



**ANDRÉ SILVEIRA FELIPE**

**MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO  
ELETROMAGNÉTICO NO INTERIOR DE UMA CAVIDADE  
MULTIMODO DE UM FORNO MICRO-ONDAS**

**LAVRAS – MG  
2021**

**ANDRÉ SILVEIRA FELIPE**

**MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO NO  
INTERIOR DE UMA CAVIDADE MULTIMODO DE UM FORNO MICRO-ONDAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2021**

**ANDRÉ SILVEIRA FELIPE**

**MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO NO  
INTERIOR DE UMA CAVIDADE MULTIMODO DE UM FORNO MICRO-ONDAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 18 de Maio de 2021.

---

Prof. Dr. Gilson Campani Junior  
DEG/UFLA

---

Prof. Dr. Joaquim Paulo da Silva  
DFI/UFLA

---

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior  
DEG/UFLA

**LAVRAS – MG  
2021**

*Aos meus pais Joaquim e Anaci.  
A minha avó Esmeralda.  
Às minhas tias Angela e Adenise.  
A minha namorada Ana Clara.  
Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pois, a cada degrau de dificuldade, Ele me proporcionou o dobro de força.

A minha família, especialmente a minha Mãe, que nunca deixou faltar nada para que meus sonhos se realizassem.

Aos amigos de faculdade, por passarmos momentos de lutas e alegrias ao longo dessa caminhada.

A todos os professores que tive a oportunidade de conhecer na faculdade, principalmente o Professor Irineu Petri Júnior, pelo apoio e compreensão na realização desse trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, PQ Júnior e NEnQ, pelas experiências que me proporcionaram crescer pessoalmente.

## RESUMO

Em escala industrial, o forno micro-ondas é utilizado em processos de aquecimento, secagem, esterilização, extração de compostos, pasteurização etc. O aquecimento de determinada amostra acontece pela interação entre as ondas eletromagnéticas geradas pelo equipamento e o dipolo elétrico das moléculas da amostra. Os pontos de maior intensidade de aquecimento dentro da cavidade do equipamento são caracterizados como *hotspots*, que são os pontos com maior intensidade de campo eletromagnético. A cavidade do micro-ondas pode ser monomodo ou multimodo. A cavidade multimodo é maior e mais comumente utilizada para fins científicos e industriais. Esse tipo de cavidade tem a particularidade de possuir múltiplos *hotspots* devido a presença de vários modos, que são pontos de distribuição das micro-ondas, assim como flutuações locais no campo eletromagnético, dando origem a um superaquecimento localizado. Devido à falta de homogeneidade na distribuição das micro-ondas dentro da cavidade de um equipamento multimodo, este trabalho tem como objetivos mapear tridimensionalmente um forno micro-ondas com cavidade multimodo, testar um método de mapeamento por meio de uma placa resistiva e papel termo sensível e gerar os pontos de maior intensidade de campos eletromagnéticos (*hotspots*), com a finalidade de se obter o melhor aproveitamento do forno micro-ondas. Com essa finalidade, foram utilizadas duas placas resistivas, sendo uma com carvão ativado/cola de acetato de polivinila e outra com óxido de ferro/cola de acetato de polivinila, para avaliar a influência dos materiais utilizados no surgimento dos pontos de aquecimento. O tempo de aquecimento que garantia o surgimento dos principais *hotspots* variou de 40 a 60 segundos devido à particularidade de cada placa resistiva. Após o término do período de aquecimento, o papel termo sensível foi digitalizado e as imagens dos *hotspots* foram tratadas pelo *software* ImageJ para identificação dos principais pontos de aquecimento. Os resultados encontrados para as duas placas resistivas utilizadas foram satisfatórios para todos os planos estudados, pois os pontos de aquecimento foram distintos e foi possível identificar locais de aquecimento rápido e homogêneo. O método inovador de mapeamento utilizado é promissor comparado aos métodos estudados anteriormente. Portanto, este trabalho fornece uma metodologia para a previsão dos pontos de aquecimento em uma cavidade de micro-ondas, sendo que a técnica experimental desenvolvida se mostrou útil para otimização das cavidades industriais.

**Palavras-chave:** Aquecimento. *Hotspots*. Homogeneidade. Placa resistiva. Otimização.

## ABSTRACT

On an industrial scale, the microwave oven is used in heating, drying, sterilizing, compound extraction, pasteurization, etc. The heating of a given sample occurs by the interaction between the electromagnetic waves generated by the equipment and the electric dipole of the sample molecules. The points of greatest intensity of heating within the cavity of the equipment are characterized as hotspots, which are the points with the highest presence of electromagnetic field. The microwave cavity can be single-mode or multi-mode. The multimode cavity is larger and more commonly used for scientific and industrial purposes. This type of cavity has the particularity of having multiple hotspots due to the presence of several modes, which are points of distribution of the microwaves, as well as local fluctuations in the electromagnetic field, giving rise to localized overheating. Due to the lack of homogeneity in the distribution of microwaves inside the cavity of a multimode equipment, this work aims to map a microwave oven with multimode cavity, test a mapping method using a resistive plate and thermo-sensitive paper, and generate the points of higher intensity of electromagnetic fields (hotspots) in order to optimize the use of the microwave oven. For this purpose, two resistive plates were used, one with activated carbon/polyvinyl acetate glue and the other with iron oxide/polyvinyl acetate glue, to evaluate the influence of the materials used in the emergence of hotspots. The heating time that guaranteed the emergence of the main hotspots varied from 40 to 60 seconds due to the particularity of each resistive plate. After the end of the heating period, the heat-sensitive paper was scanned and the images of the hotspots were processed by ImageJ software to identify the main heating points. The results found for the two resistive plates used were satisfactory for all the planes studied, because the heating points were distinct and it was possible to identify rapid and homogeneous heating locations. The innovative mapping method used is promising compared to previously studied methods. Therefore, this work provides a methodology for the prediction of heating points in a microwave cavity, and the experimental technique developed has proven useful for optimization of industrial cavities.

**Keywords:** Heating. *Hotspots*. Homogeneity. Resistive plate. Optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Magnetron e componentes secundários. ....	4
Figura 2 - Equações de Maxwell. ....	4
Figura 3 - Variação dos campos elétrico e magnético em relação ao tempo.....	5
Figura 4 - Mecanismos de aquecimento por: a) rotação de dipolo; b) condução iônica. ....	6
Figura 5 - Fornos micro-ondas com cavidades a) monomodo e b) multimodo.....	6
Figura 6 - Interação de cada tipo de material com as micro-ondas. ....	9
Figura 7 – Estrutura do carvão ativado.....	11
Figura 8 - Compactação de um particulado submetido a algum tipo de vibração mecânica. ..	13
Figura 9 - Unidade experimental em que foi realizado o mapeamento.....	18
Figura 10 - Cavidade multimodo do forno micro-ondas. ....	19
Figura 11 – Amostras de a) carvão ativado e b) óxido de ferro (III), utilizados no trabalho. ..	19
Figura 12 - Cola escolar utilizada no trabalho.....	20
Figura 13 - Agitador de peneiras para análise granulométrica. ....	22
Figura 14 – Solução de carvão ativado e cola branca depositada na placa. ....	23
Figura 15 - Placa resistiva de a) carvão ativado e b) óxido de ferro. ....	23
Figura 16 - Esquema das camadas de materiais formando a placa resistiva. ....	24
Figura 17 – Placa resistiva utilizada nos experimentos.....	24
Figura 18 - Planos de coordenadas xyz. ....	24
Figura 19 - Papel termo sensível após o aquecimento. ....	26
Figura 20 - Papel termo sensível após o tratamento pelo <i>software</i> ImageJ.....	26
Figura 21 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para alturas (plano xy) de a) 0 cm, b) 6,2 cm, c) 9,5 cm, d) 12,2 cm, e) 15,2 cm e f) 18,4 cm.....	30
Figura 22 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para as posições (plano xz) de a) 0 cm, b) 5,5 cm, c) 11 cm, d) 16,5 cm, e) 22 cm e f) 27,5 cm. ....	31
Figura 23 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para as posições (plano yz) de a) 0 cm, b) 5,5 cm, c) 11 cm, d) 16,5 cm, e) 22 cm e f) 27,5 cm. ....	32
Figura 24 - Mapeamento dos pontos de aquecimento para alturas (plano xy) de a) 0 cm, b) 6,2 cm, c) 9,5 cm, d) 12,2 cm, e) 15,2 cm e f) 18,4 cm.....	34
Figura 25 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para as posições (plano xz) de a) 0 cm, b) 5,5 cm, c) 11 cm, d) 16,5 cm, e) 22 cm e f) 27,5 cm. ....	35
Figura 26 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para as posições (plano yz) de a) 0 cm, b) 5,5 cm, c) 11 cm, d) 16,5 cm, e) 22 cm e f) 27,5 cm. ....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de materiais transparentes e suas propriedades dielétricas.....	10
Tabela 2 - Resultados experimentais para densidade <i>bulk</i> e densidade real. ....	27
Tabela 3 – Resultados do peneiramento para o carvão ativado.....	28
Tabela 4 – Resultados do peneiramento do óxido de ferro (III).....	28

## LISTA DE SÍMBOLOS

$m$	Coeficiente angular do modelo GGS	[-]
$n$	Coeficiente angular do modelo RRB	[-]
$\epsilon'$	Constante dielétrica relativa	[-]
$\rho_b$	Densidade <i>bulk</i>	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{real}$	Densidade real	[g/cm <sup>3</sup> ]
$D_i$	Diâmetro de abertura da peneira i	[ $\mu$ m]
+ $D_i$	Diâmetro da peneira de fundo	[ $\mu$ m]
- $D_i$	Diâmetro da peneira de topo	[ $\mu$ m]
dps	Diâmetro médio das partículas	[ $\mu$ m]
$\bar{D}_i$	Diâmetro médio de abertura das peneiras utilizadas	[ $\mu$ m]
$\epsilon''$	Fator de perda dielétrica relativa	[-]
$X_i$	Fração mássica acumulada de partículas retidas na peneira i	[-]
$x_i$	Fração mássica de partículas retidas na peneira i	[-]
$\Gamma$	Função gama	[-]
$m_{amostra}$	Massa da amostra	[g]
$m_{\acute{a}gua}$	Massa de água	[g]
$m_{p+r}$	Massa do particulado mais a massa do recipiente	[g]
$m_{pic+\acute{a}gua}$	Massa do picnômetro mais água	[g]
$m_{pic+gotas}$	Massa do picnômetro mais gotas de água	[g]
$m_{pic+gotas+amostra}$	Massa do picnômetro mais gotas de água mais amostra	[g]
$m_{pic+gotas+amostra+\acute{a}gua}$	Massa do picnômetro mais gotas de água mais amostra mais água	[g]
$m_{pic\ vazio}$	Massa do picnômetro vazio	[g]
$\rho_{\acute{a}gua}$	Massa específica da água	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\bar{V}$	Média do volume do particulado antes e após a compactação no recipiente	[cm <sup>3</sup> ]
$j$	Número imaginário	[-]
$D'$	Parâmetro referente ao diâmetro $D_{63,2}$ para $X = 63,2$ ;	[-]
$\epsilon^*$	Permissividade elétrica relativa	[-]
%	Porcentagem	[-]
tg $\delta$	Tangente de perda	[-]
$k$	Valor do maior diâmetro, $D_{100}$ , de partículas arrastadas	[-]

	para X=1	
$V_{\text{água}}$	Volume da água	[cm <sup>3</sup> ]
$V_{\text{amostra}}$	Volume da amostra	[cm <sup>3</sup> ]
$V_{\text{água calibração}}$	Volume da água de calibração do picnômetro	[cm <sup>3</sup> ]

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	3
2.1	AQUECIMENTO MICRO-ONDAS .....	3
2.1.1	Radiação eletromagnética.....	4
2.1.2	Mecanismos de aquecimento.....	5
2.1.3	Cavidades de fornos micro-ondas.....	6
2.2	MAPEAMENTO DE <i>HOTSPOTS</i> .....	7
2.3	PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DOS MATERIAIS.....	8
2.3.1	Carvão ativado.....	10
2.3.2	Óxido de ferro (III).....	11
2.3.3	Acetato de polivinila.....	12
2.4	MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	13
2.4.1	Densidade bulk .....	13
2.4.2	Densidade real .....	14
2.4.3	Análise granulométrica.....	15
2.4.3.1	Modelo GGS .....	16
2.4.3.2	Modelo RRB .....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	18
3.1	UNIDADE EXPERIMENTAL.....	18
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS .....	19
3.3	CARACTERIZAÇÃO .....	20
3.3.1	Densidade bulk .....	20
3.3.2	Densidade real .....	20
3.3.3	Análise granulométrica.....	21
3.4	CONFECÇÃO DAS PLACAS RESISTIVAS .....	22
3.5	TÉCNICA DE MAPEAMENTO DOS PONTOS DE AQUECIMENTO.....	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	27
4.2	MAPEAMENTO DA PLACA CARVÃO ATIVADO/COLA BRANCA.....	29
4.2.1	Plano xy .....	29
4.2.2	Plano xz .....	30
4.2.3	Plano yz .....	31
4.3	MAPEAMENTO DA PLACA ÓXIDO DE FERRO (III)/COLA BRANCA .....	33
4.3.1	Plano xy .....	33
4.3.2	Plano xz .....	34
4.3.3	Plano yz .....	36
5	CONCLUSÕES.....	38
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	39

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	40
----------------------------------	----

## 1 INTRODUÇÃO

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas com frequência entre 300 e 300000 MHz e foram utilizadas na Segunda Guerra Mundial em radares, atraindo muita atenção e recursos para o estudo deste tipo de tecnologia (MUJUMDAR, 2007). A utilização das micro-ondas na indústria alimentícia foi aprofundada na década de 1940, pelo Engenheiro Percy Spencer, que criou o primeiro forno micro-ondas para aquecer alimentos. Em escala industrial, os fornos micro-ondas são largamente aplicados em sínteses, secagem de amostras, mineralização de compostos orgânicos e inorgânicos, etc. (LEOLENNI *et al.*, 2013).

Em comparação ao aquecimento convencional, as micro-ondas possuem vantagens como transferência de energia ao invés de transferência de calor, aquecimento sem necessidade de contato, menor tempo de início e fim da operação de aquecimento, o que faz com que essa tecnologia seja largamente utilizada em processos industriais, aquecimento seletivo de certos materiais e alto nível de segurança e automação (GUÉNIN, 2016).

As ondas eletromagnéticas são geradas dentro do equipamento por um magnetron, dispositivo que possui a função de geração das micro-ondas por meio da interação de um fluxo de elétrons. As micro-ondas geradas sofrem reflexões dentro do equipamento podendo ocorrer ou não a sobreposição das mesmas (GUÉNIN, 2016). Ocorre, assim, a conversão de energia cinética em energia potencial elástica, devido ao fato das paredes do equipamento serem dimensionadas de forma que as reflexões sejam dadas nos nós das ondas. (LEOLENNI *et al.*, 2013). Essa reflexão gera pontos de maior intensidade de campo eletromagnéticos, denominados de *hotspots*. A identificação desses pontos é de extrema importância para obter um melhor aproveitamento do aquecimento micro-ondas.

