

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CURA DE REFRAATÓRIOS À BASE DE MGO VIA  
MICRO-ONDAS CONTENDO, OU NÃO, FONTES DE  
CARBONO**

**GABRIEL ARANTES CERIBELLI**

**SÃO CARLOS -SP 2023**

# **CURA DE REFRACTÁRIOS À BASE DE MGO VIA MICRO- ONDAS CONTENDO, OU NÃO, FONTES DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal de São Carlos, como requisito  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Victor Carlos  
Pandolfelli

Coorientador: Dr. Carlos Pagliosa Neto

São Carlos-SP

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
Telefones: 16 -3351-8244 e 3351-8246  
Endereço eletrônico: demachef@ufscar.br  
Rodovia Washington Luís, km 235 – Caixa Postal 676  
CEP 13565-905 – São Carlos – SP - Brasil



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Gabriel Arantes Ceribelli

**RA:** 727375

**TÍTULO:** Cura de refratários à base de MgO via micro-ondas contendo, ou não, fontes de carbono

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli

**CO-ORIENTADOR(A):** Dr. Carlos Pagliosa Neto

**DATA/HORÁRIO:** 21/03/2023, 10h30

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli	8,7	8,7
Prof. Dr. Rodolfo Foster Klein Gunnewiek	8,7	8,7
<b>Média</b>	8,7	8,7

### BANCA – ASSINATURAS:

*Victor Carlos Pandolfelli*

Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli

---

Prof. Dr. Rodolfo Foster Klein Gunnewiek

*Rodolfo F. K. Gunnewiek*

---

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli, ao Mestre Murilo Henrique Moreira ao Prof. Dr. Rodolfo Foster Klein-Gunnewiek, por toda a motivação e contribuição para a realização do presente trabalho, pois atuaram de forma muito significativa durante todo o desenvolvimento do projeto fornecendo conhecimento, atuação direta em etapas e auxiliando nas tomadas de decisões de forma a deixar o caminho e sequência para o desenvolvimento cada vez mais ampla e clara. Com certeza sem a presença destas três pessoas, este trabalho não teria realizado com tamanha eficiência todas as etapas apresentadas.

Agradeço também a empresa RHI Magnesita S. A., especialmente ao Dr. Carlos Pagliosa Neto, que além de ser um pesquisador extremamente renomado foi um gestor exemplar em todos os sentidos durante o período de convivência e aprendizagem no centro de pesquisa e desenvolvimento (CPqD) da RHI Magnesita S.A. e contribuiu ativamente para o desenvolvimento do atual trabalho prestando suporte e participando de análises e discussões á respeito dos resultados e programação de ensaios realizados, e também pela parceria para fomento de material para a realização dos ensaios e informações sobre a realização do processo de cura realizado de forma industrial.

Deixo também meu agradecimento a todos os técnicos e funcionários tanto do Laboratório GEMM, localizado na UFSCar de São Carlos/SP, quanto do CPqD da RHI Magnesita S. A., localizado em Contagem/MG que além de possuírem um conhecimento enorme sobre a preparação de amostras e realização de testes, sempre estavam dispostos a tirar dúvidas e auxiliar nas questões práticas que o projeto envolvia.

Por último, não podia deixar de agradecer minha família, meus amigos (da universidade, do CPqD e da vida) e minha parceira de jornada e vida, Gabriela B. Ribeiro, por todo o apoio e interesse no meu desenvolvimento pessoal e profissional durante este período. São pequenos gestos diários realizados por vocês que fazem com que as coisas fiquem mais leves e me deixa mais otimista e seguro para continuar mesmo nos momentos mais turbulentos desta caminhada.

"Ever tried. Ever failed. No matter. Try again. Fail again. Fail better." (Samuel Beckett)

## RESUMO

A cura é um processo essencial para a fabricação e desenvolvimento de materiais refratários e é amplamente realizada atualmente por meio de aquecimento em temperaturas relativamente baixas comparadas a temperatura de trabalho para o material, com taxas de aquecimento controladas e, em alguns casos, com controle de umidade atmosférica, por meio da utilização de estufas térmicas. Outro modo de curar o material cerâmico refratário, envolve a utilização de fornos convencionais industriais que operam utilizando chamas unidirecionais. Este processo convencional gera um gradiente de temperatura nos materiais cerâmicos levando a um aquecimento não homogêneo da estrutura, a uma demanda maior de tempo para que o processo de cura seja concluído, concentração de tensões térmicas dentro do material e gera gases prejudiciais ao ambiente que são liberados na atmosfera. Desta forma, uma alternativa que vem sendo estudada para atenuar estes fatores, que em escala industrial fazem uma considerável diferença, é a utilização de micro-ondas para realizar o procedimento de cura de materiais refratários, uma vez que, por este método, o aquecimento do material se dá de forma mais homogênea por toda a sua estrutura, oferecendo outras vantagens também como menor tempo de cura e risco de danificação estrutural e também por evitar a liberação de gases poluentes. Neste trabalho, visou-se compreender o funcionamento da cura e aquecimento utilizando o processo de micro-ondas por meio de estudo de literaturas já conhecidas. Foram realizadas simulações computacionais para prever o comportamento de um material quando submetido ao processo de cura dentro da cavidade de um micro-ondas. Também foram realizados experimentos com amostras físicas para reprodução dos modelos simulacionais estudados e desenvolvidos para a comprovação da eficácia do processo de cura utilizando micro-ondas em uma escala experimental. Durante as práticas experimentais, foram utilizados materiais resinados fornecidos pela RHI Magnesita S.A. com composição majoritária de óxido de magnésio eletrofundido e grafite, além de um aparelho micro-ondas convencional que sofreu adaptações para realização do processo de cura de forma comparativa com o método industrial utilizado. Devido à falta de literatura sobre sistemas de micro-ondas para realização de cura e sobre comportamento de materiais refratários em cura por micro-ondas, tanto o sistema desenvolvido e adaptado para as análises, quanto a composição da amostra e as condições de análise sofreram correções e melhorias durante os testes realizados para fornecerem resultados cada vez mais fiéis e comparáveis ao método industrial de cura convencional.

**Palavras-chave:** Cura. Materiais Refratários. Micro-ondas.

## ABSTRACT

Curing is an essential process for the manufacture and development of refractory materials and is now largely carried out by heating at relatively low temperatures compared to the working temperature for the material, with controlled heating rates and, in some cases, with atmospheric humidity temperature control, through the use of thermal ovens. Another way of curing the refractory ceramic material involves the use of conventional industrial furnaces that operate using unidirectional flames. This conventional process generates a temperature gradient in ceramic materials leading to non-homogeneous heating of the structure, a longer demand for the curing process to be completed, concentration of thermal stresses within the material and generates harmful gases to the environment that are released into the atmosphere. In this way, an alternative that has been studied to mitigate these factors, which on an industrial scale make a considerable difference, is the use of microwaves to perform the curing procedure of refractory materials, since, by this method, the heating of the material occurs more homogeneously throughout its structure, offering other advantages such as shorter curing time and risk of structural damage, as well as avoiding the release of polluting gases. In this work, the aim was to understand the operation of curing and heating using the microwave process through the study of already known literature. Computer simulations were performed to predict the behavior of a material when subjected to the curing process inside a microwave cavity. Experiments were also carried out with physical samples to reproduce the simulation models studied and developed to prove the effectiveness of the healing process using microwaves on an experimental scale. During the experimental practices, resin materials supplied by RHI Magnesita S.A. were used. with a majority composition of electrofused magnesium oxide and graphite, in addition to a conventional microwave device that has been adapted to carry out the curing process in a comparative way with the industrial method used. Due to the lack of literature on microwave curing systems and on the behavior of refractory materials in microwave curing, both the system developed and adapted for the analyses, as well as the sample composition and analysis conditions, were corrected and improvements during the tests carried out to provide results that are increasingly faithful and comparable to the conventional industrial curing method.

**Keywords:** Curing. Refractory Materials. Microwave.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Interior de cavidade de micro-ondas com descrição de componentes principais para funcionamento.....	20
Figura 2 — Representação de magnetron com corte na direção vertical para visualização de componentes internos .....	21
Figura 3 — Representação esquemática de corte transversal de um magnetron para ilustrar processo de formação de micro-ondas eletromagnéticas .....	22
Figura 4 — Guia de ondas retangular utilizado em aparelhos micro-ondas (esquerda) e esquema de modo de propagação TE em guias de onda retangular (direita) .....	24
Figura 5 — Representação em eixos coordenados da propagação de ondas pelo método TE .....	24
Figura 6 — Espectro Eletromagnético para ondas eletromagnéticas do tipo micro-ondas .....	25
Figura 7 — Processo para aquecimento de material utilizando micro-ondas, simplificado .....	27
Figura 8 — Esquema representativo de formação de onda estacionária a partir da reflexão de uma onda periódica dentro de uma cavidade de ressonância .....	28
Figura 9 — Experimento prático para demonstrar regiões de altas e baixas irradiações por micro-ondas durante o processo de aquecimento em um forno micro-ondas convencional .....	29
Figura 10 — Amostras para 1º procedimento experimental após processo de cura em estufa térmica .....	35
Figura 11 — Amostras de mesma composição e dimensões recebidas no laboratório GEMM para realização de 2ª (esquerda) e 3ª (direita) baterias de testes de cura por micro-ondas .....	36
Figura 12 — Amostras contendo apenas MgO e resina fenólica recebidas para realização de 4ª bateria de testes .....	36
Figura 13 — Aparelho micro-ondas utilizado para montagem de sistema de testes de cura por micro-ondas (esquerda) dimensões da cavidade do aparelho micro-ondas utilizadas como base para desenvolvimento simulacional (direita) .....	37
Figura 14 — Suporte para amostra refratária alocado na abertura superior criada na cavidade do micro-ondas para realização de 1º procedimento experimental .....	38
Figura 15 — Cavidade interna de aparelho micro-ondas utilizado no sistema desenvolvido para análise de cura por micro-ondas de cerâmicas refratárias contendo ou não fontes de carbono na composição .....	38
Figura 16 — Face frontal externa (esquerda) e interna (direita) de controlador PID utilizado no sistema de análise de materiais refratários contendo ou não fontes de carbono por micro-ondas .....	39
Figura 17 — Esquema de acoplamento de balanço no sistema de análise de cura por micro-ondas para cálculo de perda de massa durante aquecimento (TGA) nas amostras da 2ª bateria de testes .....	40

Figura 18 — Suporte de garras adaptado para gerar estabilidade e fornecer suporte ao termopar acoplado no sistema de análise de cura por micro-ondas .....	41
Figura 19 — Representações de cavidades produzidas por software Gmsh (esquerda) e Elmer (direita).....	42
Figura 20 — Visualizações de pós-processamento de simulação de ondas eletromagnéticas no interior de uma cavidade de micro-ondas geradas por software Paraview.....	43
Figura 21 — Sistema para análise de cura de materiais cerâmicos refratários contendo ou não carbono completo para realização de 1ª bateria de testes .....	45
Figura 22 — Amostra com composição de 5CAC utilizada para 1º procedimento experimental de análise de cura por micro-ondas após realização de 1º teste .....	45
Figura 23 — Reconstituição de amostra com composição de 5CAC utilizada para 1º procedimento experimental de análise de cura por micro-ondas após realização de 1º teste .....	46
Figura 24 — Anexação de uma ventoinha (esquerda) e furos (direita) na cavidade externa do aparelho de micro-ondas utilizado no sistema de análises de cura por micro-ondas para ampliação de sistema refrigerador do magnetron .....	49
Figura 25 — Suporte de amostra com rompimento de um fio sustentador (esquerda) e marcas produzidas por formação de arco elétrico (direita) na amostra utilizada no 2º teste da 2ª bateria de testes .....	50
Figura 26 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 3ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado .....	51
Figura 27 — Suporte de amostra com rompimento de dois fios sustentadores (esquerda) e marcas produzidas por formação de arco elétrico (direita) na amostra utilizada no 4º teste da 2ª bateria de testes .....	51
Figura 28 — Modificações de alocação do termopar e suporte de amostras para orifícios superior e inferior, respectivamente, do sistema para análise de cura por micro-ondas .....	53
Figura 29 — Alocação do sistema de análise de cura por micro-ondas em capela de exaustão devido a eliminação de componentes tóxicos provenientes da resina fenólica durante processo de cura por micro-ondas .....	54
Figura 30 — Teto do interior da cavidade do aparelho micro-ondas apresentou manchas escuras após realização do teste de cura por micro-ondas com 4ª amostra da 3ª bateria de testes.....	57
Figura 31 — Presença de lascamentos nas faces externas e próximas ao orifício para alocação de termopar apresentadas pela 1ª amostra da 4ª bateria de testes .	59

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Fator de Perda Dielétrica_____	25
Equação 2 - Profundidade de Penetração de Ondas _____	26
Equação 3 - Coeficiente de Reflexão de Ondas_____	26

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 1ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado .....	48
Gráfico 2 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 2ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado .....	49
Gráfico 3 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 5ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado (esquerda) e curva de acompanhamento de perda de massa durante aquecimento para 5ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado (direita) .....	52
Gráfico 4 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 2ª amostra da 3ª bateria de testes após ensaio realizado .....	56
Gráfico 5 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 4ª amostra da 3ª bateria de testes após ensaio realizado .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Composição de concreto refratário utilizada para 1º procedimento experimental de cura por micro-ondas .....	34
--	----

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
2.1	SIMULAÇÃO DE CAVIDADE .....	17
2.1.1	<b>Texto Base: Numerical Simulation Of Drying Of Refractory Concrete</b> 17	
2.1.2	<b>Softwares OpenSource</b> .....	17
2.1.2.1	Gmsh .....	18
2.1.2.2	Elmer Grid .....	18
2.1.2.3	Paraview .....	19
2.2	<b>MICRO-ONDAS</b> .....	19
2.2.1	<b>Dispositivo de Micro-Ondas</b> .....	19
2.2.2	<b>Geração de Micro-Ondas</b> .....	20
2.2.2.1	Magnetron .....	21
2.2.2.2	Guias de Ondas.....	23
2.2.3	<b>Aquecimento</b> .....	24
2.3	<b>MATERIAIS REFRAATÓRIOS DE NATUREZA MAGNESIANOS</b> CONTENDO GRAFITE .....	28
2.4	<b>RESINAS TERMOFIXAS</b> .....	32
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	34
3.1	<b>COMPOSIÇÕES</b> .....	34
3.2	<b>SISTEMA PARA REALIZAÇÃO PRÁTICA DE CURA</b> .....	37
3.2.1	<b>Cavidade de Micro-Ondas</b> .....	37
3.2.2	<b>Controle de Temperatura</b> .....	38
3.2.3	<b>Análise Termogravimétrica (TGA)</b> .....	40
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	42
4.1	<b>SIMULAÇÃO DE CAVIDADE</b> .....	42
4.2	<b>1ª BATERIA DE TESTES EXPERIMENTAIS</b> .....	44
4.3	<b>2ª BATERIA DE TESTES EXPERIMENTAIS</b> .....	46
4.4	<b>3ª BATERIA DE TESTES EXPERIMENTAIS</b> .....	52
4.5	<b>4ª BATERIA DE TESTES EXPERIMENTAIS</b> .....	57
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	59
6	<b>SUGESTÕES FUTURAS</b> .....	61
7	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	62

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico de procedimentos e equipamentos industriais é um ramo já consolidado, porém que apresenta constante demanda por inovação e implementação. A valorização excessiva de produtos e serviços vem acontecendo com crescimento exponencial nos últimos anos, o que desperta um interesse para o desenvolvimento de produtos mais eficientes e com menos gastos. Além de ser possível notar uma clara apelação para o desenvolvimento de produtos e serviços ecologicamente sustentáveis, uma vez que a destruição do meio ambiente de uma forma geral, é um dos problemas mais significativos em relação à impactos sociais.

