



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

LUÍS OTÁVIO PONTES PECHOTO

**FUSÃO DE METAIS NÃO-FERROSOS USANDO IRRADIAÇÃO DE MICRO-
ONDAS**

Ilha Solteira

2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS OTÁVIO PONTES PECHOTO

**FUSÃO DE METAIS NÃO-FERROSOS USANDO IRRADIAÇÃO DE MICRO-
ONDAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área: Materiais e Processos de Fabricação

Prof. Dr. Juno Gallego

Orientador

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P365f Pechoto, Luís Otávio Pontes.
Fusão de metais não-ferrosos usando irradiação de micro-ondas / Luís Otávio Pontes Pechoto. – Ilha Solteira: [s.n.], 2022
64 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2022

Orientador: Juno Gallego
Inclui bibliografia

1. Fundição de metais não ferrosos. 2. Micro-ondas. 3. Susceptor. 4. Refratários. 5. Curvas de aquecimento.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos

Supervisionária Técnica de Serviço
Serviço Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
02019 - 0009

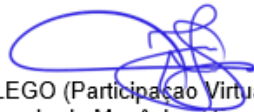
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FUSÃO DE METAIS NÃO-FERROSOS USANDO IRRADIAÇÃO DE MICROONDAS

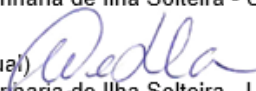
AUTOR: LUIS OTÁVIO PONTES PECHOTO

ORIENTADOR: JUNO GALLEGO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Materiais e Processos de Fabricação pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JUNO GALLEGO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA (Participação Virtual) 
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. RUBENS RIBEIRO (Participação Virtual) 
Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul -UFMS/CPTL

Ilha Solteira, 21 de fevereiro de 2022

RESUMO

A fundição de metais não ferrosos é uma das técnicas industriais mais utilizadas atualmente para a produção de peças e componentes mecânicos, empregando diferentes formas de aquecimento por energia elétrica ou por combustão. Todavia a fundição de metais por meio de irradiação de micro-ondas é um tema relativamente recente e que vem ganhando destaque científico e tecnológico. O propósito deste trabalho é investigar a aplicação de micro-ondas para a fusão de metais não-ferrosos como estanho, chumbo, alumínio e cobre. Como metais em volumes massivos não absorvem micro-ondas foi empregado um anel feito de carboneto de silício como susceptor e isolado termicamente com uma manta de fibra cerâmica. Este sistema simples foi capaz de gerar a energia térmica necessária para a fusão dentro de um forno de micro-ondas comum para uso doméstico. Para análise do processamento foram processadas cargas de 50 e 100 gramas dos metais inseridos em cadinho de grafite, sendo obtidas as curvas de aquecimento durante o aquecimento e fusão dos materiais. Os resultados obtidos provam ser viável a fusão de metais não-ferrosos em tempos similares a outros métodos de aquecimento, sendo, portanto, uma técnica alternativa e simples para a fundição para metais em pequena escala.

Palavras-chave: fundição de metais não-ferrosos; micro-ondas; susceptor; refratários; curvas de aquecimento.

ABSTRACT

The melting of non-ferrous metals is one of the most used industrial techniques today to produce mechanical parts and components, employing different forms of heating by electrical energy or by combustion. However, the melting of metals by means of microwave irradiation is a relatively recent topic that has been gaining scientific and technological prominence. The purpose of this work is to investigate the application of microwaves for melting non-ferrous metals such as tin, lead, aluminum and copper. As metals in massive volumes do not absorb microwaves, a ring made of silicon carbide was used as a susceptor and thermally insulated with a ceramic fiber blanket. This simple system was able to generate the thermal energy needed for melting inside a common microwave oven for domestic use. For analysis of the processing, loads of 50 and 100 grams of the metals inserted in a graphite crucible were processed, and the heating curves during heating and melting of the materials were obtained. The results obtained prove to be viable the melting of non-ferrous metals in times similar to other heating methods, being, therefore, an alternative and simple technique for melting metals on a small scale.

Keywords: metal casting; microwave; susceptor; refractories; heating curves.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PORCENTAGEM DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA DE MICRO-ONDAS EM DIFERENTES TÉCNICAS.....	12
FIGURA 2: VARIAÇÃO CAMPO ELETROMAGNÉTICO NOS EIXOS ATRAVÉS DA DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO.....	14
FIGURA 3: ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO INDICANDO FREQUÊNCIA DE 300MHZ A 300 GHZ PARA AS MICRO-ONDAS.....	15
FIGURA 4: REALINHAMENTO DA H ₂ O EM CAMPO ELETROMAGNÉTICO.....	17
FIGURA 5: TIPOS DE INTERAÇÃO DAS MICRO-ONDAS COM OS MATERIAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS	18
FIGURA 6: A) MAGNETRON E (B) VISTA ESQUEMÁTICA EM CORTE TRANSVERSAL DA CAVIDADE DO MAGNETRON	20
FIGURA 7: ESQUEMA DE TRANSMISSÃO E ESPALHAMENTO DE MICRO-ONDAS NA CARCAÇA DE UM FORNO.....	21
FIGURA 8: REPRESENTAÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA E FLUXOS DE CALOR E MASSA EM AQUECIMENTO CONVENCIONAL E COM MICRO-ONDAS.....	22
FIGURA 9: A) DISTRIBUIÇÃO DE CALOR EM UM AQUECIMENTO CONVENCIONAL, B) REPRESENTAÇÃO DE AQUECIMENTO HÍBRIDO COM UTILIZAÇÃO DE SUSCEPTOR.	22
FIGURA 10: ANÁLISE DE TEMPO E TEMPERATURA CARACTERÍSTICOS DE DOIS SUSCEPTORES EM PROCESSAMENTO.....	25
FIGURA 11: ANÁLISE DE TEMPERATURAS OBTIDAS A PARTIR DA COMBINAÇÃO DE MATERIAIS COMO CARBONO ATIVADO, CARBONETO DE SILÍCIO, GRAFITE E ALUMINA	27
FIGURA 12: GRÁFICO TRANSIÇÃO DE FASES SÓLIDO E LÍQUIDO EM SUBSTÂNCIA PURA....	28
FIGURA 13: A) EMBALAGENS ALIMENTÍCIA E B) TELESCÓPIO COM COMPONENTES EM ALUMÍNIO PURO.....	31
FIGURA 14: CURVA COMPARATIVA AQUECIMENTO VIA MICRO-ONDAS E MÉTODO CONVENCIONAL PARA O ALUMÍNIO.....	33
FIGURA 15: A) CALCOPIRITA E EM B) APLICAÇÃO COMERCIAL EM CONDUTORES ELÉTRICOS.....	35
FIGURA 16: FUNDIÇÃO DE ESTANHO POR MICRO-ONDAS EM POTÊNCIAS E CARGAS DISTINTAS.....	35

FIGURA 17: CURVA DE AQUECIMENTO PARA ESTANHO POR MÉTODO CONVENCIONAL E VIA MICROONDAS	36
FIGURA 18: A) METAL DE ESTANHO EM BARRA E B) EM APLICAÇÕES COMERCIAIS.	38
FIGURA 19: ANÁLISE DO TEMPO PARA FUSÃO DE 100G DE CHUMBO EM MICRO-ONDAS SOB DIVERSAS POTÊNCIAS ESTABELECIDAS	38
FIGURA 20: COMPARAÇÃO DO PROCESSAMENTO POR MICRO-ONDAS E CONVENCIONAL NO CHUMBO	39
FIGURA 21: A) GALENA E B) APLICAÇÃO EM BATERIAS NO USO COTIDIANO.....	39
FIGURA 22: FLUXOGRAMA DE ETAPAS SEPARAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS METAIS.....	40
FIGURA 23: A) REFRATÁRIOS E CADINHO USADOS EM ARRANJO PARA TESTES INICIAIS E B) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA	41
FIGURA 24: A) REFRATÁRIO USINADO PARA RECEBER SUSCEPTOR E CADINHO E B) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA	42
FIGURA 25: A) MUFLA DE MANTA CERÂMICA PARA ISOLAMENTO DO ANEL SiC, B) DESTAQUE NO ANEL SiC	43
FIGURA 26: CARVÃO VEGETAL MOÍDO E MISTURADO SILICATO DE SÓDIO	45
FIGURA 27: ARRANJO ESQUEMÁTICO DA MUFLA USANDO CARVÃO MOÍDO NOS TESTES PRELIMINARES	46
FIGURA 28: ARRANJO DEFINITIVO DA MUFLA UTILIZANDO MANTA DE ALUMINA ENVOLVENDO ANEL DE CARBONETO DE SILÍCIO.....	46
FIGURA 29: A) CADINHO DE GRAFITE E EM B) FOLHA DE GRAFITE UTILIZADA COMO SEPARADOR	47
FIGURA 30: A) MOLDE DE GRAFITE E B) DE METAL (LINGOTEIRA)	48
FIGURA 31: REGISTRADOR DIGITAL DE TEMPERATURA (DATALOGGER) PARA COLETA DE DADOS (A) E MONTAGEM DO TERMOPAR NO INTERIOR DO FORNO (B,C).	48
FIGURA 32: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MEDIDA DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA PARA O CHUMBO - 50G	49
FIGURA 33: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MEDIDA DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA PARA O CHUMBO - 100G.....	50
FIGURA 34: A) AMOSTRA OBTIDA NO TESTE DE FUSÃO DE CHUMBO - 50G, B) MASSA FINAL APÓS RETIRADA DE ESCÓRIA DA FUNDIÇÃO	51
FIGURA 35: A) AMOSTRA OBTIDA NO TESTE DE FUSÃO DE CHUMBO - 100G, B) MASSA FINAL APÓS RETIRADA DE ESCÓRIA DA FUNDIÇÃO	51

FIGURA 36: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MEDIDA DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA PARA O ESTANHO – 50G	52
FIGURA 37: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MEDIDA DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA PARA O ESTANHO – 100G	53
FIGURA 38: A) AMOSTRA OBTIDA NO TESTE DE FUSÃO DE ESTANHO - 50 G, B) MASSA FINAL DA AMOSTRA APÓS RETIRADA ESCÓRIA	54
FIGURA 39: A) AMOSTRA OBTIDA NO TESTE DE FUSÃO DE ESTANHO - 100 G, B) MASSA FINAL DA AMOSTRA APÓS RETIRADA ESCÓRIA	54
FIGURA 40: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MEDIDA DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA PARA O ALUMÍNIO – 50G.....	55
FIGURA 41: A) FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO, B) AMOSTRA OBTIDA APÓS RESFRIAMENTO E C) MASSA METÁLICA APÓS RETIRADA DE ESCÓRIA DA SOLIDIFICAÇÃO - 50G	56
FIGURA 42: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MEDIDA DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA PARA O COBRE - 50G	56
FIGURA 43: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MEDIDA DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA PARA O COBRE.....	57
FIGURA 44: A) VISTA EXTERIOR AO FORNO MICRO-ONDAS DURANTE O TESTE COM O COBRE - 50G E B) LINGOTE OBTIDO APÓS SOLIDIFICAÇÃO.....	58
FIGURA 45: COMPARATIVO CURVAS DE AQUECIMENTO PARA METAIS ESTANHO, CHUMBO, ALUMÍNIO E COBRE - 50G.....	58
FIGURA 46: COMPARATIVO CURVAS DE AQUECIMENTO DURANTE PROCESSAMENTO VIA MICRO-ONDAS PARA METAIS NÃO FERROSOS ESTANHO E CHUMBO - 100G	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM MATERIAIS METÁLICOS EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE MICRO-ONDAS	19
TABELA 2: SUSCEPTORES E SUAS RESPECTIVAS PROFUNDIDADES DE PENETRAÇÃO	25
TABELA 3: ENSAIOS UTILIZANDO DIFERENTES SUSCEPTORES E CADINHOS NA FUSÃO DE CHUMBO PARA VALIDAÇÃO DE <i>SETUP</i>	26
TABELA 4: RESULTADOS DE TEMPO DE FUSÃO OBTIDOS POR MEIO CONVENCIONAL E NÃO CONVENCIONAL DE DIFERENTES METAIS EM CARGAS DISTINTAS	32
TABELA 5: PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO EM METAIS A GRANEL E FUNDIDOS.....	37
TABELA 6: COMPARAÇÃO DO TEMPO DE FUSÃO E TAXAS DE AQUECIMENTO PARA AQUECIMENTO POR MÉTODO CONVENCIONAL E MICRO-ONDAS DE ALGUNS METAIS	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivo Geral: Viabilidade da utilização de micro-ondas na fusão de materiais não ferrosos	10
2.1 Objetivos Específicos	11
2. REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1 Justificativas para o uso de micro-ondas no processamento de metais	11
2.2 Micro-ondas	14
2.2.1 Interação do Micro-ondas com os Materiais	17
2.2.2 O Funcionamento do Micro-ondas	19
2.2.3 Tipos de Aquecimento por Micro-ondas	21
2.2.4 Vantagens do Processamento com Micro-ondas	23
2.3 Susceptores	24
2.4 Fusão de Metais	27
2.4.1 Alumínio	28
2.4.2 Cobre	33
2.4.3 Estanho	35
2.4.4 Chumbo	38
3.1 Ensaios Preliminares	40
3.2 Preparo dos Refratários	42
3.3 Preparo do material metálico	44
3.4 Processamento para fusão dos metais usando irradiação de micro-ondas ...	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5. CONCLUSÕES	59
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo Geral: Viabilidade da utilização de micro-ondas na fusão de materiais não ferrosos

A constante abertura de novas empresas, surgimento de novas tecnologias e aprimoramentos, incentivos financeiros de mercados exteriores dentre outros fatores, tem impactado diretamente a competitividade do mercado interno brasileiro. Na busca por alcançar uma posição de destaque no mercado atual e garantir a consolidação da marca, é cada vez maior o interesse das organizações em otimizar processos, aumentar a produtividade, reduzir etapas de um processo que sejam dispendiosos de tempo ou recursos, buscando manter em maior número apenas atividades que agreguem valor ao seu produto ou serviço final. Um fator de grande impacto em indústrias de processamento está ligado aos tempos despendidos em cada processo, energia utilizada, resíduos gerados e nesses quesitos alguns modos de processamento não convencionais tem obtido destaque.

Essa breve análise do cenário industrial e econômico torna evidente a viabilidade de estudos no processamento de materiais através de métodos não convencionais. Neste aspecto pode ser inserida uma técnica para fusão de metais por meio de irradiação por micro-ondas. As vantagens da utilização de micro-ondas em processamentos industriais de materiais cerâmicos e poliméricos são bastante difundidas na literatura, tais como aquecimento volumétrico, redução de resíduos gerados, redução no tempo de processamento e aquecimento seletivo, aspectos que serão abordados ao longo do estudo. No entanto, o processamento de materiais metálicos usando micro-ondas não é tradicional e tampouco difundido, tendo recebido maior atenção a partir dos anos 2000 (GUPTA; LEONG, 2007).

2.1 Objetivos Específicos

O objetivo deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento de uma técnica para fusão de metais não-ferrosos, como estanho, chumbo, alumínio e cobre, usando exclusivamente a energia gerada por um forno doméstico de micro-ondas que funciona na frequência de 2,45 GHz. O aquecimento de pequenos volumes desses metais, com massas de 50 e 100 gramas, ocorre quando é empregada uma substância que absorve micro-ondas – chamada de susceptor – e gera o calor necessário para a fusão. O processo mostrou repetibilidade e viabilidade, sendo comparável aos processos tradicionais para fundição desses metais.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Justificativas para o uso de micro-ondas no processamento de metais

De acordo com Roy *et al.* (1999) os primeiros relatos sobre estudos com uso intensivo de micro-ondas na absorção de materiais começaram a surgir de forma intensiva na década de 1970 e 1980, especialmente para os materiais cerâmicos e poliméricos. Como citado por Gupta e Leong (2007), os simpósios de 1988 realizados pela *Materials Research Society* e *American Ceramic Society* já indicavam o uso de micro-ondas em processamento de diferentes materiais. Um novo cenário focalizado em redução do consumo de energias não renováveis também ganhou força nas últimas décadas, de modo que os meios para obter energia sustentável, as chamadas *green energy* e *clean energy* vem ganhando força e destaque frente a governos ao redor do mundo e grupos de investidores, como demonstrado na pesquisa de Sovacool (2009) que contou com participantes da Ásia, Europa e América do Norte, e indicou que 70% dos entrevistados aprovam eliminar subsídios governamentais a companhias que utilizam apenas sistemas tradicionais de energia.

Baseado em Bhupendra (2016), pode se dizer que frente ao posicionamento de mercado nacional e internacional e da crescente competitividade em diversos setores, as indústrias produtoras de bens material tem buscado modificar, ampliar e automatizar

setores para então alcançar tecnologias e produtos com modo de produção sustentável e ecologicamente correto, evitando assim crises energéticas futuras. Nessa conjuntura de busca por tecnologias mais eficientes e que tenham melhor aproveitamento de recursos energéticos, o processamento de materiais utilizando o micro-ondas tem ganhado destaque, Samyal *et al* (2020) citam que métodos convencionais possuem longos períodos de aquecimento, consumo de energia excessivo e outros fatores que podem ser minimizados no uso de micro-ondas devido ao aquecimento volumétrico, do grão à superfície, que é possível obter através desse método de aquecimento. Samyal *et al* (2020) disponibilizam ainda um gráfico com as técnicas de processamento metálico e suas porcentagens de aplicação representado na figura 1, porém não especificam se os dados representam um âmbito global ou regional.

