfuração, e esta água é o principal componente a sofrer a polarização do dipolo. Esse mecanismo é o principal responsável pelo aquecimento via microondas em sistemas que contenham substâncias polares. Entretanto, para o cascalho puro, isento de água, o mecanismo da polarização do dipolo não é verificado com eficiência.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 - Conclusões

5.1.1 - Propriedades Dielétricas

As propriedades dielétricas têm papel importante no desenvolvimento e aprimoramento dessa nova tecnologia, que aplica microondas para o tratamento e descontaminação de cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Assim, as propriedades dielétricas permitem compreender e otimizar a interação do campo eletromagnético com o meio que está sendo aquecido. A análise dos resultados permitiu identificar os aspectos que governam a dependência das propriedades dielétricas.

Para a análise dos fluidos de perfuração, constatou que o fluido base olefina possui maior permissividade complexa, ou seja, maior constante dielétrica e maior fator de perda dielétrica. Deste modo, esse fluido teria maior habilidade de converter energia através da formação do campo elétrico em calor. O mesmo pode ser estendido para análise das bases orgânicas puras, onde a olefina possui maior permissividade complexa. Na comparação entre bases orgânica puras e bases orgânicas recuperadas, de um processo de aquecimento via microondas, as bases recuperadas possuem maiores valores de constante e fator de perda dielétrica. Isso ocorre devido a uma modificação na estrutura da cadeia carbônica da parafina e da olefina que foi constatada através de cromatografia gasosa.

Para o estudo da influência da granulometria nas propriedades dielétricas, a constante dielétrica aumenta de acordo com o aumento do tamanho da partícula, assim como, o fator de perdas diminui de acordo com o aumento das partículas. Entretanto, quando se avalia a tangente de perdas, observa-se que quanto menor a faixa granulométrica maior será a superfície

específica de contato e maior é a capacidade de converter energia absorvida, através de campo elétrico, e dissipá-la na forma de calor. Para o estudo da influência da variação de temperatura nas propriedades dielétricas a tangente de perdas é maior para maiores temperaturas, ou seja, com o acréscimo da temperatura o material se torna melhor condutor de energia e, conseqüentemente, a capacidade de converter essa energia absorvida em calor também aumenta.

Para o estudo da influência da concentração de contaminantes misturados ao cascalho, para avaliação das propriedades dielétricas, de acordo com o aumento da concentração, a constante dielétrica e o fator de perdas dielétricas aumentaram, isto é, houve um aumento gradual da tangente de perdas com o aumento da concentração de contaminante. Deste modo, quanto maior a concentração de contaminante, maior seria a habilidade de transformar energia absorvida em calor.

Por fim, a partir da constante dielétrica e do fator de perda dielétrica, foi possível calcular a profundidade de penetração, com base em uma expressão derivada das equações de Maxwell, para o eletromagnetismo para a frequência de interesse de 2,45GHz. Portanto, fica evidente a importância de estudos de caráter mais fundamental, abordando as propriedades dielétricas que contribuem no aperfeiçoamento e desenvolvimento da tecnologia de microondas, para tratamento de sólidos provenientes das operações de perfurações de poços de petróleo e gás.

5.1.2 - Cinética de aquecimento e secagem

O conhecimento da cinética de aquecimento dos fluidos de perfuração é importante para nortear a busca por condições operacionais que otimizem a descontaminação do cascalho oriundos da atividade petrolífera. Os resultados apontam que a cinética de aquecimento e secagem do cascalho tende a ocorrer em duas etapas distintas. Na primeira, ocorre remoção expressiva de água com arraste considerável de base orgânica. Na etapa final ocorre o aquecimento acentuado do cascalho, e esse, por condução térmica, transfere energia para a evaporação das bases orgânicas.

Dentre vários modelos de cinética de secagem propostos na literatura, dois foram escolhidos para descrever a remoção de fluidos, presentes no cascalho de perfuração. Os modelos semi empíricos de Page e de Henderson-Pabis. Adicionalmente, mais um modelo foi proposto, partindo de uma combinação dos modelos já mencionados, com a adição de um

parâmetro que foi tratado como Modelo de Secagem por Microondas (MSM). Deste modo, o modelo que melhor se aproximou dos dados experimentais foi o MSM, descrevendo satisfatoriamente a operação de secagem dos fluidos de perfuração através do aquecimento via microondas.

Portanto, é ser notória a relevância de estudos dessa natureza para o entendimento mais detalhado de aspectos fundamentais relacionados as cinéticas de aquecimento e secagem, na descontaminação de cascalhos de perfuração. O desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia de microondas para tratamento de sólidos provenientes da operação de perfurações de poços de petróleo e gás passa, necessariamente, por estudos que procuram abordar as características apresentadas nesta secção do trabalho.

5.1.3 - Simulação eletromagnética

A simulação computacional conduzida pelo *software* COMSOL *Multiphysics* abordou duas frentes de trabalho. A primeira, foi uma comparação efetiva das propriedades dielétricas, avaliadas nesse trabalho, o que mostrou a importância destas propriedades no aquecimento via microondas. Pôde-se comprovar que cascalhos com menor faixa granulométrica, mantendo-se a mesma concentração de contaminantes, possuem maior habilidade de converter energia absorvida em calor. E cascalhos com maior concentração de fluido de perfuração, mantendo-se a mesma faixa granulométrica, possuem a mesma habilidade. Ainda foi avaliada as distribuições de campo elétrico, densidade de potência e gradiente de temperatura para propriedades dielétricas variando com a temperatura, obtendo assim, resultados bastante interessantes para o processo de aquecimento via microondas.

A segunda frente de trabalho foi desenvolvida para evidenciar a importância dos estudos fundamentais de cinética no aquecimento por microondas. As simulações eletromagnéticas foram realizadas nos mesmos intervalos de tempo e frequência de microondas dos ensaios experimentais. Mesmo não se preocupando com representações fidedignas da operação de aquecimento experimental, os resultados obtidos, para esta secção, mostraram uma ótima concordância com os valores experimentais, apesar da utilização de propriedades aproximadas da mistura cascalho mais fluidos de perfuração. Acredita-se que com incremento dessas propriedades físico-químicas nesse sistema os resultados serão ainda melhores.

Portanto, o principal objetivo do trabalho de simulação computacional, associado ao trabalho de propriedades dielétricas e cinética de aquecimento via microondas, foi auxiliar com o acréscimo de mais uma ferramenta computacional, para contribuir na melhoria do tratamento de sólidos provenientes das operações de perfuração de poços de petróleo e gás.