Um produto muito visado desde seu descobrimento após a segunda guerra mundial, o aparelho de micro-ondas passou por diversas atualizações e modificações ao longo dos anos para atender cada vez mais funções relacionadas ao aquecimento culinário. No entanto, não é de hoje que tal tecnologia vem sendo estudada e desenvolvida com foco na aplicação industrial para processos que envolvem processos de tratamentos térmicos. Inclusive, existe muito interesse neste desenvolvimento vindo do setor de produção de materiais refratários para uso em aplicações de fornos e panelas siderúrgicas.

Os materiais refratários, são majoritariamente cerâmicas que atuam em condições de trabalho extremamente severas em termos de solicitações térmicas, mecânicas e físico-químicas. Devido a sua alta complexidade de desenvolvimento e produção, um fator limitante para a expansão da utilização de cerâmicas refratárias é o alto custo atrelado aos componentes utilizados em composição. Outro fator visto como prejudicial também para a maior ampliação de setores que utilizam materiais refratários está relacionado com o custo dos processos utilizados na produção e processamento do material final.

Sobre o primeiro fator, já existem diversos estudos em desenvolvimento que visam encontrar elementos e composições capazes de proporcionar propriedades e rendimentos do produto final similar aos já existentes industrialmente, porém com menor custo produtivo. Já sobre o segundo fator, uma série de questões estão sendo estudadas para atenuar os custos como modificações nos tratamentos térmicos de materiais cerâmicos refratários, pois atualmente os utilizados demandam de muito tempo e gasto energético para minimizar os danos as propriedades do material final.

Isto porque os procedimentos térmicos mais utilizados em materiais cerâmicos refratários atualmente, envolvem técnicas de tratamento térmico utilizando chamas à gás unidirecionais. Método este que, além de não fornecer uma alta eficiência de produção, pode provocar danos ao material final e promover a liberação de componentes poluentes na atmosfera devido ao processo de combustão durante o processo.

A partir deste pressuposto, o presente trabalho visou utilizar literaturas já existentes sobre aplicação de micro-ondas em processos de tratamentos térmicos para verificar a possibilidade e viabilidade de aplicação do método em cura de materiais cerâmicos refratários. Para que este objetivo pudesse ser alcançado de forma eficiente, o desenvolvimento foi dividido em três partes principais de modo a facilitar o andamento dos estudos como um todo. É importante salientar, que desde a criação da ideia do projeto, o Mestre Murilo H. Moreira acompanhou, supervisionou e realizou muitas das etapas contidas ao longo de todo o projeto apresentado de forma que sua contribuição foi essencial para que o projeto pudesse ser realizado e fosse possível apresentar resultados experimentais e analisáveis de forma significativa.

A primeira parte teve como objetivo uma revisão e comprovação à respeito dos temas abordados pelas literaturas disponíveis sobre o assunto, uma vez que as literaturas que continham mais informações validáveis se datavam de um tempo considerável em relação ao início do projeto e, portanto, foi necessária uma revisão e comprovação dos métodos apresentados. Já a segunda ficou determinada pelo desenvolvimento de uma simulação de cavidades de micro-ondas para comparação comprovativa dos dados apresentados pelas literaturas consultadas no projeto. Além disso, atrelado a esse desenvolvimento simulacional, o desenvolvimento de um sistema de análises de micro-ondas começou a ser elaborado para realização de ensaios experimentais que fossem comparativos com as condições utilizadas industrialmente em materiais cerâmicos refratários após comprovação dos dados simulacionais desenvolvidos. Para realização desta etapa foi necessário construir um sistema de análises de cerâmicas refratárias adequando e modificando componentes a partir de um aparelho micro-ondas comum, desenvolver um algoritmo para controle de temperatura durante os ensaios, e encontrar um parceiro potencial para o fornecimento de amostras e para a análise e comparação de resultados. A parte de desenvolvimento do algoritmo foi realizada totalmente pelo mestre Murilo H. Moreira

devido ao seu amplo conhecimento em programação na linguagem Python e em suas bibliotecas Matplotlib e Pandas, já a parte de simulação de cavidades foi realizada pelo autor deste trabalho, porém com total auxílio e supervisão do mestre Murilo H. Moreira devido ao seu amplo conhecimento sobre o funcionamento e operação dos *softwares* utilizados. A terceira parte do desenvolvimento do projeto, teve como objetivo a análise comparativa entre as curvas por micro-ondas e por processo industrial de forma a avaliar os parâmetros de eficiência de propriedades finais no material. Durante esta etapa e realização dos testes experimentais, tanto o sistema de ensaios quanto as amostras e o ambiente de testes necessitaram de constantes modificações e adaptações devido a interpretação dos resultados que cada ensaio gerava. Estas modificações serviram para aprimorar o sistema de análises desenvolvido afim de obter resultados cada vez mais coerentes e de fácil análise. Além dos objetivos pré-definidos para o presente estudo, futuros estudos para verificação de viabilidade econômica da utilização do método, bem como outras formas de aplicação do método estão sendo realizados pelo mestre Murilo H. Moreira e pelo aluno de iniciação científica Fernando Schimidt, de forma a tornar a gama de informações disponíveis sobre o processo cada vez mais ampla.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 SIMULAÇÃO DE CAVIDADE

#### 2.1.1 Texto Base: Numerical Simulation Of Drying Of Refractory Concrete

Desde a definição dos objetivos para a realização do projeto, havia pouca literatura disponível à respeito da aplicação de micro-ondas para aquecimento de materiais cerâmicos refratários e, muitas das literaturas consultadas, foram publicadas com muito tempo de distância para os dias atuais o que, em um primeiro momento, fez com que o estudo se voltasse para uma verificação dos argumentos apresentados nas mesmas afim de comprovar sua eficácia de forma experimental.

Dentre as literaturas disponíveis, o texto de Gong et. al. (1991), foi o escolhido para ser utilizado como texto base para o início do projeto pois apresentava informações sobre um modelo matemático, baseado em malhas de elementos finitos, para o aquecimento via micro-ondas cujas premissas básicas eram importantes, porém não totalmente justificadas. Este texto foi utilizado para a elaboração do algoritmo de controle e acompanhamento de temperatura durante a cura, e apresentava resultados comparativos entre os obtidos pela simulação realizada pelo autor e de curas por processo de aquecimento por chamas unidirecionais industriais. Assim, tanto o modelo comparativo de resultados de cura por micro-ondas e por chamas unidirecionais quanto o modelo para desenvolvimento do algoritmo puderam ser validados por meio de testes realizados posteriormente, apresentados neste mesmo trabalho.

#### 2.1.2 Softwares OpenSource

Durante a etapa de simulação de cavidade e comportamento de micro-ondas, os recursos financeiros do projeto ainda eram limitados e, desta forma, foi necessária a procura por *softwares* com código de operação aberto (*open source*) que fornecessem uma abordagem computacional satisfatória para posterior realização de testes experimentais baseados nos resultados exibidos pelas simulações desenvolvidas. Assim, foram utilizados três *softwares open source* com características

complementares para realização da simulação de cavidade de micro-ondas e análises do comportamento do campo eletromagnético em sua cavidade de ressonância.

Apesar de existirem opções pagas com maior disponibilidade de recursos de utilização e visualização, estes *softwares* foram escolhidos por possuírem as funcionalidades básicas necessárias para realização da simulação de cavidade, e pela interconexão de informações que era possível realizar entre eles. Além disso, os *softwares* escolhidos possuíam tutoriais e manuais de fácil acesso e compreensão que auxiliaram para economia de tempo para aprendizagem sobre as formas de manipulação e integração dos mesmos.

#### 2.1.2.1 Gmsh

Gmsh é um *software open source* que gera malha de elementos finitos em até três dimensões (3D), com um mecanismo CAD integrado e pós-processador para visualização da malha criada. Sua principal característica é fornecer uma criação de malha rápida, leve e fácil de usar, com entrada paramétrica e recursos de visualização didáticos. Este *software* possui sua base de operação em quatro módulos (geometria, malha, solucionador e pós-processamento), controlados com a interface gráfica do usuário, por meio de arquivos de texto escritos na própria linguagem de script do Gmsh ou em outras linguagens. (Geuzaine, 2009)

#### 2.1.2.2 Elmer Grid

É caracterizado por ser um *software* de simulação multifísica *open source* desenvolvido principalmente pelo CSC - *IT Center for Science (CSC)* em colaboração com universidades finlandesas, institutos de pesquisa e indústrias para uso nacional. Apesar de criado originalmente para uso nacional, após a disponibilização de seu código de maneira aberta sua utilização foi expandida de forma exponencial por todo o mundo. Este *software* inclui modelos físicos de dinâmica de fluidos, mecânica estrutural, eletromagnetismo, transferência de calor, acústica e etc.. que são descritos por equações diferenciais parciais resolvidas no *software* pelo Método dos Elementos Finitos (FEM). Assim, sendo possível a interação com os dados produzidos pelo *software* Gmsh.

Neste presente trabalho, o Elmer foi utilizado para a interpretação dos dados gerados pelo Gmsh afim de incluir o comportamento físico-químico das micro-ondas na cavidade bem como também para delimitar as regiões geométricas em que essas ondas atuariam na cavidade do aparelho.

### 2.1.2.3 Paraview

É o principal mecanismo de visualização de pós-processamento *open source* do mundo. Utilizando-se de ferramentas e fluxos de trabalho existentes, permite a criação e geração rápida de visualizações para análise de dados. Capaz de ler dados de diferentes fontes e códigos programados em até três dimensões (3D), bem como os programados em Elmer utilizando métodos matemáticos descritos por FEM, com uma interface que oferece múltiplas funcionalidades e é organizada de forma didática (Paraview, 2021)

## 2.2 MICRO-ONDAS

### 2.2.1 Dispositivo de Micro-Ondas

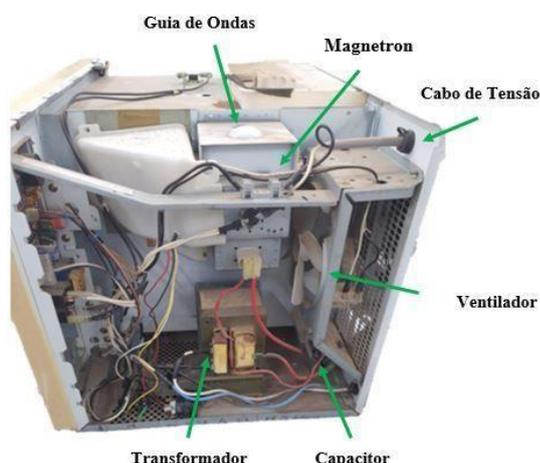
Durante a 2ª guerra mundial, o magnetron, aparelho composto por uma válvula eletrônica que funciona como um oscilador na faixa de frequência de micro-ondas, era utilizado como componente de radares em bases militares para identificação de aviões inimigos no espaço aéreo. Percy Spencer, um engenheiro eletrônico que trabalhava em uma empresa de fabricação destes radares, estava trabalhando com um radar ativo e percebeu que o chocolate do seu bolso havia derretido. Como já sabia que a propagação de micro-ondas gerava calor, supôs que as micro-ondas estavam escapando do tubo do magnetron. Para comprovar sua ideia, realizou mais alguns experimentos envolvendo o magnetron e alimentos (como o milho e ovo), chegando a conclusão e primeira patente sobre a aplicação de micro-ondas para aquecimento. Após alguns anos, em meados de 1975, o aparelho micro-ondas já apresentava alta evolução tecnológica, de forma que foi possível a inclusão do seu uso em domicílios após redução significativa de seu tamanho e necessidade energética, o que revolucionou o modo de aquecer e reaquecer alimentos (MuseuWeg, 2023).

Nos dias atuais, a evolução da tecnologia aplicada ao aparelho de micro-ondas foi tamanha que existem aparelhos micro-ondas com diversas funções, controles, programações e adaptações capazes de realizar diversos tipos de serviços para aquecer, preparar e até simular função de outros aparelhos como o forno convencional.

### 2.2.2 Geração de Micro-ondas

O sistema de aquecimento por micro-ondas está cada vez mais desenvolvido tecnologicamente devido a aplicação em diversos tipos de segmentos industriais e a alta demanda por processos mais eficientes e com alto teor ambiental. Mesmo assim, atualmente, ainda existem muitas pesquisas sobre desenvolvimento e aprimoramento de maneiras para aplicação de micro-ondas. Mesmo havendo um campo para potencial gigantesco em termos de aplicação deste sistema, o processo para geração de micro-ondas como conhecemos hoje, ocorre através de uma sequência comum de etapas lógicas.