Figura 1: Porcentagem de utilização da energia de micro-ondas em diferentes técnicas



Fonte: Adaptado de Samyal *et al* (2020)

Ainda sobre os benefícios no uso de micro-ondas para processamento, Gupta e Leong (2007) citam que o uso deste é baseado na habilidade dos materiais em absorver energia eletromagnética e ser aquecido, o que abre um leque na variedade de materiais a serem processados, que por meios tradicionais de aquecimento seriam desprezados. Os referidos autores citam como vantagem desse modo de processamento os valores de penetração da radiação, aquecimento rápido, distribuição de campos eletromagnéticos controláveis e aquecimento seletivo de materiais. Chandrasekaran *et al* (2012) explicam

que alguns fatores impactam o aquecimento por micro-ondas, estando entre eles as propriedades dielétricas do material em questão, profundidade de penetração, frequência de operação, modo de operação (singular ou multimodal), posição internamente ao forno, geometria do material e do forno.

Os autores Cha-Um *et al* (2008) e Chandrasekaran *et al* (2012) também citam como vantagens dessa linha de processamento o tempo de processamento reduzido, distribuição de temperatura uniforme, alta eficiência energética o que resultará em um aprimoramento em qualidade final para aplicação em diversos campos industriais. Roy *et al.* (1999) também já citavam vantagens do processamento por micro-ondas alegando que este é capaz de oferecer uma fina microestrutura e melhores propriedades ao produto através de baixo custo de produção, já que foi capaz de produzir tamanho de grãos mais finos e as porosidades finais possuem formas arredondadas, que concedem maior ductilidade e resistência ao material obtido após o processamento.

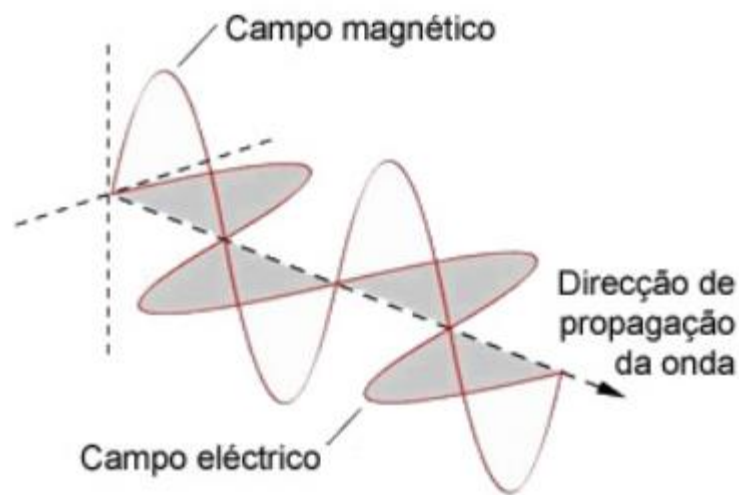
Até 1979 o processamento de metais com micro-ondas era pouco cogitado devido a uma penetração superficial das micro-ondas, quando então Nishitani (1979) realizou a sinterização de uma mistura de pós cerâmicos e metais. Alguns resultados interessantes e avançados no processamento de metais têm sido publicados, como Srinath (2011) que conseguiu obter uma união de cobre em pó com placas de cobre, com um tempo de exposição de 900 segundos e utilizando carvão como suscepter. Gupta e Sharma (2014) apresentam a criação de um revestimento em aço austenítico inoxidável utilizando micro-ondas, com boas propriedades metalúrgicas na soldagem e variações no grau de diluição dos metais. Srinath (2011) também obteve resultados interessantes ao conseguir a união de metais diferentes através de uma soldagem utilizando um micro-ondas a 2.45GHz e 900W por 450 s.

Hebbale e Srinath (2016) desenvolveram um revestimento de níquel em aço inoxidável AISI 304 com micro-ondas com potência de 900 W e frequência de 2,45 GHz livre de trincas superficiais visíveis. Zafar e Sharma (2015) conseguiram obter a formação de carbonetos de tungstênio no revestimento obtido com processamento por micro-ondas, que trouxeram aperfeiçoamento das características mecânicas do material, tais como menores taxas de desgaste e fricção. Seguindo a linha de processamento por micro-ondas, Chandrasekaran *et al* (2011) abordou em seu estudo a fusão de pós metálicos de diversos metais (com tamanho médio 3 μm), comparando estudos de processamentos convencionais e por micro-ondas.

2.2 Micro-ondas

Descoberto por Percy Spencer, em 1945, de forma acidental, o forno de micro-ondas sofreu diversos aprimoramentos. Basicamente ele é responsável por converter energia elétrica em energia térmica através das ondas eletromagnéticas. Uma onda eletromagnética é a oscilação em fase dos campos elétrico e magnético perpendiculares entre si e entre a direção de propagação da radiação, como indicado na figura 2.

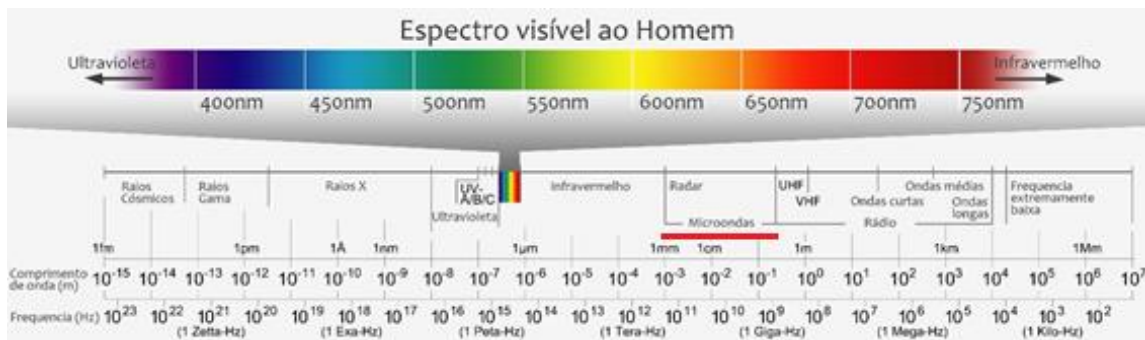
Figura 2: Variação campo eletromagnético nos eixos através da direção de propagação



Fonte: Neta (2021)

As micro-ondas fazem parte do espectro eletromagnético com o comprimento de onda variando de 1 m a 1 mm, o que corresponde a uma faixa de frequência de 300 MHz a 300 GHz. As frequências mais usadas para fins de aquecimento doméstico e industrial são 915 MHz e 2,45 GHz (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2012). A figura 3 indica o espectro eletromagnético, indicando a faixa de frequência e comprimento de onda de alguns dispositivos e aplicações.

Figura 3: Espectro Eletromagnético indicando frequência de 300Mhz a 300 Ghz para as micro-ondas



Fonte: Adaptado de Caminhos Interiores (2018)

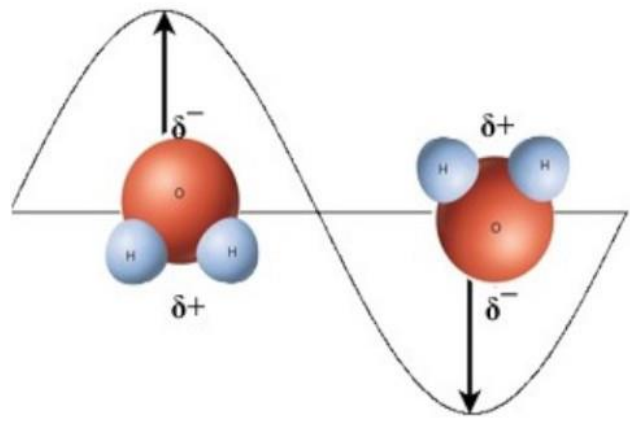
A maioria das frequências de uso de micro-ondas é de uso restrito ao governo, deixando uma frequência de uso limitada a fins domésticos. A *International Telecommunication Union (ITU)* é a instituição que regulamenta as bandas de frequência para uso industrial, científico e médico (Gupta e Leong (2007)). Para se ter uma ideia do vasto campo de utilização das micro-ondas, pode se citar:

- Aquecimento e processamento de materiais: a mais comum de suas utilizações, usado para aquecer ou cozinhar alimentos, realizar o degelo de alimentos e outros.
- Comunicação: extensivamente utilizado em satélites de comunicação para transmitir sinais e informações devido a habilidade para penetrar a atmosfera terrestre com mínima perda de energia, alta frequência e curto comprimento de onda. Como exemplo cita-se: programas ao vivo, ligações telefônicas, áudio e vídeo conferências, internet, *bluetooth* e exploração espacial.
- Radar (*Radio Detection and Ranging*): método para determinar presença, localização, velocidade e outras características de um alvo. A micro-onda é transmitida por um radar e é refletida no objeto/alvo e volta ao radar. É realizada comparações entre o sinal emitido e o refletido para determinar velocidade, alcance, posicionamento e tamanho do alvo. É usado no tráfego aéreo, operações de resgate, navegação, radares policiais e exploração espacial.

- Guerra eletrônica: consiste em prejudicar um inimigo utilizando energia eletromagnética para reduzir a eficácia de radares e equipamentos eletrônicos buscando incapacitar o oponente. Como exemplo existem as tecnologias furtivas de aeronaves, navios, mísseis e veículos que buscam reduzir ou eliminar a quantidade de micro-ondas refletidas. Também existem as interferências e ruídos para camuflar a presença de alvos.
- Aplicações médicas: micro-ondas utilizadas na área médica devido ao seu potencial de criar calor intenso e ser uma fonte de energia para equipamentos de radiologia. Também pode ser utilizada no tratamento de hipertermia do câncer, elevando a temperatura do tecido canceroso para matá-lo.
- Aplicações científicas: A radiação micro-ondas pode ser observada em pesquisas da astronomia, química e biologia, aceleradores lineares (Física) e aspectos nucleares.
- Aplicações industriais e comerciais: muito usado em atividades do setor de segurança, para detectar intrusos, proteção de perímetros, além disso é utilizada em sistemas de detectores de metais em aeroportos. Também possui utilidade para testes de inspeção não destrutivos de diferentes materiais.

Durante o funcionamento de um forno de micro-ondas doméstico uma válvula especial, conhecida como magnetron, gera ondas eletromagnéticas que se propagam no interior da câmara de cozimento do forno – chamada de cavidade. Quando as ondas atingem o alimento há uma interação com as moléculas de água presentes no alimento. As moléculas de água são polares, ou seja, há uma distinção entre regiões eletricamente positivas e negativas, como exemplificado na figura 4. O aquecimento por microondas ocorre devido à polarização das moléculas que são freneticamente realinhadas com a presença de campo elétrico de alta frequência gerado pelo magnetron e causando um aquecimento volumétrico do material (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2012).

Figura 4: Realinhamento da H₂O em campo eletromagnético

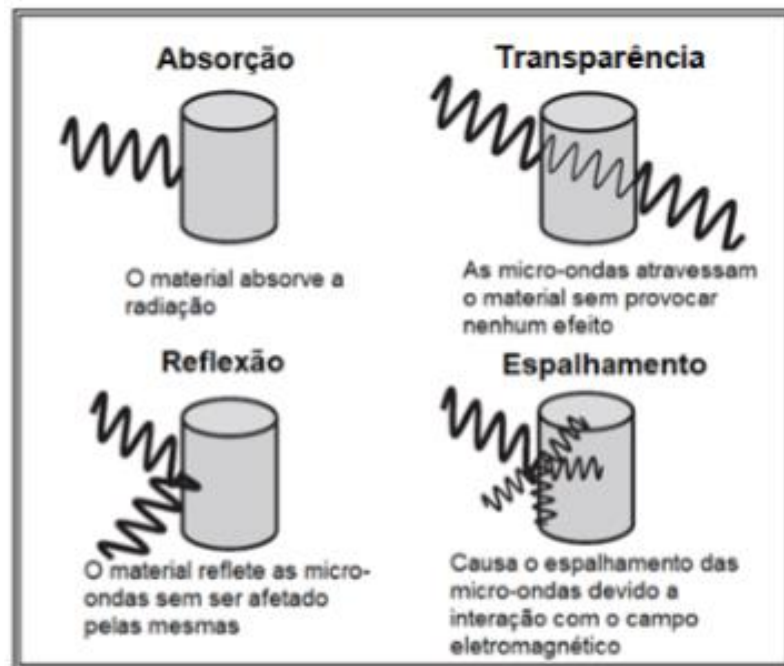


Fonte: Zerner (2010)

2.2.1 Interação do Micro-ondas com os Materiais

As micro-ondas podem ser refletidas, transmitidas ou absorvidas pelos materiais. De acordo com este comportamento os materiais podem ser classificados em: (1) Condutores opacos ou elétricos nos quais as microondas são refletidas e não penetram, como, por exemplo, os metais. (2) Materiais transparentes ou com baixa perda dielétrica, nos quais as microondas não são refletidas nem absorvidas, mas são transmitidas através do material com pouca atenuação/absorção, como por exemplo alguns vidros e o ar. (3) Absorventes ou materiais de alta perda dielétrica que absorvem a energia de micro-ondas com base no valor do fator de perda dielétrica e a convertem em calor, tais como a água, o carvão e carboneto de silício (CLARK *et al* 2000). A figura 5 ilustra o processo de interação das micro-ondas com os materiais.

Figura 5: Tipos de interação das micro-ondas com os materiais e suas características



Fonte: Adaptado de Gupta e Leong (2007).

Assim, o aquecimento do material por irradiação de micro-ondas ocorre devido a dificuldade da polarização/distribuição de cargas elétricas do material acompanhar as variações dos campos elétrico e magnético existentes nas micro-ondas (GUPTA; LEONG, 2007, p. 25). O conhecimento das propriedades dielétricas do material é fundamental para se determinar a sua resposta ao processamento com micro-ondas, de forma que o campo magnético não contribui nestes materiais para a absorção de micro-ondas e seu aquecimento.

É de senso comum dizer que metais e forno micro-ondas não combinam, podendo ser uma combinação perigosa, com a possibilidade da geração de arcos elétricos e danos ao eletrodoméstico. Isso pode ter contribuído para atrasar a aplicação das micro-ondas em metais, mas se trata de um conceito equivocado. Sabe-se que as ondas eletromagnéticas geradas no interior do forno de uso cotidiano não são capazes de penetrar em superfícies metálicas, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Profundidade de penetração de ondas eletromagnéticas em materiais metálicos em diferentes frequências de micro-ondas

Metal puro	Resistividade ¹ (10 ⁻⁸ Ω m)	Profundidade de Penetração (μm)	
		@915 Mhz	@2.45 Ghz
Alumínio, Al	2.709	2.7	1.7
Cobalto, Co @ 273 K	5.6	3.9	2.4
Cobre, Cu	1.712	2.2	1.3
Ouro, Au	2.255	2.5	1.5
Ferro, Fe	9.87	5.2	3.2
Chumbo, Pb	21.1	7.6	4.7
Magnésio, Mg	4.48	3.5	2.2
Mercúrio, Hg	96.1	16.3	10.0
Molibdênio, Mo	5.47	3.9	2.4
Níquel, Ni	7.12	4.4	2.7
Nióbio, Nb @273 K	15.2	6.5	4.0
Prata, Ag	1.617	2.1	1.3
Tântalo, Ta	13.4	6.1	3.7
Estanho, Sn @273 K	11.5	5.6	3.5
Tungstênio, W	5.39	3.9	2.4
Vanádio, V	20.1	7.5	4.6
Zinco, Zn	6.01	4.1	2.5
Zircônio, Zr	42.09	10.9	6.7

Fonte: Adaptado de Gupta e Leong (2007, p. 34).

A respeito do processamento de materiais metálicos, Gupta e Leong (2007) afirmam que os metais, sendo condutores, não podem ser aquecidos significativamente usando micro-ondas devido a profundidade de penetração ser limitada a alguns micrometros de profundidade sendo, portanto, refletidas pela superfície. No entanto, metais na forma de pó ou partículas muito pequenas são capazes de absorver micro-ondas e se aquecer significativamente.