5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realizar medidas de propriedades dielétricas para temperaturas variando entre 20-500°C, para cascalho misturados com fluidos de perfuração com teores entre 0-30% em peso;
- Realizar experimentos de cinética de aquecimento e secagem em temperaturas mais altas para novas considerações;
- Realizar experimentos de cinética de aquecimento e secagem em fornos diferentes, ou seja, com cavidades de tamanhos diferentes para novas comparações;
- Comparar a formação e distribuição do campo elétrico em cavidades de tamanhos diferentes, a fim de encontrar uma cavidade de tamanho ótimo para tratamento, em específico, de cascalho de perfuração;
- Medir as propriedades elétricas como: condutividade térmica e calor específico e calor latente das misturas de cascalho e fluido de perfuração para temperaturas variando entre 20-500°C, para cascalho misturados com fluidos de perfuração com teores entre 0-30% em peso.
- Implementar mais pacotes físicos no simulador COMSOL *Multiphysics* afim de prever as mudanças de fases e transferências de massas que existem na operação de aquecimento e secagem real;

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGILENT TECHNOLOGIES. AGILENT 85070E dielectric probe kit 200 MHz to 50 GHz. Technical Overview. USA. 2011.

ALLEN, T. Particle Size Measurement: Powder Sampling and Particle Size Measurement, Fifth ed. Chapman & Hall, Londres, 1997.

ASME, Drilling Fluids Processing Handbook, Estados Unidos, Editora Elsevier, 2005.

BASAK, T. Role of lateral and radial irradiation on efficient microwave processing of food cylinders. Chemical Engineering Science, v. 62, p. 3185-3196, 2007.

BATEMAN, R.; HARREL, C. Simulação Otimizando os Sistemas. 1 ed São Paulo: IMAM e Belge Simulação, 2005.

BUFFLER, C. Advances in dielectric measurement of foods. In: GAONKAR, A. G. Characterization of food: emerging methods. Marlborough: Elsevier Science. cap. 10, p. 213-232. 1995.

BUTTRESS, A.J.; BINNER, E.; PALADE, C.Y. P.; ROBINSON, J. P.; KINGMAN, S. W. Development and evaluation of a continuous microwave processing system for hydrocarbon removal from solids. Chemical Engineering Journal 283, 215–222, 2016.

CARDOSO, C. R.; OLIVEIRA, T. J. P.; SANTANA JUNIOR, J. A.; ATAÍDE, C. H. Physical characterization of sweet sorghum bagasse, tobacco residue, soy hull and fiber sorghum bagasse particles: Density, particle size and shape distributions. Powder Technology 245, 105–114, 2013.

CHEN, J.; PITCHAI, K.; BIRLA, S.; JONES, D.; NEGAHBAN, M.; SUBBIAH, J. Modeling heat and mass transport during microwave heating of frozen foods rotating on a turntable. Food and Bioproducts Processing 99, 116–127, 2016.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações. 4ª edição. São Paulo: Elsevier Brasil, 2014.

DARLEY, H. C. H. e GRAY, G. R., Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, 5. ed., Editora Butterworth-Heinemann, 1988.

DATTA, A. K.; SUMNU, G.; RAGHAVAN, G. S. V. Dielectric properties of food. In:RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. (Ed.). Engineering properties of foods.3rd ed. Boca Ratón: CRC Press, cap. 11, p. 101-147, 2005.

DAVIDSON, D. B. Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering. Second Edition. Cambridge, 2011.

DEV, S. R. S.; GARIEPY, Y.; ORSAT, V.; RAGHAVAN, G. S. V. Finite element modeling for optimization of microwave heating of in-shell eggs and experimental validation. INTERNATIONAL JOURNAL OF NUMERICAL MODELLING: ELECTRONIC NETWORKS, DEVICES AND FIELDS; 25:275–287, 2012.

FALCIGLIA, P. P; MANCUSO, G; SCANDURA,P; VAGLIASINDI, F. G. A. Effective decontamination of low dielectric hydrocarbon-polluted soils using microwave heating: Experimental investigation and modelling for in situ treatment. Separation and Purification Technology 156, 480–488, 2015.

FALCIGLIA, P. P; GUIDI, G; CATALFO, A; VAGLIASINDI, F. G. A. Remediation of soils contaminated with PAHs and nitro-PAHs using microwave irradiation. Chemical Engineering Journal 296, 162–172, 2016.

FORTUNY, M.; RAMOS, A. L. D.; DARIVA, C.; EGUES, S. M. S.; SANTOS, A. F. Principais aplicações das microondas na produção e refino de petróleo. Química Nova, 31(6), p. 1553-1561, 2008.

FRANCESCHINI, M. H. D. Correlação da condutividade elétrica com atributos físico-químicos do solo. Universidade de São Paulo/USP, 2007.

FRANCO, A. P.; YAMAMOTO, L. Y.; TADINI, C. C.; GUT, J. A. W. Dielectric properties of green coconut water relevant to microwave processing: Effect of temperature and field frequency. Journal of Food Engineering 155, 69–78, 2015.

FREITAS FILHO, P. J. Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com Aplicações em Arena. 2. ed. Florianópolis: Visual Books Ltda., 2008.

GOYETTE, J.; CHAHINE, R.; BOSE, T.; BOSISIO, R. Importance of the dielectric properties of materials for microwave heating. Drying Technology, 8 Issue 5, 1111-1121, 1990.

GRIFFITHS, D. J. Introduction to electrodynamics. Prentice Hall. 3rd Ed. 1999.

GU, S.; GADKARI, S.; FIDALGO, B. Numerical investigation of microwave assisted pyrolysis of lignin. Fuel Processing Technology, 156, 473-784, 2017.

HACKE, K. E. Microwave energy for mineral treatment processes - a brief review, International Journal Mineral Processes, v. 57, p. 1-24, 1999.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agriculture Engineering Research, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

LI, Y.; LEI, Y.; ZHANG, L. B.; PENG, J.; LI, C. Microwave drying characteristics and kinetics of ilmenite. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 21, p. 202-207, 2011.

LIU, C. H.; ZHANG, L. B.; SRINIVASAKANNAN, C.; PENG, J. H.; LIU, B. G.; XIA, H.Y.; Dielectric Properties and Optimization of Parameters for Microwave Drying of Petroleum Coke Using Response Surface Methodology. Drying Technology V. 32, 328-338, 2014.

MEREDITH, R. Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating, London, Institute of Electrical Engineers, 1998.

METAXAS, A. C; MEREDITH, R. Industrial microwave heating. London: PeterPeregrinus, 1993.

MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. 3. ed. Estados Unidos: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

MULEY, P.; BOLDOR, D. Investigation of microwave dielectric properties of biodiesel components. Bioresource Technology, v. 127, p. 165-174, 2013.