A cavidade de um forno micro-ondas pode ser classificada como monomodo ou multimodo. As cavidades monomodo possuem uma distribuição previsível e homogênea das micro-ondas, proporcionando uma boa reprodutibilidade para aquecimentos que utilizam pequenas quantidades de amostras, pois as micro-ondas são direcionadas diretamente para a amostra, proporcionando uma eficiência três vezes maior do que uma cavidade multimodo. Esse tipo de cavidade não é muito utilizado por possuir limitações relacionadas ao seu tamanho, o que impossibilita operações em escalas maiores (PETRI, 2014).

As cavidades multimodo caracterizam-se por uma distribuição não-homogênea das micro-ondas, devido às reflexões das mesmas nas paredes do equipamento. Esse tipo de cavidade fornece uma boa reprodutibilidade, uma síntese em maior escala e permite longos

períodos de utilização, porém com um aquecimento não uniforme, fazendo com que determinados pontos dentro da cavidade aqueçam mais do que outros. Os fornos micro-ondas domésticos e industriais possuem esse tipo de cavidade e conseguem operar com maior capacidade de processamento devido ao seu tamanho (PETRI, 2014).

A heterogeneidade da distribuição das ondas eletromagnéticas dentro de uma cavidade multimodo faz com que o aquecimento seja heterogêneo, podendo sub ou superaquecer o material. Sendo assim, é de extrema importância conhecer a distribuição das ondas eletromagnéticas no interior do forno micro-ondas. A partir daí, é possível realizar um aumento de escala ou a criação de uma nova geometria de cavidade ressonante. Alguns trabalhos a literatura estudaram métodos para a realização desse mapeamento dos *hotspots*, porém, a visualização dos pontos de aquecimento não foi precisa ou prática o suficiente para sua aplicação.

Portanto, devido à falta de homogeneidade na distribuição das micro-ondas dentro da cavidade de um equipamento multimodo, este trabalho tem como objetivos mapear tridimensionalmente um forno micro-ondas com cavidade multimodo, testar um método de mapeamento por placa resistiva e papel térmico para obter pontos de maior intensidade de campos eletromagnéticos (*hotspots*). Avaliou-se também a influência do material utilizado na confecção das placas resistivas, afim de verificar a influência dos mesmos na qualidade do mapeamento dos pontos de aquecimento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentada uma fundamentação teórica a respeito de assuntos relacionadas ao desenvolvimento deste trabalho, como a utilização e características de fornos micro-ondas, estudos realizados no mapeamento desses equipamentos e propriedades dielétricas e caracterização de materiais.

### 2.1 AQUECIMENTO MICRO-ONDAS

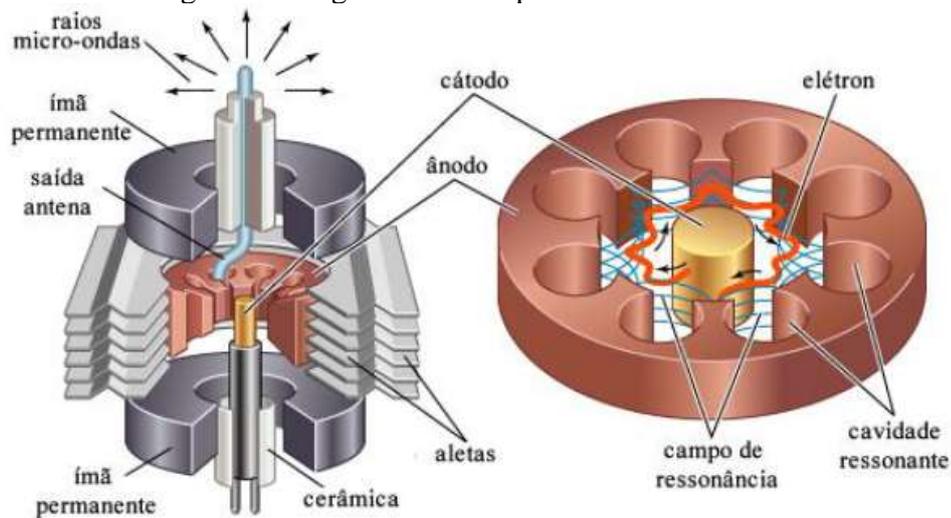
Em 1946, o engenheiro eletrônico Percy Spencer foi o pioneiro a desenvolver um forno que operava por meio de ondas não ionizantes, semelhantes às ondas de rádio, para facilitar o aquecimento de alimentos (ZAGO, 2010). Atualmente, o forno micro-ondas é um eletrodoméstico que tem sido bastante utilizado pela sua boa capacidade e praticidade em aquecer seletivamente diversos tipos de alimentos.

Em escala industrial, os fornos micro-ondas são utilizados em diversas aplicações, como em sínteses químicas ou reações químicas (MERILLAS *et al.*, 2019), secagem de resíduos (PETRI *et al.*, 2017), pirólise de biomassa (LIN *et al.*, 2020), remediação de solos (FALCIGLIA *et al.*, 2016), etc. Podem também ser aplicados em conjunto com outras tecnologias, como em processos de secagem micro-ondas e convectiva de produtos agrícolas.

A divisão básica de um forno micro-ondas consiste em cavidade, guia de ondas e parte elétrica. Na parte elétrica o principal componente é o magnetron, que possui a função de geração das micro-ondas.

A Figura 1 ilustra o magnetron e seus componentes secundários. Esse constituinte é a peça mais importante do equipamento, pois é capaz de gerar a radiação necessária para que todo o processo de aquecimento ocorra. O magnetron realiza a conversão da energia elétrica em micro-ondas por meio de uma constante diferença de potencial aplicada entre o cátodo, que é um filamento emissor de elétrons, e o ânodo, que é uma peça metálica oca contendo um par de aletas que apontam para o cátodo. Esse mecanismo é capaz de acelerar os elétrons devido à presença de um eletroímã situado entre os dois pólos (BARBOZA *et al.*, 2001). O circuito ressonante opera como um conjunto de capacitores e uma série de bobinas, que, em conjunto, se comportam como um circuito ressonante com valores de capacitância e indutância muito pequenos (PETRI, 2014). Ocorre, portanto, a geração de uma radiofrequência e, posteriormente, a transmissão das ondas eletromagnéticas por uma antena, e essas são guiadas por um guia de onda até a cavidade do equipamento.

Figura 1 - Magnetron e componentes secundários.



Fonte: Adaptado de Pagán, 2013.

As micro-ondas geradas pelo magnetron estão situadas dentro do espectro eletromagnético, que é uma grande escala de radiações eletromagnéticas.

### 2.1.1 Radiação eletromagnética

A radiação eletromagnética é composta pela presença de campo magnético juntamente com o campo elétrico, que transporta energia através da propagação da mesma no vácuo. Ondas eletromagnéticas que possuem uma grande faixa de comprimentos de onda e frequências, estão situadas no espectro eletromagnético (SALICIO, 2016). As equações de Maxwell unificaram conceitos desenvolvidos por Faraday e Ampère, mostrando que através de quatro equações, as ondas eletromagnéticas são formadas pela junção desses campos, que são interdependentes (SUELA, 2016). Essas equações estão ilustradas através da Figura 2.

Figura 2 - Equações de Maxwell.

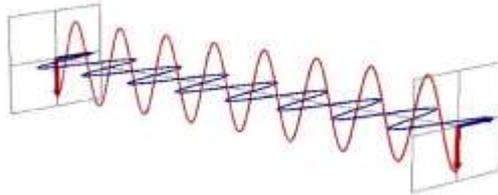
Forma Diferencial	Forma Integral	Nomenclatura	Meio material	Legenda
$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$	$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int \rho_v \cdot dv$	Lei de Gauss Elétrica	$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ $\vec{B} = \mu \vec{H}$ $\vec{J}_c = \sigma \vec{E}$	$\vec{E} \rightarrow$ Intensidade de campo elétrico $\vec{H} \rightarrow$ Intensidade de campo magnético $\vec{D} \rightarrow$ Densidade de fluxo elétrico $\vec{B} \rightarrow$ Densidade de fluxo magnético $\rho \rightarrow$ Densidade de carga elétrica $\vec{J} \rightarrow$ Densidade de corrente elétrica
$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	Lei de Gauss Magnética		
$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$	Lei de Faraday		
$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{s}$	Lei de Ampère		

Fonte: Adaptado de Suela, 2016.

Na propagação das ondas eletromagnéticas, os vetores de campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e campo magnético ( $\vec{B}$ ) são perpendiculares a direção da propagação e entre si (SALICIO, 2016). Na

Figura 3, observa-se que esses campos variam de forma senoidal com o tempo, onde o campo elétrico é representado pela onda vermelha e o campo eletromagnético pela azul.

Figura 3 - Variação dos campos elétrico e magnético em relação ao tempo.



Fonte: Salicio, 2016.

A sobreposição desses campos faz com haja uma interferência, que é típica de fenômenos oscilatórios, sendo que essa interferência pode ser construtiva ou destrutiva. A interferência construtiva acontece quando a amplitude da onda resultante é maior do que a amplitude das ondas que sofreram a sobreposição. Já a interferência destrutiva ocorre quando a amplitude da onda resultante é menor do que a amplitude das ondas iniciais (DARTORA *et al.*, 2011).

O aquecimento via ondas eletromagnéticas pode ocorrer por diferentes mecanismos, que variam de acordo com as características de cada amostra.

### **2.1.2 Mecanismos de aquecimento**

O aquecimento via micro-ondas acontece por três mecanismos, rotação de dipolo, vibração estrutural e condução iônica, que são mecanismos que realizam a transformação da energia eletromagnética em calor (SANSEVERINO, 2002).

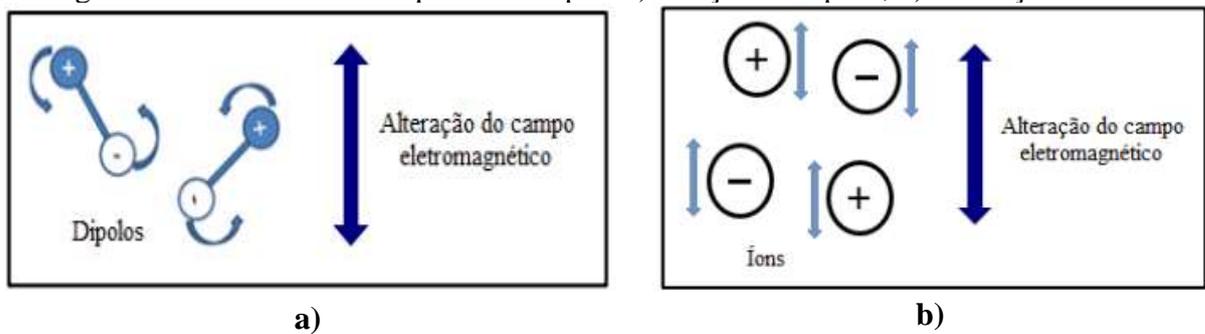
No aquecimento por rotação de dipolo, o aquecimento acontece, pois, as moléculas da amostra a ser submetida ao aquecimento possuem dipolos permanentes ou induzidos, que são reorganizados com a aplicação do campo elétrico aplicado pelo equipamento, o que pode ser observado na Figura 4. A energia absorvida para que ocorra a mudança de polaridade é dissipada e transformada em energia térmica, ou seja, é dissipada na forma de calor (SANSEVERINO, 2002). Na vibração estrutural, moléculas que estão presas na estrutura cristalina de um material sólido não sofrem rotação, ocorrendo assim, uma vibração das mesmas. A energia originada dessa vibração é dissipada em energia térmica.

Já na condução iônica, a aplicação de um campo eletromagnético na amostra a ser aquecida faz com que haja uma mudança nos íons da amostra, que colidem com outros íons e moléculas não iônicas, resultando em contínuas colisões, acarretando uma transformação da

energia resultante das colisões em calor (MOTA, 2018). Esse mecanismo pode ser observado na Figura 4.

O aquecimento de uma determinada amostra poderá ser homogêneo ou heterogêneo, dependendo da cavidade do forno micro-ondas utilizado.

Figura 4 - Mecanismos de aquecimento por: a) rotação de dipolo; b) condução iônica.



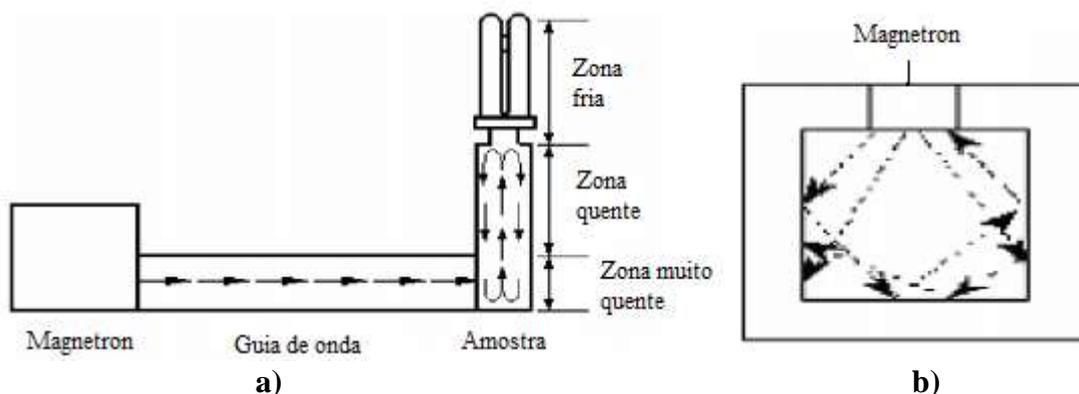
Fonte: Adaptado de Metaxas e Meredith, 1983.

### 2.1.3 Cavidades de fornos micro-ondas

A geometria e, conseqüentemente, as dimensões da cavidade de um forno micro-ondas influenciam diretamente nos perfis de temperatura, devido ao fato de que a energia eletromagnética é refletida para a amostra por meio das paredes da cavidade (SANTOS, 2013).

As cavidades de um forno micro-ondas podem ser do tipo monomodo ou multimodo e estão ilustradas na Figura 5. O tipo de cavidade a ser utilizada depende das características da amostra que será submetida ao aquecimento.

Figura 5 - Fornos micro-ondas com cavidades a) monomodo e b) multimodo.



Fonte: Adaptado de Alvarez *et al.*, 2008.

Como pode-se observar na Figura 5.a, a cavidade micro-ondas monomodo possui a particularidade de direcionar as micro-ondas geradas pelo magnetron diretamente na amostra, proporcionando uma zona muito quente de aquecimento, garantindo um aquecimento

homogêneo e eficiente. Portanto, essa cavidade permite definir exatamente onde a intensidade do campo elétrico aplicado é máxima. Porém, dependendo da quantidade de amostra a ser aquecida, esse tipo de cavidade pode apresentar menor eficiência em relação a outros tipos de cavidade (SANTOS, 2013).