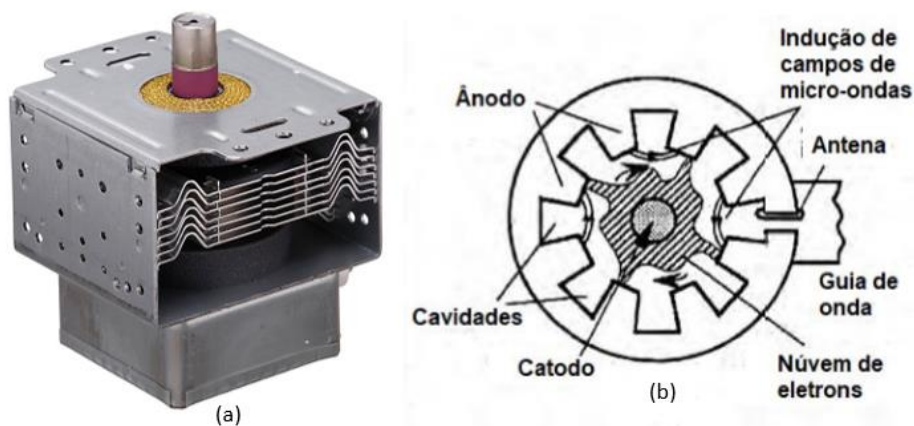
2.2.2 O Funcionamento do Micro-ondas

Com relação ao funcionamento do equipamento em análise, o *National Research Council* (1994) afirma que as microondas podem ser geradas por uma variedade de dispositivos, como magnetrons, klystrons, tubos da rede elétrica, tubos de ondas, girotrons. Nos fornos de microondas domésticos a fonte mais usada é o magnetron, que possui vantagens em termos de eficiência, confiabilidade, tamanho, peso e custo menor se comparado a outras fontes.

O magnetron, ilustrado na figura 6 (a), é um dispositivo que converte energia elétrica em micro-ondas. Uma diferença de potencial constante é aplicada entre o ânodo (que é um cilindro circular oco) e o cátodo. Os elétrons são acelerados do cátodo para o ânodo, mas a presença de um forte campo magnético (produzido por ímãs colocados entre os dois polos) faz com que os elétrons descrevam uma trajetória complexa em espiral, produzindo radiofrequência (Gupta e Leong, 2007)

No magnetron, os elétrons emitidos pelo cátodo são feitos para girar circularmente no espaço coaxial entre o catodo e o anodo sob a influência de um campo magnético axial. Na presença de um campo eletromagnético, tensões positivas e negativas alternadas são geradas no anodo e elétrons são emitidos a partir do cátodo. O agrupamento de elétrons ocorre devido a presença de regiões de aceleração e desaceleração de campos e na formação de nuvem de elétrons, como pode ser visualizado na Figura 6 (b). A potência do magnetron utilizado em um forno de micro-ondas doméstico varia de 0,3 a 3 kW e para magnetron de alta potência varia de 25 a 100kW (GUPTA; LEONG, 2007).

Figura 6: a) Magnetron e (b) Vista esquemática em corte transversal da cavidade do magnetron

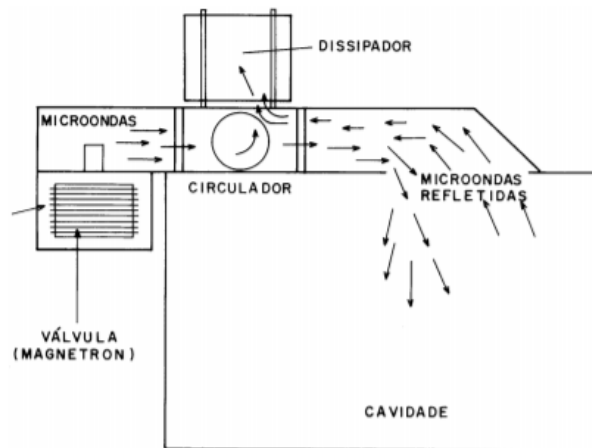


Fonte: adaptado de Gupta e Leong (2007).

Nesse sistema, ocorrerá a emissão de ondas eletromagnéticas por uma antena colocada diretamente sobre o ânodo. As ondas produzidas serão guiadas por um guia de onda até a cavidade contendo o material a ser aquecido. As paredes metálicas do forno

absorvem muito pouco da energia. A maior parte é refletida e dissipada em um dispositivo (*dummy load*), que evita que as micro-ondas danifiquem a válvula. Um esquema de um forno de micro-ondas está apresentado na Figura 7. (Barboza *et al*, 2001)

Figura 7: Esquema de transmissão e espalhamento de micro-ondas na carcaça de um forno

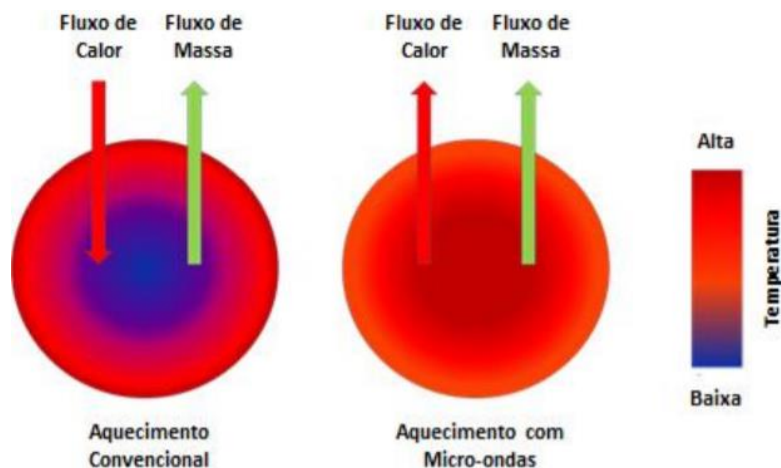


Fonte: Barboza *et al*. (2001).

2.2.3 Tipos de Aquecimento por Micro-ondas

O aquecimento por micro-ondas pode ser classificado em dois tipos: aquecimento direto por micro-ondas e aquecimento híbrido. No aquecimento direto os materiais são expostos apenas a irradiação de micro-ondas, resultando em aumento da temperatura pela absorção das ondas eletromagnéticas pelo material. Esse mecanismo de aquecimento é geralmente aplicado a materiais que absorvem micro-ondas (GUPTA; LEONG, 2007). A figura 8 abaixo representa os gradientes de temperatura para um aquecimento convencional e por micro-ondas, que permite verificar um aquecimento ocorrendo de forma mais homogênea via micro-ondas.

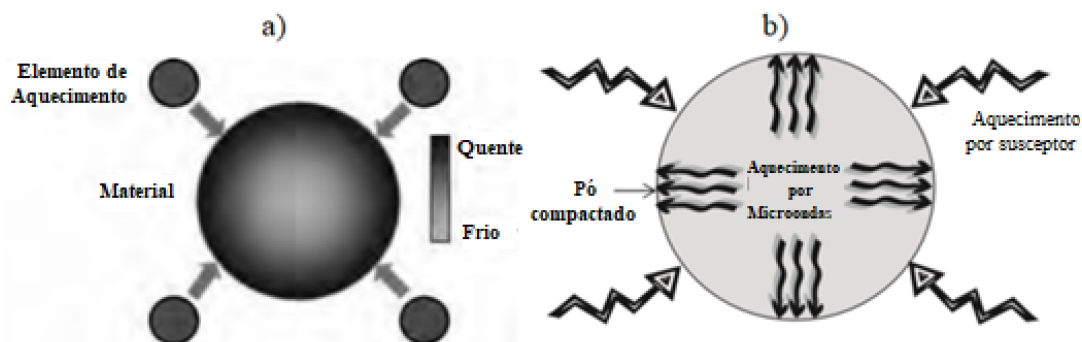
Figura 8: Representação do gradiente de temperatura e fluxos de calor e massa em aquecimento convencional e com micro-ondas



Fonte: Borges (2014)

Já o aquecimento híbrido é aquele que combina o aquecimento por micro-ondas direto para a realização de um tratamento térmico em materiais com baixa absorção até atingirem a temperatura que irão absorver as micro-ondas de forma eficaz. Esse método de aquecimento envolve dois tipos de energia, sendo que uma dessas fontes é a energia fornecida pelo próprio micro-ondas e a outra uma fonte de energia externa. Essa energia térmica adicional pode ser fornecida pelo uso de susceptores de micro-ondas, ou fornos elétricos por exemplo (Gupta e Leong, 2007). A figura 9 indica na parte a) a distribuição de calor em um aquecimento convencional, e na parte b) uma representação de aquecimento híbrido com utilização de susceptor.

Figura 9: a) Distribuição de calor em um aquecimento convencional, b) Representação de aquecimento híbrido com utilização de susceptor.



Fonte: Adaptado de Gupta e Leong (2007).

Um grande problema do aquecimento por micro-ondas é lidar com materiais que são transparentes ou opacos, ou seja, em que não há absorção de micro-ondas. Esses materiais requerem um longo tempo de aquecimento para alcançar a temperatura de processamento com micro-ondas. O longo tempo de aquecimento afeta o processamento de duas maneiras: reduz a eficiência energética do processo e introduz o risco adicional de formação de arcos elétricos ou plasma. A formação de plasmas é indesejável, uma vez que interrompe temporariamente o processo, além de infligir danos ao forno. Uma das alternativas para superar isso é a utilização de um material secundário que tenha propriedades absorventes quando exposto à irradiação de micro-ondas. (BHATTACHARYA; BASAK, 2016).

2.2.4 Vantagens do Processamento com Micro-ondas

O processamento de diferentes materiais utilizando micro-ondas vem ganhando destaque no cenário científico. Segundo o *National Research Council et al* (1994) o processamento de materiais com micro-ondas é relativamente novo, e pode oferecer alternativas a processamentos complexos de alguns materiais, reduzindo o impacto ambiental, oferecendo vantagens econômicas devido a economia de energia, espaço e tempo, e oferecendo uma oportunidade para produzir novos materiais e microestruturas que não poderiam ser alcançadas através de outros métodos.

Além disso existem características próprias do sistema por aquecimento com micro-ondas que são citadas por Gupta e Leong (2007), enunciando que nesse tipo de processamento o aquecimento é direto no objeto, não há transferências de calor envolvida, o aparato/sistema associado não tem que ser aquecido, a superfície do material não é afetada, os trabalhadores têm um ambiente de trabalho mais fresco, e ainda não produz gases, o que elimina possibilidades de superfícies corroídas. Por último cita-se que o material pode ser aquecido de dentro para fora.

Elaborando as vantagens do processo que faz uso de micro-ondas, Kim (2012) elenca os seguintes aspectos: maiores taxas de aquecimento, ausência de contato entre fonte de energia e o material, possibilita o aquecimento seletivo, fácil controle em processo de aquecimento e secagem, redução no tamanho de equipamentos e resíduos gerados.

2.3 Susceptores

Como reportado anteriormente, o aquecimento de metais massivos não ocorre diretamente por irradiação de micro-ondas, sendo necessário realizar um aquecimento híbrido com auxílio de um susceptor. Dois susceptores apresentam grande aplicação e viabilidade de uso nos trabalhos científicos, o carboneto de silício e o carvão vegetal.

Os susceptores tem a função de acelerar ainda mais o processamento de micro-ondas, proporcionando um aquecimento de duas vias com perdas de calor reduzidas da superfície do material. Em geral, os susceptores apresentam alta taxa de aquecimento, o que permite a eficiência do processamento híbrido. Além disso, o rápido aquecimento inicial do mesmo é determinante para executar o processamento de micro-ondas eficiente em termos de energia para os materiais com pouca absorção de micro-ondas (BHATTACHARYA; BASAK, 2016).

Susceptores de microondas, como o SiC, podem ser estrategicamente dispostos em torno do material para fornecer radiação térmica, buscando aquecer o material de maneira convencional. Alternativamente, os susceptores de micro-ondas podem ser uniformemente distribuídos ao redor ou misturados com material pouco absorvente de micro-ondas para aumentar a temperatura do material até que seja auto-suscetível (Gupta e Leong, 2007). Mishra *et al.* (2006) com base em suas pesquisas afirmam que o SiC possui boa absorção de micro-ondas e pode ser aquecido até 1300K (1027°C) em 5 min com uma potência de saída de 1,1 KW.

A respeito da profundidade de penetração das ondas no material, Gupta e Leong (2007) afirmam que esta é a profundidade de penetração de micro-ondas em um material e pode variar de acordo com frequência, temperatura, estado do material (sólido ou líquido, in natura ou preparado, umidade e ainda porosidade) e as propriedades dielétricas que o material possui. A Tabela 2 identifica alguns materiais opacos que podem ser usados como susceptores e suas respectivas profundidades de penetração.

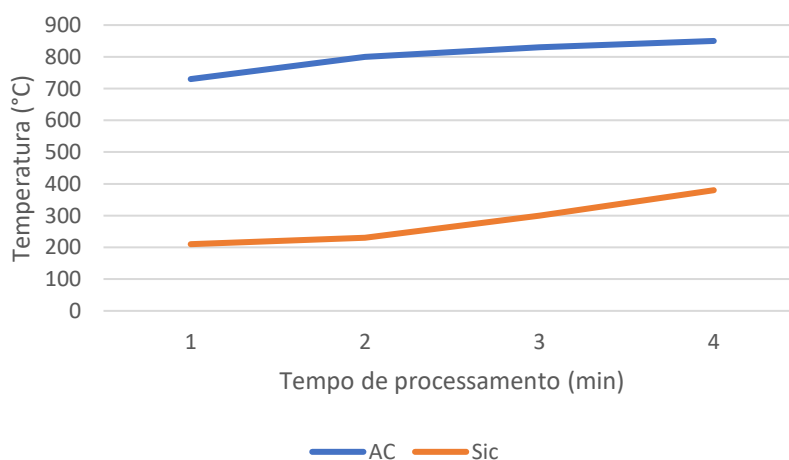
Tabela 2: Susceptores e suas respectivas profundidades de penetração

Material	Profundidade de penetração (dp) (cm)
SiC	1.93
Água	3
Grafite em pó (20 – 80 µm)	1.34 – 2.09
Carbônio ativado	0.7 – 3.43
Carvão	6 - 11

Fonte: Adaptado de Bhattacharya e Basak (2016).

Diversos são os fatores que impactam a escolha de um susceptor para o processamento de materiais. Diante disso é relevante considerar os gases que o susceptor pode gerar dentro da câmara do micro-ondas e a interação desses com o material em processamento buscando evitar oxidação ou corrosão do metal em tratamento, disponibilidade comercial e facilidade de acesso à sua compra, custo, descarte de resíduos, granulometria, e claro taxa de aquecimento e profundidade de penetração das micro-ondas. Na somatória desses fatores o carvão vegetal e o carboneto de silício (SiC) tem sido dois materiais largamente utilizados em estudos. Bhatt (2020) realiza um estudo comparativo entre o aquecimento com carvão ativado (AC) e o carboneto de silício (SiC) em diferentes tempos de processamento. Os resultados obtidos estão ilustrados na figura 10.

Figura 10: Análise de tempo e temperatura característicos de dois susceptores em processamento



Fonte: Adaptado de Bhatt (2020)

Bhatt (2020) fez ainda testes para análise dos susceptores em utilização conjunta a cadinhos de Alumina e Grafite. A tabela 3 indica as medições de temperaturas para a fusão do chumbo, elemento escolhido pelo autor para o teste. Ele concluiu que o carboneto de silício como susceptor levou o dobro de tempo para fundir o chumbo, além disso podemos verificar que o cadinho de alumina atingiu maiores temperaturas, o que por um lado poderia estar indicando maior aquecimento também pode representar uma maior dissipação de energia, através da perda de temperatura para o ambiente.

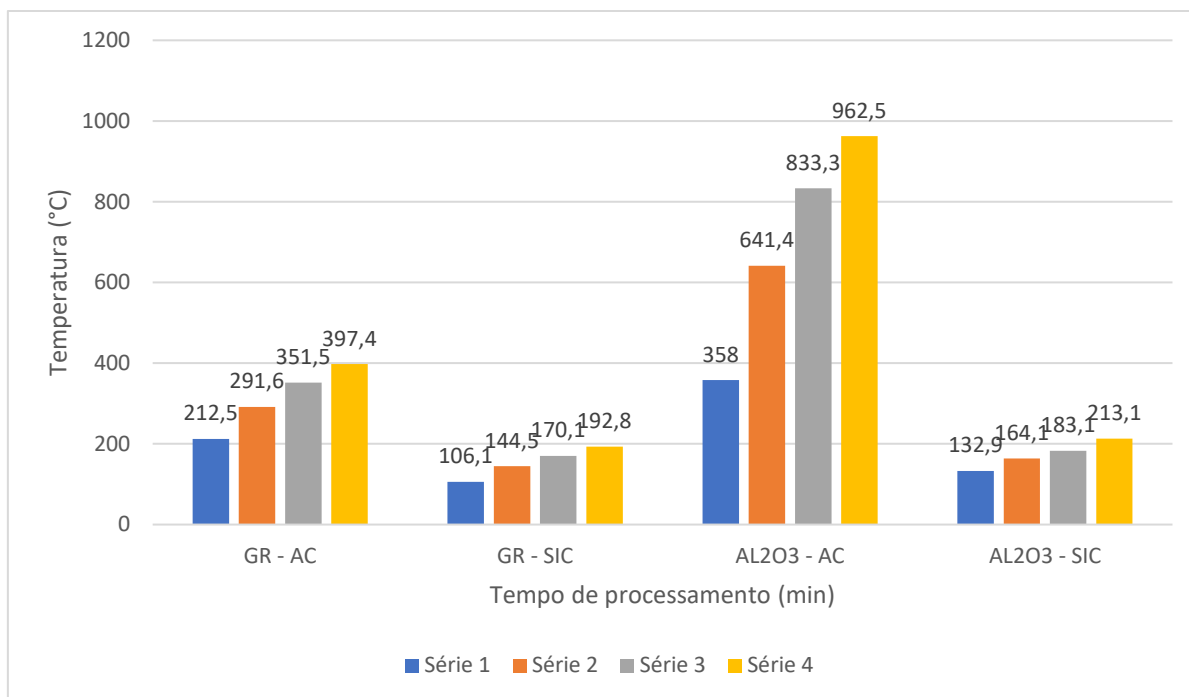
Tabela 3: Ensaios utilizando diferentes susceptores e cadinhos na fusão de Chumbo para validação de *setup*

Susceptor	Material do Cadinho	
	Grafite	Alumina
Carvão Ativado (1 ciclo)	420°C	534.9°C
Carboneto de Sílica	310 °C	325°C

Fonte: Adaptado de Bhatt (2020)

A análise dos dados obtidos na tabela 3 também foram explicitados em gráfico, e o método utilizado por Bhatt (2020) foi medir as temperaturas em intervalo de 1 minuto durante um período de 4 minutos, e os materiais analisados foram carbono ativado (AC), carboneto de silício (SIC), grafite (GR) e alumina (Al_2O_3). A figura 11 representa os resultados do teste, que torna claro que a melhor configuração a ser implementada é a combinação de alumina e carvão ativado.