NELSON, S. O.; Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, v. 44, n.2, p. 98-113, 2010.

NELSON, S. O.; TRABELSI, S. Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food products. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, v. 46, n. 2, p. 93-107, 2012.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer. Dissertation (Master's Thesis)-Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue. 1949

PANISSET, C. M. A., Novas alternativas para o sistema de separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo: teste de uma unidade de VCS; busca do aumento de eficiência da operação de hidrociclonagem; e tratamento da borra de centrifugação por microondas. Tese de Doutorado. Uberlândia/MG, UFU, 2014.

PEGDEN, D. C.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. Introduction to Simulation Using SIMAN. 2.ed. New York: Mc-Graw Hill, 1995.

PEREIRA, M. S. Caracterização de Cascalho e Lama de Perfuração ao Longo do Processo de Controle de Sólidos em Sondas de Petróleo e Gás. Dissertação de Mestrado. Uberlândia/MG, UFU, 2010.

- PEREIRA, M. S., Aplicação de Secagem por Micro-ondas no tratamento de cascalho de perfuração. Tese de Doutorado. Uberlândia/MG, UFU, 2013.
- PEREIRA, M. S.; PANISSET, C. M. A.; MARTINS, A. L.; SÁ, C. H. M.; BARROZO, M. A. S.; ATAIDE, C. H. Microwave treatment of drilled cuttings contaminated by synthetic drilling fluid. *Separation and Purification Technology*. v. 124, 68–73, 2014a.
- PEREIRA, M.S.; MARTINS, R. A.; MARTINS, A. L.; BARROZO, M. A. S.; ATAIDE, C. H. Physical properties of cuttings. drilling fluid and organic phase recovered in the drying operation in oil and gas well drilling. *Materials Science Forum* Vol. 802, p. 262-26, 2014b.
- PEREIRA, M. S.; SANTOS, J. M.; BARROZO, M. A. S.; ATAÍDE, C. H.; MARTINS, A. L. Decontamination of Drilled Cutting by Microwave Drying Kinetics Aspects. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*. v.9 n.1 p. 001-010, 2015.
- PETRI, I. Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalho de perfuração. Dissertação de Mestrado. Uberlândia/MG, UFU, 2014.
- PETRI, I.; PEREIRA, M. S.; SANTOS, J. M.; DUARTE, C. R.; ATAIDE, C. H.; PANISSET, C. M. A. Microwave remediation of oil well drill cuttings. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 134 p. 23-29, 2015.
- PETROBRAS. Manual de Fluidos. 1. ed. Rio de Janeiro, 2011.
- PILAI, M.G. Thin layer drying kinetics, characteristics and modeling of plaster of paris. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 91, p. 1018–1027, 2013.
- POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. 3. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons Ltda. 2005.
- ROBINSON, J. P., KINGMAN, S. W., SNAPE, C. E., BARRANCO, R., SHANG, H., BRADLEY, M. S. A., BRADSHAW, S. M., Remediation of oil-contaminated drill cuttings using continuous microwave heating, *Chemical Engineering Journal*, v. 152(2), p. 458-463, 2009.
- ROBINSON, J. P.; KINGMAN, S. W.; SNAPE, C. E.; BRADSHAW, S. M.; BRADLEY, M. S. A.; SHANG, H.; BARRANCO, R. Scale-up and design of a continuous microwave treatment system for the processing of oil-contaminated drill cuttings, *Chemical Engineering Research and Design*, v. 88(2), p. 146-154, 2010.
- ROBINSON, J. P.; KINGMAN, S. W.; LESSER, E. H.; YI, C. Microwave remediation of hydrocarbon-contaminated soils – Scale-up using batch reactors, *Separation and Purification Technology*, v. 96, p. 12-19, 2012.
- ROBINSON, J. P.; BINNER, E. R.; SILVESSER, S. A.; KINGMAN, S. W.; LESSER, E. H. Investigation into the mechanisms by which microwave heating enhances separation of water-in-oil emulsions, *Fuel*, v. 116, p. 516-521, 2014.
- ROSSI, A. S.; FARIA, M. G.; PEREIRA, M. S.; ATAÍDE, C. H. Kinetics of Microwave Heating and Drying of Drilling Fluids and Drill Cuttings. *Drying Technology*, 2017.

SALEMA, A. A.; YEOW, Y. K.; ISHAQUE, K.; ANI, F.N.; AFZAL, M. T.; HASSAN, A. Dielectric properties and microwave heating of oil palm biomass and biochar. *Industrial Crops and Products* 50, p.366– 374, 2013.

SALVI, D.; BOLDOR, D.; AITA, G.M.; SABLIOV, C.M. COMSOL Multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids. *Journal of Food Engineering* 104, p.422–429, 2011.

SANTOS, J. M.; PEREIRA, M. S.; JUNIOR, I. P.; PENA, M. M. R.; ATAIDE, C. H. Microwave Drying of Drilled Cuttings in the Context of Waste Disposal and Drilling Fluid Recovery. *Energy Technol.* 2. p. 832–838, 2014a.

SANTOS, J. M., Remediação de sólidos de perfuração via aquecimento por micro-ondas. Dissertação de Mestrado. Uberlândia/MG, UFU, 2014b.

SAXENA, V.K.; CHANDRA, U., *Microwave Synthesis: a Physical Concept - Microwave Heating* (ed U. Chandra), 2011.

SHANG, H.; SNAPE, C. E.; KINGMAN, S. W.; ROBINSON, J. P. Treatment of oil-contaminated drill cuttings by microwave heating in a high-power single-mode cavity, *Industrial e Engineering Chemistry research*, v. 44(17), p. 6837-6844, 2005.

SHANG, H.; SNAPE, C. E.; KINGMAN, S. W.; ROBINSON, J. P. Microwave treatment of oil-contaminated North Sea drill cuttings in a high power multimode cavity, *Separation and Purification Technology*, v. 49(1), p. 84-90, 2006.

SHANG, H.; ROBINSON, J. P.; KINGMAN, S. W.; SNAPE, C. E.; WU, Q. Theoretical study of microwave enhanced thermal decontamination of oil contaminated waste, *Chemical Engineering Technology*, v. 30(1), p. 121-130, 2007.

SILVESTER, P.; FERRARI, R. *Finite elements for electrical engineers*. Cambridge University Press, 3^o ed. 1996.

SOKOLOWSKI, J.; BANKS, C. M. *Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach*. Wiley, 1st ed. 2009.

TAHMASEBI, A.; YU, J.; HANA, Y.; ZHAO, H.; BHATTACHARYA, S. A kinetic study of microwave and fluidized-bed drying of a Chinese lignite. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 92 (1), p. 54-65, 2013.