A cavidade multimodo, como ilustrado na Figura 5.b, é maior comparada à cavidade monomodo e é revestida com um material condutor para que sejam refletidas as ondas eletromagnéticas. Isso faz com que a distribuição das micro-ondas não seja homogênea e a reflexão das ondas provoque um superaquecimento localizado, devido a fenômenos de interferência construtiva e destrutiva (MOTA, 2018). Porém esse tipo de cavidade é mais adaptável a diferentes tipos e formas de materiais em processos contínuo e em batelada, sendo, portanto, mais utilizada em escala industrial (SANTOS, 2013).

Sendo assim, um mapeamento dos *hotspots* de uma cavidade multimodo é necessário para que se consiga um aproveitamento melhor do equipamento, o que foi realizado por alguns estudos que serão citados na seção a seguir.

## 2.2 MAPEAMENTO DE *HOTSPOTS*

A utilização de um forno micro-ondas com cavidade multimodo é de extrema importância para o aquecimento de certos produtos, em escala laboratorial ou industrial, de uma forma rápida e prática. Portanto, se faz necessário o mapeamento dessas micro-ondas para descobrir os pontos de maior intensidade de campos eletromagnéticos para o melhor aquecimento.

É possível encontrar alguns trabalhos na literatura que desenvolveram técnicas para mapear a distribuição das ondas eletromagnéticas no interior das cavidades. Rosini *et al.* (2004) propuseram duas formas distintas para o mapeamento dos *hotspots*. A primeira foi por meio da utilização de *marshmallows*, que mudam seu volume ao serem aquecidos. Ao realizar os experimentos, os autores constataram que os locais onde havia *hotspots* causavam aumento do volume seguido da caramelização dos *marshmallows* e, em locais com baixa incidência de micro-ondas, os *marshmallows* permaneceram sem nenhuma alteração visível. A segunda forma de mapeamento consistiu na secagem de uma solução aquosa de cloreto de cobalto II ( $\text{CoCl}_2$ ) 4% m/v em um papel absorvente. A utilização do cloreto de cobalto II se justifica pelo fato de que quando hidratado, esse elemento possui coloração rosa e quando desidratado se torna azul, possibilitando um rápido mapeamento qualitativo. Após o aquecimento, foi possível a obtenção de um papel com diversas tonalidades, mostrando as regiões de *hotspots* com coloração azul e as regiões de baixa incidência de micro-ondas com coloração rosa.

Sebben *et al.* (2014) realizaram o mapeamento dos *hotspots* por meio da utilização de milho para pipoca, com um teor de umidade padronizado, espalhado sobre toda a superfície de uma cavidade multimodo. Após o aquecimento por um determinado tempo, os autores observaram uma não homogeneidade no aquecimento realizado na cavidade, que promoviam o estouro prematuro dos milhos. Um mapeamento semelhante foi realizado por Rocha (2017), que realizou o aquecimento e monitoramento da temperatura de béqueres com propano-1,2,3-triol ( $C_3H_8O_3$ ), constatando que houve uma heterogeneidade no aquecimento e que os *hotspots* mais pronunciados são aqueles gerados em uma região da cavidade próxima ao guia de onda.

Mehdizadeh (2010) apresentou um mapeamento dos *hotspots* no interior de uma cavidade multimodo por meio de uma folha resistiva, composta por um polímero e um material absorvente às micro-ondas, em contato com uma camada de papel termo sensível. À medida que a placa resistiva ia sendo submetida ao aquecimento pelas diferentes intensidades de campo eletromagnético, os *hotspots* eram mostrados como áreas escuras no papel termo sensível.

A pesquisa realizada por Mehdizadeh (2010) serviu como base para a execução deste trabalho, onde serão testados diferentes materiais absorvedores e um polímero acessível e de baixo custo.

A interação das ondas eletromagnéticas geradas pelo equipamento depende das propriedades dielétricas dos materiais que estão em análise, pois com base nessa propriedade é capaz de prever como determinado material se comporta quando aquecidos pelas micro-ondas.

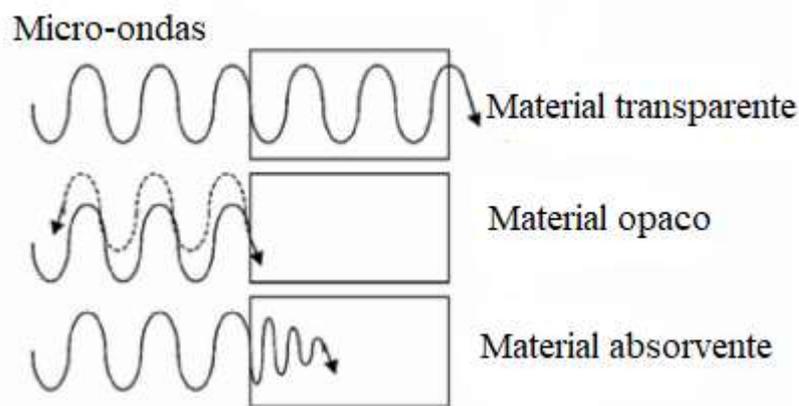
### **2.3 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DOS MATERIAIS**

Um material é considerado dielétrico quando apresenta, a nível molecular, uma estrutura de um dipolo elétrico, caracterizada por uma separação entre as cargas eletricamente carregadas de forma positiva e de forma negativa (CALLISTER, 2007). Portanto, para determinar se haverá boa interação das micro-ondas geradas pelo equipamento com o material em análise, se faz necessário o conhecimento das propriedades dielétricas do mesmo, pois quando as ondas eletromagnéticas são incididas, elas podem ser absorvidas, refletidas ou transmitidas pelo material que está sendo submetido ao processo de aquecimento (ROSSI, 2017).

Como pode ser observado na Figura 6, os materiais podem ser classificados em três tipos com relação ao seu comportamento perante as micro-ondas (SHANG *et al.*, 2006). Os

materiais considerados transparentes possuem baixa absorção das micro-ondas, exemplos desse material são os vidros, porcelanas e cristais. Os materiais considerados opacos são aqueles que refletem e não absorvem as micro-ondas incididas, por exemplo os metais. Já os materiais absorventes são aqueles que absorvem as micro-ondas incididas de acordo com o campo eletromagnético aplicado e com o fator de perda dielétrica, que é a dissipação da energia eletromagnética na forma de calor (ROSSI, 2017). Alguns materiais que se encaixam nessa classificação são o carvão ativado e o óxido de ferro.

Figura 6 - Interação de cada tipo de material com as micro-ondas.



Fonte: Adaptado de Shang *et al.*, 2006.

As Equações 1 e 2 mostram as propriedades dielétricas dos materiais que representa a interação das ondas eletromagnéticas com os materiais (MUJUMDAR, 2007).

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2)$$

Onde:

$\varepsilon^*$  = Permissividade elétrica relativa;

$\varepsilon'$  = Constante dielétrica relativa;

$j$  = Número imaginário;

$\varepsilon''$  = Fator de perda dielétrica relativa;

$\text{tg } \delta$  = Tangente de perda.

O comportamento do material frente às micro-ondas incididas é descrito pela permissividade elétrica relativa, que leva em consideração a constante dielétrica relativa, que é a capacidade de armazenamento de energia pelo material, um número imaginário e o fator

de perda dielétrica, que determina a eficiência de dissipação da energia absorvida em calor (MOTA, 2018).

Já a tangente de perda é considerada uma estimativa de como a energia eletromagnética absorvida pelo material é dissipada na forma de calor. Um material considerado transparente possui o valor de tangente de perda menor do que 0,1, e um material absorvente possui esse valor maior do que 0,1. Materiais opacos possuem tangente de perda igual a zero pois não absorvem a energia eletromagnética que é incidida sobre eles para posterior dissipação em calor (ROSSI, 2017).

A Tabela 1 mostra exemplos de materiais considerados transparentes e suas constantes dielétricas, fatores de perda dielétrica relativa e rigidezes dielétricas. A rigidez dielétrica se caracteriza pela possibilidade de um material isolante se tornar um material condutor com a aplicação de altos valores de campo elétrico.

Tabela 1 - Exemplos de materiais transparentes e suas propriedades dielétricas.

<b>Material</b>	<b>Constante dielétrica relativa (<math>\epsilon'</math>)</b>	<b>Fator de perda dielétrica relativa (<math>\epsilon''</math>)</b>	<b>Rigidez dielétrica (kV/mm)</b>
Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	3,8-5,4	0,0015	15-25
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8,8-10,1	0,003-0,02	10
Vidro	4,0-8,0	0,0005-0,01	7,8-13,2
Mulita	6,2-6,8	0,03-0,034	7,8
Zircônia (ZrO <sub>2</sub> )	12,0	0,12	5,0

Fonte: Adaptado de Mehdizadeh, 2010.

Observa-se que os materiais transparentes possuem baixo fator de perda dielétrica, o que faz com que não absorvam as micro-ondas incididas, pois esse fator se caracteriza pela dissipação da energia elétrica em energia térmica, ou seja, calor.

Os materiais utilizados para a confecção das placas resistivas para realização do mapeamento dos pontos de aquecimento foram o carvão ativado, o óxido de ferro (III) e a cola branca (acetato de polivinila), sendo que cada um será abordado a seguir.

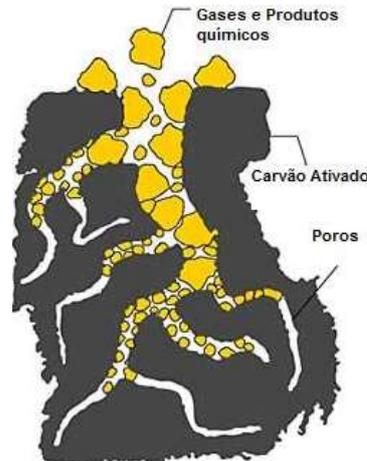
### **2.3.1 Carvão ativado**

O carvão ativado possui uma estrutura cristalina composta por heteroátomos, com oxigênio ligado a átomos de carbono (HEYLMANN, 2015). Esse material pode ser

encontrado na forma de pó ou granulado. Sua obtenção é proveniente da carbonização de biomassas e da utilização de reagentes para sua ativação.

A estrutura física de um determinado material possui influência direta nas propriedades dielétricas do mesmo, sendo assim, a porosidade influencia na absorção da energia eletromagnética (NUNES, 2009). Como pode ser observado na Figura 7, o carvão ativado possui estrutura altamente porosa e elevada área superficial, o que lhe confere uma alta capacidade de adsorção de líquidos e gases (HEYLMANN, 2015) e boa absorção de energia eletromagnética, mais especificamente as micro-ondas. Por ser composto majoritariamente por carbono, que é considerado um bom condutor de eletricidade, esse material também é capaz de converter, por meio da irradiação, a energia eletromagnética em calor (SALEMA,2011).

Figura 7 – Estrutura do carvão ativado.



Fonte: Snatural Ambiente, 2021.

Sendo assim, o carvão ativado foi utilizado na confecção de uma das placas resistivas para avaliação de sua eficiência no mapeamento dos principais pontos de aquecimento do equipamento.

### 2.3.2 Óxido de ferro (III)

Devido à sua abundância na natureza e facilidade de sintetização, existem diversos tipos de óxidos de ferro. Particularmente o óxido de ferro (III), conhecido como hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), composto por cerca de 70% de ferro e o restante de oxigênio, é considerado o principal minério de ferro de ocorrência natural (JEZINI, 2015). Esse elemento tem como característica a cor avermelhada.

A hematita ou o óxido de ferro (III) possui massa específica em torno de  $5,3 \text{ g/cm}^3$  e possui duas formas cristalinas distintas, a mais comumente encontrada é a hexagonal compacta ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$ ) e a outra forma é a romboédrica ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-}\gamma$ ).

A estrutura cristalina hexagonal compacta confere ao óxido de ferro (III) a característica de um semicondutor intrínseco, apresentando alta anisotropia em sua condutividade (JEZINI, 2015). Ao ser aquecido, o óxido de ferro (III) se comporta como um termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*), ou seja, sua resistência diminui à medida em que o aquecimento ocorre (LANDFREDI *et al.*, 2008). A energia eletromagnética é absorvida e convertida em calor por meio da agitação molecular.

Portanto, esse óxido foi utilizado na confecção de uma das placas resistivas para avaliação da sua influência no mapeamento dos *hotspots*.

### **2.3.3 Acetato de polivinila**

O acetato de polivinila ( $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2$ )<sub>n</sub> é um polímero amorfo que oferece boa adesão à maioria das superfícies devido à formação de um filme polimérico, esse polímero é utilizado na composição da cola de madeira e escolar (SANTOS, 2014).

Não-tóxico, neutro, com baixa condutividade térmica, sem odor e destituído de qualquer sabor, o acetato de polivinila possui propriedades diretamente dependentes da sua massa molar. Com um aumento da mesma, as propriedades desse polímero variam de forma a apresentar características de um líquido viscoso à um sólido com baixa temperatura de fusão. Devido a essas características, o acetato de polivinila também é utilizado em produtos como tintas, adesivos, papéis e tecidos (MESQUITA, 2002).

Para a confecção das placas resistivas será utilizada uma cola escolar branca com acetato de polivinila em sua composição, por ser um material transparente, ou seja, com baixa absorção de energia eletromagnética. O objetivo de sua utilização é o fornecimento de adesão ao carvão ativado e ao óxido de ferro (III), os quais irão absorver e acumular as micro-ondas para a adequada realização do mapeamento dos principais pontos de aquecimento do equipamento.

É necessária a realização da caracterização de algumas propriedades dos materiais utilizados nas placas resistivas que influenciam diretamente no aquecimento e, conseqüentemente, no mapeamento dos *hotspots*.

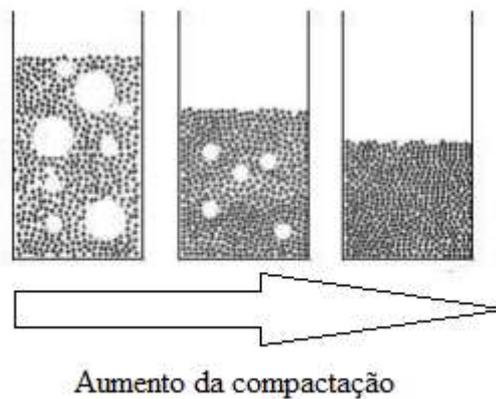
## 2.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

A caracterização de materiais é de extrema importância para o conhecimento de propriedades físicas e químicas, sendo possível avaliar se essas características estão de acordo com a literatura e para a sua devida aplicação.

### 2.4.1 Densidade bulk

Em determinados tipos de indústrias, os materiais particulados sofrem compactação durante certas operações, como ilustrado na Figura 8, que mostra um aumento da compactação de um particulado à medida que sofre algum tipo de vibração mecânica (SOUSA, 2014).

Figura 8 - Compactação de um particulado submetido a algum tipo de vibração mecânica.



Fonte: Adaptado de Mallol, 2018.

A densidade *bulk* ( $\rho_b$ ) leva em consideração a forma de compactação dessas partículas e pode ser calculada pela Equação 3. Esta equação leva em consideração a razão entre a massa do material particulado e uma média entre volume do particulado antes e após sua compactação no recipiente ( $\bar{V}$ ). A norma ABNT NBR ISO 3852:2009 (Minérios de ferro como insumo para alto – forno e redução direta – Determinação da densidade a granel) é uma referência utilizada para determinação desse tipo de densidade.

$$\rho_b = \frac{(m_{p+r} - m_r)}{\bar{V}} \quad (3)$$

Onde:

$\rho_b$  = Densidade *bulk*;

$m_{p+r}$  = Massa do particulado mais a massa do recipiente;

$m_r$  = Massa do recipiente;

$\bar{V}$  = Média do volume do particulado antes e após sua compactação no recipiente.