Figura 11: Análise de temperaturas obtidas a partir da combinação de materiais como Carbono ativado, Carboneto de Silício, Grafite e Alumina

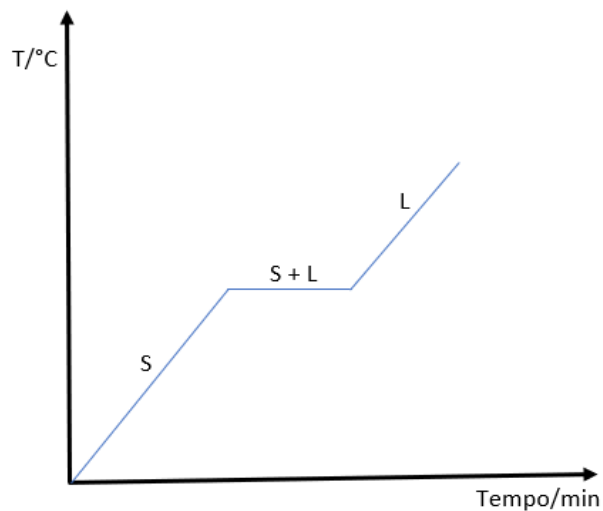


Fonte: Adaptado de Bhatt (2020)

2.4 Fusão de Metais

Ao falar sobre fusão de metais é importante determinar qual o tipo de metal que estará em análise, visto que um metal puro possui características e comportamentos distintos de uma liga metálica, como explica Rocha e Nieckele (2002). No geral, quando o material a ser fundido ou solidificado é uma substância pura, a transição entre as fases sólida e líquida se comporta de forma bem definida, com temperatura fixa à de mudança de estado do material. A figura 12 representa um gráfico da transição de fase sólida e líquida em uma substância pura.

Figura 12: Gráfico transição de fases sólido e líquido em substância pura



Fonte: Próprio autor

2.4.1 Alumínio

Uma característica do alumínio que terá grande importância nesse estudo é sua temperatura de fusão, e Gelson (2021) afirma ocorrer com temperatura de 660°C. Baseado em Kaufman (2000), algumas características pertencentes a componentes de Alumínio puro são: altas taxas de conformação, resistência a corrosão e alta condutividade elétrica, além disso sua faixa de resistência à tração final é por volta de 70 a 185 MPa (10 – 27 ksi).

A Associação Brasileira do Alumínio, ABAL, (2007) também traz algumas informações de relevância a serem mencionadas, tais como a leveza do material que possui densidade de cerca de 2,7 g/cm³, e explica ainda que com sua baixa resistividade e boa condutividade elétrica aliada à sua baixa densidade, um condutor de alumínio pode conduzir tanta energia quanto um condutor de cobre, que é duas vezes mais pesado e mais caro.

Como enunciado por Georgantzia *et al.* (2021) a aplicação do alumínio como material estrutural tem aumentado ultimamente devido às suas atrativas propriedades, tanto do ponto de vista de processamento como microestrutural, garantindo boa relação de resistência e peso, fácil fabricação, ser um material maleável, boa ductibilidade, excelente condutividade térmica e alta resistência à corrosão, aliado ao bom acabamento

estético final, logo, a união de tantas propriedades e vantagens tornam o alumínio um material altamente interessante para usos na engenharia e ciência.

Georgantzia *et al.* (2021) citam ainda que a característica de baixa corrosão torna este material interessante para aplicações navais, de modo que não se faz necessário a utilização de revestimentos sobre ele para aumentar o tempo de vida na sua utilização, o que torna os custos de manutenção baixos comparado a outros metais. Soma-se ainda os avanços nos processos de fabricação do alumínio e suas ligas para reduzir o consumo de energia necessária em mais de 75% desde 1995, reduzindo a pegada ecológica (*footprint*) das indústrias em quase 40%. Além disso, o fato de as estruturas desse material serem 100% recicláveis dão a ele o título de metal ecológico (*green metal*).

De acordo com Kaufman (2000) as seguintes características podem ser elencadas para as ligas de alumínio:

- Resistência à corrosão: sendo, portanto, muito utilizado em ambientes com presença de água do mar ou diferentes tipos de sais.
- Condutividade térmica: alumínio e ligas de alumínio são bons condutores de calor, e apesar da baixa temperatura de fusão, aproximadamente 535°C (1000°F), eles levam mais tempo que o aço para atingir altas temperaturas.
- Condutividade elétrica: alumínio e suas ligas possuem alta condutividade elétrica (baixa resistividade)
- Relação força/peso: combinação de resistência relativamente alta com baixa densidade indicando alta eficiência no uso e oportunidades para substituição de metais mais pesados sem perda na capacidade de carga. Tudo isso garante seu uso em contêineres, aeronaves e automóveis.
- Resistência à fratura e capacidade de absorção de energia: boa escolha para aplicações com fratura frágil.
- Resistência criogênica: mesmo em temperaturas extremamente baixas mantém boa tenacidade, ductilidade e resistência.

- Maleável: as ligas de alumínio são facilmente adaptáveis aos diversos tipos de usinagens de metais, como por exemplo a extrusão, o que permite sua produção em diversos formatos.
- Fácil união: as ligas de alumínio possuem fácil adesão para métodos de junção, como soldagem, brasagem, rebite e outros.
- Reciclável: o alumínio e as ligas de alumínio são os materiais estruturais mais fáceis de serem reciclados, de modo que podem ser reciclados de modo direto sem a perda de qualidade final.

Uma liga metálica é caracterizada por ser uma substância com propriedades metálicas e composta em geral por dois ou mais elementos, tendo um metal como elemento principal. As ligas de alumínio contêm em geral de 90 a 96% de alumínio, com um ou mais elementos adicionados para obter combinações específicas que irão gerar as propriedades e características desejadas.

A ABAL (2007) cita ainda que o alumínio segue o ferro/aço entre os metais de maior consumo anual, sendo o mais importante dos metais não ferrosos e o Brasil tem capacidade para produção de alumínio, pois além da abundante reserva de bauxita, terceira maior reserva de bauxita do mundo, tem alto potencial de geração de energia hidrelétrica, que é um insumo primordial para obtenção do alumínio primário através da eletrólise.

Em geral os principais usos de um material com alto nível de pureza se dá em sistemas onde é necessário resistência à corrosão e alta conformabilidade, como folhas para embalagens, equipamentos químicos, carrocerias de caminhões e folhas metálicas com maior nível de trabalho final. A figura 13 indica na esquerda o uso de alumínio puro em embalagens alimentícias e à direita um telescópio de alumínio.

Figura 13: a) Embalagens alimentícia e b) Telescópio com componentes em alumínio puro



a)



b)

Fonte: Kaufman (2000)

Verma e Lila (2021) dizem que é o terceiro elemento em abundância e que se encontra disponível para uso, ficando atrás apenas de Oxigênio e Silício. Verma e Lila (2021) citam ainda que a produção industrial de alumínio tem menos de 100 anos, e o que justifica sua larga escala de utilização é a soldabilidade excelente e boa relação entre peso e resistência. Além disso características básicas como leveza, durabilidade, o fato de ser moldável, boa soldabilidade, bom condutor aliado ao bom acabamento o tornam um material popular quando comparado a outros metais. As inúmeras pesquisas sobre este componente têm aumentado ainda mais sua utilização, que já faz parte de diversos componentes utilizados no dia a dia ou não.

Uma característica muito interessante do alumínio é a baixa corrosão, característica essa obtida a partir de uma fina camada de óxido gerada na superfície do alumínio em contato com o oxigênio da atmosfera. Como dito por Verma e Lila (2021) o ponto de fusão do alumínio depende do seu índice de pureza, de modo que com 99,9% de pureza sua temperatura de fusão é de 660°C. A adição de maiores taxa de elementos de liga podem reduzir a temperatura de fusão, porém o material ganha um aprimoramento em outras características, podendo então ter uma aplicação que anteriormente não seria possível. Ligas metálicas em geral possuem ganhos em propriedades mecânicas, tais como resistência, dureza e soldabilidade.

Estudos conduzidos por Lingappa *et al.* (2018) utilizaram um método de aquecimento convencional (forno de 2000W) e um por micro-ondas (900W), testando a

fundição de materiais como estanho, zinco, alumínio e latão, em cargas de 50, 100 e 150 gramas, com gravação das temperaturas atingidas pelo sistema a cada 20 segundos e utilizando um susceptor de SiC, cadinho de grafite e um sistema refratário para prevenir danos ao micro-ondas e perda de energia do sistema. Através deste estudo foram obtidos dados valiosos que direcionaram nossos estudos e mostram ser plausível a fundição de metais por meio não convencional.

A tabela 4 indica que os tempos de processamento utilizando micro-ondas são significativamente menores do que aqueles verificados no processamento convencional para fusão do estanho e do alumínio, chegando a ser quase três vezes menores, além disso mantendo certa constância nos tempos de preparo independentemente da quantidade de carga metálica processada (considerando cargas pequenas).

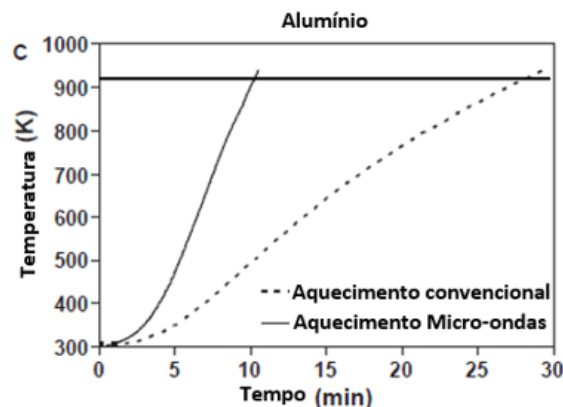
Tabela 4: Resultados de tempo de fusão obtidos por meio convencional e não convencional de diferentes metais em cargas distintas

Metal	Carga (g)	Processamento MW (s)	Processamento	Tempo de fusão	Tempo de fusão
			Convencional (s)	completo – método micro-ondas (s)	completo – método convencional (s)
Estanho	50	300	860		1500
	100	300	980		1950
	150	300	1080		2280
Alumínio	50	760 - 800	2640	900	3540
	100	760 - 800	3080	1020	4140
	150	760 - 800	3320	1020	4380

Fonte: Adaptado de Lingappa *et al.* (2018)

Os dados obtidos por Chandrasekaran *et al* (2011) revelam uma curva de aquecimento bem distinta entre os modos de aquecimento convencional e por micro-ondas, de modo que o aquecimento não convencional obtém uma alta taxa de aumento de temperatura, obtendo assim a temperatura de fusão em tempo claramente reduzido, como mostra a figura 14.

Figura 14: Curva comparativa aquecimento via micro-ondas e método convencional para o alumínio



Fonte: Chandrasekaran *et al* (2011)

2.4.2 Cobre

O autor Júnior (2003) informa que o cobre possui um ponto de fusão de 1083°C, com densidade de 8,96g/cm³.

Júnior (2003) explicita ainda as excelentes características do cobre que o tornam um metal tão valorizado no comércio, tais como alta condutividade (muitas vezes sendo considerado como padrão de condutibilidade), resistência mecânica, flexibilidade e resistência à corrosão, sem falar no fato de o material possuir alta reciclagem de sucata.

Os estudos de Geng *et al* (2020) apontam como vantagens das ligas de cobre sua alta condutividade e excelentes propriedades mecânicas, que tornam seu uso comum em aeronaves, ferrovias de alta velocidade, eletrodomésticos e quadros de energia. Dentre as características de cobre puro temos alta condutividade, excelente ductilidade e baixa resistência. Para aprimorar as características mecânicas do cobre, muitos pesquisadores fazem a adição de elementos como Cobalto, Alumínio, Magnésio, Ferro, Titânio, Prata, Cromo ou Zircônio buscando ligas de cobre cada vez melhores e mais completas em suas características finais.

O fato de ser um material de fácil acesso e com boas propriedades tornam o cobre muito utilizado em ligas metálicas, como justificam as diversas pesquisas já realizadas acerca do material.

Estudos com diversos materiais tem indicado os melhores componentes a serem utilizados para a composição de ligas metálicas, ao passo que Lu Tianxing *et al.* (2021) indica que os melhores materiais serão aqueles com características tais como: alta temperatura de estabilidade (até cerca de 1000°C), excelente condutividade térmica para minimizar tensões térmicas, boa resistência à fluência e devem ser insolúveis na matriz de cobre.

O cobre é considerado um material com longo prazo de utilização, e tal reconhecimento deve-se ao fato de que possui taxas de corrosão razoáveis, mesmo em ambientes com condições extremas e severas, sendo que a combinação de fatores como umidade, quantidade de íons cloreto e oxigênio e presença de outros metais na liga de cobre irão definir suas taxas de corrosão. Estudos conduzidos por Hamidah Ida *et al* (2021) apontaram que ácidos (HCl) e sais eletrólitos (NaCl) impactam de forma mais agressiva o processo corrosivo quando comparado a soluções alcalinas (NaOH e KOH).

Hamidah Ida *et al* (2021) investigaram ainda os efeitos dos eletrólitos na corrosão e propriedades mecânicas da liga, incluindo testes de microscopia eletrônica, perda de material (redução de peso) e testes de rendimento e tensão. Verificou se que quanto maior a concentração de eletrólitos na liga de cobre, maior a taxa de corrosão, além disso para materiais com concentrações muito altas de eletrólitos, o efeito de corrosão não cresce de forma excessiva devido ao fenômeno da passividade superficial e por último as taxas de corrosão influenciaram nas propriedades mecânicas das ligas de cobre, tornando as menos fortes e com elevada taxa de fadiga.

A figura 15 ilustra em a) o cobre em seu estado natural e em b) uma de suas aplicações comerciais.

Figura 15: a) Calcopirita e em b) aplicação comercial em condutores elétricos.



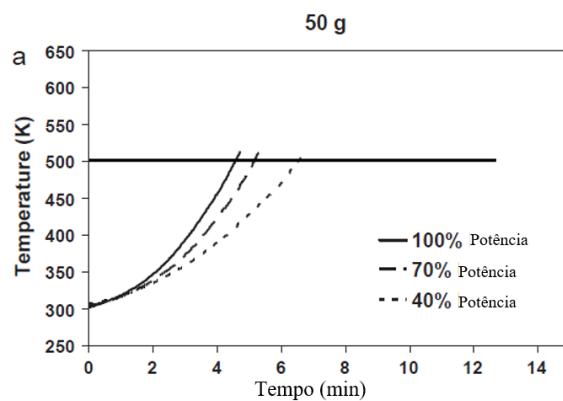
Fonte: Cobre - Magalhães

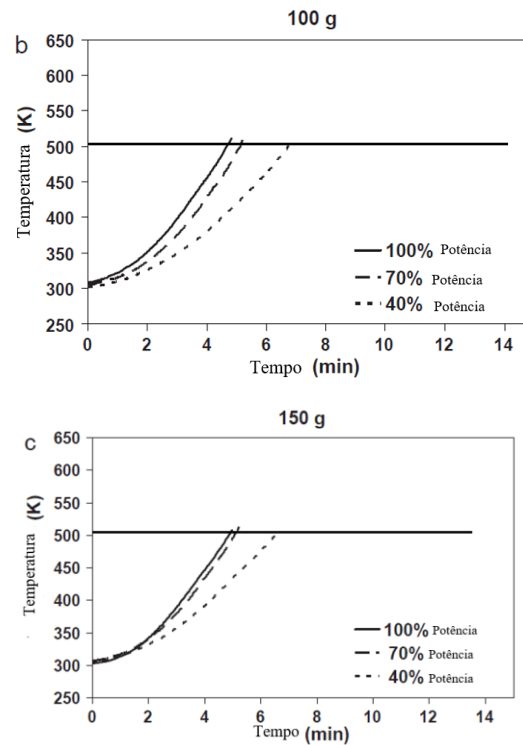
2.4.3 Estanho

Segundo Dias *et al.* (2018) o estanho possui uma temperatura de fusão de $231,8^{\circ}\text{C}$ e densidade de $7,29\text{g/cm}^3$.

