



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Luiz Gonzaga Caminhas Irias

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ALUMÍNIO FUNDIDO (SAE J425
323) COM ACRÉSCIMO DE GRAFENO PROCESSADOS EM ATMOSFERA
INERTE EM UM FORNO A INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

Belo Horizonte

Agosto / 2025



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
MESTRADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Luiz Gonzaga Caminhas Irias

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ALUMÍNIO FUNDIDO (SAE J425
323) COM ACRÉSCIMO DE GRAFENO PROCESSADOS EM ATMOSFERA
INERTE EM UM FORNO A INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa de Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Belo Horizonte

Agosto / 2025

Irias, Luiz Gonzaga Caminhas.
I68c Caracterização das propriedades de alumínio fundido (SAE J425 323) com acréscimo de grafeno processados em atmosfera inerte em um forno a indução eletromagnética / Luiz Gonzaga Caminhas Irias. – 2025.
144 f. : il.
Orientador: Sidney Nicodemos da Silva.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2025.
Bibliografia.

1. Grafeno. 2. Alumínio. 3. Nanocompósitos (Materiais). 4. Fundição. 5. Indução eletromagnética. 6. Forno elétrico. 7. Cabos elétricos. I. Silva, Sidney Nicodemos da. II. Título.

CDD: 620.11297

Luiz Gonzaga Caminhas Irias

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ALUMÍNIO FUNDIDO (SAE J425 323) COM ACRÉSCIMO DE GRAFENO PROCESSADOS EM ATMOSFERA INERTE EM UM FORNO A INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 21 / 2025 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.043665/2025-45

Belo Horizonte-MG, 21 de agosto de 2025.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ALUMÍNIO FUNDIDO (SAE J425 323) COM ACRÉSCIMO DE GRAFENO PROCESSADOS EM ATMOSFERA INERTE EM UM FORNO A INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Autor: Luiz Gonzaga Caminhas Irias

Orientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 22 de agosto de 2025 esta Dissertação:

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Almir Gonçalves Vieira (EXAMINADOR EXTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof.^a Dr.^a Sara Silva Ferreira Dafe (EXAMINADORA EXTERNA)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUCMINAS

(Assinado digitalmente em 22/08/2025 11:22)
ALMER GONCALVES VIEIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DF (11.56.10)
Matrícula: 1219790

(Assinado digitalmente em 25/08/2025 20:02)
CLAUDINEI REZENDE CALADO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQUI (11.55.09)
Matrícula: 1330453

(Assinado digitalmente em 25/08/2025 11:29)
SIDNEY NICODEMOS DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DF (11.56.10)
Matrícula: 2519987

(Assinado digitalmente em 22/08/2025 16:42)
SARA SILVA FERREIRA DE DAFE
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.216-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **21**, ano: **2025**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **21/08/2025** e o código de verificação: **393fae2f28**

Belo Horizonte

Agosto / 2025

À minha família que de uma forma direta ou indireta me apoiou
Em especial a minha amada esposa Alessandra Feitosa, pelo apoio constante,
Dedico a vocês a conclusão deste projeto.

AGRADECIMENTOS

À D'eus o eterno por me proporcionar a vida e a condição de fazê-lo.

À minha esposa Alessandra Feitosa por sempre acreditar e me encorajar a ser mestre.

Ao professor Dr. Sidney Nicodemos da Silva por ter estado comigo desde o início da jornada. Por ser muito mais que um orientador e sim um mestre e amigo.

Ao CEFET-MG pelo crescimento acadêmico que obtive ao longo desse tempo e pela oportunidade de cursar essa pós-graduação.

Ao CDTN, na pessoa Dr^a Denise das Mercês Camarano e ao engenheiro João Bosco do LabCoN, pela parceria e realização dos experimentos.

À PUC MG, na pessoa Dr^a Sara Ferreira Silva de Dafé, pelo apoio na realização das caracterizações MEV-EDS e por aceitar fazer parte da banca de defesa.

Meu agradecimento ao Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado e Prof. Dr. Almir Gonçalves Vieira por aceitar fazer parte da banca de qualificação e defesa.

À Hexo Graphene por doar as amostras de grafeno e apoiar em todas as etapas da pesquisa para a realização dos experimentos.

Ao mestrando Aldo Pandolfi pelo suporte e apoio nos experimentos.

Aos todos aqueles que me auxiliaram, direta e indiretamente, nesta empreitada, fica minha gratidão!