Figura 1 — Interior de cavidade de micro-ondas com descrição de componentes principais para funcionamento



Fonte: O autor (2023).

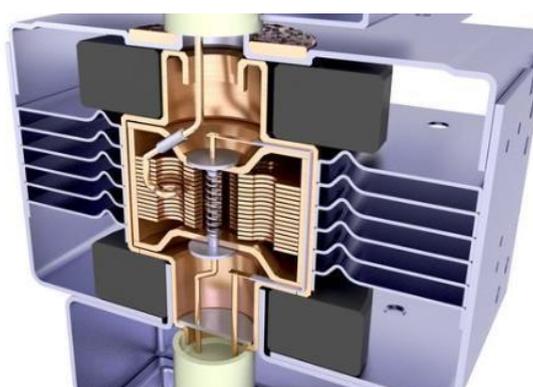
Essa sequência começa pelo recebimento de tensão elétrica por meio de um fio ligado à uma tomada que fornece tensões elétricas de 127 ou 220V para o sistema. No entanto, esta tensão é muito baixa perto da necessária para que um magnetron possa funcionar e gerar micro-ondas. Assim, a tensão recebida inicialmente é convertida por um transformador em uma tensão da ordem de 4000V. A transferência

desta nova tensão convertida para o magnetron, passa por um capacitor de alta tensão que tem como função reter de forma eficiente a tensão elétrica convertida pelo transformador e regular a tensão de envio ao magnetron de acordo com o comando escolhido pelo operador do aparelho.

### 2.2.2.1 Magnetron

O magnetron, por sua vez, realiza a parte mais importante de todo o processo deste sistema, que é a geração das micro-ondas. Esse processo ocorre, pois, as micro-ondas são nada mais que ondas de caráter eletromagnético com frequências da magnitude de 2,45GHz, produzidas por uma oscilação de movimentos de campos elétricos e magnéticos gerados no magnetron e irradiados por uma antena acoplada ao sistema. No caso do magnetron utilizado no aparelho de micro-ondas, existe um filamento metálico (cátodo) com características de ser um bom condutor elétrico devido à alta disponibilidade de elétrons de valência para, quando aquecida por meio do recebimento de uma alta tensão vinda do capacitor, promover a excitação e emissão de elétrons de sua estrutura. Este fenômeno é comumente chamado de Efeito Termiônico.

Figura 2 — Representação de magnetron com corte na direção vertical para visualização de componentes internos



Fonte: Turbosquid. Acesso em Nov. 2022

O comportamento normal dos elétrons liberados é se propagar em linha reta, porém isso não é benéfico para o sistema pois acarretaria perda energética. Assim, são alocados ímãs na parte superior e inferior do filamento, de geometria circular, gerando um campo magnético que causa mudança de direção das partículas

carregadas devido a indução de uma força perpendicular tanto de velocidade de propagação quanto de campo (Kenzo, 2019).

Desta forma, os elétrons liberados pelo aquecimento metálico ficam girando em torno do filamento, mas tenderiam a se espalhar caso não houvesse uma outra cavidade de revestimento deste sistema. Então ao redor do filamento e com mesma geometria que os ímãs, existe uma cavidade de material metálico (ânodo) para qual os elétrons liberados são direcionados. Entre o ânodo e o cátodo deve existir vácuo, pois a propagação dos elétrons pelo ar até o ânodo resultaria em desvios de rota por choque com as partículas gasosas do ar atmosférico e também acarretaria perda energética. Esse ânodo possui cavidades muito parecidas com divisórias (Figura 3) por toda sua circunferência de forma proposital, uma vez que uma carga elétrica negativa circulando por essas cavidades perturbam os elétrons próximos da superfície desta cavidade causando alteração de cargas entre as cavidades do ânodo de forma constante.

Figura 3 — Representação esquemática de corte transversal de um magnetron para ilustrar processo de formação de micro-ondas eletromagnéticas



Fonte: Kenzo, 2019.

Este ânodo e suas cavidades, atuam como um capacitor no sistema, acumulando cargas elétricas e, devido a diferença de cargas entre as cavidades, estas cargas elétricas retidas apontam de uma cavidade com carga negativa para a outra positiva (Figura 3) criando um campo elétrico resultante e oscilante na região. Isso proporciona uma alteração de cargas entre as cavidades do ânodo devido a passagem de corrente elétrica, criando nesta região um campo magnético que se

alterna assim como as cargas nas cavidades do ânodo. Complementar a este fato, dois campos que se alternam geram ondas eletromagnéticas que se propagam de forma aleatória por todas as direções.

### 2.2.2.2 Guias de Ondas

A intenção do sistema de micro-ondas não é que as ondas eletromagnéticas geradas pelo magnetron se propaguem desordenadamente pois isso geraria perda energética uma vez que poucas ondas atingiriam a cavidade do micro-ondas. Assim, entre o magnetron e a porta da cavidade, existe um guia de ondas, que são cavidades que tem por função direcionar os feixes de ondas eletromagnéticas de alta potência com a intenção de que ocorra o mínimo de perda de irradiação durante o processo de condução das mesmas até a cavidade do aparelho. Essas cavidades são compostas externamente por um material condutor oco (geralmente metálico), contendo um dielétrico no interior (geralmente ar), no qual as ondas de alta potência se propagam por meio de reflexão realizadas no interior das paredes desta cavidade condutora (Stroski, 2018).

Existem guias de ondas de diferentes tipos de materiais e com diferentes modos de propagação, porém neste trabalho vamos nos atentar ao guia de ondas para altas potências, geralmente metálico e oco em seu interior e de geometria retangular, este guia trabalha no modo de propagação conhecido como Transverso Elétrico (TE).

Figura 4 — Guia de ondas retangular utilizado em aparelhos micro-ondas (esquerda) e esquema de modo de propagação TE em guias de onda retangular (direita)



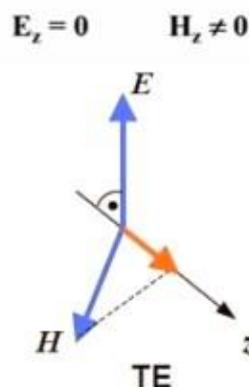
Fonte:

Stroski, 2018.

Este tipo de propagação de ondas pela cavidade favorece o transporte de ondas elétricas uma vez que sua componente de propagação é perpendicular a

direção de propagação de ondas no guia (Figura 5). E, no caso dos micro-ondas, é exatamente esta a componente que vai proporcionar o aquecimento do material dentro da cavidade de ressonância.

Figura 5 — Representação em eixos coordenados da propagação de ondas pelo método TE



Fonte:

Stroski, 2018.

Antes de adentrar a cavidade do micro-ondas, existe um revestimento feito de uma fina camada de mica entre o interior da cavidade de ressonância do aparelho micro-ondas e o guia de ondas. Este revestimento é transparente as micro-ondas geradas pelo magnetron, e atua como uma proteção contra contaminação da cavidade interna do guia de onda evitando que o material aquecido na cavidade do micro-ondas consiga acessar o guia de ondas.

### 2.2.3 Aquecimento

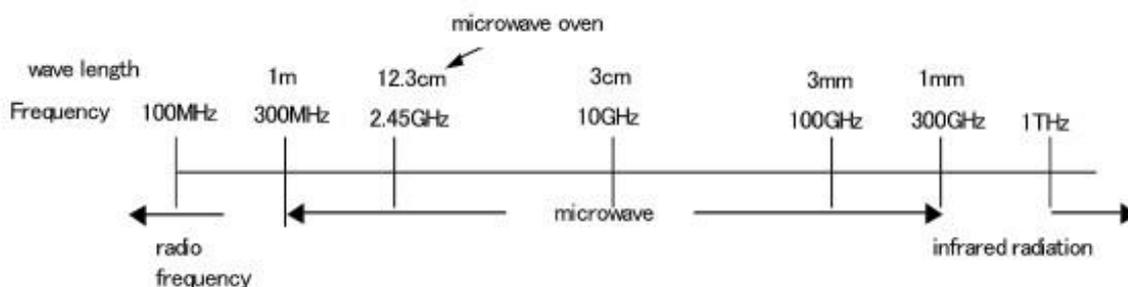
As micro-ondas são ondas eletromagnéticas de frequências entre 300 MHz e 300 GHz. Frequência esta que está diretamente ligada ao comprimento de ondas ( $\lambda$ ) que a onda possuíra de modo inversamente proporcional. Além disso, o processo de geração de uma onda eletromagnética realizado pelo magnetron depende de um fornecimento energético muito grande que está atrelado diretamente a frequência final da onda que se deseja.

As micro-ondas são classificadas no sistema ISM (utilizadas nos setores Industrial, Científico, Médico) que classifica as frequências disponíveis para geração de ondas de forma a não interferir nas frequências já existentes (Gunnewiek, 2013). Assim, os aparelhos de micro-ondas utilizam frequência de propagação de 2,45GHz,

o que equivale a um comprimento de onda médio de aproximadamente 12,24cm. Esse comprimento de ondas proporciona que a geometria da cavidade de ressonância do aparelho micro-ondas possa ter dimensões menores e a adequação do aparelho ao ambiente residencial fica facilitada.

Além disso, apesar de em algumas literaturas ser possível encontrar que está frequência de operação de aparelhos micro-ondas foi definida pois, a maioria dos alimentos e materiais possuem moléculas de água (H<sub>2</sub>O) em sua composição, essa informação não procede pois já existem estudos evidenciando que alguns tipos de proteínas, sal, gorduras podem ser melhores aquecidos do que a água, pois o processo de aquecimento utilizando micro-ondas depende muito mais das propriedades dielétricas que aquele material vai possuir intrinsecamente e se vai haver alguma modificação após aplicação de temperatura.

Figura 6 — Espectro Eletromagnético para ondas eletromagnéticas do tipo micro-ondas



Fonte: Taira, 2008.

Para que um material sofra ação de uma onda eletromagnética é preciso que ocorra uma condução de cargas à longa distância, polarizações das moléculas (por meio iônico ou elétrico) ou rotação dos dipolos elétricos gerados após interação entre ambas as partes. Este último requisito é muito relevante, uma vez que ele é decorrência direta do movimento que as moléculas polares do material realizam de acordo com a direção e intensidade da onda eletromagnética irradiada. Além disso, este fenômeno é dependente de uma propriedade intrínseca do material que é a permissividade relativa (real e imaginária) que, por sua vez, depende diretamente da temperatura do sistema. Esta relação é dada pela equação (1):

$$tg\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

Onde:  $\varepsilon''$  é a permissividade relativa imaginária,  $\varepsilon'$  é a permissividade relativa real,  $\delta$  é o fator de defasagem entre polarização do material e oscilação do campo elétrico e  $tg\delta$  é o fator de perda dielétrica neste processo. A  $tg\delta$  está inversamente proporcional a profundidade de penetração de uma onda eletromagnética em um material. Assim, quanto menos perda dielétrica ocorrer durante a incidência de uma onda eletromagnética na superfície de um material, maior vai ser a profundidade que esta onda conseguirá alcançar na estrutura do material e menos ondas serão refletidas. Por esse motivo, os metais são utilizados para a superfície da cavidade de ressonância, enquanto materiais como cerâmicos e poliméricos podem ser colocados no interior da cavidade como suporte para os materiais a serem analisado, sem causar danos nenhum ao sistema durante as análises. Como ambas as permissividades são dependentes de temperaturas, o comportamento dos materiais utilizados (em termos de profundidade de penetração e absorção de ondas) podem ser modificados com a variação de temperatura.

Devido a estas variações consideráveis, uma correlação entre a incidência da onda, a profundidade de penetração ( $l$ ) e o coeficiente de reflexão ( $R$ ) é estimado pelas equações (2) e (3):

$$l = \left(\frac{c}{\omega}\right) \sqrt{\frac{2[1 + \sqrt{1 + (tg\delta)^2}]}{\varepsilon' tg\delta}}$$

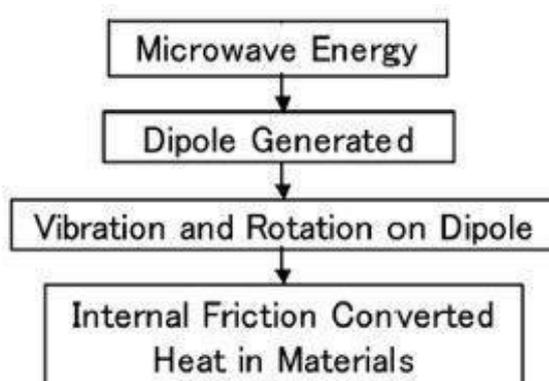
$$R = \frac{1 - \sqrt{2\varepsilon'[1 + \sqrt{1 + (tg\delta)^2}] + \varepsilon'\sqrt{1 + (tg\delta)^2}}}{1 + \sqrt{2\varepsilon'[1 + \sqrt{1 + (tg\delta)^2}] + \varepsilon'\sqrt{1 + (tg\delta)^2}}}$$

Onde:  $c$  é a velocidade da luz e ambas as equações são expressas em função do campo magnético.

Todo este procedimento descrito baseado em Gunnewiek et. al. (2013) e Bykov et. al. (2023), geram um efeito resultante da rotação da molécula dipolar de forma que essa rotação causa atrito das moléculas dipolares com as moléculas vizinhas. Este atrito e esse movimento de rotação das moléculas dipolares geram reações com dissipação de energia na região vizinha na forma de calor. Como na maioria dos

alimentos as moléculas de água estão por toda a estrutura, ao tentarem se alinhar com as ondas eletromagnéticas, um efeito repetitivo de atrito e geração de calor por toda a estrutura do alimento é criado, aquecendo-o por todo seu volume. Este tipo de aquecimento proporcionado no aparelho micro-ondas para materiais com estrutura homogênea e boa distribuição de partículas, é conhecido como Aquecimento Volumétrico e está descrito sucintamente pelo esquema apresentado abaixo, na Figura 7.