No estudo conduzido por Chandrasekaran *et al.* (2011) testes para fundição de estanho são realizados, utilizando diferentes quantidades em massa dentro do cadinho (50, 100 e 150g) e com diferentes potências aplicadas ao processamento, sendo respectivamente de 100% (1300W), 70% (910W) e 40%(520W). Para os parâmetros estipulados os dados foram tabelados e apresentados em forma de gráfico, apresentados na figura 16.

Figura 16: Fundição de Estanho por micro-ondas em potências e cargas distintas

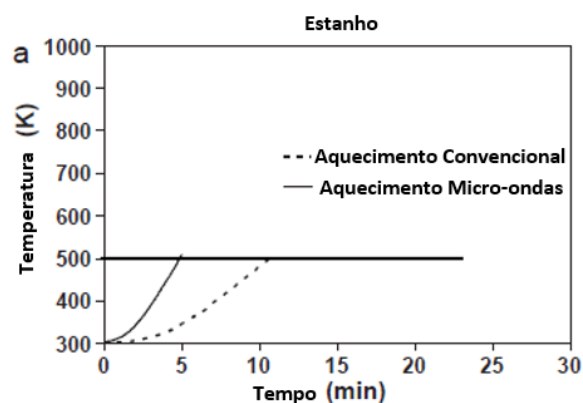




Fonte: Chandrasekaran *et al.* (2011)

Chandrasekaran *et al.* (2011) traz ainda em seu estudo um gráfico comparando a curva de aquecimento do estanho para um método convencional e para aquecimento via micro-ondas, de forma que o segundo método se mostra mais eficiente, obtendo maiores temperaturas em períodos de tempos menores, o que indica uma taxa de aquecimento maior, mais efetiva como mostra o gráfico na figura 17.

Figura 17: Curva de aquecimento para estanho por método convencional e via microondas



Fonte: Chandrasekaran *et al.* (2011)

Mishra *et al.* (2006) trazem dados de sua pesquisa, e a respeito do processamento do pó de estanho com granulometrias menores que $75\mu\text{m}$ afirmam ser possível chegar próximo ao ponto de fusão com cerca de 4 min, de modo que a fusão completa foi obtida em aproximadamente 5 min para potências entre 100% e 70% e com 7 min para uma potência de 40%. Tais dados serão de suma importância para basear testes iniciais, orientando para tempos e potenciais a serem utilizadas nos testes.

Os estudos realizados por Sun *et al.* (2005) trouxeram informações a respeito das profundidades de penetração das ondas eletromagnéticas em materiais metálicos a granel e fundidos, sendo assim elaborada a tabela 5.

Tabela 5: Profundidade de penetração em metais a granel e fundidos

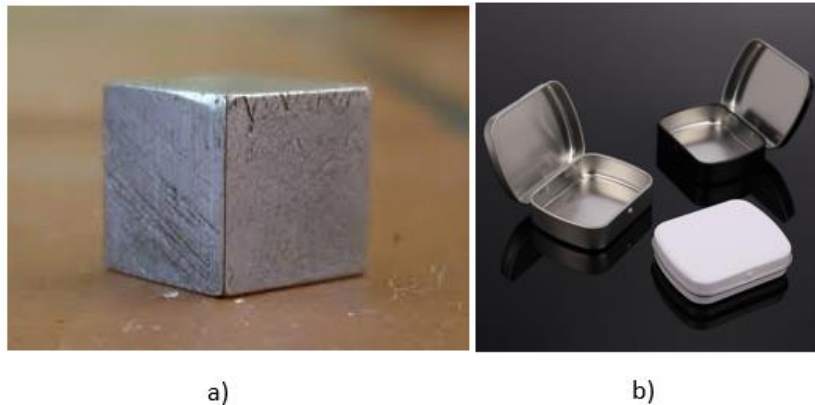
Material	Profundidade de penetração (m)		Temperatura fundido (°C)
	A granel	Fundido	
Al	1.58079E-06	5.00201E-06	960
Pb	4.45541E-06	9.91058E-06	628
Sn	3.44815E-06	7.04462E-06	532

Fonte: Adaptado de Sun *et al.* (2005)

Dias *et al.* (2018) cita as aplicações do estanho inicialmente na fabricação de folha de flandres ou chapas de estanho para embalagens de alimentos, aplicação em ligas (principalmente o bronze, estanho + cobre), soldas, fusíveis e tipografia.

A China detém as maiores reservas de estanho, sendo também o principal produtor do minério. Em 2014 foi responsável por mais de 40% da produção mundial. A Indonésia vem em seguida com 27%. Nas Américas, o Brasil ganhou destaque principalmente por suas jazidas na região amazônica (Rondônia e Amazonas), tornando-se o principal produtor do continente e o terceiro maior do mundo, ficando atrás apenas da China e da Indonésia (Pontes 2016). A figura 18 a) mostra o metal estanho e em b) sua utilização em modo final com valor agregado.

Figura 18: a) Metal de estanho em barra e b) em aplicações comerciais.



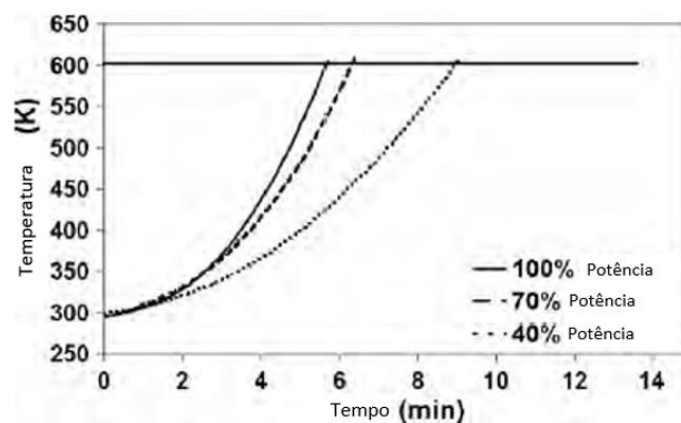
Fonte: Dias (2018)

2.4.4 Chumbo

Sobral *et al.* (2012) caracteriza o chumbo como um material cinzento, azulado brilhante, não elástico, mole, dúctil, maleável, razoável condutor de calor e eletricidade, com ponto de fusão de 327°C e densidade de $11,37\text{g}/\text{cm}^3$.

Chandrasekaran *et al.* (2011) traz diversas informações relevantes a respeito do processamento de Chumbo em micro-ondas, com uma potência de 1300W, sendo possível ver na figura 19 que o ponto de fusão de 600K é alcançada em 5,5 min a 100% de potência, 6 min para 70% e 9 min para 40%, sendo a taxa de aquecimento de 51 K/min a 100% de potência e 33K/ min para 40%.

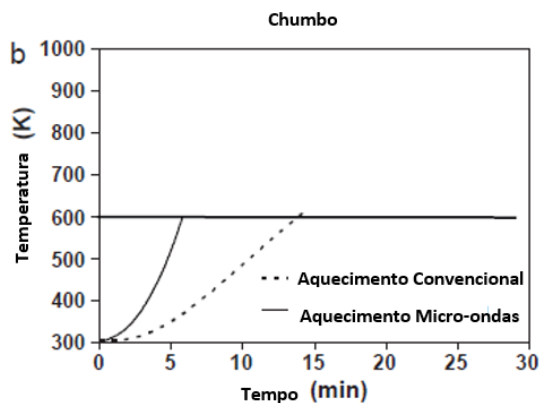
Figura 19: Análise do tempo para fusão de 100g de Chumbo em micro-ondas sob diversas potências estabelecidas



Fonte: Chandrasekaran *et al.* (2011)

Chandrasekaran *et al.* (2011) faz também um comparativo entre o tempo de processamento do material chumbo em processamento por micro-ondas e convencional., gerando dados para a figura 20 e tabela 6. A figura 21 a) ilustra a galena, minério do chumbo, e b) uma bateria, uma das aplicações cotidianas mais importantes do metal.

Figura 20: Comparação do processamento por micro-ondas e convencional no chumbo



Fonte: Chandrasekaran *et al.* (2011)

Tabela 6: Comparação do tempo de fusão e taxas de aquecimento para aquecimento por método convencional e micro-ondas de alguns metais

Metal utilizado	Micro-ondas (1300W)		Convencional (2500W)	
	Tempo de fundição (min)	Taxa de aumento da temperatura (°C/min)	Tempo de fundição (min)	Taxa de aumento da temperatura (°C/min)
Estanho	5	40	11	24
Chumbo	6	51	14	21
Alumínio	9	82	29	24

Fonte: Adaptado de Chandrasekaran *et al.* (2011)

Figura 21: a) Galena e b) aplicação em baterias no uso cotidiano



a)



b)

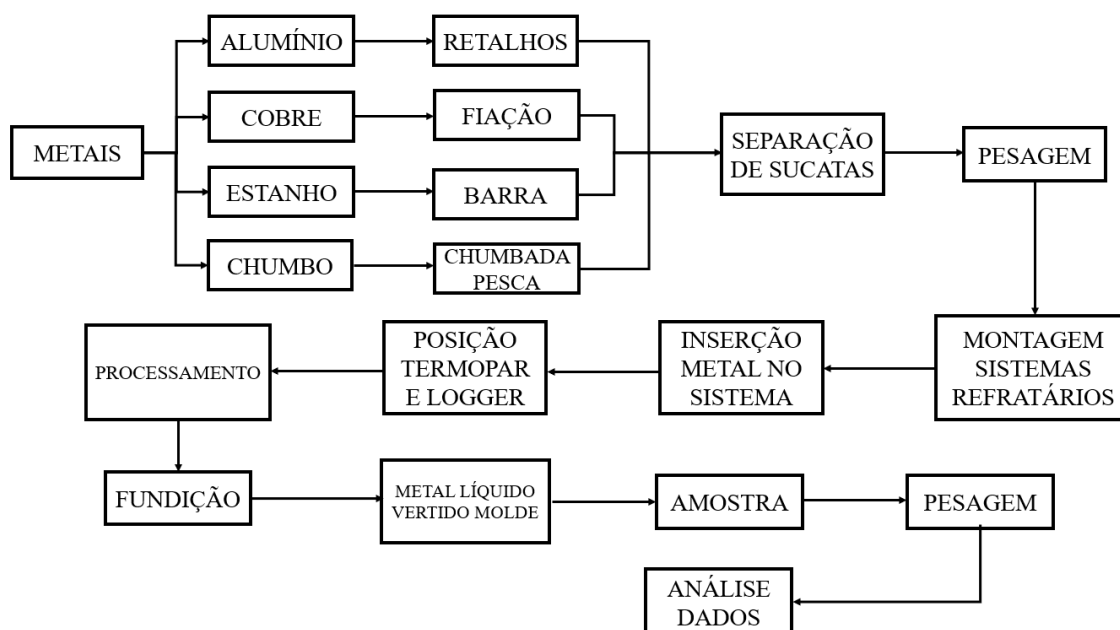
Fonte: Geology page (2014)

MATERIAIS E MÉTODOS

Antes de dar início a esse capítulo será válido indicar ao leitor os procedimentos experimentais adotados, os quais são apresentados no fluxograma da figura 22. Nele constam todas as etapas, desde a seleção, limpeza e pesagem dos metais, a montagem da mufla de aquecimento e o processamento do material (fusão), as quais serão detalhadas a seguir.

Para realização dos testes foi escolhido utilizar materiais com pureza comercial (cerca de 98% de pureza), sendo assim teremos para o Estanho, Chumbo, Alumínio e Cobre, os pontos de fusão de 232°C, 328°C, 660°C e 1085°C respectivamente.

Figura 22: Fluxograma de etapas separação e processamento dos metais

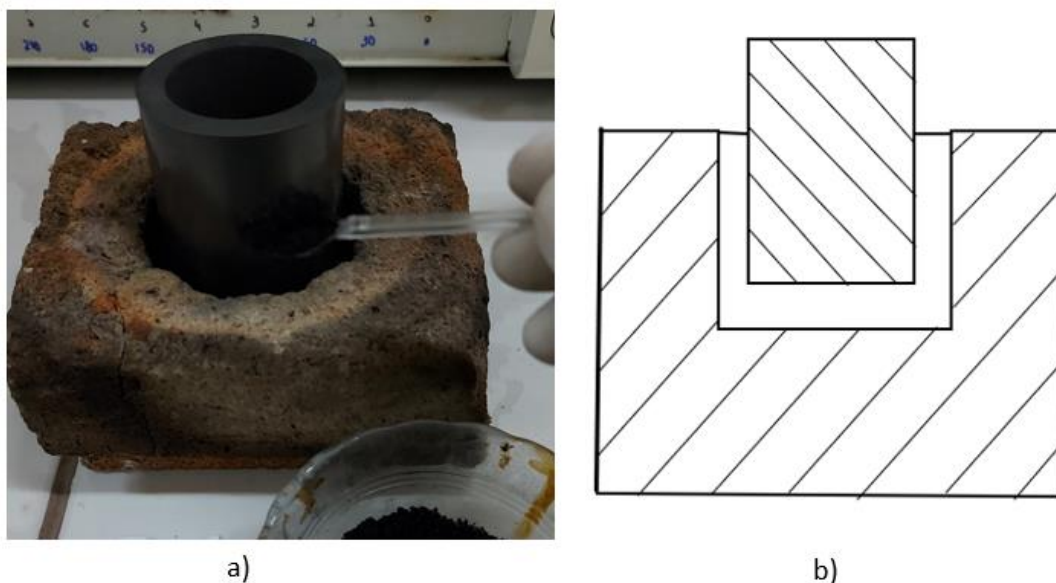


Fonte: Próprio autor.

3.1 Ensaios Preliminares

Os primeiros testes realizados utilizou-se tijolos cerâmicos isolantes como base do sistema, identificado na figura 23 a) e representado esquematicamente em b), e algumas peças foram usinadas para receber a adição do suscepter em pó, visto ter sido escolhido fazer uso de um aquecimento híbrido para o material.

Figura 23: a) Refratários e cadinho usados em arranjo para testes iniciais e b) Representação esquemática



Fonte: Próprio autor

O susceptor escolhido inicialmente foi o carvão, devido a sua facilidade de ser encontrado comercialmente, baixo custo na aquisição e fácil preparo. O carvão era triturado em um liquidificador e peneirado para obter as menores granulometrias de material a fim de facilitar o aquecimento, esse processo será melhor detalhado posteriormente neste capítulo, o grande problema do uso do carvão foi sua fácil dispersão durante o processamento, que gerava grandes quantidades de pó acumulado no interior da carcaça do micro-ondas (que poderia gerar aquecimento de componentes) e partículas suspensas que comprometiam a limpeza do laboratório.

Uma alternativa utilizada foi a adição de silicato de sódio ao pó de carvão em pequenas quantidades, apenas o necessário para levemente hidratar o carvão, dessa forma o silicato serviria como uma espécie de aglomerante evitando dispersão de partículas, e a pequena quantidade utilizada não comprometeria a amostra final pois não iria gerar gases oxidantes.

A alternativa foi validada por se mostrar altamente efetiva em sua função desejada, todavia os refratários estavam trincando e quebrando em praticamente todos os testes, o que atrasava a realização dos mesmo e comprometia a repetibilidade dos experimentos. Logo analisou se ser necessário desenvolver um novo *setup* para o

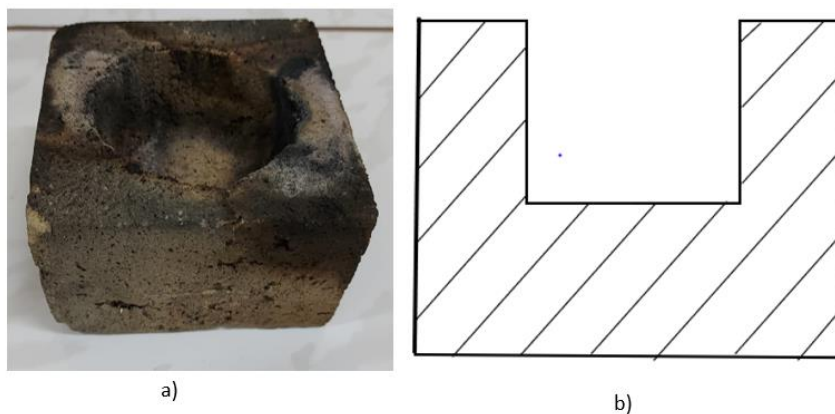
aquecimento, construindo um novo refratário e utilizando um outro susceptor, sabendo que o foco era atingir as temperaturas desejadas, tornar o setup resistente a ponto de garantir repetibilidade dos testes, baixo custo e fácil acesso comercial aos itens utilizados.

Para o refratário foi utilizada uma manta cerâmica com formato criado em molde de gesso, como será detalhado posteriormente, e para o susceptor foi escolhido utilizar o carboneto de silício. Foi então desenvolvido um cilindro de carboneto de silício que posteriormente seria inserido no interior da manta cerâmica também em formato cilíndrico, gerando assim um sistema prático e que permitiu repetibilidade dos testes sem quebras, trincas ou partículas contaminantes, a figura 24 ilustra o sistema final com a manta e susceptor.