TEWARY, G. Microwave and radio-frequency heating. In: TEWARY, G.; JUNEGA, V. *Advances in thermal and non-thermal food preservation*. Iowa: Blackwell Publishing, p. 91-98, 2007.

VAZ, R.H.; PEREIRA, J.M.C; ERVILHA, A.R.; PEREIRA, C.F. Simulation and uncertainty quantification in high temperature microwave heating. *Applied Thermal Engineering* (70), 1025-1039, 2014.

VENKATESH, M.; RAGHAVAN, G. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystem Engineering*, v. 88, n. 1, p. 1- 18, 2004.

VENKATESH, M.; RAGHAVAN, G. An overview of dielectric properties measuring techniques. Canadian Biosystem Engineering, v. 47, p. 7.15-7.30, 2005.

ZARATE, J. M. O.; HITA, J. L.; KHAYET, M.; LEGIDO, J. L. Measurement of the thermal conductivity of clays used in pelotherapy by the multi-current hotwire technique. Applied Clay Science (50), 423-426, 2010.

APÊNDICE 1

De acordo com FALCIGLIA *et al.*, (2015) que trabalharam com um material semelhante ao utilizado nesse trabalho é possível atingir 100% de remoção do contaminante aplicando a secagem por microondas como mostrado na Figura A1.1.

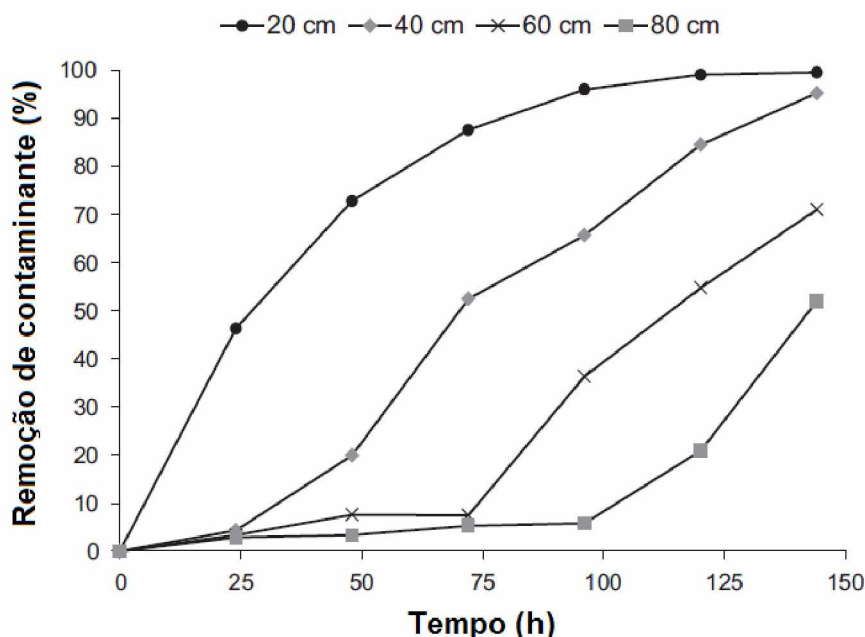


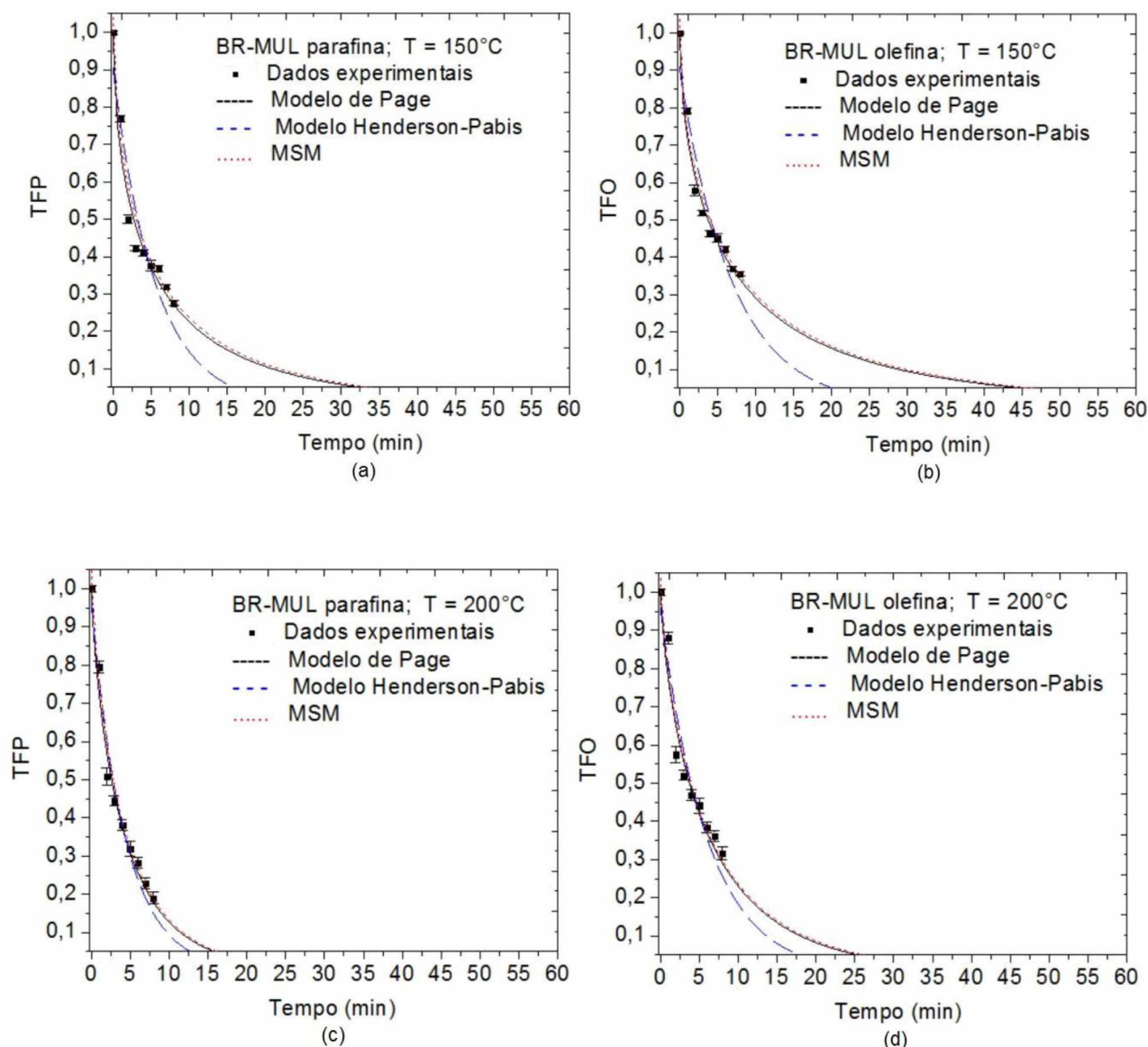
Figura A1.1 - Remoção de contaminante com o tempo para várias distancias da fonte de microondas. Adaptado de FALCIGLIA *et al.*, (2015).