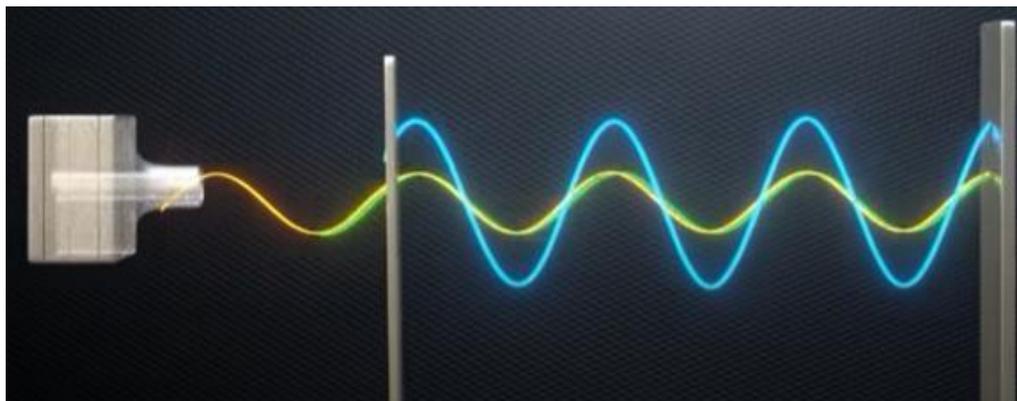
Figura 7 — Processo para aquecimento de material utilizando micro-ondas, simplificado



Fonte: Gong, 1991.

Mas para que a irradiação destas ondas eletromagnéticas seja realizada de forma eficaz até o alimento ou material situado na cavidade de ressonância do micro-ondas, primeiramente as faces desta cavidade devem ser constituídas de um material refletor de micro-ondas (material metálico) e devem possuir superfícies planas para que as reflexões ocorram sem desvios de direção. Além destas características da cavidade, a onda que é gerada pelo magnetron e direcionada até a cavidade ressonante pelo guia de ondas se propaga e se reflete de forma que são geradas regiões com altas e baixas incidências de ondas eletromagnéticas, chamadas de *hot* e *cold spots*, respectivamente.

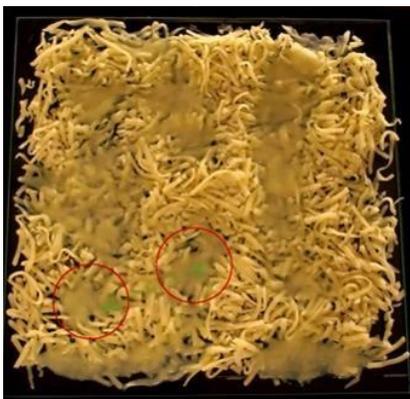
Figura 8 — Esquema representativo de formação de onda estacionária a partir da reflexão de uma onda periódica dentro de uma cavidade de ressonância



Fonte: LesicsPortuguês, 2022.

A formação destas regiões se dá pois, ao ter uma onda eletromagnética periódica se propagando dentro de uma cavidade, com comprimento definido por um múltiplo de metade do comprimento de onda da onda eletromagnética fornecida, vão existir regiões no espaço, onde as cristas da onda incidida e refletida se coincidirão e gerarão uma interferência construtiva para aumento de amplitude da crista resultante (Campos, 2023). Ao mesmo tempo, na interpolação das regiões de nós, essa amplitude de incidência será minimizada. Estas interferências acontecem de forma constante devido a alta frequência da onda, o que provoca dentro da cavidade de ressonância a formação de uma onda eletromagnética estacionária que favorece o aquecimento do material nas regiões que sofrem ação das cristas formadas pela somatória das amplitudes das ondas periódicas, mas ao mesmo tempo não ocorre incidência de onda eletromagnética para as regiões de nós das ondas estacionárias formadas. Este processo pode ser visto na Figura 9, onde um experimento envolvendo aquecimento de um prato com queijo por micro-ondas, sem o sistema de movimentação do alimento, mostrou um aquecimento apenas de regiões localizadas do alimento, que estavam localizadas na direção de incidência das ondas com maior energia devido a sobreposição de amplitudes. Além disso, foi notado que essa incidência proporcionou um aquecimento expansivo de toda a região vizinha a onda e foi notado que a distância entre o centro de uma região aquecida para a outra apresentava distância equivalente à um múltiplo do valor de meio comprimento de onda da onda eletromagnética irradiada. Isso comprova as teorias explicadas anteriormente sobre aquecimento volumétrico, condições de dimensões de cavidades e irradiação por formação de ondas estacionárias com concentração maior de energia advinda da sobreposição de duas ondas periódicas.

Figura 9 — Experimento prático para demonstrar regiões de altas e baixas irradiações por micro-ondas durante o processo de aquecimento em um forno micro-ondas convencional



Fonte: KitchenGearoid, 2019.

Para minimizar este efeito de aquecimento localizado, um sistema envolvendo uma base giratória foi introduzida nos aparelhos micro-ondas. Este sistema não altera as regiões com maior incidência de ondas dentro da cavidade, mas consegue girar o material de forma que este passa por diferentes regiões de incidência de ondas eletromagnéticas durante o aquecimento, melhorando e uniformizando o aquecimento volumétrico do material por toda sua estrutura.

### 2.3 MATERIAIS REFRAATÓRIOS DE NATUREZA MAGNESIANOS CONTENDO GRAFITE

Boa parte da redução de custos na produção de aços vem das melhorias e desenvolvimentos em torno dos refratários de caráter magnesianos ou dolomíticos e, apesar da constante procura por desenvolvimento no estudo de refratários para siderurgias, poucas literaturas e avanços consolidados ainda estão disponíveis para consultas devido ao interesse das empresas desenvolvedoras de manter seus desenvolvimentos realizados no sigilo.

O processamento de aço, ferro, cimento entre outros possui etapas realizadas utilizando tratamentos térmicos realizados em altas temperaturas que exigem materiais capazes de suportar condições de trabalhos como: altas temperaturas, esforços mecânicos como vibrações desgaste por atrito, tensões de compressão, tensão e flexão. Também devem suportar solicitações de natureza térmica, como expansão e choque térmico, e de natureza físico-químicas, que envolvem

principalmente interações e reações com escórias de procedimentos siderúrgicos (Zimmer, 2004).

Deste modo, existem diversos tipos materiais que atendem a estas solicitações no mercado, chamados de refratários. Dentre eles, as cerâmicas refratárias se destacam pois são constituídas de óxidos que possuem alto ponto de fusão e são inertes quimicamente à efeitos de reações químicas e transformações estruturais severas em altas temperaturas. Nesta classe, existe uma vasta gama disponível, dentre os quais são comumente classificados de acordo com sua forma e composição química.

Quanto à forma, os refratários podem possuir seus formatos pré-definidos durante seu processamento (conformados) ou podem ter ser formado definido durante a aplicação (monolíticos). Já quanto a composição química, as cerâmicas refratárias são subdivididas em ácidas, alcalinas, neutras ou especiais. Como o foco do presente trabalho é o entendimento e discussão das características de cerâmicas refratárias de caráter magnesiano, contendo ou não carbono, falaremos apenas da classificação e características que envolve este tipo de material. Eles são considerados refratários alcalinos e quase não reagem quando em trabalho, entram em contato com escórias contendo caráter básico na composição (Zimmer, 2004).

Refratários a base de doloma ( $\text{CaO.MgO}$ ) eram muito utilizados pois possuem maior disponibilidade em mercado e são mais baratos. No entanto, devido a evolução dos processos siderúrgicos e da produção de matérias primas que pedem por propriedades fundamentais mais efetivas, como maior refratariedade, alta condutividade térmica e resistência a hidratação do  $\text{MgO}$ , que são propriedades oferecidas pelos refratários a base de  $\text{MgO}$ , quase não são usados tijolos dolomíticos na siderurgia atualmente. Estes novos refratários de caráter magnesianos contêm em sua composição geralmente acima de 80% de magnésia ( $\text{MgO}$ ), que é produzido pela calcinação da magnesita e possuem como principal característica a alta resistência a ataques e interações com escórias de natureza básica. Essa propriedade permite que esses materiais sejam amplamente utilizados em aplicações para misturadores para fundição, fornos de panela (aciaria), fornos rotativos e também em fornos para fusão de vidros. Porém, possuem duas limitações fundamentais que são: serem susceptíveis a hidratação do  $\text{MgO}$  (mesmo que menos susceptíveis que as dolomas) e possuírem alto coeficiente de expansão térmica (CET) (Zimmer, 2004).

A primeira limitação pode ser contornada pelo aumento de temperatura na produção da matéria prima, uma vez que quanto maior a temperatura de aquecimento, menor a área superficial do grão gerado por causa do favorecimento do crescimento do mesmo devido ao aumento de temperatura. Isso proporciona uma diminuição significativa da susceptibilidade à hidratação do grão de MgO. Já a segunda limitação, pode ser minimizado ao combinar MgO com óxidos ou componentes menos expansivos como o espinélio. Mas outra alternativa é acrescentar grafite como agregado na composição, pois sua estrutura anisotrópica apresenta valores de CET pequenos nas direções paralelas aos planos de grafites e, mesmo possuindo elevado CET na direção de um plano para outro, existe uma grande compressibilidade da estrutura do grafite nesta direção que acontece por ausência de ligações primarias. Este fato pode até vir a auxiliar na absorção de parte da expansão realizada pelo MgO na estrutura (Bitencourt, 2011).

Além da adição como agregado, o grafite pode ser adicionado na composição com a função de ligante. Assim, podem ser geradas melhoras significativas em relação ao mantimento da refratariedade por não fundir e nem se decompor em altas temperaturas. A possibilidade de possuir uma segunda fonte de carbono adicional na estrutura para aumentar o fornecimento de carbono para a matriz após o processo de cura. Sua elevada condutividade térmica, se combinada com seu baixo CET e com sua flexibilidade estrutural, aumentam a resistência ao choque térmico. Sua maior condutividade térmica pode proporcionar formação de camada protetora contra degradação de metal ou escória viscosa/solidificada sobre a face quente do revestimento. Além disso, sua não molhabilidade por escórias siderúrgicas melhora significativamente a resistência final do material à efeitos corrosivos (Bitencourt; Pandolfelli, 2013). Porém, a adição de grafite desta forma, possui duas limitações: este componente é altamente susceptível a oxidação em altas temperaturas, e ligas contendo Fe podem facilmente molhar o grafite e decompô-lo. Fatores estes que são minimizados quando o grafite está em contato com óxidos refratários, pois eles possuem pouca susceptibilidade ao ataque químico de ligas de Fe e não esboçam reação quando em presença de atmosferas oxidantes em altas temperaturas.

## 2.4 RESINAS TERMOFIXAS

Devido a interação de fraca magnitude entre óxidos refratários e grafite e devido à ausência de processo de sinterização do grafite, em materiais refratários de caráter magnesianos contendo grafite, é sempre necessária adição de um elemento ligante (Bitencourt, 2011).

Apesar de existirem diversos tipos de ligantes inorgânicos, estes muitas vezes contêm altas porcentagens de água ( $H_2O$ ) em suas composições. Esse fato aumenta consideravelmente o risco de hidratação do  $MgO$ , o que não é benéfico para as propriedades e desempenho que se espera deste material refratário. Assim, a opção por um ligante orgânico e que contenham fontes de carbono em sua composição é preferível, uma vez que estes não possuem água ( $H_2O$ ) em suas composições e, por possuírem carbono, proporcionam aumento das propriedades favorecidas pela introdução de carbono em materiais refratários de caráter magnesianos. Desta forma, alguns tipos de ligantes que atendem estas especificações poderiam ser utilizados, como: Piche, Alcatrão e Resinas termofixas.

As duas primeiras opções citadas possuem limitações consideráveis em comparação as resinas termofixas pois são comercializadas no estado sólido, então a mistura deve ser realizada com presença de temperatura para que estas fontes de carbono adquiram fluidez e passem a molhar as demais matérias primas da composição. No entanto, este processo é inviável e provoca uma maior perda energética do processo. Além disso, ambas as opções liberam componentes cancerígenos e poluentes durante a reação de pirólise no processo de aquecimento. Empresas realizaram o beneficiamento destas matérias primas de forma a minimizar a quantidade e proporção dos componentes cancerígenos emitidos durante pirólise, nomeando o composto beneficiado de carbões. Porém o seu desenvolvimento e comprovação de aplicação prática ainda não são suficientes para promover seu uso em larga escala e nem para substituir as resinas termofixas, que são os ligantes utilizados em maior escala no ramo de refratários nos dias atuais (Bitencourt; Pandolfelli, 2013).

Resinas termofixas são substâncias orgânicas que possuem baixo peso molecular e que passam por transformações estruturais permanentes durante o processo de cura. Estas transformações ocorrem, pois, as moléculas da resina

reagem entre si formando macromoléculas altamente ramificadas que por sua vez, também sofrem reação com outras macromoléculas da estrutura e se ligam por interações covalentes. Isso proporciona uma estrutura sólida que restringe o movimento entre as macromoléculas. Esse comportamento é típico de pode ser usado para definir polímeros de caráter termofixos. Pois, em caso de um novo aumento de temperatura, estas macromoléculas não se reorientam. Ao invés disso, elas se degradam e, em ambientes cuja presença de oxigênio é mínima, geram um resíduo carbonáceo que fica depositado na estrutura do material em altas temperaturas.

A resina termofixa mais utilizada nos dias atuais é a fenólica, por possuir alta disponibilidade, ser barata, possuir uma fixação de resíduos carbonáceos alta e liberar menor quantidade de componentes tóxicos e poluentes após cura, eliminar menor quantidade de componentes tóxicos e poluentes, proporcionar melhora das propriedades mecânicas após a cura e diminuição da porosidade, e por possuir grande variedade de composições com fácil produção, proporcionando variedade de opções específicas para cada caso de composição e solicitação (Bitencourt, 2011).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 COMPOSIÇÕES

Para a aplicação dos resultados obtidos pela simulação em experimento prático, a princípio foram processadas 12 amostras cilíndricas com um pequeno orifício na parte superior para encaixe de termopar que teria como função aferir a temperatura da amostra durante os ensaios. A formulação dessas amostras foi majoritária de diferentes frações de alumina tabular que variaram pelo tamanho de grão entre 2mm até 0,02 $\mu$ m. Além da matéria prima principal, foram incorporados ligantes (cimento de aluminato de cálcio, Secar 71), aluminas calcinadas e reativas (CL370 e CT 3000), dispersante (FS60) e água, gerando um composto final de 3kg.