3.2 Preparo dos Refratários

O tijolo cerâmico isolante foi usinado para receber o susceptor carvão em pó tem um formato quadrado, com as dimensões de 113 mm para largura e comprimento, e 73mm para altura. Já o rebaixo, possui 40 mm de profundidade e 73 mm de diâmetro. A figura 24 ilustra um dos tijolos, com as medidas acima especificadas e que é utilizado no processo para receber a carga de susceptor.

Figura 24: a) Refratário usinado para receber susceptor e cadinho e b) Representação esquemática



Fonte: Próprio autor

O último componente do sistema é composto por uma manta com fibras cerâmicas de alumina, que serviu como tampa isolante térmica. Um furo central pequeno permitiu inserir um termopar ao interior do cadinho, buscando obter as aferições de temperatura durante o processo. Vale ressaltar que esse arranjo refratário foi utilizado nos testes com uso do carvão como suscepter.

O uso de carboneto de silício como suscepter empregou esta cerâmica na forma de um anel com aproximadamente 100 mm de diâmetro, espessura média de 4 mm e 60 mm de altura, agregado com uma mistura de silicato de sódio em água na razão 1:2 em massa, respectivamente. O isolamento térmico do anel de carboneto de silício foi feito envolvendo a peça em uma manta de fibra cerâmica a base de alumina, obtendo-se diâmetro externo do suscepter com isolamento de 200 mm e altura aproximada de 100 mm, como mostra a figura 25.

Figura 25: a) Mufla de manta cerâmica para isolamento do anel SiC, b) destaque no anel SiC



a)

b)

Fonte: Próprio autor

3.3 Preparo do material metálico

Os metais com pureza comercial usados neste trabalho foram coletados da maneira mais simples possível. O alumínio foi obtido a partir de sucatas de alumínio, sendo então retiradas as impurezas da superfície através de lixamento, em seguida as folhas de alumínio foram picadas em pedaços menores para facilitar o processo de fusão. O chumbo foi adquirido facilmente em casas comerciais especializadas em pesca, através das chumbadas. O estanho foi fornecido na forma de lingotes alongados de pequeno porte e o cobre foi obtido de sucata de fiações elétricas, sendo necessário realizar uma limpeza desses materiais para a remoção do material isolante. Após separação e limpeza os materiais foram pesados para a produção das cargas para fusão, sendo usadas massas de 50 e 100 gramas para os testes.

3.4 Processamento para fusão dos metais usando irradiação de micro-ondas

Este trabalho envolveu o estudo de uma técnica alternativa para fusão de metais como Alumínio, Cobre, Estanho e Chumbo, através da utilização de ondas eletromagnéticas geradas no interior de um forno de micro-ondas doméstico. Durante testes iniciais grandes quantidades de susceptor (carvão em pó) ficavam depositadas no interior do micro-ondas, sendo necessário periodicamente desmontar a carcaça do aparelho e realizar a limpeza interna dos componentes - o que tomava grande tempo e mão de obra.

Uma solução encontrada foi a utilização de silicato de sódio em baixas quantidades adicionadas ao carvão em pó, buscando tornar o susceptor citado uma espécie de massa unificada, evitando a dispersão de pó de carvão na carcaça do micro-ondas e possíveis contaminações do material a ser fundido, de forma que essa alternativa mostrou se extremamente eficiente e aplicável. Deve-se ressaltar que foram utilizadas poucas gotas de silicato de sódio, buscando evitar ao máximo que esse componente gerasse gases na câmara do micro-ondas ou ainda que influenciasse de maneira significativa nos resultados do processamento.

A figura 26 mostra a técnica de mistura de silicato de sódio ao carvão moído, para evitar a dispersão de partículas do susceptor na parte interna do forno de micro-ondas.

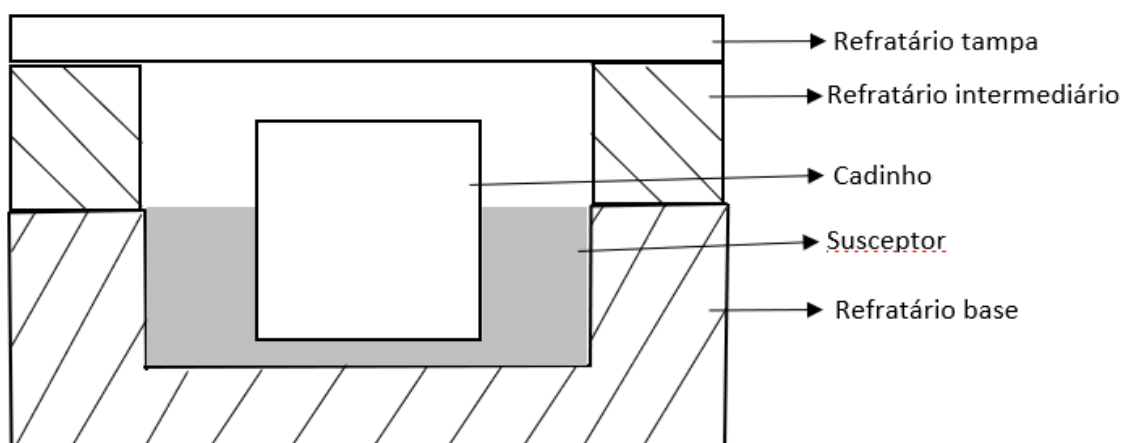
Figura 26: Carvão vegetal moído e misturado silicato de sódio



Fonte: Próprio autor

A mistura de carvão moído contendo silicato de sódio foi usada na base do mufla esquematizado na figura 27. Neste arranjo, usado nos testes preliminares, o susceptor fica em contato direto com o cadinho e o tijolo refratário, gerando desgaste de ambos os componentes devido aos ciclos de aquecimento/resfriamento e choques térmicos.

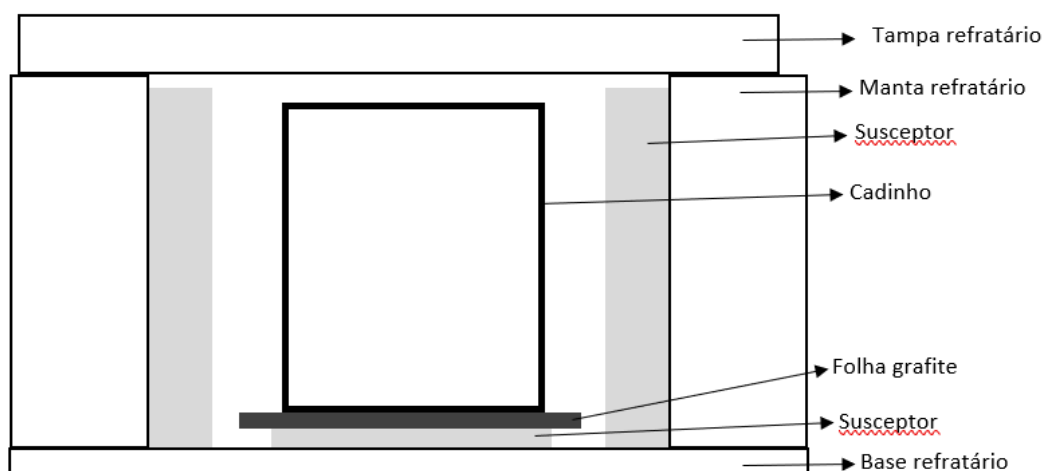
Figura 27: Arranjo esquemático da mufla usando carvão moído nos testes preliminares



Fonte: Próprio autor

O arranjo exemplificado na figura 27 mostrou-se pouco eficaz, uma vez que os refratários acabavam trincando bastante, se rompendo e os tempos de processamento eram mais longos, além dos resíduos deixados pelo uso do carvão moído. Deste modo optou-se em usar o carboneto de silício como susceptor, usando este material na forma de anel apresentado esquematicamente na figura 28. Nesse novo arranjo o susceptor não possui contato direto com o cadinho nem na sua base, onde existe uma folha de grafite sendo utilizada como elemento separador.

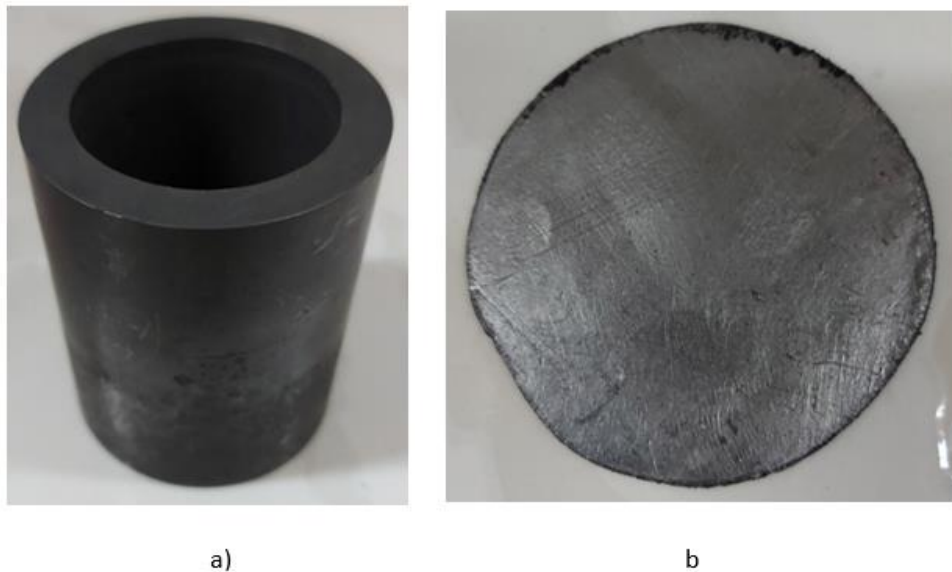
Figura 28: Arranjo definitivo da mufla utilizando manta de alumina envolvendo anel de carboneto de silício



Fonte: Próprio autor

No processamento é utilizado um cadinho de grafite, ilustrado na figura 29 a), material que suporta aquecimento em temperaturas elevadas e é resistente ao choque térmico. Para o isolamento da base do cadinho com o susceptor foi utilizada uma folha de grafite, como mostra a figura 29 b), com dimensões de espessura de 1 mm e diâmetro de 55 mm.

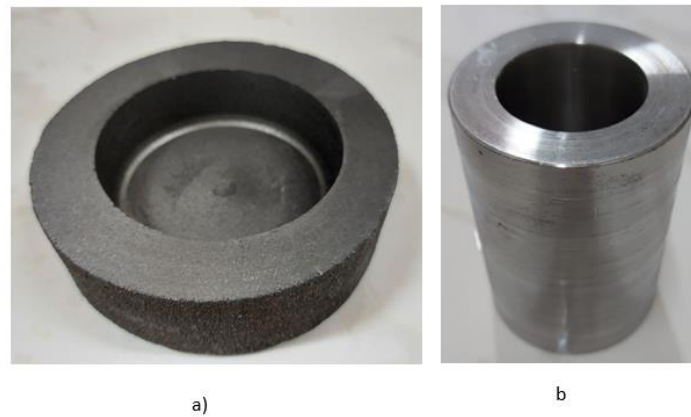
Figura 29: a) Cadinho de grafite e em b) folha de grafite utilizada como separador



Fonte: Próprio autor

A solidificação do metal fundido inicialmente era feita em um molde de grafite como mostra a figura 30 a), mas a pequena massa de metal fundido não permitiu neste molde a obtenção de peças com geometria adequada. Assim optou-se por utilizar um molde metálico (lingoteira), figura 30 b), que possibilitou a obtenção de peças fundidas com bom formato e acabamento, extraídas facilmente da lingoteira.

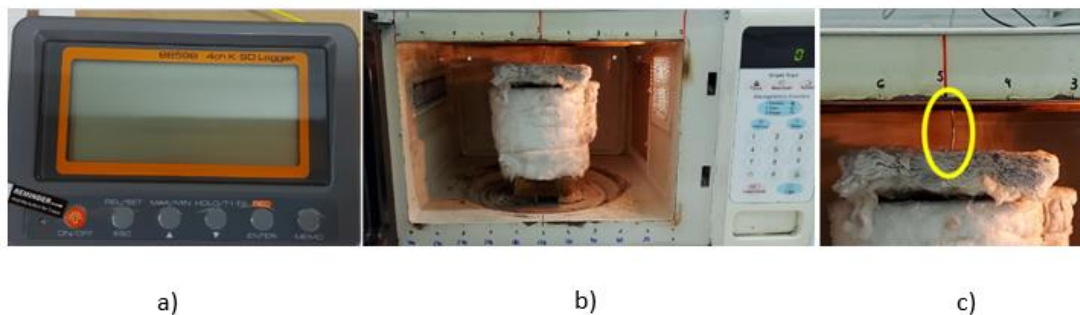
Figura 30: a) Molde de grafite e b) de metal (lingoteira)



Fonte: Próprio autor

Para o monitoramento da temperatura durante o processamento foi utilizado um termopar do tipo K (cromel-alumel) com revestimento metálico protetor de aço inoxidável, devidamente isolado da junção de medida. Este tipo de termopar permitiu as medidas de temperatura sem terem sido afetadas pelas variações do campo elétrico existentes no interior da cavidade do forno de micro-ondas usado. Para o registro das medidas de temperatura durante o aquecimento e fusão dos metais foi empregado um registrador digital do tipo logger, que a cada ensaio gerava um arquivo de dados que era armazenado em um cartão de memória do tipo SD. A frequência para medição da temperatura foi 1 Hertz. A figura 31 ilustra o sistema usado para coleta e registro das variações de temperatura durante os ensaios realizados.

Figura 31: Registrador digital de temperatura (datalogger) para coleta de dados (a) e montagem do termopar no interior do forno (b,c).

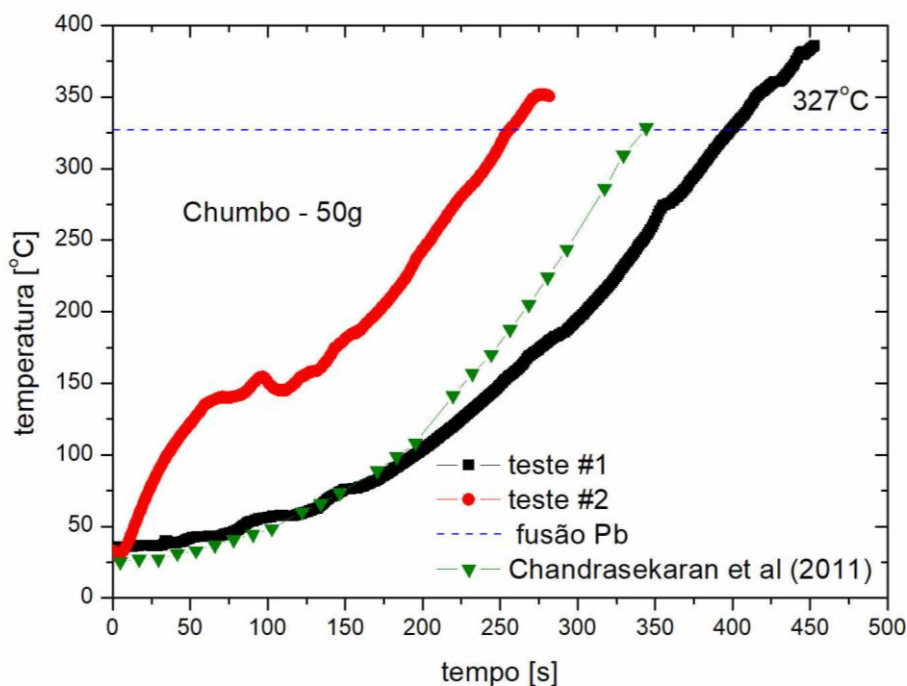


Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

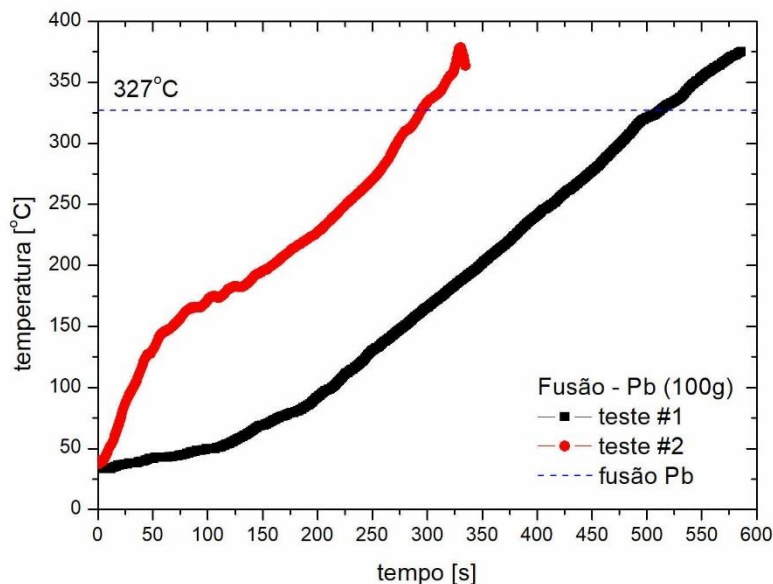
Nos testes realizados foram verificadas as temperaturas a cada 1 segundo durante o processamento de cada um dos metais, e para quantidades de cargas diferentes. Os dados foram obtidos em 2 testes, realizados em dias diferentes sendo o teste 1 e o teste 2, com temperatura ambiente distintas, posicionamento da mufla no interior do micro-ondas em pontos possivelmente distintos, que foram tabelados e serão apresentados por gráficos. Na figura 32 é apresentado um gráfico no qual podemos identificar os dados obtidos no processamento de 50 gramas de Chumbo nos testes 1 e 2 realizados pelo autor e um comparativo com os dados obtidos por Chandrasekaran *et al.* (2011) que permite inferir que os dados obtidos estão condizentes com a literatura abordada e na figura 33 os gráficos de 100 gramas.