RESUMO

Os efeitos das mudanças climáticas são um dos desafios mais críticos que a humanidade vem enfrentando nas últimas décadas. No setor elétrico em específico, a produção de novos materiais com baixa emissão de carbono e alta performance vem sendo aprimorados ao redor do mundo. Um levantamento das patentes concedidas entre 2000 e 2025 (WIPO) mostra que o *Estado da Arte* destes materiais para eletrificação com condutividade elétrica e térmica melhorada, e razoáveis propriedades mecânica são uma parte importante da solução encontrada para a redução dos impactos ambientais e elevação da eficiência energética. Por meio da literatura confirma-se que o desenvolvimento de materiais baseados na nanotecnologia é fundamental para fabricação de cabos elétricos (flexíveis ou rígidos) mais leves e duráveis, envolvendo o uso de nanocompósitos de matrizes metálicas, como cobre (Cu) ou alumínio (Al) contendo grafeno (G), que oferecem alta capacidade de condução elétrica minimizando as perdas de energia e elevando a segurança dos cabos, bem como também de outros dispositivos elétricos, tais como: baterias e motores elétricos. Estes nanocompósitos de Al-G têm se provado ser um excelente substituto, atendendo as normas técnicas para os cabos elétricos de cobre com suas condutividades da ordem de 20% superiores, e para as carcaças de motores de alumínio fundido apresentando maiores dissipações térmicas, e possuindo significativa resistência mecânica e alta reciclabilidade. Neste contexto, o presente trabalho trata da produção e caracterização de nanocompósitos de matriz da liga de alumínio (SAE J425 323), reforçados com nanoplaquetas de grafeno comercial de poucas camadas. O material grafênico utilizado (HP10) possui até 10 camadas, e foi adicionado ao Al 323 nas proporções de 0,5%, 1%, 1,5% e 2% m/m. Foram avaliados parâmetros de processamento pela técnica de fundição em forno de indução eletromagnética com atmosfera inerte com gás argônio (Ar) ultrapuro (pureza 5.0) após 3 purga gasosa. Posteriormente foram realizados ensaios de caracterizações físico-químicas e microestruturais por meio de microscopia eletrônica de varredura acoplado com análise de espectroscopia por energia dispersiva (MEV/EDS), difração de raios-X (DRX) para a determinação da porcentagem das fases presentes, determinação da incorporação e dispersão das nanoplaquetas de grafeno, e como também avaliar as características microestruturais e propriedades elétrica, térmica e mecânica para usos elétricos e/ou térmicos. Para esta caracterizações foram realizados os ensaios mecânico de dureza Vickers (HV), resistência elétrica (método de Ponte Kelvin) e difusividade térmica (método Quadrupolo Térmico) dos nanocompósitos. Como resultados destes estudos foi possível verificar uma forma de dispersão do grafeno na matriz de Al, por meio das correntes de Foucault (lei de Faraday) do forno de indução eletromagnética, além da convecção natural e da agitação mecânica manual. Houve um ganho nas propriedades estudadas dos nanocompósitos sendo verificado um aumento na condutividade elétrica principalmente para as amostras com 1,0% de grafeno, o valor calculado com base no padrão internacional de cobre recozido (*International Annealed Copper Standard – IACS*) foi 9,3% maior que a referência da literatura. Já difusibilidade térmica nas amostras com 2,0% de grafeno, o valor foi 7% maior do que a liga de alumínio 323 como recebida. Pode-se observar vantagens significativas com a adição de grafeno e reprodutividade no processamento dos nanocompósitos e um ganho de propriedades elétricas e térmicas para um eventual uso em escala industrial.

PALAVRAS-CHAVE: Grafeno, alumínio, nanocompósito, fundição, indução eletromagnética, forno elétrico, atmosfera inerte, cabos elétricos.