Tabela 1 — Composição de concreto refratário utilizada para 1º procedimento experimental de cura por micro-ondas

Material Final: 5 CAC		
Composição:		
Matéria Prima	Massa para 4Kg (g)	Massa para 3Kg (g)
Alumina Tabular 6-3 mm	1000	750
Alumina Tabular 3-1 mm	400	300
Alumina Tabular 1-0,5 mm	840	630
Alumina Tabular 0,6-0,2 mm	280	210
Alumina Tabular 0-0,2 mm	720	540
Alumina Tabular <45 $\mu$ m	240	180
CL 370	80	60
CT 300056	200	150
Secar 71	210	180
F 560	8	6
Água	60	120

Fonte: O autor (2023).

Os pós foram misturados junto aos ligantes em um reômetro de pás, de propriedade do laboratório GEMM com capacidade para 5kg, até incorporarem a fase líquida. Esse processo não levou mais de 60 segundos e durante ele, água foi sendo acrescida na mistura até que fosse identificada uma queda de torque no processo.

Após a retirada do reômetro, o material misturado passou pelo processo de aferição de fluidez, utilizando uma mesa vibratória de propriedade do laboratório GEMM. Em seguida, foram moldadas em 12 cilindros de PVC com diâmetro médio de 50 mm, contendo em média 1/12 de peso da composição cada para então passar a

segunda vez pelo processo de vibração na mesa com o objetivo de eliminar possíveis bolhas e para melhorar a compactação e homogeneização da massa refratária no molde, conforme apresentado na Figura 10. Antes de levar as amostras para a cura na câmara climática, espaçadores improvisados com fita adesiva, nas dimensões de aproximadamente 5 mm de diâmetro, foram adicionados para gerar as cavidades do termopar no centro das amostras.

Figura 10 — Amostras para 1º procedimento experimental após processo de cura em estufa térmica



Fonte: O autor (2023).

As amostras já moldadas foram então encaminhadas para a câmara climática onde ficaram por um período de 24h em temperatura controlada de 110°C com umidade relativa de 80%. Finalizadas as 24h, o processo de desmoldagem foi realizado e procedido do processo de pesagem da amostra para comparação de resultados após o ensaio com o micro-ondas

Além deste primeiro experimento prático, foram realizados mais três baterias de testes com amostras fornecidas pela RHI Magnesita S.A.. Estas amostras continham em sua composição majoritariamente magnésia eletrofundida e uma fonte de carbono (grafite), porém em menor teor possuíam antioxidantes (alumínio metálico e liga de alumínio-magnésio) e resina fenólica utilizada como ligante da composição. Estas amostras foram produzidas pela própria empresa passando por um processo de mistura dos elementos da composição em um misturador de rolos com capacidade para 10Kg, seguido por um processo de prensagem uniaxial em uma prensa do tipo FKL. Após o processamento inicial, o material prensado foi encaminhado para corte em serra industrial do tipo clipper à seco para produção de amostras com dimensões cúbicas de 50x50x50mm (padrão utilizado para todos os testes realizados).

Diferentemente da amostra de 5CAC, o furo para alocação do termopar foi realizado utilizando uma furadeira industrial, de posse do laboratório GEMM, com broca de 7mm cuja profundidade de penetração foi de 25mm.

Figura 11 — Amostras de mesma composição e dimensões recebidas no laboratório GEMM para realização de 2ª (esquerda) e 3ª (direita) baterias de testes de cura por micro-ondas



Fonte: O autor (2023).

No último fornecimento de amostras pela empresa, para a realização da quarta bateria de testes, houve modificação na composição que deixou de ter grafite e antioxidantes devido ao tipo de estudo e análise proposto para esta parte do ensaio. No entanto, os procedimentos de mistura, prensagem, corte e furo ocorreram exatamente no mesmo modelo adotado para as demais amostras produzidas anteriormente. Uma diferença considerável produzida pela alteração da composição, foi a fragilização da estrutura da amostra à verde. Isso acarretou lascamentos e esboroamento da estrutura durante os processos de corte e de furo para alocação do termopar.

Figura 12 — Amostras contendo apenas MgO e resina fenólica recebidas para realização de 4ª bateria de testes



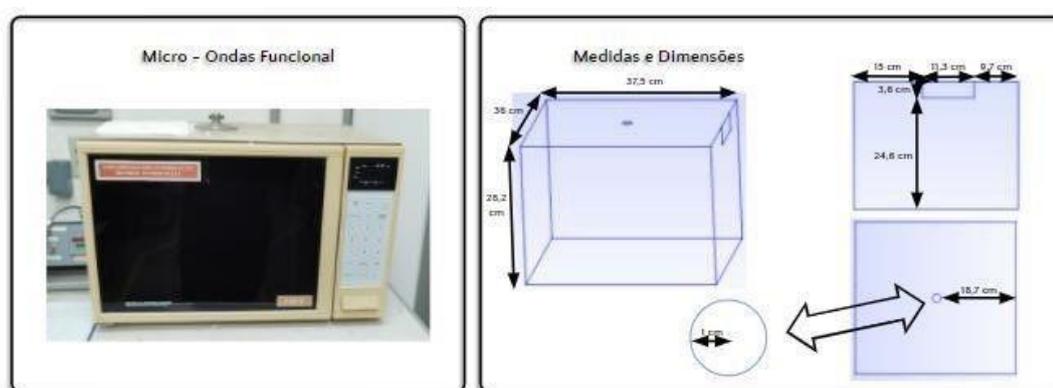
Fonte: O autor (2023).

## 3.2 SISTEMA PARA REALIZAÇÃO PRÁTICA DE CURA

### 3.2.1 Caverna de Micro-ondas

O aparelho de micro-ondas utilizado para os estudos de cura das amostras refratárias se trata de um modelo muito antigo e convencional da Brastemp que já era de posse do laboratório GEMM da UFSCar - São Carlos, quando os estudos teóricos começaram.

Figura 13 — Aparelho micro-ondas utilizado para montagem de sistema de testes de cura por micro-ondas (esquerda) dimensões da caverna do aparelho micro-ondas utilizadas como base para desenvolvimento simulacional (direita)



Fonte: O autor (2023).

Antes do início dos testes o aparelho já se encontrava em pleno funcionamento de todos seus componentes, porém devido ao tipo de utilização não convencional para realização dos testes de cura, o aparelho teve de passar por algumas modificações iniciais para garantir a realização dos testes de cura de forma eficiente.

Estruturalmente, as modificações feitas foram: abertura central no teto do aparelho para conectar uma balança com suporte de amostras para realizar o acompanhamento de perda de massa durante os ensaios. Além disso, foi necessário a retirada do prato e do sistema giratório pois o orifício seria utilizado como caminho para alocação de um termopar para realizar o acompanhamento de temperatura da amostra durante os ensaios.

Figura 14 — Suporte para amostra refratária alocado na abertura superior criada na caverna do micro-ondas para realização de 1º procedimento experimental



Fonte: O autor (2023).

Figura 15 — Cavity interna de aparelho micro-ondas utilizado no sistema desenvolvido para análise de cura por micro-ondas de cerâmicas refratárias contendo ou não fontes de carbono na composição



Fonte: O autor (2023).

Além disso, foram introduzidos alguns componentes externos, que serão exemplificados a seguir, aos de funcionamento do micro-ondas para adequar todo o sistema e realizar os testes de cura de forma eficiente.

### 3.2.2 Controle de Temperatura

O aparelho de micro-ondas por si só, não contém em sua programação uma forma de controle da taxa de aquecimento em seu interior, pois opera de forma a ligar e desligar o magnetron em uma potência já pré-determinada no painel de comandos. Como consequência, não seria possível a reprodução da cura realizada no setor

industrial com taxa de aquecimento constante de uma temperatura. Então, foi então necessário a anexação de um controlador PID para se adaptar a esta situação.

Figura 16 — Face frontal externa (esquerda) e interna (direita) de controlador PID utilizado no sistema de análise de materiais refratários contendo ou não fontes de carbono por micro-ondas



Fonte: O autor (2023).

O controlador utilizado não garante uma taxa de aquecimento constante para a operação do aparelho micro-ondas. Porém, através de uma curva base de taxa de aquecimento criada por um algoritmo, o controlador consegue determinar quando o magnetron vai ser ligado para enviar as ondas eletromagnéticas e quando ele será desligado. Para conseguir seguir o comportamento da taxa de aquecimento proposto pela curva base, foi necessário a aplicação de um termopar em contato com a amostra para registrar a temperatura da mesma durante os testes e informar ao controlador se ele deve ligar o magnetron (quando a temperatura do termopar ficasse menor do que a da curva base) ou se ele deve desligar o magnetron (quando a temperatura do termopar superasse a da curva base).

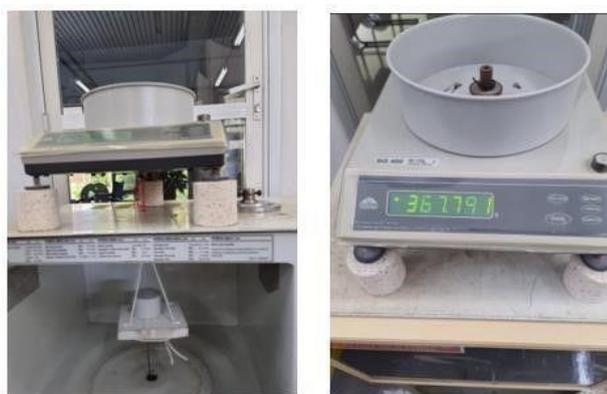
Apesar de não ser o método mais eficiente existente, por ele é possível fazer com que as curvas (base e experimental) possuam o mesmo comportamento e que a taxa de aquecimento das amostras siga bem próxima da taxa de aquecimento estipulada para o ensaio em questão. Ademais, durante a realização dos testes, foram identificados processos de adequação do sistema para corrigir alguma falha ou para melhorar o desempenho do aparelho nos testes de cura, uma vez que o sistema desenvolvido para os testes foi criado e adaptado a partir da definição de aquecimento utilizando micro-ondas e das necessidades que o sistema convencional necessitaria para simular as condições de cura utilizadas em escala industrial.

### 3.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

O teste prévio mostrou resultados satisfatórios quanto ao controle do sistema pelo algoritmo e quanto ao aquecimento realizado no bquer contendo água ( $H_2O$ ) dentro da cavidade. Assim, o sistema estava pronto para a realização da etapa seguinte, que seria compor um sistema funcional para ensaiar um material cerâmico refratário, possuindo uma balança para aferir a evolução da massa enquanto o aquecimento é realizado (Análise Termogravimétrica), e um termopar acoplado para o levantamento do histórico térmico da amostra.

Para isso, foi necessário o posicionamento de uma balança com capacidade para 3kg sobre o aparelho de micro-ondas. Abaixo desta balança, existia um gancho usado para sustentar hastes de fio polimérico que acomodavam uma base refratária de alumina porosa para sustentação e estabilização da amostra dentro da cavidade do micro-ondas, como mostra a representação da Figura 17.

Figura 17 — Esquema de acoplamento de balança no sistema de análise de cura por micro-ondas para cálculo de perda de massa durante aquecimento (TGA) nas amostras da 2ª bateria de testes



Fonte: O autor (2023).

Já na parte abaixo do aparelho micro-ondas, foi alocada uma haste metálica improvisada, com garras, para servir como suporte do termopar que seria introduzido na cavidade de modo a ficar em contato com a amostra suspensa para realizar o cálculo da TGA durante o ensaio, como mostra o esquema representado na Figura 18.

Figura 18 — Suporte de garras adaptado para gerar estabilidade e fornecer suporte ao termopar acoplado no sistema de análise de cura por micro-ondas



Fonte: O autor (2023).

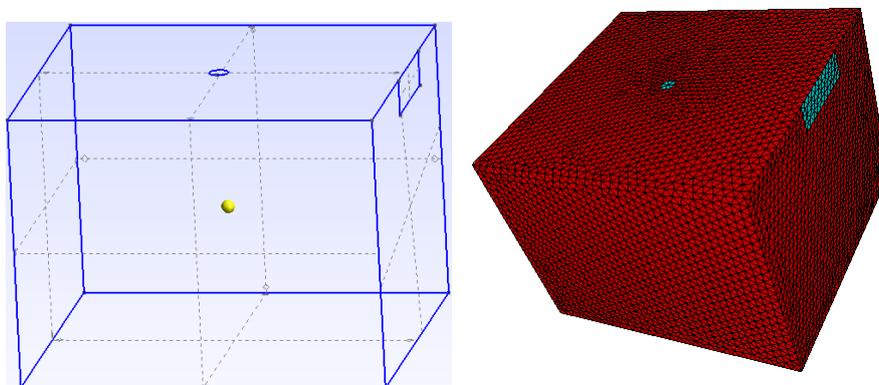
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 SIMULAÇÃO DE CAVIDADE

Esta simulação foi feita contendo os resultados obtidos para os três *softwares open source* utilizados. O objetivo final, era realizar a simulação de uma cavidade de micro-ondas, baseado nas dimensões do equipamento existente no laboratório GEMM, e analisar o comportamento das propriedades eletromagnéticas dentro desta cavidade para visualizar as regiões com maiores ou menores influências de irradiação de micro-ondas, a fim de comparar e comprovar os resultados obtidos com as informações fornecidas pelas literaturas bases utilizados no início do projeto.