A constante dielétrica dos materiais sofre influência direta da densidade *bulk*, influenciando, conseqüentemente, comportamento de determinado material perante a sua capacidade de absorver e armazenar energia e a capacidade dissipação dessa mesma energia em calor (ULABY *et al.*, 1990).

#### 2.4.2 Densidade real

A densidade real é a densidade calculada apenas do volume de particulado, isento do espaço vazio entre os grãos da amostra. Essa propriedade é descoberta pela técnica de picnometria, que utiliza a água como substância padrão para tal finalidade. A norma ABNT NBR ISO 5018:2014 (Materiais refratários – Determinação da densidade real) é a referência utilizada para determinação desse tipo de densidade.

Para tal procedimento, primeiramente é feita a calibração do picnômetro e o volume do picnômetro é calculado pelas Equações 4 e 5.

$$m_{\text{água}} = m_{\text{pic+água}} - m_{\text{pic vazio}} \quad (4)$$

$$V_{\text{água calibração}} = \frac{m_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \quad (5)$$

Onde:

$m_{\text{água}}$  = Massa de água;

$m_{\text{pic+água}}$  = Massa do picnômetro mais água;

$m_{\text{pic vazio}}$  = Massa do picnômetro vazio;

$V_{\text{água calibração}}$  = Volume da água de calibração do picnômetro;

$\rho_{\text{água}}$  = Massa específica da água.

Após o procedimento de calibração, a água contida no picnômetro é descartada e realizasse o procedimento de determinação da densidade real da amostra. Os cálculos para determinação da massa e volume da amostra e, conseqüentemente, densidade real da amostra são mostradas pelas Equações 6, 7, 8, 9 e 10.

$$m_{\text{amostra}} = m_{\text{pic+gotas+amostra}} - m_{\text{pic+gotas}} \quad (6)$$

$$m_{\text{água}} = m_{\text{pic+gotas+amostra+água}} - m_{\text{amostra}} - m_{\text{pic vazio}} \quad (7)$$

$$V_{\text{água}} = \frac{m_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \quad (8)$$

$$V_{\text{amostra}} = V_{\text{água calibração}} - V_{\text{água}} \quad (9)$$

$$\rho_{\text{real}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}} \quad (10)$$

Onde:

$m_{\text{amostra}}$  = Massa da amostra;

$m_{\text{pic+gotas+amostra}}$  = Massa do picnômetro mais gotas de água mais amostra;

$m_{\text{pic+gotas}}$  = Massa do picnômetro mais gotas de água;

$m_{\text{pic+gotas+amostra+água}}$  = Massa do picnômetro mais gotas mais amostra mais água;

$V_{\text{água}}$  = Volume da água;

$V_{\text{amostra}}$  = Volume da amostra;

$\rho_{\text{real}}$  = Densidade real.

### 2.4.3 Análise granulométrica

O conhecimento das propriedades morfológicas de um particulado é de extrema importância na compreensão dos fenômenos que ocorrem nas operações unitárias. A norma ABNT NBR 7181:2016 (Solo – Análise granulométrica) e ABNT NBR NM-ISO 2395:1997 (Peneiras de ensaio e ensaio de peneiramento – Vocabulário) são referências que são utilizadas para realização de uma análise granulométrica.

A análise granulométrica pode ser definida como a análise de distribuição de tamanhos de um conjunto de partículas. O peneiramento é considerado um dos métodos mais antigos de obtenção de uma análise granulométrica, sendo que esse processo classifica as partículas por tamanho. O peneiramento pode ser realizado por via seca ou por via úmida. Por via seca, com auxílio de um agitador eletromagnético, as partículas giram sobre a superfície da tela das peneiras e são expostas às aberturas das mesmas por diversas vezes; dependendo do tamanho da partícula, a mesma ficará retida em determinada peneira ou passará para a próxima até chegar ao fundo do conjunto de peneiras (SAMPAIO, 2021).

Para realização do peneiramento em escala laboratorial por via seca é necessária a utilização de peneiras que são padronizadas e agrupadas em ordem decrescente de abertura (*mesh*), de baixo para cima, ou em ordem crescente de diâmetro da peneira ( $\mu\text{m}$ ).

Com parâmetros de fração mássica e diâmetro médio das peneiras utilizadas, é possível estimar o diâmetro médio das partículas pela Equação 11.

$$dps = \frac{1}{\sum_i^n \left( \frac{X_i}{\bar{D}_i} \right)} \quad (11)$$

Onde:

$dps$  = Diâmetro médio das partículas ou Diâmetro de Sauter;

$X_i$  = Fração mássica acumulada de partículas retidas na peneira  $i$ ;

$\bar{D}_i$  = Diâmetro médio de abertura das peneiras utilizadas.

Também pode-se aplicar modelos matemáticos como o de Gates, Gaudin e Schumann (GGS) e o de Rosin, Rammler e Bennet (RRB) para determinação do melhor modelo que descreve a distribuição granulométrica do material.

#### 2.4.3.1 Modelo GGS

A Equação deste modelo está representada pela Equação 12.

$$X_i = \left( \frac{D_i}{k} \right)^m \quad (12)$$

Onde:

$X_i$  = Fração mássica acumulada de partículas retidas na peneira  $i$ ;

$D_i$  = Diâmetro de abertura da peneira  $i$ ;

$k$  = Valor do maior diâmetro,  $D_{100}$ , de partículas arrastadas para  $X=1$ ;

$m$  = Coeficiente angular obtido através da linearização da Equação 12.

Para obtenção dos coeficientes  $k$  e  $m$  da Equação do modelo, é necessário realizar uma linearização da Equação 12, acarretando na Equação 13, seguida de uma regressão linear dos dados obtidos na análise granulométrica realizada pelo peneiramento (CREMASCO, 2012).

$$\ln X_i = m \ln D_i - m \ln k \quad (13)$$

Para valores de  $m > 1$ , o diâmetro médio das partículas, ou diâmetro de Sauter, pode ser calculado pela Equação 14 (CREMASCO, 2012).

$$d_{ps} = k \left( \frac{m-1}{m} \right) \quad (14)$$

#### 2.4.3.2 Modelo RRB

A Equação 15 é a Equação característica do modelo RRB.

$$X_i = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D_i}{D'}\right)^n\right] \quad (15)$$

Onde:

$D'$  = Parâmetro referente ao diâmetro  $D_{63,2}$  para  $X = 63,2$ ;

$n$  = Coeficiente angular obtido através da linearização da Equação 15.

De forma similar ao modelo GGS, é necessária uma linearização da Equação 15 para obtenção dos parâmetros  $D'$  e  $n$ , pela Equação 16.

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-X_i}\right)\right] = n[\ln D_i - \ln D'] \quad (16)$$

Para os valores de  $n > 1$ , o diâmetro médio das partículas, ou diâmetro de Sauter, pode ser calculado pela Equação 17 (CREMASCO, 2012).

$$d_{ps} = \frac{D'}{\Gamma\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \quad (17)$$

Onde:

$\Gamma$  = Função Gama.

Para obtenção da Função Gama, que é uma função de distribuição contínua de probabilidade, se faz necessário a utilização da Equação 18, que leva em consideração valores tabelados para a realização de seu cálculo (CREMASCO, 2012).

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{r-1} dx \quad (18)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos detalhes a respeito do forno micro-ondas, da caracterização realizada dos materiais utilizados e da confecção das placas resistivas para a realização do mapeamento dos principais pontos de aquecimento.

#### 3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL

A Figura 9 ilustra o forno micro-ondas em que foi realizado o mapeamento tridimensional dos pontos de aquecimento. O forno da marca Electrolux possui uma potência total de 1500 Watts (W), sendo que a potência do magnetron é de 1000 W. Suas dimensões externas são de 52 centímetros (cm) de comprimento, 42,2 cm de largura, 32,5 cm de altura e um volume de 31 litros (L). Esse equipamento é utilizado em pesquisas científicas no Laboratório de Sistemas Térmicos (LOST) da Universidade Federal de Lavras.

Figura 9 - Unidade experimental em que foi realizado o mapeamento.



Fonte: Autor (2021).

O equipamento possui uma cavidade multimodo com as dimensões de 33 cm de comprimento, 33 cm de largura e 19 cm de altura. Essa cavidade pode ser observada na Figura 10. O prato rotativo foi retirado de dentro da cavidade para realização dos experimentos.

Foram feitas a caracterização dos particulados utilizados na confecção das placas resistivas, para determinação de algumas propriedades como densidade *bulk* e densidade real, e uma análise granulométrica para se conhecer o diâmetro médio de partícula de cada particulado.

Figura 10 - Cavidade multimodo do forno micro-ondas.



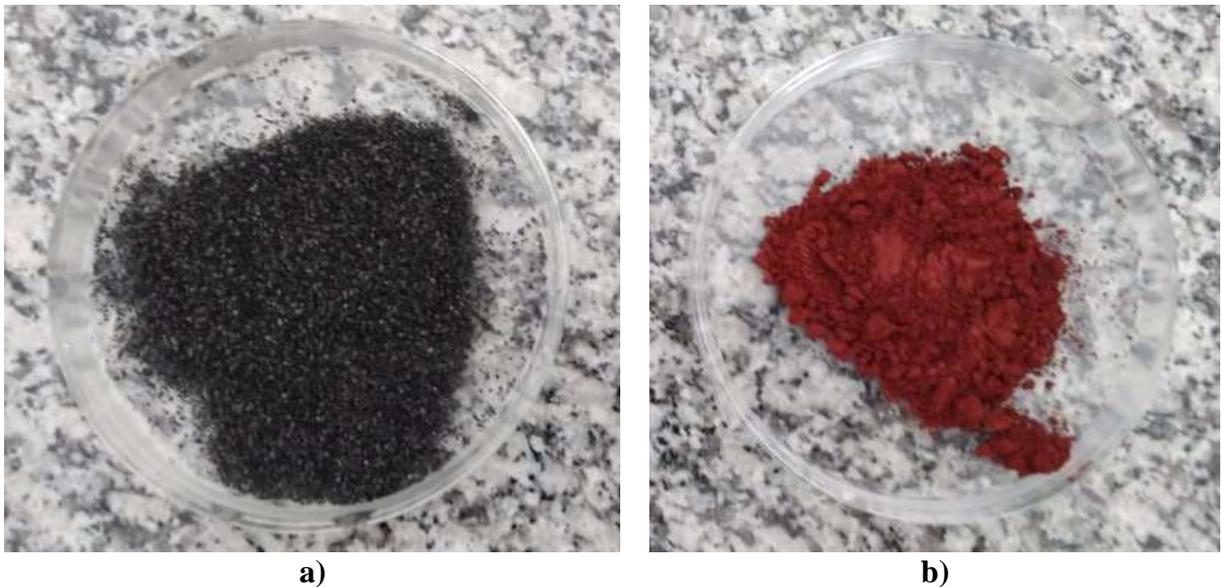
Fonte: Autor (2021).

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na confecção das placas resistivas foram o carvão ativado, o óxido de ferro (III) e a cola branca (acetato de polivinila).

O carvão ativado e o óxido de ferro (III) utilizados estão ilustrados na Figura 11, sendo eles reagentes P.A. obtidos em projetos anteriores. A cola branca da marca Maxi-Cola foi adquirida no comércio local e sua imagem é apresentada na Figura 12.

Figura 11 – Amostras de a) carvão ativado e b) óxido de ferro (III), utilizados no trabalho.



Fonte: Autor (2021).

Figura 12 - Cola escolar utilizada no trabalho.



Fonte: Autor (2021).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO

#### 3.3.1 *Densidade bulk*

Para obtenção da densidade *bulk* do carvão ativado e do óxido de ferro foi utilizada a norma ABNT NBR ISO 3852:2009, conforme foi apresentada na Seção 2.4.1.

Primeiramente pesou-se uma proveta de 100 ml, para a obtenção da massa do recipiente. Em seguida, colocou-se uma certa quantidade de particulado na proveta e aferiu-se a massa do conjunto recipiente/particulado e o volume ocupado pela amostra dentro do recipiente. Após a aquisição desses dados, foi realizada a compactação do particulado dentro da proveta via vibrações mecânicas e, em seguida, foi aferido o volume que o particulado ocupava no recipiente após a compactação.

Sendo assim, com a obtenção de todos os parâmetros necessários, foi possível a determinação da densidade *bulk* pela Equação 3.

#### 3.3.2 *Densidade real*

De forma similar ao que foi realizado com a densidade *bulk*, foi utilizada a norma ABNT NBR ISO 5018:2014 para determinar a densidade real, conforme foi apresentada na Seção 2.4.2.

Antes de realizar o procedimento para o cálculo da densidade real, foi realizada a calibração do picnômetro por meio da aferição da massa do picnômetro e da massa do conjunto picnômetro/água para chegar no valor da massa de água dentro do picnômetro, conforme a Equação 4. Com o valor da massa de água e conhecendo sua massa específica à temperatura ambiente, foi possível pela Equação 5, obter o volume calibrado do picnômetro.

Feita a calibração, a água que estava dentro do picnômetro foi descartada e foi aferida a massa do conjunto picnômetro/gotas de água que ficaram retidas na vidraria. Em seguida uma certa quantidade de particulado foi adicionada ao picnômetro e aferiu-se a massa do conjunto picnômetro/gotas de água/amostra. Utilizando a Equação 6, realizou-se o cálculo da massa da amostra.

De forma similar ao que já foi realizado, foi adicionado água no picnômetro e aferiu-se a massa do conjunto picnômetro/gotas de água/amostra/água. Assim, obteve-se a massa de água adicionada pela Equação 7, com esse valor foi possível o cálculo do volume de água utilizada pela Equação 8.

Sendo assim, com a diferença entre o volume de água da calibração do picnômetro e o volume da água utilizada no experimento, tem-se o valor do volume do particulado pela Equação 9. Por fim, tendo os valores da massa e do volume da amostra, é possível o cálculo da densidade real utilizando a Equação 10.

### ***3.3.3 Análise granulométrica***

Para realização da análise granulométrica fez-se o peneiramento do carvão ativado e do óxido de ferro por 10 minutos.

Para o carvão ativado foi utilizado o seguinte conjunto de peneiras (em ordem crescente de diâmetro do fundo para o topo): fundo, 106  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 1400  $\mu\text{m}$  e 1800  $\mu\text{m}$ . Como o óxido de ferro é mais fino comparado ao carvão ativado, o conjunto de peneiras para realização do seu peneiramento foi o seguinte: fundo, 45  $\mu\text{m}$ , 106  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  e 1400  $\mu\text{m}$ .

Primeiramente, cada peneira foi pesada para obtenção de sua massa sem particulado. Em seguida, uma amostra do particulado foi colocada na peneira de topo, neste trabalho utilizou-se amostras de 100,59 g de carvão ativado e 99,45 g de óxido de ferro (III). O peneiramento foi realizado e ao fim, cada peneira foi retirada do agitador eletromagnético para aferição da massa do conjunto peneira/particulado. Com a massa em cada peneira, foi possível descobrir quanto de particulado ficou retido. Sendo assim, foi possível calcular o diâmetro médio das partículas e aplicar os modelos matemáticos de distribuição granulométrica, a fim e determinar qual modelo é o mais adequado.