ABSTRACT

The effects of climate change are one of the most critical challenges humanity has faced in recent decades. In the electricity sector specifically, the production of new materials with low carbon emissions and high performance has been improving worldwide. A survey of patents granted between 2000 and 2025 (WIPO) shows that state-of-the-art materials for electrification, with improved electrical and thermal conductivity and mechanical property specifications, are an important part of the solution found to reduce environmental impacts and degrade energy efficiency. The literature confirms that the development of nanotechnology-based materials is essential for the manufacture of lighter and stronger electrical cables (flexible or rigid), involving the use of nanocomposites of metal matrices, such as copper (Cu) or aluminum (Al), containing graphene (G), which offer high electrical conduction capacity, minimizing energy losses and increasing the safety of cables, as well as other electrical devices, such as batteries and electric motors. These Al-G nanocomposites have proven to be an excellent alternative, meeting the technical standards for copper electrical cables with their conductivities of about 20% higher, and for aluminum motor housings, presenting greater thermal dissipation, and possessing significant mechanical strength and high recyclability. In this context, this work addresses the production and characterization of aluminum alloy matrix nanocomposites (SAE J425 323), reinforced with commercial few-layer graphene nanoplates. The graphene material used (HP10) has up to 10 layers and was added to Al 323 in proportions of 0.5%, 1%, 1.5%, and 2% w/w. Processing parameters were evaluated by research technique in an electromagnetic induction furnace with an inert atmosphere with ultrapure argon (Ar) gas (purity 5.0) after three gas purges. Subsequently, physicochemical and microstructural characterization tests were performed using scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (SEM/EDS) analysis, X-ray diffraction (XRD) to determine the percentage of phases present, determine the incorporation and dispersion of graphene nanoplates, and evaluate the microstructural characteristics and electrical, thermal, and mechanical properties for electrical and/or thermal uses. For this characterization, mechanical tests of Vickers hardness (HV), electrical resistance (Kelvin Bridge method), and thermal diffusivity (Thermal Quadrupole method) of the nanocomposites were performed. As a result of these studies, it was possible to verify a form of graphene dispersion in the Al matrix, through eddy currents (Faraday's law) of the electromagnetic induction furnace, in addition to natural and manual mechanical convection. There was an improvement in the properties of the nanocomposites, with an increase in electrical conductivity observed, mainly for the samples with 1.0% graphene. The value calculated based on the International Annealed Copper Standard (IACS) was 9,3% higher than the literature reference. Thermal diffusivity in the samples with 2,0% graphene was 7% higher than that of the as-received 323 aluminum alloy. Significant advantages can be observed with the addition of graphene, as well as reproducibility in the processing of the nanocomposites, and an improvement in electrical and thermal properties for potential use on an industrial scale.

KEYWORDS: Graphene, aluminum, nanocomposite, foundry, electromagnetic induction, electric furnace, inert atmosphere, electrical cables.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Quantidade atual de cobre por veículo para os principais grupos motopropulsores kg/cobre por veículo.....	18
Figura 2: a) Preço do Cobre e Alumínio entre 2019 a 2022 b) Evolução mensal do preço nos últimos 12 meses (\$/tonelada).....	19
Figura 3 - Fluxograma esquemático das operações de transformação do alumínio.	31
Figura 4 - Formas alotrópicas do grafeno.....	34
Figura 5 - Estrutura molecular bidimensional do grafeno com arranjos hexagonais de carbono.	36
Figura 6 - Hibridização sp^2 formando ângulos de aproximadamente 120°	37
Figura 7 - Representação esquemática da zona de <i>Brillouin</i> e cone de <i>Dirac</i>	37
Figura 8 - Comparativo esquemático entre o comportamento eletrônico do grafeno como de semicondutor.	38
Figura 9 - Nanoindentação sobre uma monocamada de grafeno.	40
Figura 10 - Métodos de síntese do grafeno por processo <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i>	41
Figura 11 - Clivagem micromecânica – Peeling- (Esfoliação mecânica).....	42
Figura 12 - Método de síntese por CVD.....	42
Figura 13 - Esquema geral da reação de esfoliação química do grafite <i>bulk</i> para a obtenção de OG ou OGR.....	43
Figura 14 - Representação esquemática das estruturas do (a) Grafeno, (b) GO e (c) rGO.....	44
Figura 15 - Representação das fases matriz e dispersa de um nanocompósito.	46
Figura 16 - Classificação dos compósitos segundo sua matriz e o tipo de reforço. ..	47
Figura 17 - Exemplo de disposição de reforço na matriz.....	47
Figura 18 - a) Representação esquemática de um material compósito e b) Imagem MEV de um compósito de Mg/SiC.....	47
Figura 19 - Circuito em ponte de Wheatstone para medição de um resistor.....	66
Figura 20 - Modelização para o método Quadrupolo térmico.....	68
Figura 21 - Grafeno fornecido pela Hexo Graphene HP10 Powder	69
Figura 22 – Caracterizações do grafeno HP10. a) Espectro Raman; b) Histograma do número de camadas; c) Difratoograma de raio X; d) Análise termogravimétrica TGA.....	70
Figura 23 - Lingotes de alumínio SAE 323.....	71