A criação da malha de elementos finitos com entradas paramétricas e a definição da geometria para a cavidade foram produzidas utilizando o *software* Gmsh, de forma a fornecer uma pré-visualização da cavidade em 3D com as malhas parametrizadas expostas (Figura 19, esquerda). Seguinte a criação das malhas, foi utilizado o *software* Elmer para inclusão do modelo físico-químico de propagação de ondas eletromagnéticas e para a definição das condições de contorno para esta propagação (Figura 19, direita). A visualização da cavidade fornecida por este *software* não possui muitas diferenças em relação a apresentada pelo *software* Gmsh, uma vez que as funcionalidades adicionadas nesta etapa dependem do funcionamento prático do sistema para poderem ser visualizadas com mais clareza.

Figura 19 — Representações de cavidades produzidas por software Gmsh (esquerda) e Elmer (direita)



Fonte: O autor (2023).

Para a visualização do comportamento do modelo aplicado de propagação de ondas eletromagnéticas utilizando malhas de elementos finitos, foi utilizado o *software* Paraview que fornece uma visualização 3D do exterior e interior da cavidade e projeta o comportamento das ondas eletromagnéticas dentro da cavidade para melhor visualização e interpretação do mesmo durante trabalho (Figura 20).

Figura 20 — Visualizações de pós-processamento de simulação de ondas eletromagnéticas no interior de uma cavidade de micro-ondas geradas por software Paraview



Fonte: O autor (2023).

As visualizações apresentadas fornecem os dados da magnitude de irradiação do campo elétrico em diferentes formas de visualizações para facilitar o entendimento sobre o processo. As regiões em azul e vermelho, são as regiões que mais sofrem ação das ondas eletromagnéticas e só possuem identificação diferente, pois a onda oscila em sentidos opostos perpendicularmente à uma mesma direção, assim o *software* identifica as intensidades de cada sentido como magnitudes positivas e negativas de interação e utiliza cores diferentes para destacá-las. Pela visualização do comportamento eletromagnético gerado pelo Paraview, foi possível comprovar o comportamento de onda estacionária para a propagação eletromagnética dentro da cavidade de micro-ondas, levando em consideração a componente elétrica por ser a principal responsável pelo aquecimento do material contido no sistema.

## 4.2 1ª BATERIA DE TESTES EXPERIMENTAIS

Como os dados simulacionais foram obtidos de forma antecipada ao prazo pré-determinado, e apresentaram resultados satisfatórios com relação a validação dos dados analisados nas literaturas, foi possível dar início a outra etapa do projeto que também possuía duas frentes principais: pesquisar e obter a simulação de cavidade de micro-ondas levando em conta a presença de uma amostra em seu interior, e realizar um experimento prático de secagem pelo processo de micro-ondas. Esta primeira etapa ficou restrita momentaneamente devido a ausência de tempo hábil disponível para aprendizagem de utilização do software escolhido para realizar estas simulações. Já para a segunda parte, utilizando os conhecimentos adquiridos até o momento e com o auxílio de um algoritmo para efetuar os comandos do controlador no micro-ondas e com as adaptações feitas para tornar o sistema mais seguro e eficiente, se tornou possível realizar um teste inicial do sistema até agora desenvolvido utilizando um béquer de vidro com água para verificar o processo de aquecimento utilizando o sistema desenvolvido. Os resultados obtidos foram satisfatórios em relação a programação e ao aquecimento do líquido durante o ensaio, propiciando o início da montagem do sistema contendo os componentes externos e adaptados (balança, termopar e suporte para ensaiar uma amostra refratária) para realização do primeiro teste experimental envolvendo uma amostra cerâmica refratária.

Figura 21 — Sistema para análise de cura de materiais cerâmicos refratários contendo ou não carbono completo para realização de 1ª bateria de testes



Fonte: O autor (2023).

O sistema foi construído de maneira rústica e, portanto, possuía discrepâncias significativas de um sistema considerado ideal para o ensaio e comparação de dados,

como desbalanceamento, falta de estabilidade, dificuldade de controle de taxa de aquecimento que são fatores muito cruciais ao tentar verificar perda de massa de uma amostra suspensa por meio de um termopar acoplado. No entanto, o objetivo principal deste experimento prático era verificar o funcionamento do controlador pelos comandos do algoritmo gerado e obter dados à respeito de redução de massa no final do experimento, mesmo não sendo possível tirar conclusões mais específicas no momento.

Por erros técnicos durante a realização do experimento, a taxa de aquecimento da amostra atingiu valores críticos, cerca de  $1.2^{\circ}\text{C/s}$ , o que levou a explosão da amostra dentro da cavidade e acarretou insucesso na realização do experimento prático inicial, como é possível ser observado na Figura 22.

Figura 22 — Amostra com composição de 5CAC utilizada para 1º procedimento experimental de análise de cura por micro-ondas após realização de 1º teste



Fonte: O autor (2023).

No entanto, em uma análise post mortem, foi possível a reconstituição parcial da amostra e, com isso, percebeu-se que mesmo fora dos parâmetros estudados foi possível identificar que o início da explosão aconteceu na direção do interior para o exterior da amostra devido a presença de regiões mais danificadas e lascadas no interior, enquanto a região exterior se mostrou sem presença de ação de tensões induzidas pelo aquecimento. Além disso, o rompimento catastrófico da amostra ocorreu em uma direção centralizada na amostra, mostrando que devido ao aumento abrupto de temperatura e pressão, a região interna central gerou concentração excessiva de tensões.

Estes fatos corroboraram para comprovar que o aquecimento de um material por micro-ondas acontece de maneira volumétrica, devido a troca de calor e diferença de pressão entre a atmosfera e a superfície da amostra, em casos como esse com altas taxas de aquecimento o interior da amostra sofre maior influência da pressão e

temperatura gerada, o que proporciona uma maior concentração de tensão no interior do refratário, ocasionando a explosão com direção do interior para a superfície do material.

Figura 23 — Reconstituição de amostra com composição de 5CAC utilizada para 1º procedimento experimental de análise de cura por micro-ondas após realização de 1º teste



Fonte: O autor (2023).

Apesar de não ter sido possível obter o comportamento teórico ideal, o estudo da amostra após o teste e o sistema construído para análises térmicas envolvendo micro-ondas, abriram espaço para a correção do sistema adaptado, bem como do algoritmo utilizado para controlar os pulsos do aparelho micro-ondas, para continuar prosseguindo com os testes em amostras refratárias.

#### 4.3 2ª BATERIA DE TESTES EXPERIMENTAIS

Para a continuação da realização de cura nas cerâmicas refratárias, algumas modificações foram feitas no sistema de análise para corrigir erros antigos e proporcionar uma melhor experiência e análise de resultados.

Desta forma, o principal problema no primeiro teste havia sido o aquecimento desenfreado da amostra durante ensaio. Assim, o algoritmo que comanda o controlador teve os erros de operação corrigidos para conseguir manter o aquecimento da amostra de forma uniforme durante a cura, o que foi comprovado posteriormente com um aquecimento utilizando novamente um béquer com água para verificar o controle da taxa de aquecimento durante o ensaio.

Após apresentação do projeto e dos primeiros resultados obtidos para possíveis parceiros, um interesse da RHI Magnesita S.A. foi desenvolvido e, desde

então, a empresa passou a incentivar o projeto e contribuir para a realização de mais testes com envio de amostras e participação ativa na discussão e análise dos resultados obtidos.

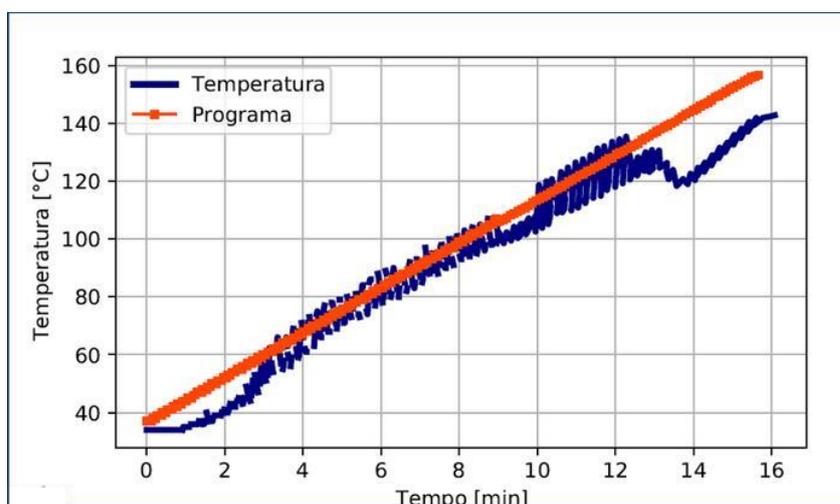
Assim, já para realização da segunda bateria de testes, foram utilizadas amostras de fornecidas pela RHI Magnesita S.A.. O principal interesse da empresa era o de verificar a eficácia do método em comparação ao já utilizado na empresa com fornos que utilizam a queima convencional por meio de queimadores com chamas unidirecionais.

A princípio, dentre as cinco amostras fornecidas, três seriam utilizadas para realização de testes de acompanhamento de taxa de aquecimento, enquanto as demais seriam utilizadas para os ensaios de TGA.

No presente teste e para os seguintes realizados (3ª e 4ª baterias de testes), as condições para cura utilizando micro-ondas foram determinadas utilizando uma curva base para controle de temperatura que levava em conta uma taxa de aquecimento de 5°C por minuto com temperatura limite de 200°C e 100% de potência do micro-ondas, seguido de um patamar de aquecimento de 30 minutos em 200°C.

Para a primeira amostra ensaiada, foi possível observar um comportamento da curva de aquecimento experimental (azul) muito próximo do que se esperava quando comparado a curva de aquecimento teórica (laranja) já pré-programada pelo algoritmo.

Gráfico 1 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 1ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado



Fonte: O autor (2023).

No entanto, o teste foi subitamente interrompido em torno de 160°C durante o aquecimento, que ocorreu por mecanismo de segurança do aparelho de micro-ondas uma vez que, após cessado o teste, foi possível identificar uma alta temperatura no magnetron e nas regiões próximas a ele que podem ter sido ocasionadas devido ao desgaste do filamento do magnetron que diminui a eficiência do processo e assim necessita de mais energia para produção das ondas e como consequência, mais calor é dissipado da cavidade. Assim, não foi possível analisar o comportamento da curva durante o período de patamar. Ademais, foi identificado um forte cheiro durante todo o teste, que posteriormente a bateria de testes realizadas, seria descoberto como sendo proveniente da reação térmica da resina fenólica utilizada.

Após uma análise dos empecilhos durante o teste, foram necessárias mais algumas modificações no sistema de modo a corrigi-las. Desta forma, para a diminuição do aquecimento do magnetron e dos arredores, foram feitos alguns orifícios na parte superior do micro-ondas (na direção do magnetron) e incluída mais uma ventoinha para melhorar a circulação de ar e, conseqüentemente, o sistema de refrigeração do mesmo.

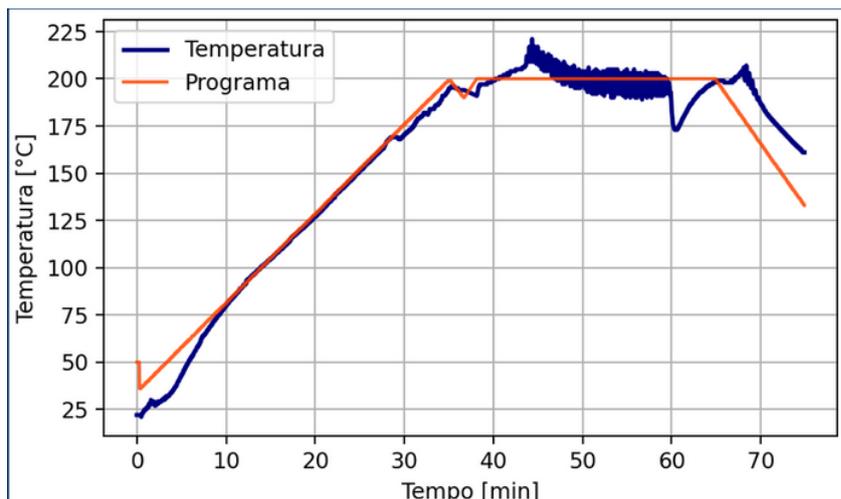
Figura 24 — Anexação de uma ventoinha (esquerda) e furos (direita) na cavidade externa do aparelho de micro-ondas utilizado no sistema de análises de cura por micro-ondas para ampliação de sistema refrigerador do magnetron



Fonte: O autor (2023).

O teste com a segunda amostra produziu resultados mais coerentes de acompanhamento de temperatura. Sendo possível até a aferição do comportamento térmico da amostra durante patamar de 200°C.

Gráfico 2 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 2ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado



Fonte: O autor (2023).

O programa de acompanhamento de temperatura (azul) foi mais coerente com a curva teórica programada (laranja) apresentando algumas oscilações apenas próximo da temperatura final de aquecimento e durante patamar de queima à 200°C. Isso ocorreu devido a uma instabilidade do algoritmo durante as medições de temperatura para esta faixa. Além disso, o cheiro forte diminuiu consideravelmente e, pela primeira vez, puderam ser observados eventos de abertura de arco elétrico durante algum teste realizado.

Estes eventos culminaram em regiões demarcadas na amostra ensaiada e em corte de uma das hastes de suporte da amostra, o que não causou interferência no teste pois as demais três hastes mantiveram a peça estabilizada da mesma forma.

Figura 25 — Suporte de amostra com rompimento de um fio sustentador (esquerda) e marcas produzidas por formação de arco elétrico (direita) na amostra utilizada no 2º teste da 2ª bateria de testes

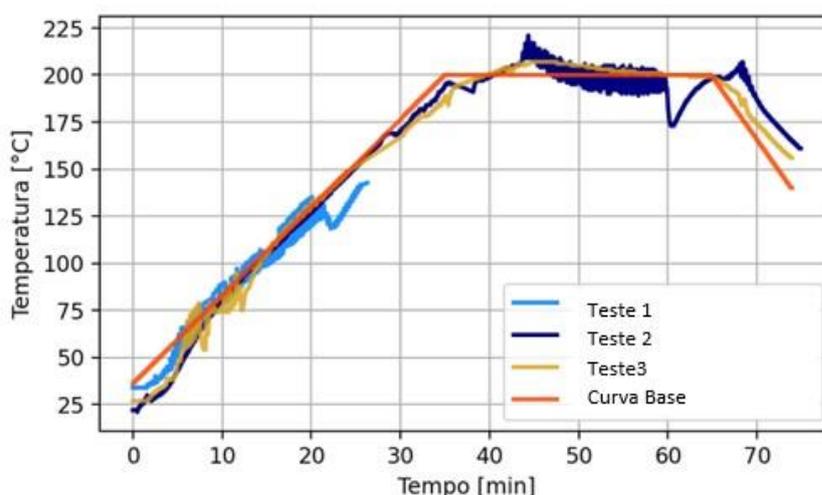


Fonte: O autor (2023).