Os pesquisadores testaram diferentes distâncias do material a ser seco até a fonte emissora de microondas. Deste modo, para uma distância de 20cm e com tempo de exposição às microondas superior a 125h, conseguiu-se, ao final do experimento, um material com 0% de contaminante, ou seja, o X^* , neste caso, poderia ser assumido como zero.

No presente trabalho existem duas fontes emissoras de microondas, a primeira localizada logo abaixo do material a ser aquecido com distância de aproximadamente 2cm da base da amostra e a segunda fonte localizada acima do material com distância de aproximadamente 11cm do topo da amostra a ser seca, sendo a altura da cavidade interna do forno de 21cm.

Tomando como referência os dados presentes no gráfico do pesquisadores Italianos, pode-se inferir, que com distâncias menores do que 20cm das fontes de microondas o tempo para remoção completa do contaminante seria menor que 150h.

Ainda sim, foi realizada uma extrapolação dos modelos obtidos no presente trabalho (PAGE, HENDERSON-PABIS e MSM) para descrever a remoção dos fluidos de perfuração, utilizando, para isso, um tempo superior a 60 minutos (Figura A1.2), nota-se que a curvas tendem a zero, ou seja, para um experimento com longo tempo de exposição às microondas estima-se que o X_{fp}^* e X_{fo}^* seja zero. Este critério foi utilizado devido ao limite do equipamento, garantindo a segurança do laboratório e diminuindo o risco de acidentes com possíveis explosões do forno.



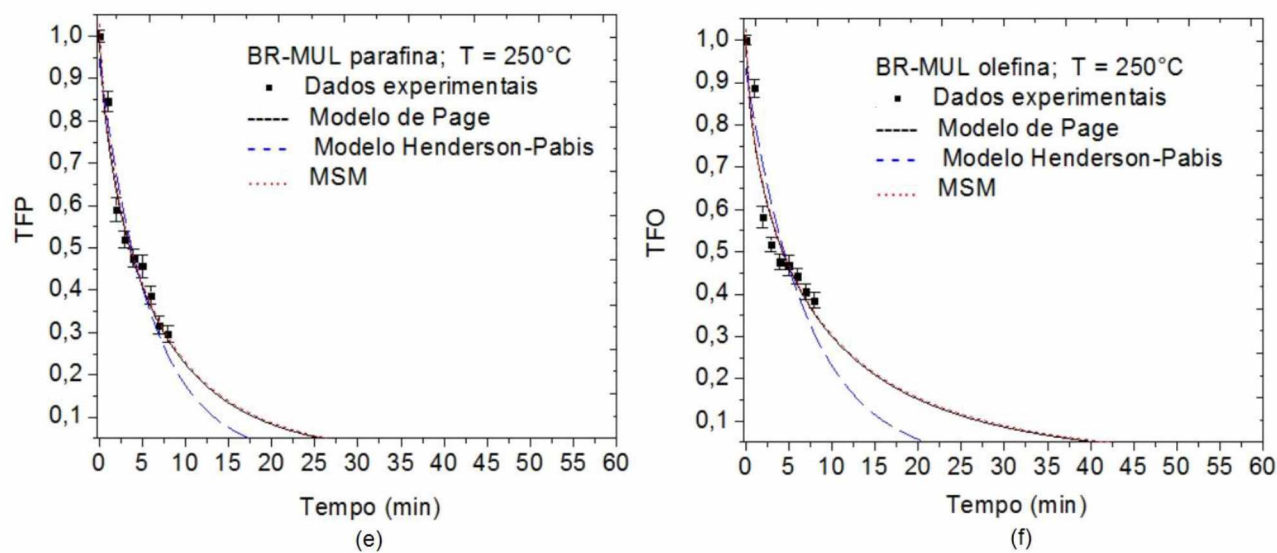


Figura A1.2 - Extrapolação dos modelos de secagem para fluido parafina (a), (c), (e) e olefina (b), (d), (f) em três diferentes temperaturas.

APÊNDICE 2

Os fluidos de perfuração são misturas de vários hidrocarbonetos, desde alcanos de cadeia C_{10} a C_{16} e alcenos de cadeia C_{16} a C_{18} . Além disso, os fluidos são compostos por água e aditivos sólidos específicos para cada fluido. No caso do fluido parafina a composição é de 39,4% de base orgânica e 28% de água, enquanto o fluido olefina tem composição de 43,4% de base orgânica e 27% de água. O restante dos componentes, para fechar o balanço de massa, para ambos os fluidos são aditivos ou componentes específicos de cada tipo de fluido. Deste modo, além da dificuldade de representar essa mistura complexa na simulação computacional existe a dificuldade de se obter dados na literatura das propriedades físicas destes compostos, principalmente destes hidrocarbonetos de cadeia longa que compõe cada fluido.

Para o cascalho de perfuração a dificuldade da simulação não é diferente, pois o cascalho de perfuração analisado nesse trabalho advém de algum poço de perfuração que tem uma determinada característica. Caso a perfuração seja em outro local pode haver modificação na composição química da rocha alterando toda característica final do cascalho e inviabilizando o processo de simulação numérica. Segundo a Tabela 4.7 o cascalho avaliado nesse trabalho tem grandes concentrações de óxidos de alumínio e ferro o que confere a ele grande poder de absorção de microondas. Em contrapartida a concentração de sílica é grande (cerca de 40%) gerando grande número de reflexões de ondas eletromagnética e baixa absorção de energia. Assim, existe uma grande dificuldade de representar essa mistura complexa na simulação com todas suas características e ainda a falta, ou total inexistência, de propriedades físicas disponíveis na literatura. Para contornar esse problema na simulação o cascalho de perfuração do presente trabalho foi tomado como argila pura e suas propriedades físicas observadas na literatura.