A Figura 13 ilustra o agitador eletromagnético utilizado com um conjunto determinado de peneiras.

Figura 13 - Agitador de peneiras para análise granulométrica.



Fonte: Autor (2021).

### 3.4 CONFECÇÃO DAS PLACAS RESISTIVAS

Foram confeccionadas duas placas resistivas, cada uma com os mesmos teores de materiais, com o objetivo de avaliar a influência do carvão ativado e do óxido de ferro (III) na qualidade das imagens dos *hotspots*.

Primeiramente, foi realizada a mistura de 648 gramas (g) de cola branca e 72 g de particulado, totalizando uma massa de 720 g para cada placa resistiva, com a proporção de 90 por cento (%) de cola e 10 % de particulado. Essa mistura foi colocada em uma placa de vidro com 6 milímetros (mm) de espessura e com dimensões próximas às dimensões da cavidade, e colocou-se papelão em volta para servir como molde e para que a mistura não vazasse. A solução depositada na placa pode ser observada na Figura 14.

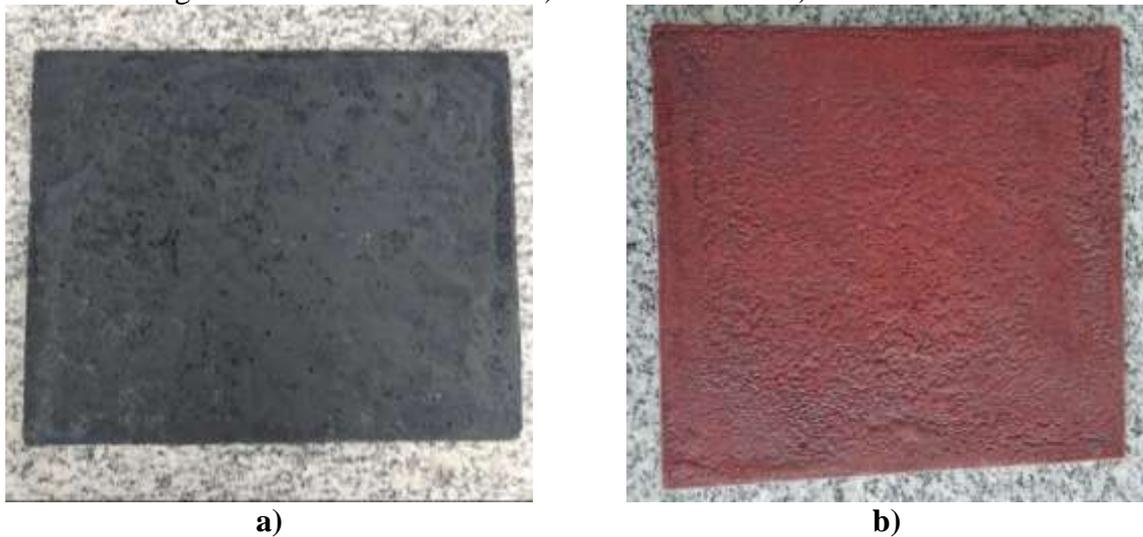
Em seguida, o conjunto ficou na estufa à temperatura ambiente por 48 horas, que foi o tempo de cura da cola, que endureceu por reticulação, ou seja, formação de ligações cruzadas das cadeias poliméricas do polímero, no caso da cola, o acetato de polivinila. Após esse período, o conjunto foi retirado da estufa, os moldes de papelão foram retirados e foi realizado o lixamento das placas com auxílio de uma lixadeira elétrica. Após realização desse procedimento, as placas resistivas estavam prontas para utilização. A Figura 15 mostra as placas resistivas de carvão ativado e óxido de ferro após todo o procedimento de preparação.

Figura 14 – Solução de carvão ativado e cola branca depositada na placa.



Fonte: Autor (2021).

Figura 15 - Placa resistiva de a) carvão ativado e b) óxido de ferro.

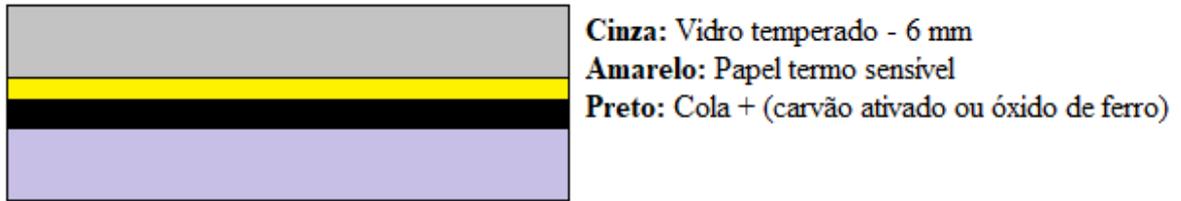


Fonte: Autor (2021).

### 3.5 TÉCNICA DE MAPEAMENTO DOS PONTOS DE AQUECIMENTO

A técnica de mapeamento dos pontos de aquecimento na cavidade desenvolvida nesse trabalho se baseia na utilização de uma placa resistiva, para absorção das micro-ondas e conversão das mesmas em calor, e de um papel termo sensível que muda sua tonalidade ao atingir uma temperatura próxima a 92 °C (MEHDIZADEH, 2010). Esse conjunto é prensado por duas placas de vidro de 6 mm de espessura para garantir um bom contato entre o papel termo sensível e a placa resistiva, assim como mostrado no esquema da Figura 16. A Figura 17 mostra a placa resistiva que foi utilizada nos experimentos.

Figura 16 - Esquema das camadas de materiais formando a placa resistiva.



Fonte: Autor (2021).

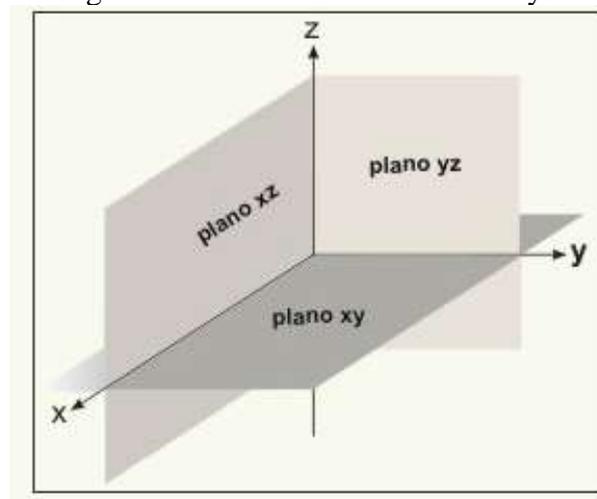
Figura 17 – Placa resistiva utilizada nos experimentos.



Fonte: Autor (2021).

Para realização do mapeamento tridimensional da cavidade, foi definida a orientação dos planos conforme a Figura 18. A base da cavidade do forno micro-ondas está situada no plano  $xy$ , o fundo situa-se no plano  $yz$  e, conseqüentemente, as laterais da cavidade estão perpendiculares ao eixo  $xz$ .

Figura 18 - Planos de coordenadas  $xyz$ .



Fonte: Bizelli, 2021.

Durante os ensaios, para realização do mapeamento tridimensional dos pontos de aquecimento, foi realizada a variação do posicionamento da placa com relação à altura (plano xy) e da posição lateral (planos xz e yz), com o auxílio de béqueres de vidro e cacinhos de porcelana. Por serem materiais transparentes às micro-ondas, a presença dos béqueres e dos cacinhos não interferiram no aquecimento e na distribuição das ondas eletromagnéticas dentro da cavidade.

Para o mapeamento dos pontos de aquecimento no plano xy, considerando que a altura interna da cavidade do equipamento é de 19 cm, foram avaliadas 6 alturas, sendo elas: 0 cm (base da cavidade), 6,2 cm, 9,5 cm, 12,2 cm, 15,2 cm e 18,4 cm. Essas alturas foram estipuladas de acordo com os béqueres disponíveis para variação das posições.

Para o mapeamento dos *hotspots* para o plano xz, foram avaliadas 6 posições. Foi definida a parte esquerda da cavidade como ponto inicial para o mapeamento e, a partir dela, foram mapeadas as demais posições em sequência. As posições mapeadas foram: 0 cm (parte esquerda da cavidade), 5,5 cm, 11 cm, 16,5 cm, 22 cm e 27,5 cm.

Assim como realizado no plano xz, para o mapeamento dos *hotspots* no plano yz foram avaliadas 6 posições. Foi definida a parte que fica próxima à porta do equipamento como ponto inicial para o mapeamento e, a partir dela, foram mapeadas as demais posições em sequência. As posições mapeadas foram: 0 cm (próxima a porta do equipamento), 5,5 cm, 11 cm, 16,5 cm, 22 cm e 27,5 cm (próxima ao fundo da cavidade).

O tempo de aquecimento para a placa resistiva de carvão ativado foi estabelecido em 40 s, tempo suficiente para identificação dos principais pontos de aquecimento. Já para a placa composta por óxido de ferro o tempo foi de 60 s. A diferença de tempo de uma placa resistiva para a outra foi devido ao fato de a placa composta por óxido de ferro precisar de um maior tempo para que os pontos de aquecimento fossem identificados.

Após o aquecimento, o papel termo sensível foi retirado da placa resistiva. A Figura 19 mostra como o papel termo sensível permanecia após o aquecimento micro-ondas.

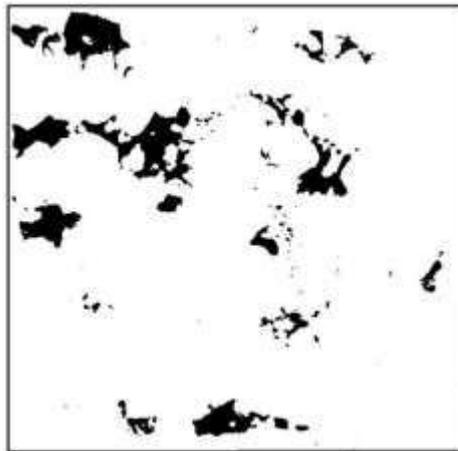
Observou-se que para uma melhor qualidade de análise dos pontos de aquecimento, era necessário que o papel termo sensível fosse digitalizado e fosse realizado um tratamento das imagens para destacar o local dos pontos de aquecimento, processo que foi feito utilizando o *software ImageJ*. As ferramentas do *software* utilizadas para esse tratamento foram as seguintes: *Image > Type > 8-bit; Process > Binary > Make Binary*. Os comandos apresentados foram aplicados proporcionando uma diferenciação entre tons claros e escuros. Dessa forma, as imagens dos pontos de aquecimento ficaram com maior qualidade para realização da análise, o que pode ser observado na Figura 20.

Figura 19 - Papel termo sensível após o aquecimento.



Fonte: Autor (2021).

Figura 20 - Papel termo sensível após o tratamento pelo *software* ImageJ.



Fonte: Autor (2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foram analisados os resultados de caracterização dos particulados utilizados na confecção das placas resistivas e a influência dos mesmos no mapeamento tridimensional da cavidade multimodo do forno micro-ondas utilizado neste trabalho. Foi analisado também os posicionamentos dos *hotspots* entre os planos tridimensionais, a fim de verificar os melhores locais de aquecimento no interior da cavidade.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Com a realização dos procedimentos experimentais para determinação da densidade *bulk* e densidade aparente, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 2 para o carvão ativado e para o óxido de ferro (III). Os procedimentos foram realizados em triplicata e obteve-se uma média dos valores para que o erro de execução pudesse ser minimizado.

Tabela 2 - Resultados experimentais para densidade *bulk* e densidade real.

	Densidade <i>bulk</i> (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Carvão ativado</b>	0,511±0,00497	1,205±0,002
<b>Óxido de ferro (III)</b>	0,630±0,00438	4,312±0,001

Fonte: Autor (2021).

Percebe-se que a densidade *bulk* do óxido de ferro é maior em comparação à densidade *bulk* do carvão ativado, assim, conclui-se que o óxido de ferro (III) possui uma compactação melhor do que o carvão ativado.

Com relação à densidade real, o valor encontrado para o óxido de ferro (III) também foi superior ao encontrado para o carvão ativado, o que pode ser explicado pela análise da massa molar dos elementos, pois a densidade é proporcional à mesma. Sendo assim, pode-se estimar que a densidade real do óxido de ferro (III) seja superior a densidade real do carvão ativado, pois o carvão ativado é composto majoritariamente por carbono e esse elemento possui menor massa molar comparado ao ferro.

Para realização da análise granulométrica do carvão ativado e do óxido de ferro (III), realizou-se o peneiramento dos particulados por 10 minutos.

O peneiramento foi realizado para o carvão ativado e, com as quantidades que ficaram retidas em cada peneira, foi possível a construção da Tabela 3, sendo que o diâmetro da peneira de topo (-D<sub>i</sub>), o diâmetro da peneira de fundo (+D<sub>i</sub>), a fração mássica retida em cada peneira (x<sub>i</sub>) e a fração mássica acumulativa (X<sub>i</sub>) são resultados necessários para verificação do

modelo de distribuição granulométrica que melhor descreve a análise, obtido a partir de linearizações e regressões.

Tabela 3 – Resultados do peneiramento para o carvão ativado.

<b>Peneiras (<i>mesh</i>)</b>	<b>-Di (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>+Di (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>\overline{D}_i</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>x_i</math> (retido)</b>	<b><math>X_i</math> (acumulativo)</b>
(-9,67+12)	1800	1400	1600	0	1
(-12+32)	1400	500	950	0,00089	0,99911
(-32+60)	500	250	375	0,7315	0,26761
(-60+150)	250	106	178	0,2546	0,01301
(-150)	fundo	fundo	fundo	0,0129	0,00011

Fonte: Autor (2021).

Para o modelo de distribuição granulométrica GGS, obteve-se um coeficiente de determinação de 0,92 e, para o modelo RRB o valor foi 0,99. Sendo assim, o modelo RRB descreve melhor a análise granulométrica, pois o valor encontrado está mais próximo de 1, o que implica que esse modelo se ajustou melhor aos dados da amostra.

O modelo RRB para o carvão ativado está representado pela Equação 19, já inseridos os valores experimentais de  $n = 3,74$  e  $D' = 544,28 \mu\text{m}$ .

$$X_i = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D_i}{544,28} \right)^{3,74} \right] \quad (19)$$

Utilizando a Equação 11, foi possível determinar o diâmetro médio das partículas de carvão ativado, resultando em um valor de  $405,94 \mu\text{m}$ .

Também foi realizado o peneiramento para o óxido de ferro (III), obtendo-se a quantidade de óxido de ferro (III) retida em cada peneira. Com isso, foi possível a construção da Tabela 4, para verificação de qual modelo de distribuição granulométrica descreve melhor a análise.

Tabela 4 – Resultados do peneiramento do óxido de ferro (III).