Como estes eventos não ocorreram nas análises da primeira amostra, e o sistema de micro-ondas respondeu de forma benéfica as alterações realizadas do teste com a primeira amostra para a segunda (magnetron não sobreaqueceu e curva teórica seguiu com bom resultado até o final do patamar), o teste foi realizado sem nenhuma modificação no sistema de análises também.

Apesar de ter sido uma réplica do teste anterior, o teste com a terceira amostra mostrou comportamento similar ao observado na curva de acompanhamento de temperatura do teste com a segunda amostra, porém não houve eventos de abertura de arco elétrico durante o mesmo. Como já existiam dados suficientes sobre os testes realizados de cura por micro-ondas, o resultado deste teste foi apresentado com um comparativo envolvendo os demais resultados obtidos pelas análises prévias da 2ª bateria de testes realizada.

Figura 26 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 3ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado



Fonte: O autor (2023).

Algumas oscilações aconteceram no início e final da aferição dos resultados por conta de limitações do algoritmo que foram corrigidas durante o próprio ensaio.

Após os resultados coerentes entre os testes realizados de acompanhamento de temperatura nas amostras anteriores, era esperado que o teste com a 4ª amostra apresentasse resultados similares aos apresentados pelas amostras 2 e 3 ensaiadas. No entanto, um evento de abertura de arco elétrico ocorreu no início do teste, ocasionando a queda da amostra em análise devido ao corte de duas hastes de

suporte do material. Desta forma, o teste foi interrompido e não foram gerados dados suficientes para análise gráfica.

Figura 27 — Suporte de amostra com rompimento de dois fios sustentadores (esquerda) e marcas produzidas por formação de arco elétrico (direita) na amostra utilizada no 4º teste da 2ª bateria de testes

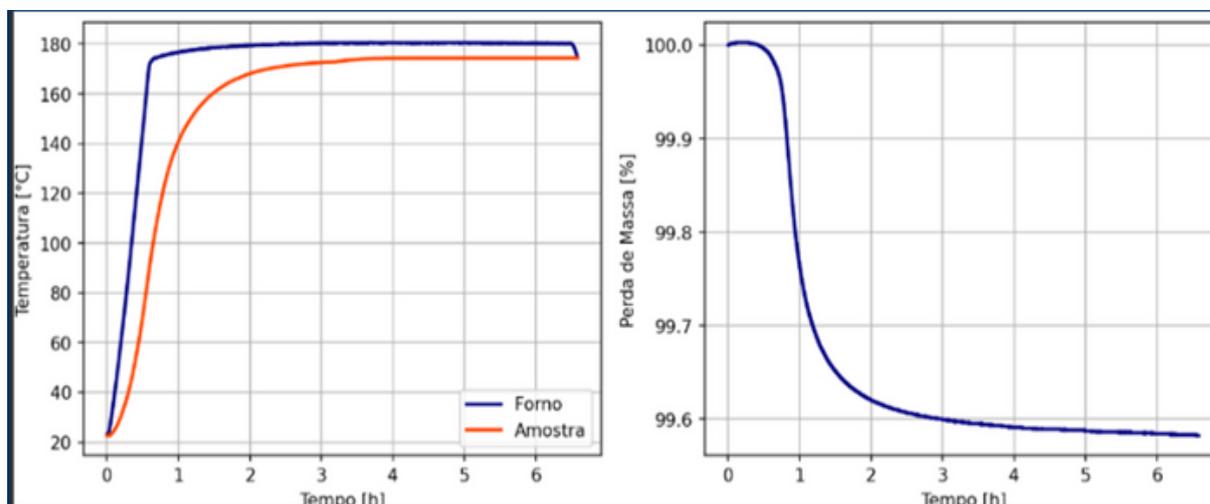


Fonte: O autor (2023).

Apesar de não ter sido possível analisar o acompanhamento de temperatura durante todo o ensaio, o evento de abertura de arco elétrico proporcionou uma visão com foco voltado para o entendimento da ocorrência deste evento antes da produção e envio de mais amostras para realização de mais testes de cura por micro-ondas.

Ademais, com a amostra que havia sobrado, foi realizado o teste de acompanhamento de perda de massa durante aquecimento para verificar se ocorria alguma alteração na amostra durante o aquecimento da mesma.

Gráfico 3 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 5ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado (esquerda) e curva de acompanhamento de perda de massa durante aquecimento para 5ª amostra da 2ª bateria de testes após ensaio realizado (direita)



Fonte: O autor (2023).

Este teste tinha o objetivo de apresentar dados que seriam comparados posteriormente com análises de TGA realizadas pelo laboratório da RHI Magnesita S.A.. No entanto, devido aos resultados de acompanhamento de queima obtidos durante os testes com as 4 amostras e devido a necessidade de inserir uma cavidade nas amostras para ensaio envolvendo a alocação do termopar, não seria um comparativo coerente com as amostras ensaiadas pela RHI Magnesita S.A., então o teste que apresentou resultados satisfatórios para a curva experimental (azul) não foi utilizado como medida comparativa efetiva ao final das análises. Além disso, o teste de TGA precisa ser realizado independente do teste de acompanhamento de temperatura devido ao sistema aplicado para as análises neste trabalho. Assim, para as demais análises que serão apresentadas neste presente trabalho, não haverá mais análises de TGA pois o tópico central é entender se é possível a realização do acompanhamento de temperatura durante a cura de refratários Magnésia-Carbono para poder comparar com o processo industrial de cura.

Após a finalização dos cinco testes realizados, foi perceptível a existência de uma possibilidade real de que o procedimento de cura utilizando micro-ondas seja viável.

Mesmo com todas as adaptações realizadas no sistema inicial de micro-ondas, algumas questões como: a vibração excessiva do sistema, que provoca instabilidade na medição de temperatura pelo termopar, o forte cheiro durante o aquecimento das amostras e o evento de abertura de arco elétrico durante os ensaios serão estudados antes de seguir com mais testes para os materiais Magnésia-Carbono.

#### 4.4 3ª BATERIA DE TESTES EXPERIMENTAIS

Mesmo com alguns indícios satisfatórios obtidos durante a realização dos ensaios de cura por micro-ondas para amostras refratárias Magnésia-Carbono, foram feitas algumas implementações no sistema e nas amostras, como: a alocação da amostra com um suporte de alumina pelo orifício inferior do micro-ondas, assim como a alocação do termopar pelo orifício superior, para minimizar os efeitos de instabilidade de acompanhamento de temperatura durante os ensaios.

Figura 28 — Modificações de alocação do termopar e suporte de amostras para orifícios superior e inferior, respectivamente, do sistema para análise de cura por micro-ondas



Fonte: O autor (2023).

Também foi realizado um estudo para identificar o que poderia estar causando o cheiro forte durante o aquecimento nos testes e foi descoberto que a eliminação da resina fenólica causava este cheiro, pois libera componentes tóxicos na atmosfera como já descrito no texto de Bitencourt (2011). Assim, para os testes posteriores o sistema de micro-ondas foi alocado em uma capela de exaustão para que os agentes eliminados durante os ensaios fossem capturados de maneira correta e a exposição dos experimentadores ao agente tóxico fosse evitada.

Figura 29 — Alocação do sistema de análise de cura por micro-ondas em capela de exaustão devido a eliminação de componentes tóxicos provenientes da resina fenólica durante processo de cura por micro-ondas



Fonte: O autor (2023).

Por último, realizou-se um estudo a respeito dos eventos de abertura de arco elétrico durante os ensaios de cura visando entender se o grafite poderia estar sendo o causador do evento e se a geometria da amostra contribuía para a ocorrência deste evento durante as análises, uma vez que as regiões demarcadas pelas descargas

elétrica se encontravam em regiões de quinas nas amostras. Deste estudo, pode se inferir que o grafite, assim como outras formas de carbono, é um material considerado absorvedor de micro-ondas, devido a sua alta taxa de absorção de micro-ondas quando em recebimento das mesmas, podendo suportar altas temperaturas e fornecer altas taxas durante aquecimento.

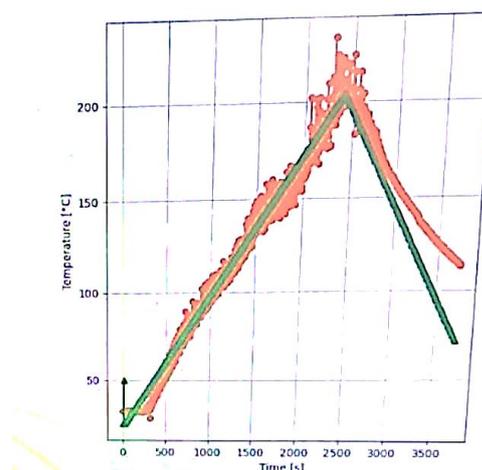
Quando os grafites são aquecidos na presença de micro-ondas, alguns elétrons  $\pi$  deslocalizados que estão livres para se mover em regiões relativamente amplas, podem saltar para fora do material, devido ao aumento de sua energia cinética. Isso acarreta a ionização da atmosfera ao redor, e o evento pode ser visualizado como formação de faíscas ou de arco elétrico, em um nível macroscópico. Mas, em nível microscópico, esses pontos superaquecidos são, na verdade, eventos chamados de plasmas. A depender do ponto de vista tanto do espaço quanto do tempo, esses plasmas podem ser considerados micro plasmas, uma vez que ocorrem e contemplam apenas uma pequena região envolta da atmosfera envolvida e duram apenas uma fração de segundos (Chandrasekaran, 2013).

Além disso, não foi encontrada literatura disponível sobre a influência da geometria da amostra na abertura de arco elétrico durante aquecimento em baixas temperaturas utilizando micro-ondas. No entanto, é sabido que regiões pontiagudas favorecem a concentração de tensão nos grãos ali contidos. Com isso, o fato das áreas demarcadas pelos eventos de abertura de arco elétrico estarem localizados próximos a uma ponta da amostra, corrobora para a conclusão de que a presença da ponta não é o motivo principal para a abertura de arco elétrico durante os ensaios, mas mostra que ela contribui de forma significativa para que este evento ocorra, uma vez que potencializa a concentração de carga elétrica nos grãos de grafites contidos naquelas regiões.

Os ensaios realizados nesta etapa do trabalho, com a primeira e terceira amostras, ocorreram por menos de cinco minutos devido a aberturas de arco elétrico durante os aquecimentos. Uma vez que os dados não seriam comparativos e nem analisáveis, os ensaios foram abortados para evitar problemas futuros com o aparelho micro-ondas. As regiões demarcadas pelas descargas elétricas, foram nas bordas dos orifícios criados para alocação do termopar e, pelas análises prévias e estudos realizados, afere-se que ocorreram devido ao efeito da geometria do local, borda interna da amostra, que atua como uma região de concentração de tensão.

Já o teste com a segunda amostra, ocorreu de forma coerente em termos de acompanhamento de temperatura durante todo o aquecimento. Porém, devido à um problema no algoritmo, o teste foi cessado automaticamente após atingir a temperatura de 200°C, então análises comportamentais da amostra durante patamar de aquecimento não foram produzidas.

Gráfico 4 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 2ª amostra da 3ª bateria de testes após ensaio realizado

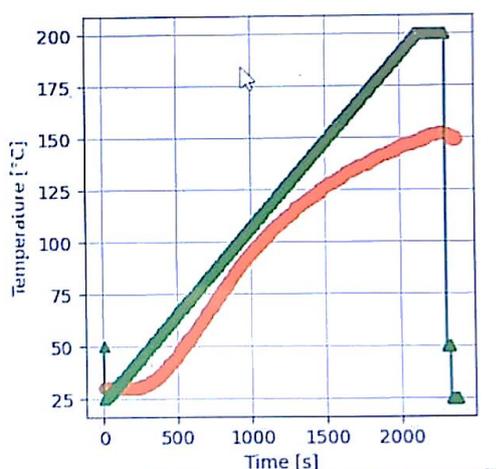


Fonte: O autor (2023).

Apesar de não ter sido possível a análise do comportamento da amostra durante o patamar de queima, o aquecimento experimental ocorreu de forma muito controlada e similar ao aquecimento teórico. Não foram observados eventos de abertura de arco elétrico durante o teste e apenas ocorreu uma crescente variação nas medições experimentais de temperatura próximos a temperatura final do ensaio, como também havia acontecido no ensaio da 2ª amostra da 2ª bateria de testes. Assim, não é possível inferir nenhuma previsão para qual seria o comportamento do material durante patamar de queima, mesmo possuindo um acompanhamento de temperatura coerente com o esperado.

O teste utilizando a quarta amostra apresentou comportamento de acompanhamento de aquecimento bem similar ao da segunda amostra, no entanto a curva de taxa de aquecimento experimental (laranja) sempre esteve abaixo do determinado pela curva teórica pré-programada (verde).

Gráfico 5 — Curva de acompanhamento de aquecimento com o tempo para 4ª amostra da 3ª bateria de testes após ensaio realizado



Fonte: O autor (2023).

Além disso, o teste não apresentou nenhum evento de abertura de arcoelétrico durante o aquecimento e, mesmo assim, o ensaio foi subitamente interrompido após alguns minutos de patamar de queima. Em um estudo posterior do ocorrido, notou-se que o fusível havia queimado durante o ensaio, o que levou o sistema de análises a curto, causando o desligamento do mesmo instantaneamente.

Figura 30 — Teto do interior da cavidade do aparelho micro-ondas apresentou manchas escuras após realização do teste de cura por micro-ondas com 4ª amostra da 3ª bateria de testes



Fonte: O autor (2023).