Figura 32: Variação de temperatura medida durante os testes experimentais e comparação com resultados da literatura para o chumbo - 50g



Fonte: Próprio autor

Figura 33: Variação de temperatura medida durante os testes experimentais e comparação com resultados da literatura para o Chumbo - 100g



Fonte: Próprio autor

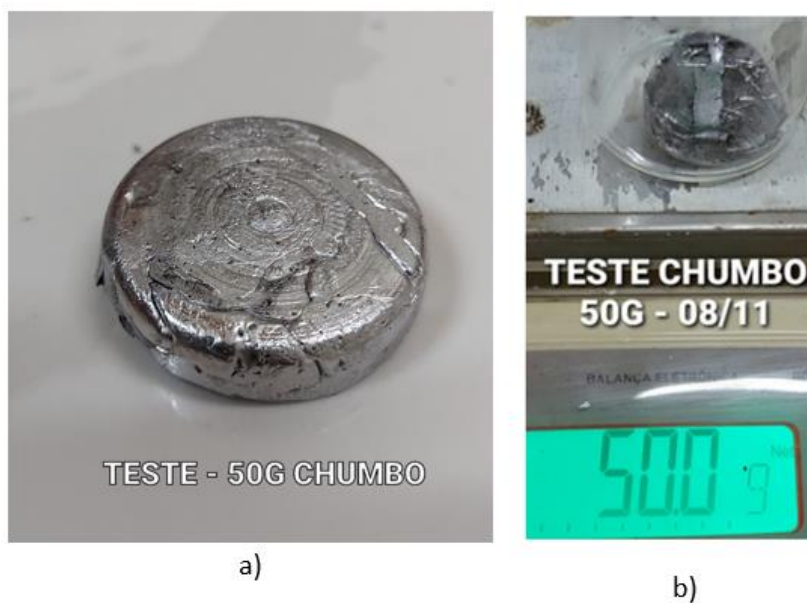
Após as cargas de 50 e 100 g de chumbo serem derretidas, estas foram solidificadas no molde apresentado na figura 30, sendo respectivamente às figuras 34 e 35 que mostram os lingotes consolidados. As imagens também mostram o peso final da amostra, indicando a quantidade de material perdida em possíveis formações de escória.

Com a carga de 50 gramas de chumbo foram necessários 400 segundos (teste 1) e 257 segundos (teste 2) para atingir a temperatura de fusão. Notou-se grande variação no aquecimento entre os testes, possivelmente provocado pela mudança no posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas. A formação de ondas estacionárias dentro da cavidade do forno de micro-ondas resulta em algumas regiões expostas a energia mais alta que outras, conhecidas como *hot spots*, sendo que nessas regiões há um aumento da taxa de aquecimento (Jones, 2002). Como cita Luciana *et al* (2020), a identificação dos hot spots formados auxilia na escolha da posição em que o material deverá ser colocado dentro da cavidade do forno de micro-ondas.

No aspecto comparativo nota-se que o teste 1 teve comportamento similar ao observado por Chandrasekaran *et al* (2011), que atingiu a temperatura de fusão após aproximadamente 340 segundos. Em relação aos testes realizados neste trabalho o

atraso máximo na fusão foi estimado em aproximadamente 15% e também pode ser justificado pelo posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas e na maior potência do aparelho (1300W).

Figura 34: a) amostra obtida no teste de fusão de chumbo - 50g, b) massa final após retirada de escória da fundição



Fonte: Próprio autor

Figura 35: a) amostra obtida no teste de fusão de chumbo - 100g, b) massa final após retirada de escória da fundição



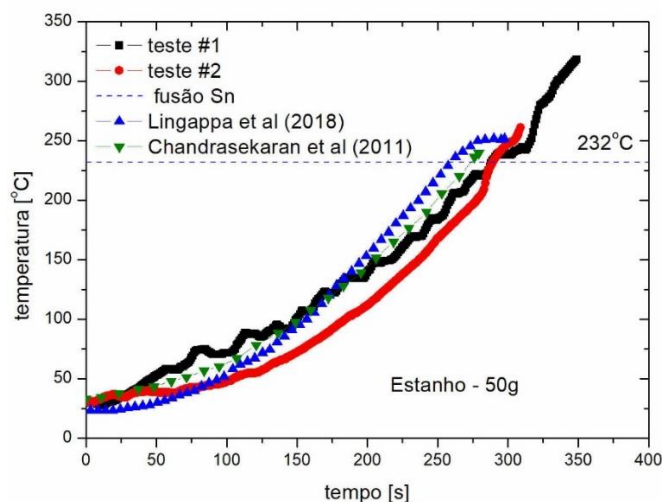
Fonte: Próprio autor

Com a carga de 100 gramas de chumbo foram necessários 513 segundos (teste 1) e 295 segundos (teste 2) para atingir a temperatura de fusão. Notou-se grande variação no aquecimento entre os testes, possivelmente provocado pela mudança no posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas. Chandrasekaran *et al* (2011) obteve a fusão do chumbo após aproximadamente 340 segundos, em um ciclo térmico intermediário entre os resultados experimentais deste trabalho. Em relação aos testes realizados neste trabalho o atraso máximo na fusão foi estimado em aproximadamente 34% em relação ao resultado de Chandrasekaran *et al* (2011), cuja causa pode estar relacionada ao posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas e na maior potência do micro-ondas (1300W).

O gráfico apresentado na figura 36 e 37 apresenta os dados obtidos durante o processamento de 50 e 100 gramas de Estanho respectivamente, novamente analisando os testes 1 e 2. Podemos visualizar que no Teste 1 foram necessários 289 s, e no Teste 2 290 s para atingir a temperatura de fusão, ao passo que Chandrasekaran *et al* (2011) atingiu a temperatura mencionada com 270 s e Lingappa aos 260 s.

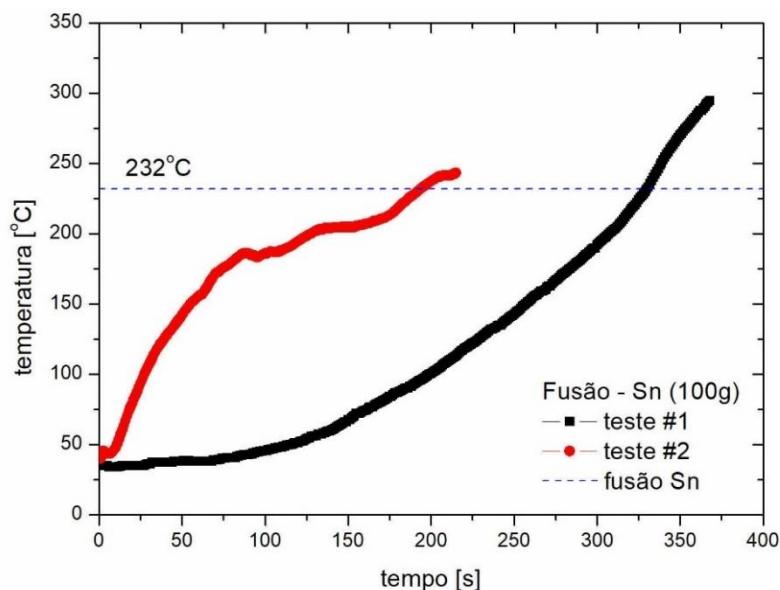
Em relação aos testes realizados neste trabalho o atraso na fusão foi estimado em aproximadamente 10% e pode ser justificado pelo posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas e por variações na potência do aparelho - Chandrasekaran *et al* (2011) utilizaram um forno de 1300W em seus experimentos.

Figura 36: Variação de temperatura medida durante os testes experimentais e comparação com resultados da literatura para o Estanho – 50g



Fonte: Próprio autor

Figura 37: Variação de temperatura medida durante os testes experimentais e comparação com resultados da literatura para o Estanho – 100g



Fonte: Próprio autor

Após as cargas de 50 e 100 g de estanho serem derretidas, estas foram solidificadas no molde de metal já apresentado na figura 30, sendo representadas respectivamente nas figuras 38 e 39, onde as imagens a) representam as amostras, e a b) representa o peso das amostras após retirada da escória de fusão.

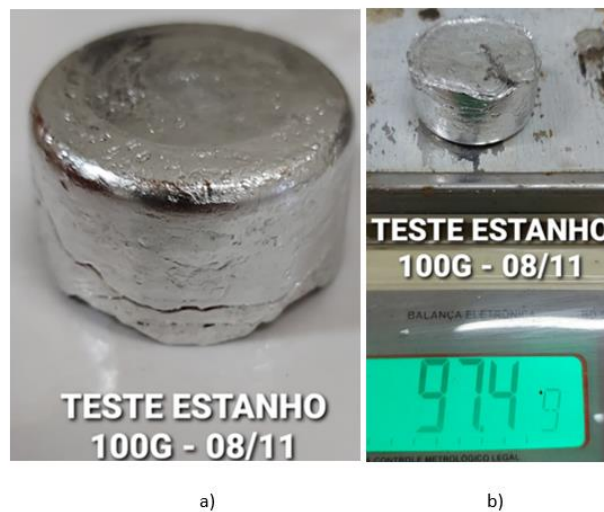
Com a carga de 100 gramas de estanho foram necessários 330 segundos (teste 1) e 194 segundos (teste 2) para atingir a temperatura de fusão. Notou-se grande variação no aquecimento entre os testes, possivelmente provocado pela mudança no posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas como evidenciado no trabalho de Luciana *et al.* (2020). No aspecto comparativo nota-se que o teste 1 teve comportamento similar ao observado por Chandrasekaran *et al* (2011), que atingiu a temperatura de fusão após aproximadamente 285 segundos, e por Lingappa *et al* (2018) que atingiu esta temperatura após cerca de 283 segundos. Em relação aos testes realizados neste trabalho o atraso na fusão foi estimado em aproximadamente 14% e também pode ser justificado pelo posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas e por variações de potência do aparelho.

Figura 38: a) amostra obtida no teste de fusão de estanho - 50 g, b) massa final da amostra após retirada escória



Fonte: Próprio autor

Figura 39: a) amostra obtida no teste de fusão de estanho - 100 g, b) massa final da amostra após retirada escória

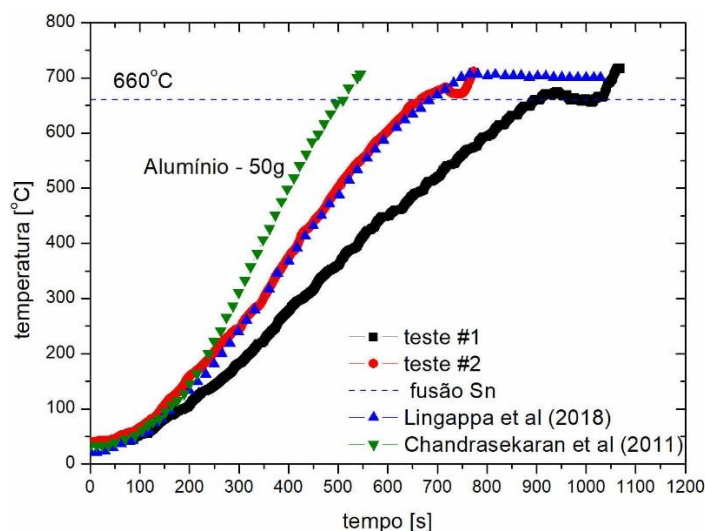


Fonte: Próprio autor

Devido o alumínio ser um metal com baixa densidade, é fato que ocupa volumes maiores que os outros metais avaliados, e devido as limitações dimensionais do cadinho utilizado não foi possível realizar a avaliação de temperatura e tempo para uma carga de

100 gramas, tendo sido realizada apenas a de 50 gramas, como infere o gráfico na figura 40.

Figura 40: Variação de temperatura medida durante os testes experimentais e comparação com resultados da literatura para o Alumínio – 50g

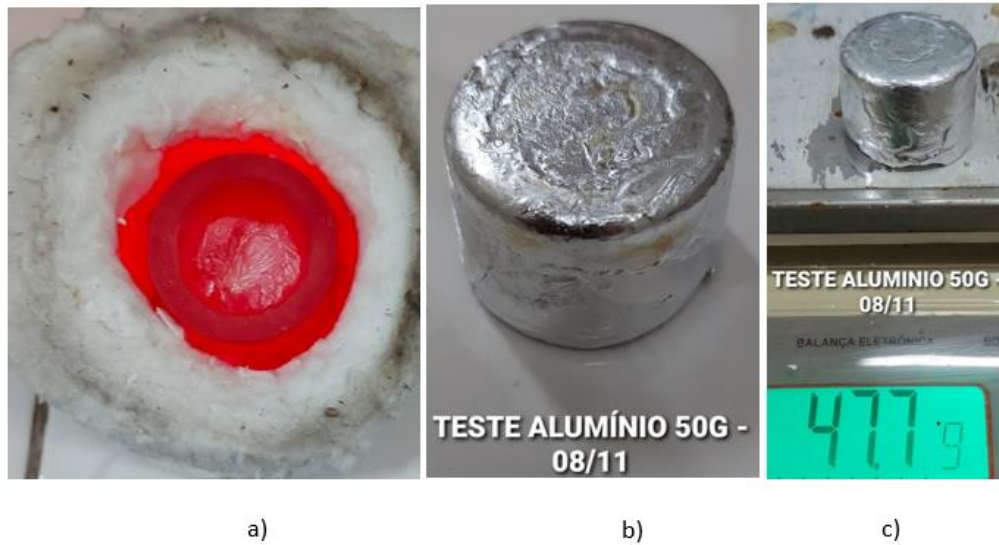


Fonte: Próprio autor

Após a carga de 50 g de Alumínio ser fundida, figura 41 a), ela foi solidificada no molde de aço, de modo que a amostra é apresentada na figura 41 b), e após sua escória de fundição ser retirada foi obtida a massa apresentada na figura 41 c).

Com a carga de 50 gramas de alumínio foram necessários 900 segundos (teste 1) e 670 segundos (teste 2) para atingir a temperatura de fusão. No aspecto comparativo nota-se boa similaridade com os resultados obtidos por Lingappa *et al* (2018) que atingiu esta temperatura após cerca de 690 segundos. Chandrasekaran *et al* (2011) fundiram 25 gramas de alumínio em aproximadamente 510 segundos empregando um forno de micro-ondas com potência de 1300W. Em relação aos testes realizados neste trabalho as diferenças nos tempos para fusão podem estar associadas ao posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas e pela potência do aparelho.