<b>Peneiras (<i>mesh</i>)</b>	<b>-Di (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>+Di (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>\overline{D}_i</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>x_i</math> (retido)</b>	<b><math>X_i</math> (acumulativo)</b>
(-12+32)	212	500	356	0,3419	0,6581
(-32+60)	500	250	375	0,6170	0,0411
(-60+150)	250	106	178	0,0220	0,0191
(-150+325)	106	45	75,5	0,0180	0,0011
(-325)	fundo	fundo	-	0,0003	0,0008

Fonte: Autor (2021).

Para o modelo de distribuição granulométrica GGS, obteve-se um coeficiente de determinação de 0,79 e, para o modelo de distribuição granulométrica RRB, obteve-se um valor de 0,76. Portanto, o modelo GGS descreve melhor os dados para o óxido de ferro (III).

O modelo GGS para o carvão ativado está representado pela Equação 20, já inseridos os valores experimentais de  $m = 3,23$  e  $k = 650,38 \mu\text{m}$ .

$$X_i = \left( \frac{D_i}{650,38} \right)^{3,12} \quad (20)$$

Com a Equação 11 foi possível determinar o diâmetro médio de partículas de óxido de ferro (III), resultando em um valor de  $480,75 \mu\text{m}$ .

Realizadas as caracterizações que foram propostas, a seguir será apresentado o mapeamento tridimensional dos principais pontos de aquecimento do forno micro-ondas, utilizando as placas resistivas de carvão ativado/cola branca e óxido de ferro (III)/cola branca.

## 4.2 MAPEAMENTO DA PLACA CARVÃO ATIVADO/COLA BRANCA

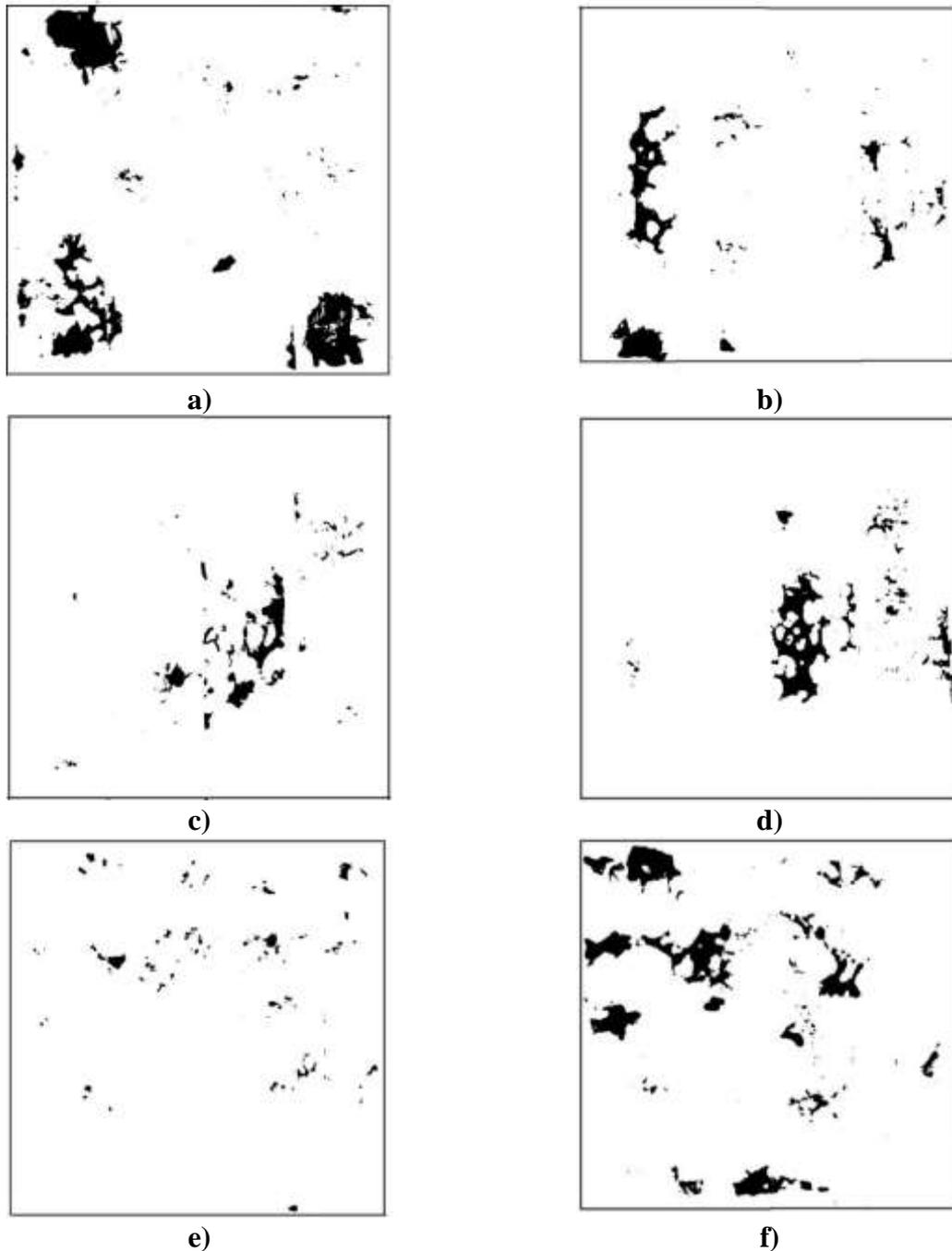
Foi realizado o mapeamento tridimensional da cavidade do forno micro-ondas, realizando o mapeamento do plano xy através de uma variação de altura e dos planos xz e yz através de uma variação de posição lateral.

### 4.2.1 Plano xy

A Figura 21 mostra os perfis de pontos de aquecimento obtidos variando a altura da placa resistiva no plano xy.

Analisando os pontos de aquecimento de forma individual, percebe-se um padrão na posição dos mesmos à medida em que se aumenta a altura da placa resistiva. Para as alturas menores (0 e 6,2 cm) há uma maior quantidade de pontos de aquecimento nas bordas e quase inexistência de pontos de aquecimento no centro da placa resistiva. Caso seja desejado um aquecimento rápido de determinada amostra no centro, essas alturas não são indicadas. Para as alturas intermediárias 9,5 e 12,2 cm, a distribuição dos pontos de aquecimento muda, os pontos estão situados no centro da placa resistiva, o que é desejável para o aquecimento de qualquer material, pois, geralmente amostras submetidas ao aquecimento via forno micro-ondas são posicionadas no centro da cavidade do equipamento. Para as alturas maiores 15,2 e 18,4 cm, os pontos de aquecimento são mais uniformes, podendo ser observados tanto nas bordas quanto no centro da placa resistiva, porém com menor presença na parte central.

Figura 21 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para alturas (plano xy) de a) 0 cm, b) 6,2 cm, c) 9,5 cm, d) 12,2 cm, e) 15,2 cm e f) 18,4 cm.



Fonte: Autor (2021).

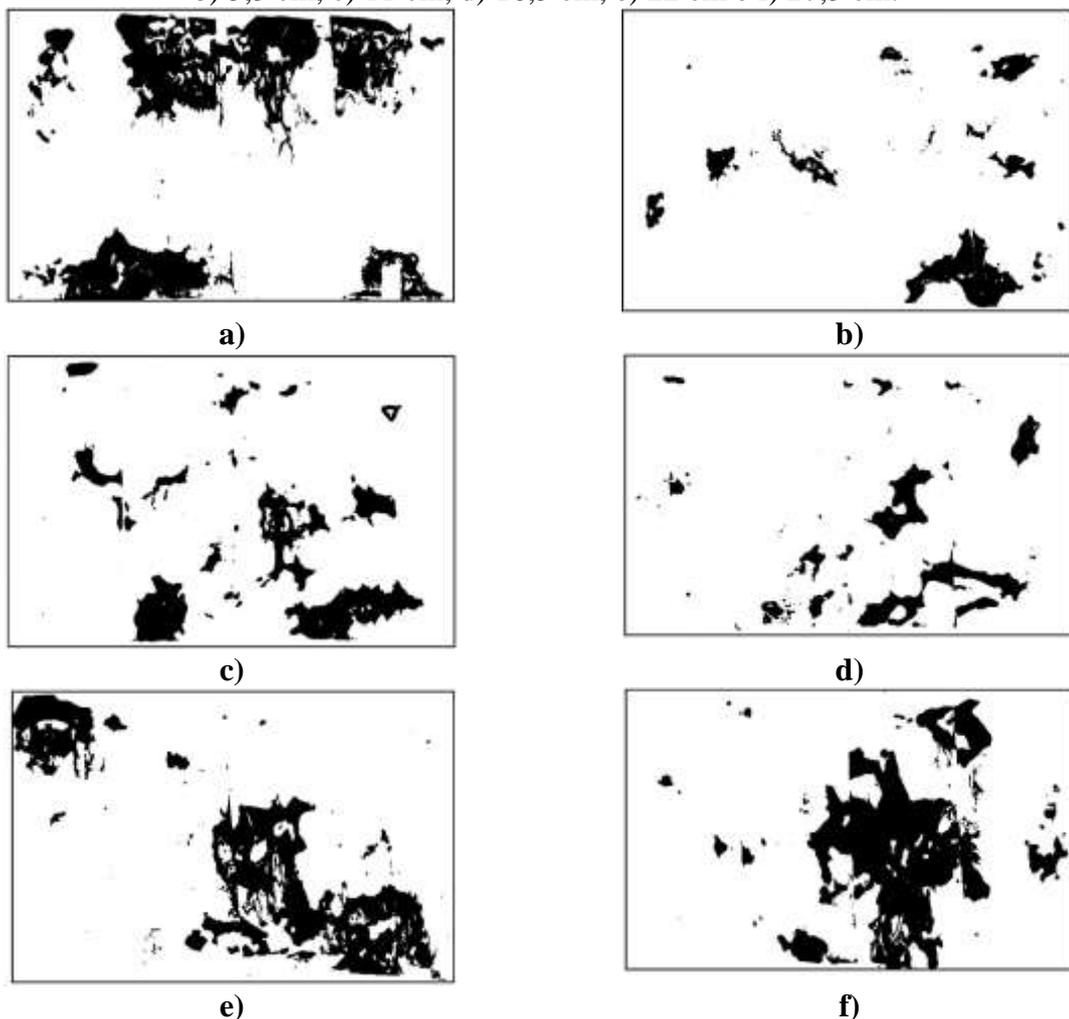
#### 4.2.2 Plano xz

A Figura 22 mostra os perfis de pontos de aquecimento obtidos variando a posição da placa resistiva no plano xz.

Ao observar os pontos de aquecimento nesse plano, percebe-se certa semelhança com o que ocorre no plano xy. Para as posições 0 e 5,5 cm, nota-se uma maior quantidade de pontos de aquecimento nas extremidades, com pouca presença dos mesmos no centro da placa

resistiva. Sendo assim, essas posições não são adequadas para um aquecimento rápido. Para as posições intermediárias 11 e 16,5 cm, observa-se maior quantidade de pontos de aquecimento no centro da placa resistiva, o que é desejável para o aquecimento de qualquer amostra. Já nas posições de 22 e 27,5 cm, observa-se grande presença de pontos de aquecimento na região central da placa resistiva. Isso pode ser justificado pelo fato de que, nessas últimas duas posições, a placa resistiva estava situada próxima ao magnetron do equipamento, onde são geradas as ondas eletromagnéticas que entram na cavidade.

Figura 22 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para as posições (plano xz) de a) 0 cm, b) 5,5 cm, c) 11 cm, d) 16,5 cm, e) 22 cm e f) 27,5 cm.



Fonte: Autor (2021).

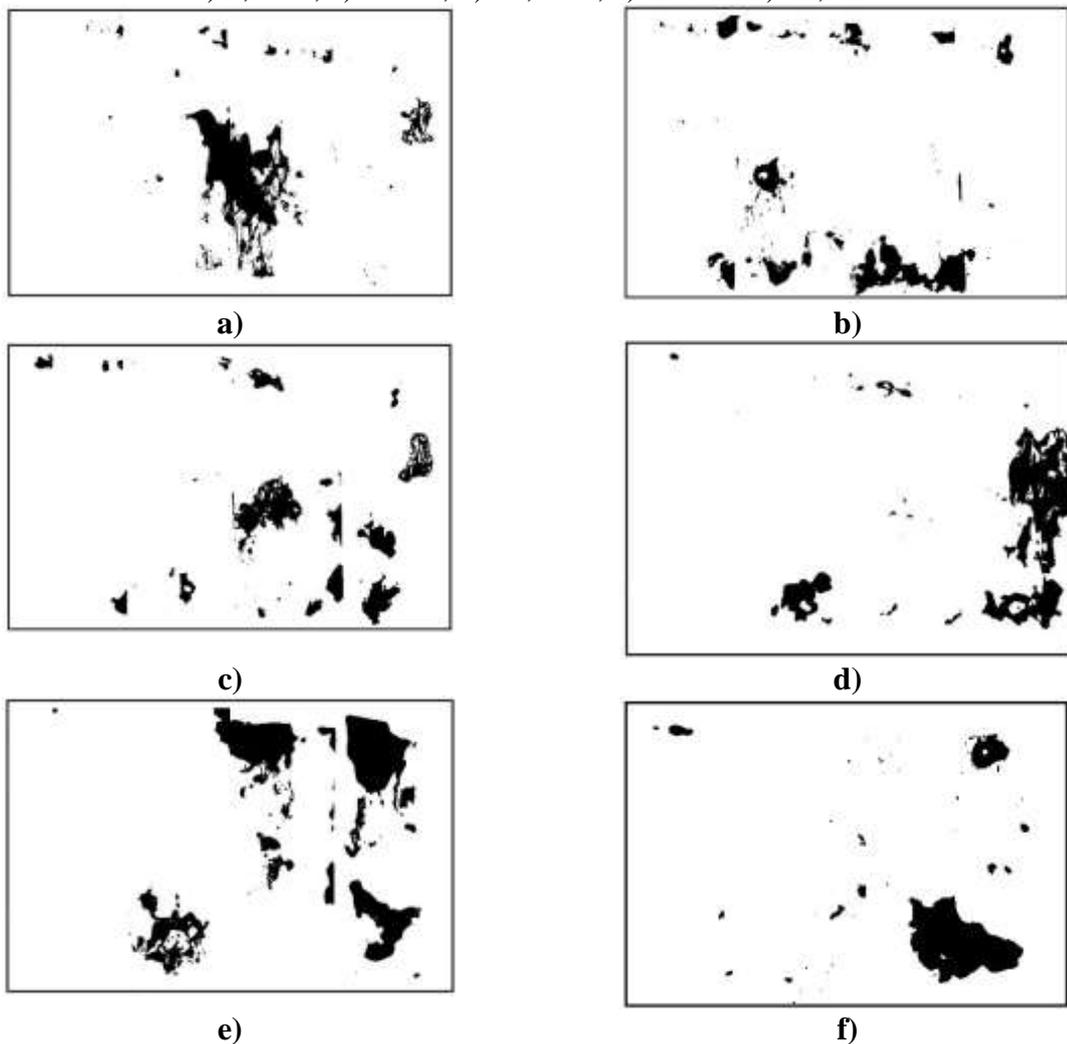
#### 4.2.3 Plano yz

A Figura 23 mostra os perfis de pontos de aquecimento obtidos variando a posição da placa resistiva no plano yz.