A complexidade na simulação ainda aumenta quando se mistura o cascalho de perfuração aos fluidos, ou seja, existiria uma fase sólida composta de cascalho e uma fase líquida composta pelo fluido de perfuração. Tendo que descrever a fase líquida separada da sólida como uma mistura heterogênea, fato que não ocorre na realidade pois a mistura cascalho/fluido forma uma mistura muito homogênea levemente úmida. Para contornar esse problema a mistura cascalho/fluido foi tomada como uma mistura sólida. Essa decisão foi tomada ao se perceber que cascalho de perfuração misturado com 24% (em massa) de fluido (maior quantidade de fluido misturado ao cascalho no presente trabalho) tem um aspecto muito próximo de um sólido.

Para o caso das simulações de aquecimento dos fluidos, bem como da água, a mistura foi tratada na fase líquida respeitando suas propriedades de vaporização quando disponíveis na literatura. Devido à grande dificuldade de se encontrar propriedades como condutividade elétrica e térmica de hidrocarbonetos a solução foi utilizar, para essas propriedades, os valores do maior hidrocarboneto existe no banco de dados do COMSOL. FRANCESCHINI (2007) e ZARATE *et al.*, (2010) avaliaram a condutividade elétrica e térmica da argila em seus respectivos trabalhos e esses valores foram empregados para a simulação do cascalho de perfuração.

Para o caso da densidade foram utilizados dados calculados por PETRI (2014) através de testes de picnometria tanto para fluido de perfuração quanto o cascalho. Foram utilizados os valores de densidade real para os fluidos e densidade bulk para o cascalho de perfuração como segue na Tabela A1. Para a capacidade calorífica, a temperatura constante, foram empregados os valores fornecidos no trabalho de ROBINSON *et al.*, (2009) tanto para fluido de perfuração quanto o cascalho. A Tabela A1 apresenta os valores do banco de dados do simulador bem como os valores aproximados extraídos da literatura.

Tabela A1 - Propriedades dos materiais utilizados na simulação COMSOL

Material	ϵ_r	μ	σ [S/m]	K [W/mK]	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/KgK]
Ar	1	1	0	---	---	---
Disco	1	1	1,7391	---	---	---
Cavidade	1	1	1,7391	---	---	---
Água	++	1	$5,5 \times 10^{-6}$	++	++	++
Cascalho	***	1	0,006 ^b	$0,82 \pm 0,13^c$	1300 ^d	1500 ^e
Fluidos	***	1	Eq. COMSOL ^f	Eq. COMSOL ^f	1050 ^d	2000 ^e

--- Não aplicado.

++ Valores apresentados por SALVI *et al.*, (2011).

*** Propriedades dielétricas inserida de acordo com o teste realizado.

^b Valores calculados no trabalho de FRANCESCHINI, (2007).

^c Valores calculados no trabalho de ZARATE *et al.*, (2010).

^d Valores calculados no trabalho de PETRI, (2014).

^e Valores utilizados no trabalho de ROBINSON *et al.*, (2009).

^f Equação do banco de dados COMSOL para o maior hidrocarboneto disponível C₁₂H₂₆.

Para o caso específico da simulação de aquecimento da água foram utilizados as propriedades, com variação da temperatura, obtidas no trabalho de SALVI *et al.*, (2011). Detalhes mais específicos da simulação da operação de aquecimento da água pode ser encontrados no Apêndice 3 deste trabalho. Todas as outras propriedades, necessária a simulação, foram extraídas do próprio banco de dados do COMSOL *Multiphysics*. As Figuras A2.1 até A.4 mostram as propriedades físicas dos componentes do banco de dados do simulador.