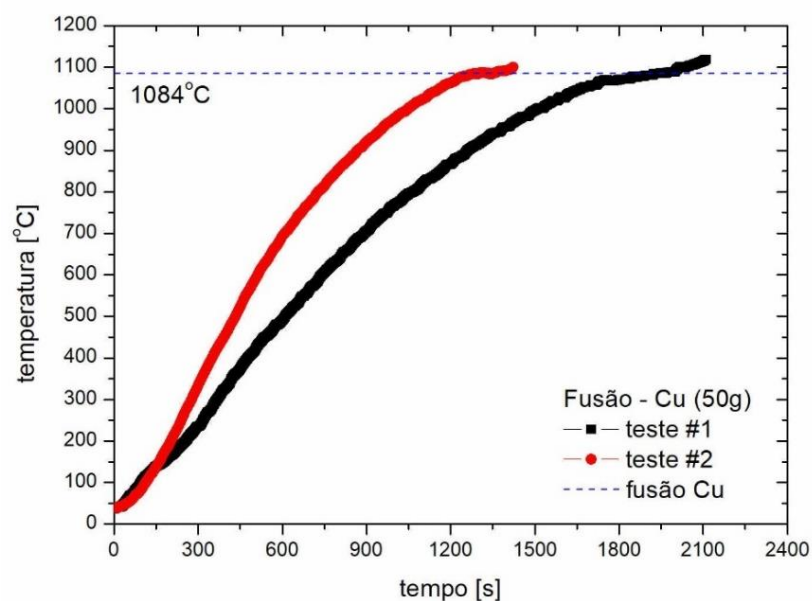
Figura 41: a) Fundição de alumínio, b) amostra obtida após resfriamento e c) massa metálica após retirada de escória da solidificação - 50g



Fonte: Próprio autor

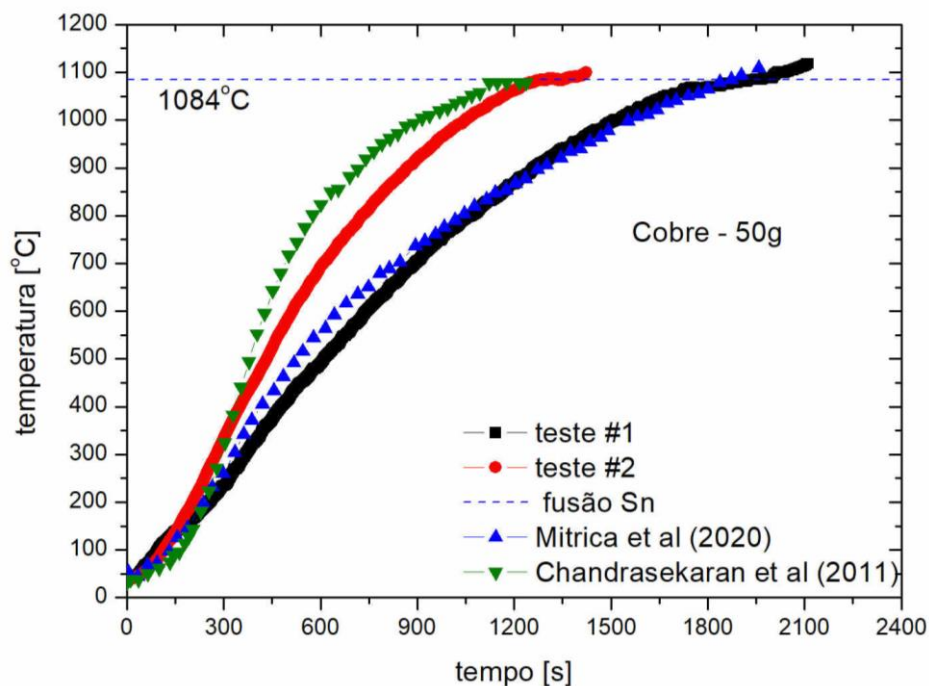
O gráfico apresentado na figura 42 indica o processamento de 50 g de cobre utilizando os mesmos critérios e padrões dos demais testes, e na figura 43 temos um comparativo dos dados para o cobre de 50g obtidos pelo autor e literaturas consultadas.

Figura 42: Variação de temperatura medida durante os testes experimentais e comparação com resultados da literatura para o Cobre - 50g



Fonte: Próprio autor

Figura 43: Variação de temperatura medida durante os testes experimentais e comparação com resultados da literatura para o cobre

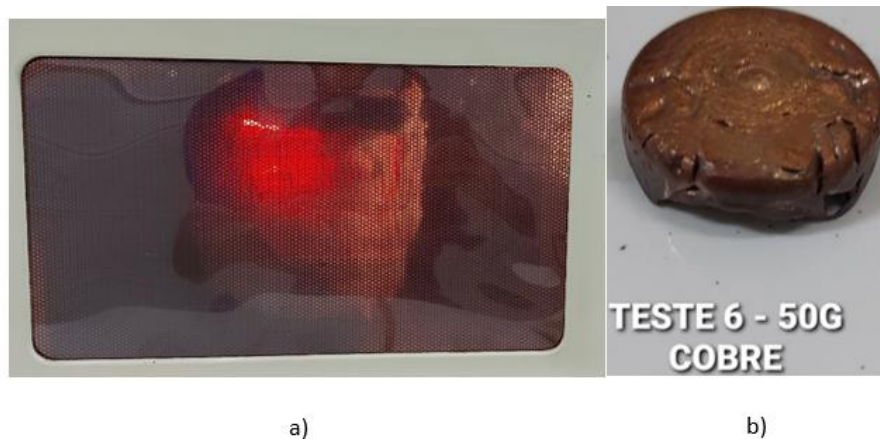


Fonte: Próprio autor

Para a fusão da carga de 50 gramas de cobre foram necessários 1925 segundos (teste 1) e 1350 segundos (teste 2) para atingir a temperatura de fusão. No aspecto comparativo nota-se muito boa similaridade com os resultados obtidos por Mitrica *et al* (2020) que atingiu esta temperatura após cerca de 1840 segundos. Chandrasekaran *et al* (2011) fundiram 25 gramas de cobre em aproximadamente 1230 segundos empregando um forno de micro-ondas com potência de 1300W. Em relação aos testes realizados neste trabalho as diferenças nos tempos para fusão podem estar associadas ao posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas e pela potência do aparelho.

Após a fundição de cobre, o metal líquido foi vertido no molde de aço apresentado na figura 30, dando origem ao lingote apresentado na figura 44, onde a) indica o aquecimento no interior da mufla durante processamento e b) o lingote obtido ao final do teste.

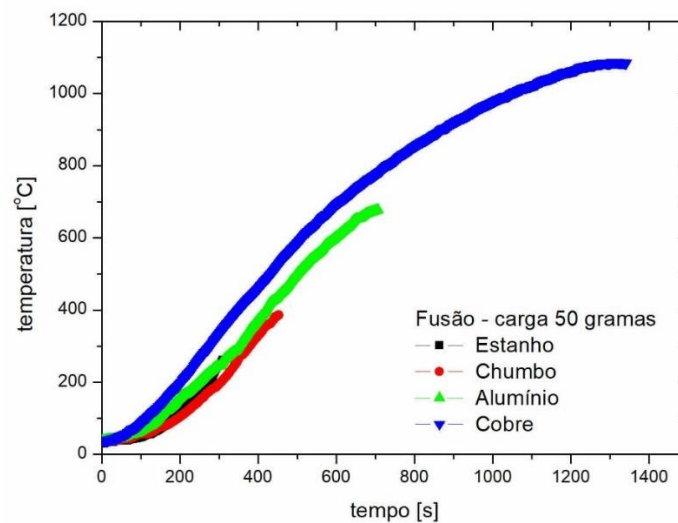
Figura 44: a) vista exterior ao forno micro-ondas durante o teste com o Cobre - 50g e b) lingote obtido após solidificação.



Fonte: Próprio autor

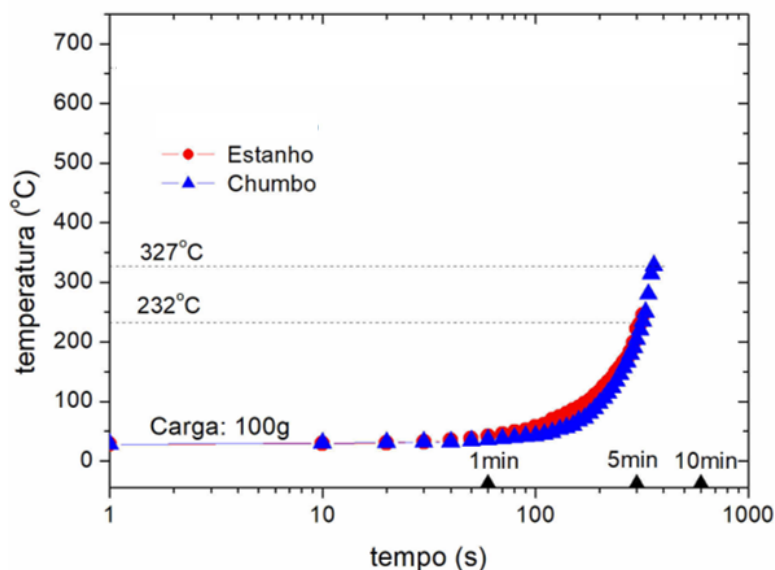
Para efeitos comparativos e uma melhor análise também foram gerados gráficos dos diferentes metais para as mesmas cargas, sendo possível analisar que até os 60 s o comportamento é praticamente o mesmo em todos os materiais, o que indica possivelmente ser um tempo de aquecimento do cadinho, e após isso passam a prevalecer as características de cada metal. As figuras 45 e 46 apresentam respectivamente o comparativo para cargas de 50 e 100 gramas dos metais estanho, chumbo, alumínio e cobre trabalhados nesse estudo.

Figura 45: Comparativo curvas de aquecimento para metais estanho, chumbo, alumínio e cobre - 50g



Fonte: Próprio autor

Figura 46: Comparativo curvas de aquecimento durante processamento via micro-ondas para metais não ferrosos estanho e chumbo - 100g



Fonte: Próprio autor

5. CONCLUSÕES

Os avanços nos estudos realizados permitiu obter conclusões sobre o uso de um micro-ondas convencional para a fusão de metais não-ferrosos o Estanho, o Chumbo, o Alumínio e o Cobre. Para a fusão do estanho foi necessária a utilização do forno de micro-ondas durante, no máximo, 330 segundos (5,5 minutos). Para a fusão do chumbo, alumínio e cobre foram necessários, respectivamente, 513 s (8,5 minutos), 900 s (15 minutos) e 1925 s (32,1 minutos).

Estes tempos para fusão são compatíveis aos resultados reportados na literatura. Notou-se grande influência do posicionamento da carga no interior da cavidade do forno de micro-ondas sobre o ciclo térmico para aquecimento, de forma que diferenças significativas de tempo sob irradiação podem ocorrer se a carga se encontra próxima, ou não, de um ponto quente (*hot spot*).

Pelos resultados experimentais obtidos acredita-se que a fundição em pequena escala, através de um método não convencional como a irradiação por micro-ondas, pode ser uma alternativa viável e econômica para a indústria da joalheria. Neste setor processa-se a fundição de pequenas quantidades de metais preciosos, como ouro e prata

por exemplo, que poderiam ser trabalhados de forma rápida, prática, sem geração de resíduos, gases nocivos e de alto desempenho energético.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fica como sugestão para trabalhos futuros verificar o efeito da potência do micro-ondas sobre o ciclo térmico, pois diversas são as configurações de um micro-ondas, tais como tamanho da câmara, potência, componentes mecânicos e outros. Uma outra recomendação é realizar uma análise do custo operacional por fusão em micro-ondas, com base no tipo de metal utilizado e tempo de processamento, obtendo assim o consumo em KWh e custo em reais por teste realizado. Além disso deve se testar outras ligas não ferrosas além das analisadas por meio deste trabalho e demarcar de forma definitiva o exato posicionamento dos hotspots do interior da mufla, garantindo assim resultados ainda mais precisos.

REFERÊNCIAS

- ABAL, AB d A. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo: Abal, 2007.
- BARBOZA, A. C. *et al.* Aquecimento em forno de microondas/desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. **Química Nova**, Campinas, v. 24, n. 6, p. 901-904, 2001.
- BHATT, S. *et al.* Experimental study on effect of susceptor and separator materials on microwave melting of lead metal. **Materials Today: Proceedings**, 2020.
- BHATTACHARYA, M.; BASAK, T. A review on the susceptor assisted microwave processing of materials. **Energy**, London, p. 306 – 338, 2016.
- BHUPENDRA, K. V; SANGLE, S. Strategy to derive benefits of radical cleaner production, products and technologies: a study of Indian firms. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 126, p. 236-247, 2016.
- BORGES, F. C. **Estudo do processamento termoquímico de biomassas com microondas: pirólise rápida de biomassas residuais e microalgas**. 2014. (Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CHANDRASEKARAN, S. *et al.*; Experimental and theoretical investigation on microwave melting of metals. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 211, n. 3, p. 482-487, 2011.
- CHANDRASEKARAN, S. *et al* T.; Microwave material processing: a review. **Fluid Mechanics and Transport Phenomena - AICHE Journal**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 330 - 363, 2012.
- CHA-UM, W; *et al.* Experimental analysis of microwave heating of dielectric materials using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀)(Case study: Water layer and saturated porous medium). **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 33, n. 3, p. 472-481, 2009.
- GEOLOGY PAGE. **Chumbo**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <http://www.geologypage.com/2014/05/lead.html>. Acesso em: 26/jan/2022.
- CLARK, David E.; *et al.* Processing materials with microwave energy. **Materials Science and Engineering: A**, Amsterdam, v. 287, n. 2, p. 153-158, 2000.
- COBRE, M. L; Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/cobre/>. Acesso em: 26/jan/2022.
- DIAS, C. H; *et al.* **Estanho**. [S. l.: s. n.], 2018.
- CAMINHONEIROS INTERIORES. **Espectro Eletromagnético**. Disponível em: <http://caminhosinteriores.com.br/cromoterapia-entrando-no-universo-das-cores/>. Acesso em: 28 maio 2019.

- GEORGANTZIA, E; *et al.* Aluminium alloys as structural material: A review of research. **Engineering Structures**, Oxford, v. 227, p. 111372, 2021.
- GENG, Y. *et al.* A review of microstructure and texture evolution with nanoscale precipitates for copper alloys. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 5, p. 11918-11934, 2020.
- GUPTA, M.; LEONG, E. W. W. **Microwave and Metals**. Singapore: John Wiley & Sons, 2007. 232 p.
- GUPTA, D.; SHARMA, A. K.; Microwave cladding: a new approach in surface engineering. **Journal of Manufacturing Processes**, London, v. 16, n. 2, p. 176-182, 2014.
- HAMIDAH, Ida *et al.* Corrosion of copper alloys in KOH, NaOH, NaCl, and HCl electrolyte solutions and its impact to the mechanical properties. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, v. 60, n. 2, p. 2235-2243, 2021.
- HEBBALE, Ajit M.; SRINATH, M. S. Microstructural investigation of Ni based cladding developed on austenitic SS-304 through microwave irradiation. **Journal of materials research and technology**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 4, p. 293-301, 2016.
- JONES, D. A., *et al.* Microwave heating applications in environmental engineering: a review. **Resour. Conserv. Recycl.**, [s. l.], v. 34, p. 75–90, 2002.
- JÚNIOR, C. L. C. J; **Cobre e suas ligas**. Curitiba: UFPR, 2003.
- KAUFMAN, J. G. **Introduction to aluminum alloys and tempers**. ASM international, 2000.
- KIM, J. *et al.* Review of microwave assisted manufacturing technologies. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Seoul, v. 13, n. 12, p. 2263-2272. dez. 2012.
- LINGAPPA, S. M.; *et al.* Melting of bulk non-ferrous metallic materials by microwave hybrid heating (MHH) and conventional heating: a comparative study on energy consumption. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Heidelberg, v. 40, n. 1, p. 1, 2018.
- LOMBA, L. G. F. **Aplicação de micro-ondas para a produção de pós usados em revestimentos endurecidos por carbonetos de titânio formados durante soldagem com arco elétrico GTAW**. 2019. 49 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2019.
- LU, Tianxing *et al.* Enhanced mechanical and electrical properties of in situ synthesized nano-tungsten dispersion-strengthened copper alloy. **Materials Science and Engineering: A**, Amsterdam, v. 799, p. 140161, 2021.

- LUZ, G. **Blog materiais**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/09/ponto-de-fusao-dos-metais.html>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- MISHRA, P.; *et al.* Modeling of microwave heating of particulate metals. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 37, n. 5, p. 839-845, 2006.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL *et al.* **Microwave processing of materials**. Washington, DC: The National Academies Press, 1994.
- NETA, M. **Radiação Eletromagnética**. FQ PT, 2022. Disponível em: <https://www.fq.pt/luz/radiacao-eletromagnetica>. Acesso em: 19. jan. 2022.
- NISHITANI, T. **Method for sintering refractories and an apparatus therefor**. U.S. Patent n. 4,147,911, 3 abr. 1979.
- PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia**. Hemus, 2000.
- PONTES E.P. 2016 **Estanho**. In: LIMA T.M. & NEVES C.A.R. (coord.). Sumário Mineral 2015. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), v. 35, p. 62-63. ISSN: 01012053.
- ROCHA, L. J. C; NIECKELE, A. O. Melting of a pure metal from an isothermal vertical wall in the presence of turbulent natural convection. In: **International Heat Transfer Conference Digital Library**. Begel House Inc., 2002.
- ROY, R.; *et al.*; Full sintering of powdered-metal bodies in a microwave field. **Nature**, New York, v. 399, n. 668, p. 6737, 1999.
- SAMYAL, R.;. **The casting of materials using microwave energy: a review**. Materials Today: Proceedings, 2020.
- SOBRAL, L. G. S., *et al.* **Metalurgia do chumbo: processos de produção e refino**. CETEM/MCTI, 2012.
- SOVACOOOL, B. K. The importance of comprehensiveness in renewable electricity and energy-efficiency policy. **Energy Policy**, London, v. 37, n. 4, p. 1529-1541, 2009.
- SUN, X. *et al.* Effects of microwave on molten metals with low melting temperatures. **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, Irvine, v. 4, n. 2, p. 107-112, 2005.
- SRINATH, M. S.; *et al.*. A new approach to joining of bulk copper using microwave energy. **Materials & Design**, London, v. 32, n. 5, p. 2685-2694, 2011.
- TAKAHASHI, L. *et al.* **Mapeamento da energia irradiada na cavidade de um forno de micro-ondas adaptado para o processamento de materiais metálicos**. I Cobicet, 2020.

VERMA, R. P.; LILA, M. K.. A short review on aluminium alloys and welding in structural applications. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

ZAFAR, S.; SHARMA, A. K. On friction and wear behavior of WC-12Co microwave clad. **Tribology Transactions**, v. 58, n. 4, p. 584-591, 2015.

ZERNER, T. **The physics of microwave ovens**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: <http://tobyzerner.com/microwaves/> Acesso em: 20 jan. 2022.