Ao contrário dos demais planos, o plano yz não apresentou resultados similares em relação à presença dos pontos de aquecimento. Percebe-se certa semelhança para as posições

de 0, 11 e 22 cm, que se caracterizam por apresentarem pontos de aquecimento na região central e nas extremidades da placa resistiva, sendo a região central ideal para amostras que necessitam de um rápido tempo de aquecimento. As demais posições (5,5, 16,5 e 27,5 cm) apresentam predominantemente pontos de aquecimento nas extremidades, com poucos pontos na região central da placa resistiva, sendo assim, não são ideais para um aquecimento que necessite de um rápido tempo de aquecimento.

Figura 23 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para as posições (plano yz) de a) 0 cm, b) 5,5 cm, c) 11 cm, d) 16,5 cm, e) 22 cm e f) 27,5 cm.



Fonte: Autor (2021).

Com o mapeamento tridimensional realizado, foi possível perceber que, dependendo da localização da amostra dentro do equipamento, não se obtém um aquecimento homogêneo, pois, para o tempo estabelecido, os pontos de aquecimento são diferentes em todos os planos estudados. Então, dependendo da posição em que a amostra esteja situada dentro da cavidade, o equipamento pode não aquecer a amostra de forma homogênea, necessitando de um gasto

de energia extra devido ao tempo superior que deverá ser aplicado para atingir a temperatura desejada.

Para todos os planos mapeados, os pontos de aquecimento foram distintos e de fácil identificação, diferentemente dos resultados obtidos por Sebben *et al.* (2014) e Rocha (2017), pois, nesses estudos, não foi possível observar com qualidade os pontos de aquecimento que foram gerados.

Percebe-se também que, com apenas 40 s, houve a demarcação dos principais pontos de aquecimento, mostrando que o carvão ativado um material absorvente de micro-ondas. Já a cola branca, sendo um polímero, é considerada um material transparente às micro-ondas, ou seja, possui baixa absorção da energia eletromagnética. Sendo assim, esse material possui baixa ou nenhuma interferência no surgimento dos pontos de aquecimento.

### **4.3 MAPEAMENTO DA PLACA ÓXIDO DE FERRO (III)/COLA BRANCA**

Assim como foi feito no mapeamento da placa de carvão ativado/cola branca, foi realizado o mapeamento tridimensional da cavidade do forno micro-ondas. Portanto realizou-se o mapeamento do plano xy variando-se a altura e dos planos xz e yz variando-se a posição lateral.

#### **4.3.1 Plano xy**

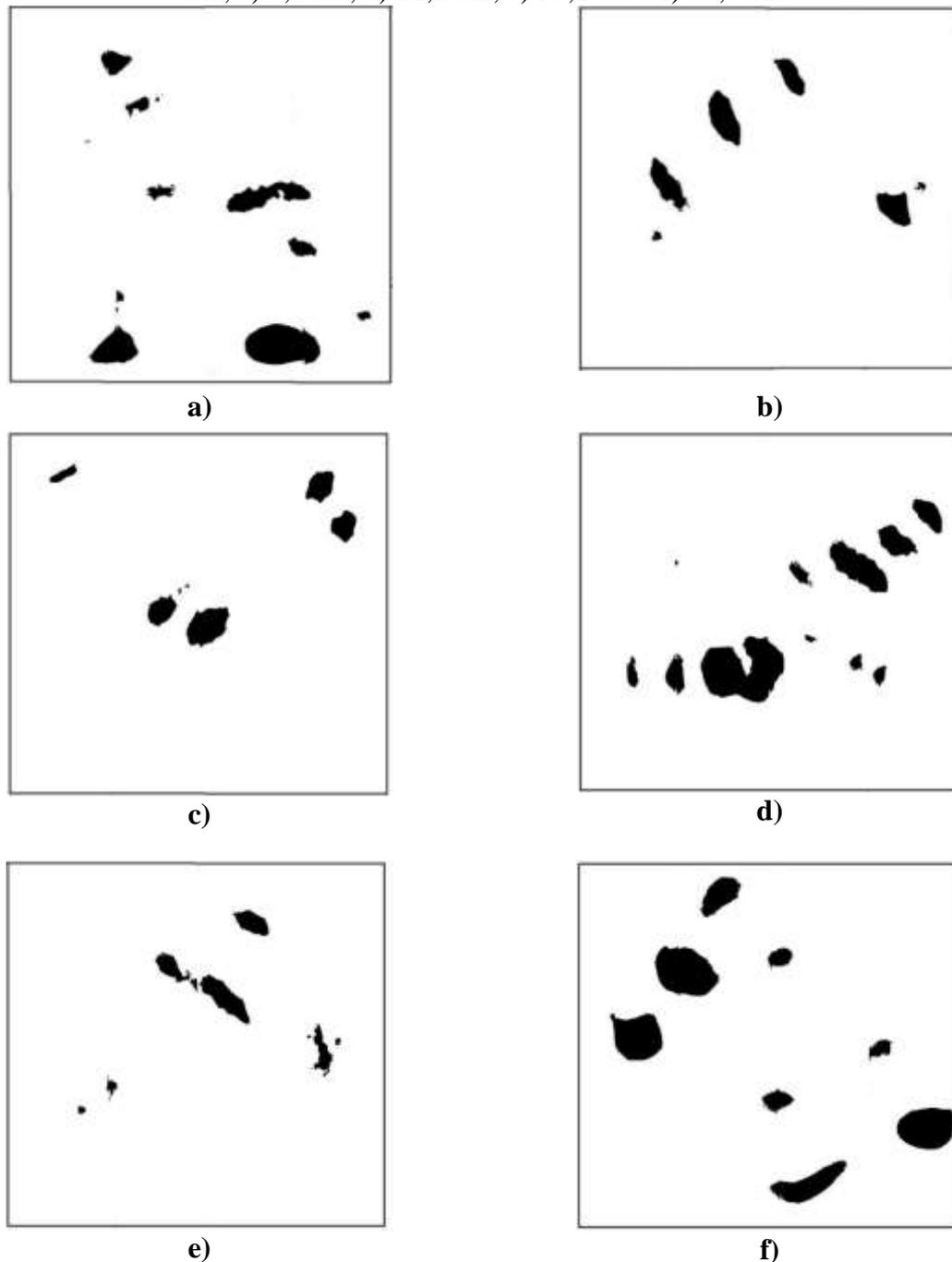
A Figura 24 mostra os perfis de pontos de aquecimento obtidos variando a posição da placa resistiva no plano xy.

Analisando os pontos de aquecimento de forma individual, percebe-se que as alturas centrais de 0, 12,2 e 18,4 cm apresentaram uma tendência de formação de pontos de aquecimento na região central e nas bordas da placa resistiva, caracterizando um aquecimento homogêneo. Portanto, essas alturas são indicadas para um aquecimento rápido e de qualidade. Para a altura de 9,5 cm, observou-se pontos de aquecimento situados na região central e nas extremidades da placa resistiva, porém em menor quantidade. As alturas de 6,2, 15,2 cm apresentaram pontos de aquecimento menos uniformes, que estão situados entre a região central e as bordas da placa resistiva, caracterizando um aquecimento não homogêneo.

Os pontos de aquecimento gerados pela placa resistiva de óxido de ferro (III)/cola branca para o plano xy foram similares aos gerados pela placa resistiva de carvão ativado/cola branca, porém um pouco mais suavizados, ou seja, de menor tamanho, considerando que o óxido de ferro (III) pode estar absorvendo menos as micro-ondas comparado ao carvão

ativado. Sendo assim, há uma subestimação desses pontos que, como visto na placa resistiva composta por carvão ativado, são maiores e bastante difusos.

Figura 24 - Mapeamento dos pontos de aquecimento para alturas (plano xy) de a) 0 cm, b) 6,2 cm, c) 9,5 cm, d) 12,2 cm, e) 15,2 cm e f) 18,4 cm.



Fonte: Autor (2021).

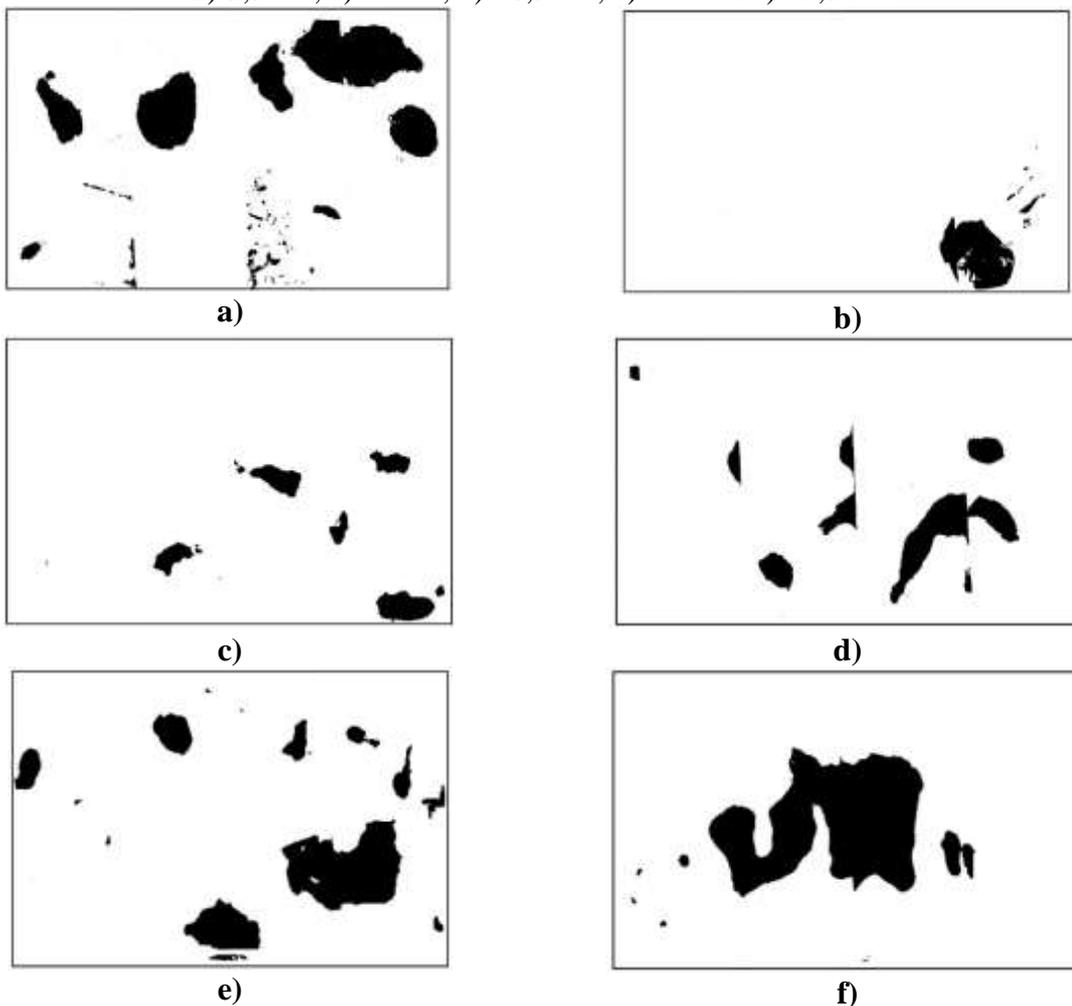
#### 4.3.2 Plano xz

A Figura 25 mostra os perfis de pontos de aquecimento obtidos variando a posição da placa resistiva no plano xz.

Observando os pontos de aquecimento neste plano, as posições de 5,5 e 11 cm apresentaram pontos de aquecimento situados próximos a extremidade direita da placa resistiva, com ausência ou pequena presença de pontos de aquecimento situados próximos a região central. Portanto, essas posições não são adequadas para realização de aquecimento rápido. No tempo estabelecido, as demais posições apresentaram um padrão de pontos de aquecimento situados próximos à região central e às bordas da placa resistiva, caracterizando um aquecimento homogêneo e, conseqüentemente, ideal. As posições de 22 e 27,5 cm apresentaram grandes pontos de aquecimento no tempo estipulado, por estarem situadas próximo à fonte de radiação eletromagnética do equipamento, o magnetron.

Os pontos de aquecimento gerados pela placa resistiva de óxido de ferro (III)/cola branca para o plano xz ficaram similares aos pontos de aquecimento gerados pela placa resistiva de carvão ativado/cola branca nesse mesmo plano, porém, com os pontos de aquecimento mais suavizados.

Figura 25 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para as posições (plano xz) de a) 0 cm, b) 5,5 cm, c) 11 cm, d) 16,5 cm, e) 22 cm e f) 27,5 cm.



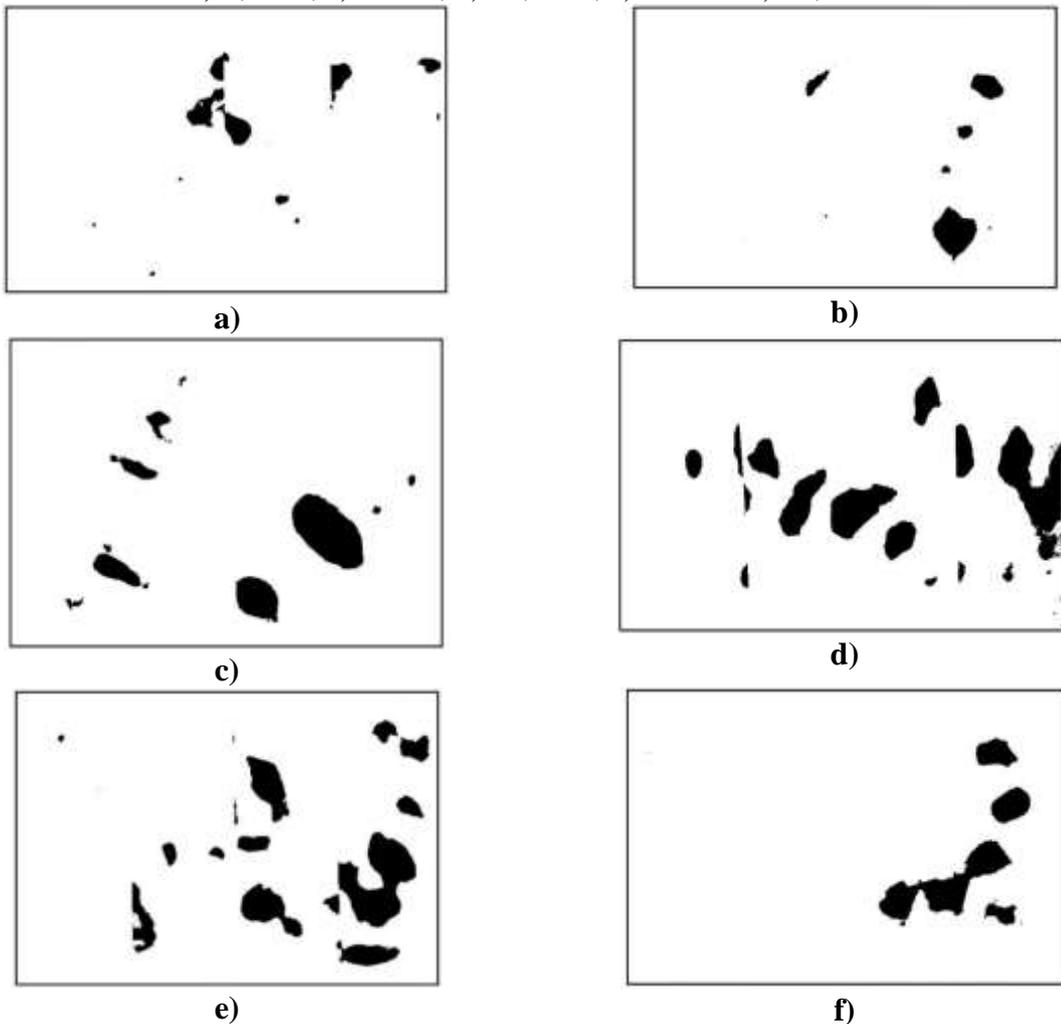
Fonte: Autor (2021).