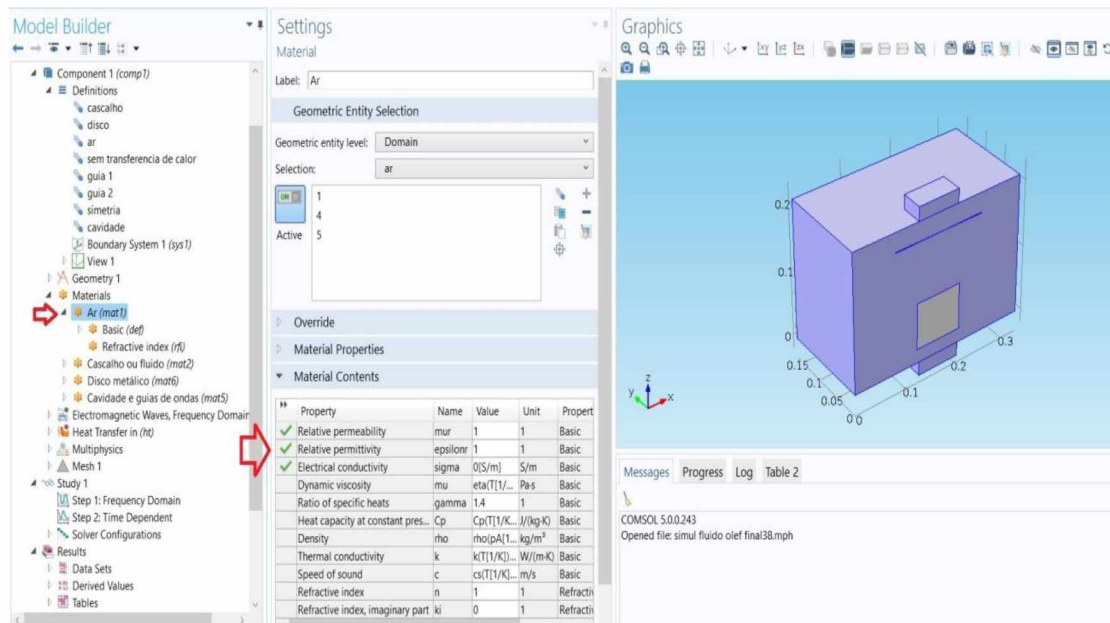


Figura A2.1 - Propriedades do ar banco de dados COMSOL

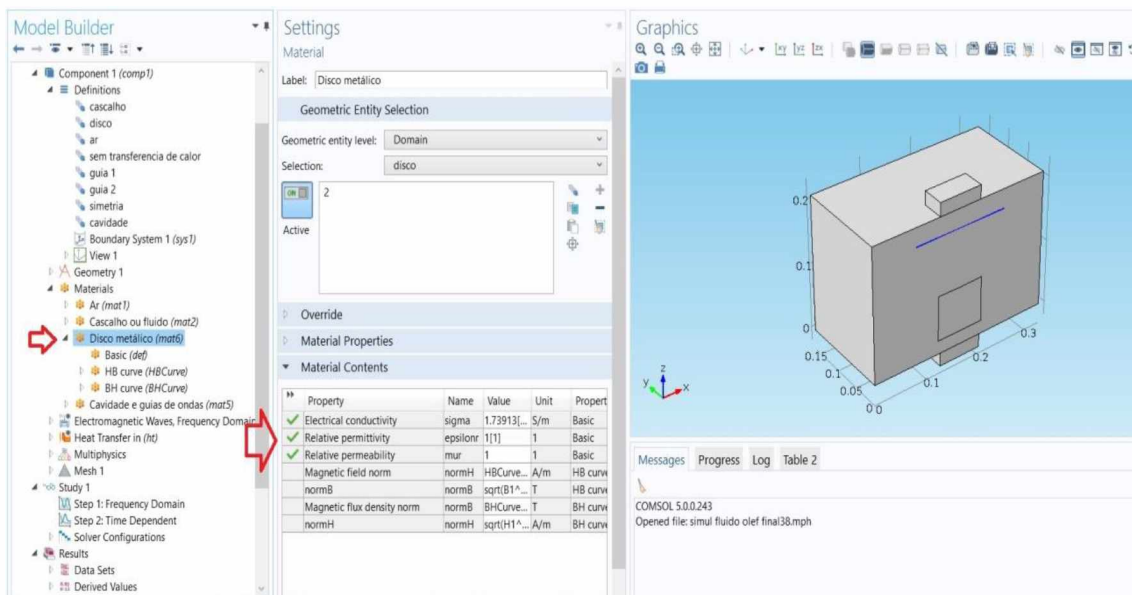


Figura A2.2 - Propriedades do disco metálico banco de dados COMSOL

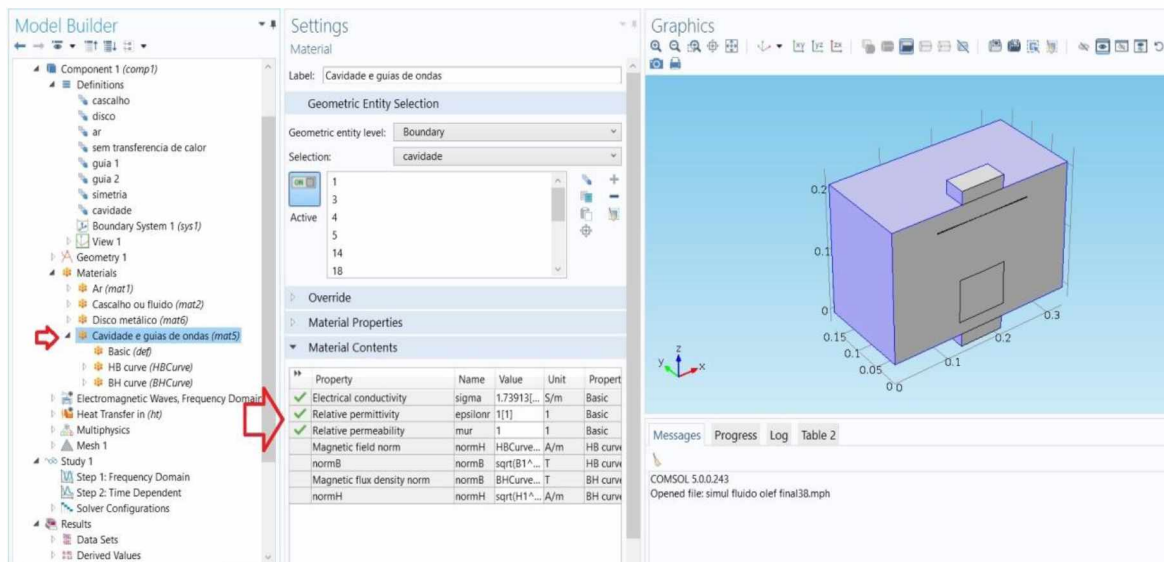


Figura A2.3 - Propriedades da cavidade banco de dados COMSOL

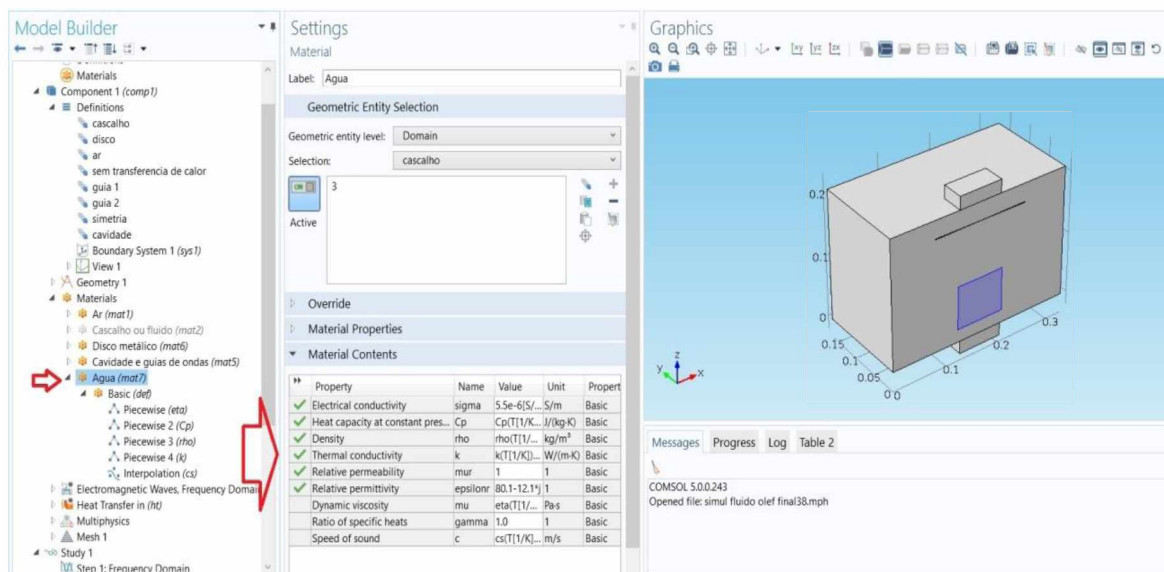


Figura A2.4 - Propriedades da água banco de dados COMSOL

APÊNDICE 3

Para a simulação computacional da operação de aquecimento da água pura, via microondas, foi utilizado como base os dados extraídos do trabalho de SALVI *et al.*, (2011). A Tabela A2 mostra os dados de condutividade térmica versus temperatura.

Tabela A2 - Condutividade térmica da água pura versus temperatura					
	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C
K (W/mK)	0,6037	0,6309	0,6527	0,6692	0,6803

Desta forma, foi realizado uma regressão linear com esses dados para se obter a melhor reta que passava sob os pontos (Figura A3.1). O objetivo dessa ferramenta foi encontrar uma equação onde pudesse prever os valores de condutividade térmica variando com a temperatura, para realizar a simulação da operação de aquecimento da água pura, obtendo, ao final, valores mais próximos de um experimento convencional de aquecimento via microondas.