Os ajustes realizados no sistema de micro-ondas e no algoritmo, assim como as modificações realizadas na amostra devido aos estudos realizados mostraram uma clara evolução na qualidade e eficiência dos testes realizados. Embora a abertura de arco elétrico continue ocorrendo, nos testes cujo este evento não foi visualizado, os resultados produzidos foram de melhor qualidade e de mais fácil análise.

Após este estágio, foi possível perceber que o algoritmo para o sistema de análise de cura por micro-ondas teve considerável evolução e, a princípio, não precisou ser ampliado para continuação dos testes. Além disso, a aferição de temperatura e o controle da taxa de aquecimento também estão condizentes com o esperado para realização das análises seguintes. No entanto, devido aos eventos de abertura de arco elétrico nos ensaios acontecerem em uma porcentagem de ensaios de 50%, não foi possível determinar a eficiência ou não do método para aplicação de cura de materiais refratários de composição Magnésia-Carbono.

Desta forma, o foco do trabalho ficou voltado para o melhor entendimento do ocorrido com o aparelho micro-ondas e também para a produção de amostras que não contenham grafite na composição, com o intuito de verificar se apenas as partículas de grafite atuavam como as principais causadoras da abertura de arcoelétrico durante os ensaios de cura por micro-ondas, ou se outros fatores como a geometria da amostra, a potência de aquecimento do magnetron e/ou a influência da resina fenólica contribuíam de forma significativa para os eventos de abertura de arco elétrico durante os ensaios de cura por micro-ondas.

#### 4.5 4ª BATERIA DE TESTES EXPERIMENTAIS

As conclusões retiradas referente aos estudos dos testes anteriores levantaram discussões sobre possíveis outros agentes influenciadores para a formação de arco elétrico durante os ensaios de cura por micro-ondas de refratários de caráter Magnésia-Carbono. Além disso, após a identificação da queima do fusível ele foi trocado por um novo e o aparelho de micro-ondas foi testado novamente utilizando um bquer com água para verificar a sua funcionalidade. O teste ocorreu de forma satisfatória e então, optou-se por continuar os testes de cura por micro-ondas.

O primeiro ensaio desta 4ª bateria de testes, apresentou altas variações nas medições de temperatura experimental logo no início. Faíscas não foram observadas, mas esse comportamento durante ensaio é comum quando ocorrem formações de arco elétrico. Em poucos minutos o aparelho desligou sozinho, assim como na terceira bateria de testes envolvendo a quarta amostra, sendo o teste interrompido forçadamente e, desta forma, não sendo possível a geração de dados analisáveis na forma gráfica para o ensaio em questão.

Após a análise do sistema interno do micro-ondas, novamente foi constatado que o desligamento forçado do sistema havia ocorrido devido a queima do fusível. Como o fato era uma reincidência após um teste de cura de materiais por micro-ondas, optou-se por não dar prosseguimento nos testes das demais amostras recebidas para evitar danos maiores ao aparelho. Ao invés disso, foi acordado em encaminhar o aparelho à um técnico especialista para verificação do correto funcionamento de todos os componentes do sistema elétrico do aparelho e de seus elementos externos acoplados para realização dos testes de cura, antes do prosseguimento da análise do acontecimento.

A avaliação não constatou nenhuma alteração no sistema elétrico do aparelho e nem dos componentes externos, levantando algumas questões teóricas sobre a razão do seu desligamento forçado, como: sobrecarga devido ao sistema liga/desliga imposto pelo controlador que não é natural do uso cotidiano de um aparelho micro-ondas; influência das bordas lascadas das amostras que poderiam estar provocando formação de arco elétrico de forma precoce durante o ensaio; influência da resina fenólica na formação de arco elétrico durante ensaios.

Figura 31 — Presença de lascamentos nas faces externas e próximas ao orifício para alocação de termopar apresentadas pela 1ª amostra da 4ª bateria de testes



Fonte: O autor (2023).

Para todos os tópicos levantados, estudos estão sendo desenvolvidos com foco primeiramente na busca literária e no entendimento do fenômeno ocorrido e, até o presente momento, ainda não foram obtidos dados suficientes para uma discussão neste presente trabalho.

## 5 CONCLUSÃO

Desde o início do projeto, ficou claro que um desafio estava começando por se tratar de um projeto de base, e que todos os resultados e análises obtidas após os testes possuíam potencial para comprovar, esclarecer ou abrir uma nova rota de pensamento à respeito da utilização de micro-ondas para cura de materiais cerâmicos refratários.

Ainda durante o período de iniciação científica, um estudo base foi utilizado para realização da simulação da cavidade de micro-ondas por meio da utilização dos softwares de código aberto que não só comprovaram os dados fornecidos pelas literaturas estudadas, como também forneceu dados suficientes para proporcionar viável a realização de um experimento prático como próximo passo do projeto que se concretizaria durante o período de estágio e de trabalho de conclusão de curso do autor.

Para a realização experimental um sistema de análises envolvendo um micro-ondas já existente no laboratório GEMM foi utilizado, assim como componentes externos foram adaptados para proporcionar a cura com parâmetros comparativos à realizada em escala industrial. Ademais, o principal foco de comparação era na taxa de aquecimento e para isso o Msc. Murilo H. Moreira desenvolveu um algoritmo pois o aparelho micro-ondas não possuía esta função em sua estrutura.

O resultado deste primeiro teste, não produziu dados suficientes para análises gráficas, devido ao comprometimento da amostra durante ensaio, mas um estudo de post mortem posterior, proporcionou uma visão otimista sobre comprovação do método de aquecimento por micro-ondas e serviu para comprovar os dados obtidos pela simulação de cavidade realizada anteriormente.

Desta forma outras análises, com constante implementação do sistema de análises para melhoria dos resultados obtidos e dos testes realizados, foram realizadas e mostraram crescente evolução no sistema de análises mas também despertaram questões a respeito de problemas durante as mesmas tanto em relação ao material utilizado quanto em relação as adaptações realizadas no sistema. Essas questões contribuíram para o desenvolvimento e evolução dos estudos que tentava, por meio de realização de mais ensaios, melhor compreender e se ajustar as questões levantadas.

Após a realização de 4 baterias de testes, os resultados obtidos mostraram uma clara possibilidade para realização de cura utilizando micro-ondas, porém ainda deixou muitas questões por serem resolvidas na continuação do estudo, como a influência da composição e geometria das amostras na abertura de arcos elétricos durante os ensaios, e após discussão final foi levantada a questão da presença de CO<sub>2</sub> na atmosfera do micro-ondas que, como já visto em literaturas, pode potencializar e até ser o principal causados dos eventos de arco elétrico durante as análises.

## 6 SUGESTÕES FUTURAS

Mesmo após tanta evolução para as práticas experimentais de cura utilizando micro-ondas, os estudos sobre os principais efeitos causadores de abertura de arco elétrico precisam ser mais aprofundados, assim como as implementações no sistema de análises existentes já mostram uma considerável evolução, porém ainda precisam ser aprimoradas para evitar a sobrecarga do mesmo e queima de fusíveis.

Uma questão levantada para estudo futuro é a utilização de nano partículas de grafite na composição em substituição ao grafite, uma vez que as propriedades proporcionadas pela adição de carbono seriam mantidas e as nano partículas poderiam proporcionar maior superfície de contato para interação com a estrutura e melhor e mais uniforme distribuição deste elemento por toda a estrutura.

Por último, um estudo sobre a viabilidade econômica da aplicação do método de cura por micro-ondas está começando a ser conduzido pelo aluno de iniciação científica do GEMM, Fernando Schimidt, e pelo Msc. Murilo H. Moreira. Uma vez que a comprovação da eficácia científica do método é essencial, porém sem a viabilidade econômica dificilmente terá aplicação prática em larga escala nos dias atuais.

## 7 REFERÊNCIAS

3D MAGNETRON Microwave. Disponível em:

<https://www.turbosquid.com/3dmodels/3d-diagram-magnetron-model-1581265>.

Acesso em: 23 nov. 2022.

ARNOSTI JR., S.; INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C.. Variáveis críticas no processo de secagem de concretos refratários. **Cerâmica**, v. 45, p. 292-293, Jun 1999.

BITENCOURT, C. S.; PANDOLFELLI, V. C. . Refratários contendo carbono: propriedades, características e variáveis em sua composição. **Cerâmica**, v. 59, p. 84-114, 2013.

BITENCOURT, Celina Souza. **Cerâmicas Refratárias Resinadas: Fundamentos, Análise Crítica e Efeito dos Agentes Grafitizantes e Antioxidantes** Dissertação (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

BYKOV, Yu V; RYBAKOV, K. I; SEMENOV, V. E. High-temperature microwave processing of materials. **Journal of Physics D, Applied Physics**, v. 34, n. 13, 2001.

CAMPOS, Gustavo. **Ondas Periódicas**. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/ondas-periodicas.htm>. Acesso em: 1 mar. 2023.

CHANDRASEKARAN, Sekaran; BASAK, Tanmay; SRINIVASAN, Ramanathan. Microwave heating characteristics of graphite based powder mixtures. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 48, p. 22-27, Nov 2013.

DE CARVALHO, Regina pinto. Processos Químicos Assistidos por Microondas. *In*: DE CARVALHO, Regina Pinto. **Microondas**. 1 ed. Sociedade Brasileira de Física: Livraria da Física, 2005. cap. 5, p. 31-36.

ELMER. Disponível em: <https://www.csc.fi/web/elmer>. Acesso em: 15 ago. 2021.

ESPECTRO Eletromagnético. Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/>. Acesso em: 1 mar. 2023.

FAN, Yuzun *et al.* Evaluation of the microwave absorption property of flake graphite. **Materials Chemistry and Physics**, v. 115, n. 2-3, p. 696-698, Jun 2009.

FEY, Karl-Georg *et al.* Pressure driven heat-up curves: A numerical and experimental investigation. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 113, p. 1-9, Mar 2017.

FONTANA, Eduardo. Guias de Onda. *In*: ELETROMAGNETISMO: Parte II. 1 ed. 2013. cap. 10.

FORNO Micro-ondas: Como funciona?. Lesics português, 2022 (11 min). Disponível em:

[https://www.youtube.com/watch?v=dCxJ4K649Cw&ab\\_channel=Lesicsportugu%C3%AAs](https://www.youtube.com/watch?v=dCxJ4K649Cw&ab_channel=Lesicsportugu%C3%AAs). Acesso em: 23 fev. 2023.

GEUZAINÉ, Christophe; REMACLE, Jean-François. Gmsh:: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 79, n. 11, p. 1309-1331, Maio 2009.

GONG, Z. X.; SONG, B.; MUJUMDAR, S.. Numerical simulation of drying of refractory concrete. **Drying Technology**, v. 9, n. 2, p. 479-500, 1991.

GOTTO, Kiyoshi; KOHNO, Kohji; NITTA, Michio. Development of Refractory Technology. **NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT**, v. 101, p. 111-114, Nov 2012.

HOW DOES a microwave oven work?: 7 components explained. KitchenGearoid. Disponível em: <https://kitchengearoid.com/microwave-oven/how-does-a-microwaveoven-work/>. 2019. Acesso em: 4 mar. 2023.

INVIVO - FIOCRUZ. **Como surgiu o micro-ondas?**. EBC. Disponível em: <https://memoria.ebc.com.br/infantil/voce-sabia/2015/06/como-surgiu-o-micro-ondas>. Acesso em: 4 mar. 2023.

KENZO, Daniel; APPENDINO, Rodrigo; PICCOLLO, Cauê. **Guias de Onda e o Magnetron**, p. 1-2 Trabalho de Disciplina ( Bacharelado em Física/Eng. Física) Universidade Estadual de Campinas, 2019. Disponível em: <https://sites.ifi.unicamp.br/mbonanca/files/2019/11/tema11L.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2023.

KLEIN-GUNNEWIEK, Rodolfo Foster. **Sinterização por Micro-ondas em uma e em duas etapas de varistores à base de ZnO** Tese - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

MENÉNDEZ, J. A. *et al.* Microwave heating processes involving carbon materials. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 1, p. 1-8, Jan 2010.

MISHIGAMI, Yasufusa; HARAGUCHI, Ryutaro. APPLICATION OF MICROWAVE HEATING ON THE FABRICATION OF PRECAST BLOCK OF REFRACTORIES. **Krosaki Harima Corporation**.

OLIVEIRA, Rafael Luiz Galvão; RODRIGUES, João Paulo; PEREIRA, João Miguel. Aplicações Industriais de Cerâmicas Refratárias: Estado da Arte. *In*: 6AS

JORNADAS DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS URBANOS E 1AS JORNADAS DE PROTEÇÃO CIVIL. 2018. 2018.

ORIGEM e curiosidades sobre o forno micro-ondas. Museu WEG de Ciência e Tecnologia. 2021. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/origem-e-curiosidadessobre-o-forno-micro-ondas/>. Acesso em: 10 fev. 2023.

PARAVIEW. Disponível em: <https://www.paraview.org/>. Acesso em: 2 ago. 2021.

SAHEB, Nouari. Spark plasma and microwave sintering of Al6061 and Al2124 alloys. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, v. 20, p. 152-159, 2013.

STROKI, Pedro Ney. **O que são guias de onda?**. Electrical e-Library. 2018. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2018/07/20/o-que-sao-guias-deonda/>. Acesso em: 3 mar. 2023.

TAIRA, Hatsu; NAKAMURA, Hisashi. Microwave drying of monolithic refractories. **Nippon Steel Technical Report**, v. 98, Jul 2008.

VOLLMER, Michael. Physics of the microwave oven. **Physics Education**, v. 39, n. 1, p. 74-81, Jan 2004.

WANG, Chen *et al.* Synthesis and microwave absorbing properties of FeCo alloy particles/graphite nanoflake composites. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 509, n. 2, p. 494-498, 12 jan 2011.

ZIMMER, A. *et al.* Comparação entre Refratários Magnesianos e Dolomíticos Utilizados em Panelas para Refino de Aços. **Congresso Brasileiro de Cerâmica**, v. 48, jun 2004.