### 4.3.3 Plano yz

A Figura 26 mostra os perfis de pontos de aquecimento obtidos variando a posição da placa resistiva no plano yz.

Assim como ocorreu com a placa resistiva de carvão ativado/cola branca, os pontos de aquecimento para o plano yz não apresentaram similaridade com os pontos de aquecimento dos demais planos. Para as posições de 0, 5,5, e 27,5 cm, os pontos de aquecimento gerados apresentaram maior frequência nas bordas. Essas posições não são adequadas para se colocar a amostra e submetê-la ao processo de aquecimento, pois o mesmo não será homogêneo. Porém, para as posições de 11, 16,5 e 22 cm, nota-se que os pontos de aquecimento surgiram tanto nas bordas quanto na região central, o que indica um aquecimento homogêneo da placa resistiva no tempo determinado. Portanto, essas três posições são adequadas para realização de aquecimento considerado rápido e de qualidade.

Figura 26 – Mapeamento dos pontos de aquecimento para as posições (plano yz) de a) 0 cm, b) 5,5 cm, c) 11 cm, d) 16,5 cm, e) 22 cm e f) 27,5 cm.



Fonte: Autor (2021).

Os pontos de aquecimento gerados pela placa resistiva de óxido de ferro (III)/cola branca para o plano yz ficaram similares e mais suavizados comparados aos pontos de aquecimento gerados pela placa resistiva de carvão ativado.

Para a placa resistiva de óxido ferro (III)/cola branca, foi possível perceber que, dependendo da localização da amostra dentro do equipamento, não se obtém um aquecimento homogêneo, pois, para o tempo estabelecido, os pontos de aquecimento são diferentes em todos os planos estudados.

Assim como ocorreu para a placa resistiva de carvão ativado/cola branca, para a placa resistiva de óxido de ferro (III)/cola branca, os resultados dos pontos de aquecimento para todos os planos foram distintos e de fácil identificação.

Os principais pontos de aquecimento surgiram com 60 s, propiciando um bom aquecimento da placa resistiva, caracterizando o óxido de ferro como um material absorvente de micro-ondas, que posteriormente se converte em energia térmica. Como já citado, a cola branca é considerada um material transparente e, por isso, possui baixa ou nenhuma interferência no surgimento dos pontos de aquecimento.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou a possibilidade de realização de um mapeamento tridimensional dos pontos de aquecimento de uma cavidade multimodo de um forno micro-ondas. O mapeamento foi realizado de forma satisfatória para as duas placas resistivas que foram confeccionadas, visto que os resultados gerados para os pontos de aquecimento foram distintos e de fácil identificação.

Comparando-se os pontos de aquecimento que surgiram para todos os planos estudados nas duas placas resistivas que foram confeccionadas, percebe-se que os pontos da placa resistiva de óxido de ferro (III)/cola branca foram menores em comparação com a placa resistiva de carvão ativado/cola branca. Isso se dá porque o óxido de ferro (III) absorve menos as ondas eletromagnéticas, o que explica a necessidade de maior tempo de exposição às micro-ondas comparado ao tempo de exposição da placa resistiva composta por carvão ativado. Portanto, conclui-se que o valor da tangente de perda ( $\tan \delta$ ) do carvão ativado é maior que do óxido de ferro (III), pois quanto mais rápido o material se aquece, maior a tangente de perda.

Apesar da diferença de tempo de exposição às ondas eletromagnéticas de cada placa resistiva, os pontos de aquecimento obtidos para os planos foram de certa forma similares. Em geral, no plano xy foi possível observar que, para as duas placas resistivas, as alturas que apresentaram pontos de aquecimento situados na região central e extremidades foram 12,2 e 18,4 cm. Logo, essas posições são ideais para um aquecimento rápido e homogêneo da amostra. Para o plano xz, obteve-se uma melhor concentração de *hotspots* na região central e extremidades da placa nas posições de 22 e 27,5 cm, devido ao fato de que, nessas posições, a placa resistiva estava situada próximo ao magnetron. E, para o plano yz, as posições que apresentaram condições ideais para um bom aquecimento foram nas posições de 11 e 22 cm.

O método utilizado neste trabalho para o mapeamento dos pontos de aquecimento é um método inovador e os resultados obtidos foram comparados com outros métodos de diferentes estudos realizados na área. Os resultados encontrados se mostraram promissores, pois, diferentemente dos demais estudos encontrados na literatura, os pontos de aquecimento gerados neste trabalho foram de fácil visualização e interpretação. Portanto, este método pode contribuir para a realização de um mapeamento dos principais pontos de aquecimento de fornos micro-ondas com o intuito de otimizar sua eficiência para fins científicos ou industriais.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Utilizar materiais na composição da placa resistiva que tenham tangente de perda ( $\tan \delta$ ) conhecida na literatura, para analisar a influência do material absorvedor nos pontos de aquecimento;
- Utilizar materiais na confecção da placa resistiva que possuam porosidade elevada para que haja maior absorção das ondas eletromagnéticas incididas;
- Utilizar materiais na confecção da placa resistiva que possuam diferentes propriedades condutivas, para a conversão da energia eletromagnética em calor;
- Modificar as proporções dos materiais utilizados na confecção da placa resistiva, aumentando ou diminuindo a quantidade dos constituintes, para verificar a influência na quantidade e qualidade dos pontos de aquecimento que serão gerados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBIENTE, S. **Filtros e Filtração de Água – Carvão Ativado**. Disponível em: <https://www.snatural.com.br/filtro-agua-carvao-ativado/>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- ALVAREZ, H.M.; VALDES, R.H.; ACOSTA, B.G.; MARTINS, D.L.; ANTUNES, O.A.C. As Micro-ondas como alternativa na síntese química. *Diálogos & Ciência - Revista da Rede de Ensino FTC* - Ano II, n. 7, Dez. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3852:2009**: Minérios de ferro como insumo para alto – forno e redução direta – Determinação da densidade a granel. Rio de Janeiro: Abnt, 2009. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 5018:2014**: Materiais refratários - Determinação da densidade real. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2016**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: Abnt, 2016. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 2395:1997**: Peneira de ensaio e ensaio de peneiramento - Vocabulário. Rio de Janeiro: Abnt, 1997. 9 p.
- BARBOZA, A. C. R. N.; CRUZ, C. V. M. S.; GRAZIANI, M. B.; LORENZETTI, M. C. F.; SABADINI, E. Aquecimento em forno de microondas / desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. *Química Nova*, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 901-904, dez. 2001. FapUNIFESP (SciELO).
- BIZELLI, M. H. S. S. **Sistema Tridimensional de Coordenadas**. Disponível em: [http://www.calculo.iq.unesp.br/sitenovo/Calculo1/tridi\\_coordenadas.html#:~:text=O bserve%20que%20tomados%20aos%20pares,x%20e%20o%20eixo%20z](http://www.calculo.iq.unesp.br/sitenovo/Calculo1/tridi_coordenadas.html#:~:text=O%20que%20tomados%20aos%20pares,x%20e%20o%20eixo%20z)). Acesso em: 15 fev. 2021.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2007.
- CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos**. Ed. Blucher, 2012.
- DARTORA, C.A.; NOBREGA, K.Z.; MARINA H. K. M.; FILLIPE K. R. C.; TERTULIANO H.S.F. Conceitos básicos sobre a difração e a dispersão de ondas

- eletromagnéticas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 1-10, mar. 2011.
- 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**, v. 296, p. 162-172, 2016.
- GUÉNIN, E. **Microwave Engineering of Nanomaterials**. New York: Jenny Stanford Publishing, 2016. 452 p.
- HEYLMANN, K. K. A. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil**. 2015. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.
- JEZINI, V. S. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE ÓXIDO DE FERRO E DO COMPÓSITO ÓXIDO DE FERRO/ÓXIDO DE GRAFENO REDUZIDO PARA APLICAÇÃO EM SUPERCAPACITORES**. 2015. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.
- LANFREDI, S.; GROSSO, R. L.; ANTUNES, A. C.; ANTUNES, S. R. M.; NOBRE, M. A. L. Comportamento elétrico a alta temperatura de termistor cerâmico alfa-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com coeficiente de temperatura negativo. **Cerâmica**, [S.L.], v. 54, n. 332, p. 443-450, dez. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132008000400009>.
- LIN, K.H., LAI, N., ZENG, J.Y., CHIANG, H.L., Microwave-pyrolysis treatment of biosludge from a chemical industrial wastewater treatment plant for exploring product characteristics and potential energy recovery, **Energy**, 117446, 2020.
- LEONELLI, C.; VERONESI, P.; CRAVOTTO, G.. Microwave-Assisted Extraction: an introduction to dielectric heating. **Food Engineering Series**, [S.L.], p. 1-14, 2012. Springer US.
- MALLOL, G.; AMORÓS, J. L.; ORTS, M. J.; LLORENS, D. Densification of monomodal quartz particle beds by tapping. **Chemical Engineering Science**, vol. 63, p. 5447-5456, 2008.
- MEHDIZADEH, M. **MICROWAVE / RF APPLICATORS AND PROBES FOR MATERIAL HEATING, SENSING AND PLASMA GENERATION A DESIGN GUIDE**. Oxford: Elsevier, 2010.

MERILLAS, B.; CUÉLLAR, E.; DIEZ-VARGA, A.; ASENSIO-BARTOLOMÉ, M.; GARCÍA-HERBOSA, G.; TORROBA, T.; MARTÍN-ALVAREZ, J.M.; MIGUEL, D.; VILLAFANE, F.; Whole microwave syntheses of pyridylpyrazole and of Re and Ru luminescent pyridylpyrazole complexes, **Inorganica Chimica Acta**, 484, 1-7, 2019.

MESQUITA, A. C. **ESTUDO DA POLIMERIZAÇÃO DO ACETATO DE VINILA UTILIZANDO A RADIAÇÃO IONIZANTE**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear- Aplicações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

METAXAS, A.C.; MEREDITH, R.J. **Industrial Microwave Heating**. London: Institute of Electrical Engineers, 1983.

MOTA, A. C. S. **PROPRIEDADES DIELÉTRICAS E CINÉTICA DE SECAGEM DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS UTILIZANDO MICRO-ONDAS**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. Taylor & Francis Group. 2007.

NUNES, D. L. **PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE TORTA Prensada de Raphanus sativus L. E UTILIZAÇÃO PARA CLARIFICAÇÃO DE SOLUÇÕES**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009

PAGÁN, A. N. **Nuevo procedimiento de diseño de cavidades multimodo con agitadores de modo**. 2013. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2013.

PETRI, I.J. **Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalho de perfuração**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2014.

PETRI, I.J., SANTOS, J.M.; ROSSI, A.S., PEREIRA, M.S., DUARTE, C.R., ATAÍDE, C.H., Influence of Rock Chemical Composition in Microwave Heating and Decontamination of Drill Cuttings. **Materials Science Forum**, v. 899, p. 469-473, 2017.

ROCHA, K.R.; JÚNIOR, A.J.B.. Otimização da síntese do óleo de bétula usando microondas geradas por um magnetron mapeado. **Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v.9, p.54-61, 01 nov. 2017.

- ROSINI, F.; NASCENTES, C.; NÓBREGA, J. Experimentos Didáticos Envolvendo Radiação Micro-ondas. São Carlos: **Química Nova**, 2004.
- ROSSI, A. S., **CINÉTICA DE AQUECIMENTO E SECAGEM, PROPRIEDADES DIELÉTRICAS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADO AO TRATAMENTO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO POR MICROONDAS**. 2017. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- SALEMA A.A.; ANI F.N.; Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass, **Bioresource Technology**, v. 102, p. 3388-3395, 2011.
- SALICIO, Claudio Ubirajara. **O Espectro eletromagnético e as interações de cada faixa espectral com a matéria**. 2016. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1884377/mod\\_resource/content/0/%3D%3D%20SEMINARIO%2024ago16-TEXTO.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1884377/mod_resource/content/0/%3D%3D%20SEMINARIO%2024ago16-TEXTO.pdf). Acesso em: 23 maio 2021.
- SAMPAIO, J. A. **CAPÍTULO 3 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO**. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1020/1/Cap%203%20Peneiramento.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021.
- SANSEVERINO, Antonio Manzollilo. Microondas em síntese orgânica. **Química Nova**, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 660-667, jul. 2002. FapUNIFESP (SciELO).
- SANTOS, D. **ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS EM UNIDADES MULTIMODO E MONOMODO PARA QUEBRA DE EMULSÕES DE PETRÓLEO**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes – Unit, Aracaju, 2013.
- SANTOS, D. P. **PRODUÇÃO DE PARTÍCULAS DE POLI(ACETATO DE VINILA) (PVAc) E POLI(ACETATO DE VINILA-co-METACRILATO DE METILA) (PVAc-co-PMMA) PARA IMOBILIZAÇÃO DE L-ASPARAGINASE, BSA E LISOZIMA**. 2014. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- SEBBEN, J.; RAYMUNDO, L.; TRIERWEILER, J. Desenvolvimento de uma Ferramenta para Mapear o Padrão de Aquecimento em Micro-ondas. Florianópolis: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2014.

- SHANG, H.; SNAPE, C. E.; KINGMAN, S. W.; ROBINSON, J. P. Microwave treatment of oilcontaminated North Sea drill cuttings in a high power multimode cavity, **Separation and Purification Technology**, v. 49(1), p. 84-90, 2006.
- SOUZA, L. M., AVALIAÇÃO DE DENSIDADES BULK DE PÓS EM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., 2014, Uberlândia. **AVALIAÇÃO DE DENSIDADES BULK DE PÓS EM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO**. Uberlândia: Cobec-Ic, 2014. p. 1-7.
- SUELA, Faiossander. **Medição de Ruídos Eletromagnéticos Irradiados em Sistemas de Geração Fotovoltaica**. 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo, 2016.
- ULABY F. T.; BENGAL T. H.; DOBSON M. C.; EAST J. R.; GARVIN J. B.; EVANS D. L.; Microwave dielectric properties of dry rocks, in **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 28, no. 3, pp. 325-336, May 1990.
- ZAGO, M. A. **SÍNTESE DE BIODIESEL EM REATOR MICRO-ONDAS USANDO LÍQUIDO IÔNICO**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes – Unit, Aracaju, 2010.