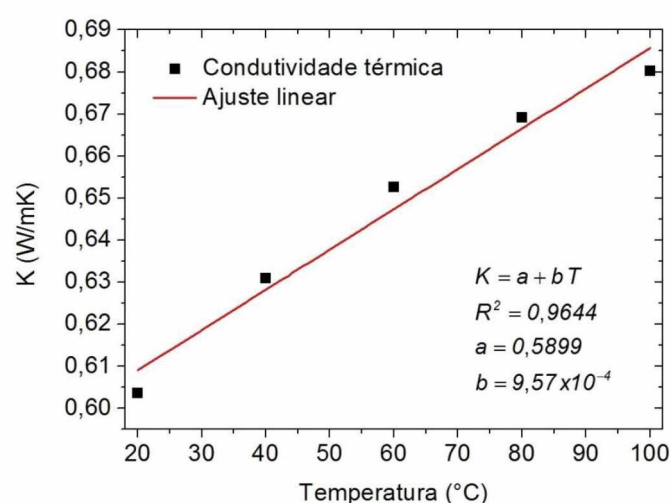


Figura A3.1 - Regressão linear da condutividade térmica da água variando com a temperatura.

A melhor regressão linear, considerando os resultados obtidos por SALVI *et al.*, (2011), forneceu um quadrado coeficiente de correlação ou $R^2 = 96,4\%$ para os valores de condutividade térmica. Assim, a Eq. A3.1 mostra a condutividade térmica da água variando com a temperatura.

$$K = 0,5899 + 9,57 \times 10^{-4}T \quad (A3.1)$$

Deste modo, a equação A3.1 foi inserida no *software* COMSOL seguindo o fluxograma da Figura 3.8 com permissividade complexa variando com a temperatura. A Tabela A3 mostra os dados de densidade da água pura variando com a temperatura.

Tabela A3 - Densidade da água pura versus temperatura					
	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C
ρ (Kg/m ³)	995,7	991,3	983,8	973,4	959,9

Foi realizado uma regressão linear com esses dados para se obter a melhor reta que passava sob os pontos (Figura A3.2). O objetivo dessa ferramenta foi encontrar uma equação onde pudesse prever os valores de densidade variando com a temperatura, para realizar a simulação da operação de aquecimento da água pura, obtendo, ao final, valores mais próximos de um experimento real de aquecimento via microondas.

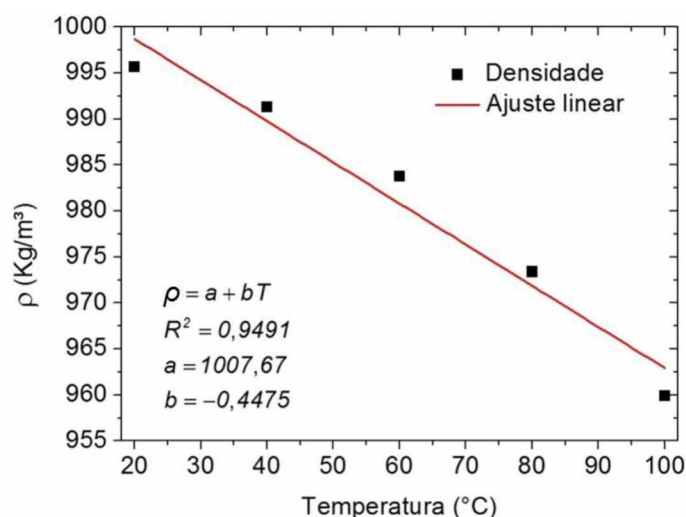


Figura A3.2 - Regressão linear da densidade da água variando com a temperatura.

A melhor regressão linear, considerando os resultados obtidos por SALVI *et al.*, (2011), forneceu um quadrado coeficiente de correlação ou $R^2 = 94,91\%$ para os valores de densidade. Assim, a Eq. A3.2 mostra a densidade da água variando com a temperatura.

$$\rho = 1007,67 - 0,4475T \quad (A3.2)$$

A equação A3.2 foi inserida no *software* COMSOL seguindo o fluxograma da Figura 3.8 com permissividade complexa variando com a temperatura. A Tabela A4 mostra os dados de capacidade calorífica da água pura variando com a temperatura.

Tabela A4 - Capacidade calorífica da água pura versus temperatura					
	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C
C _p (J/KgK)	4176,6	4181,3	4190,5	4204,1	4221,8

Desta maneira, foi realizado uma regressão linear com esses dados para se obter a melhor reta que passava sob os pontos (Figura A3.3). O objetivo dessa ferramenta foi encontrar uma equação onde pudesse prever os valores de capacidade calorífica variando com a temperatura, para realizar a simulação da operação de aquecimento da água pura, obtendo, ao final, valores mais próximos de um experimento convencional de aquecimento via microondas.

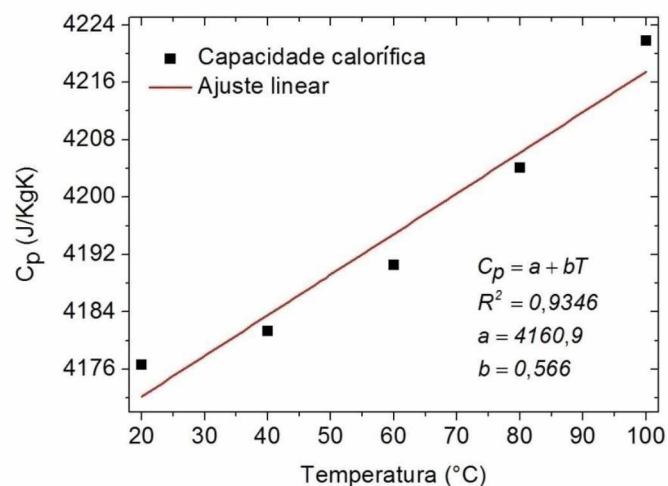


Figura A3.3 - Regressão linear da capacidade calorífica da água variando com a temperatura.

A melhor regressão linear, considerando os resultados obtidos por SALVI *et al.*, (2011), forneceu um quadrado coeficiente de correlação ou $R^2 = 93,46\%$ para os valores de capacidade calorífica. Desta forma, a Eq. A3.3 mostra a capacidade calorífica da água variando com a temperatura.

$$C_p = 4160,9 + 0,566 T \quad (A3.3)$$

Assim, a equação A3.3 foi inserida no *software* COMSOL seguindo o fluxograma da Figura 3.8 com permissividade complexa variando com a temperatura.