Figura 24 – Forno de indução do CDTN.....	72
Figura 25 – Cadinho, lingoteira e lança em grafite.	74
Figura 26 – Processamento considerado	75
Figura 27 – Ciclo de operação, fusão e agitação para obtenção dos lingotes com resfriamento ao forno.	77
Figura 28 – Aspectos dos lingotes após a retirada do forno.....	77
Figura 29 – Identificação das 3 regiões de amostragens dos nanocompósitos.	78
Figura 30 – Amostras para as caracterizações planejadas	79
Figura 31 – Amostras embutidas da Liga SAE 323.....	80
Figura 32 - Micro-ohmímetro e Ponte Kelvin Digital.	82
Figura 33 – Amostras para Medidas de Resistividade.	83
Figura 34 – Amostras para o difusímetro QuadruFlash 1200.....	84
Figura 35 – Compósito SAE 323 com Grafeno – 100x.....	86
Figura 36 – Compósito SAE 323 com Grafeno – 200x.....	87
Figura 37 – Compósito SAE 323 com Grafeno – 400x.....	88
Figura 38 – Compósito SAE 323 com Grafeno – 800x.....	89
Figura 39 – Morfologia da amostra de Al-0,5%GNP 800x.....	91
Figura 40 – Morfologia da amostra de Al-1,0%GNP 800x.....	92
Figura 41 - Morfologia da amostra de Al-1,5%GNP 800x.....	92
Figura 42 - Morfologia da amostra de Al-2,0%GNP 800x.....	93
Figura 43 - Morfologia do alumínio de controle (Alumínio virgem) e regiões de análise química por EDS a uma ampliação de 500x	94
Figura 44 – Ampliação de 1200x – a) Morfologia do alumínio com 1,0% de grafeno e regiões de análise química por EDS, b) EDS em camadas da microestrutura da amostra processada.....	95
Figura 45 – Ampliação de 1200x - a) Morfologia do alumínio com 1,5% de grafeno e regiões de análise química por EDS, b) EDS em camadas da microestrutura da amostra processada.....	96
Figura 46 – Difratoograma de Raios X (DRX) Espaçado.	99
Figura 47 – Difratoograma de Raios X (DRX) com Ampliação.....	100
Figura 48 – Difratoograma de Raios X (DRX) com Ampliação Espaçado.....	101
Figura 49 – Apresentação gráfica das propriedades térmicas.....	102
Figura 50 – Difusividade térmica - Forno a indução vs forno resistivo.	104

Figura 51 – Densidade das amostras.	105
Figura 52 – Resistividade das amostras.....	107
Figura 53 – Condutividade Elétrica.	108
Figura 54 – Influência da adição de grafeno na microdureza Vickers HV de 0,05 kgf das fases do compósito Al-Si.	110
Figura 55 – Regiões dos ensaios de Microdureza Vickers - HV com carga de 0,05 kgf.	111
Figura 56 – Revestimento do Cadinho com Concreto Refratário.	132
Figura 57 – Alternativas para Inserção do Grafeno Durante a Fusão.	133
Figura 58 – Alternativas para Agitação Mecânica para Homogeneidade.	133
Figura 59 – Exemplos de alguns casos de Insucesso na Dispersão do GNP.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas do alumínio, cobre e aço.....	26
Tabela 2: Proporção alumínio em relação ao Cobre.	26
Tabela 3 - Nomenclatura e aplicações das ligas de Al para fundições.....	28
Tabela 4 - Nomenclatura e aplicações das ligas de Al trabalháveis.....	30
Tabela 5 - Faixas de resistência à tração de algumas ligas de alumínio forjadas.....	31
Tabela 6 - Composição química da liga de alumínio SAE 323.....	33
Tabela 7 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio SAE 323.....	33
Tabela 8 - Resumo das propriedades do Grafeno.	44
Tabela 9 - Reforço utilizados em compósitos de matriz metálica.....	52
Tabela 10 - Propriedades dos reforços utilizados em matrizes metálicas.....	52
Tabela 11 - Comparativo entre as propriedades do alumínio e as do grafeno.	56
Tabela 12 – Propriedades físico-químicas do Grafeno Phoster HP10 Powder.	70
Tabela 13 – Composição Química da liga de Alumínio SAE 323, dados do fabricante e referência normativa SAE 323.....	71
Tabela 14 – Balanço de massa utilizado na produção dos lingotes.	75
Tabela 15 – Concentração de principais elementos químicos encontrados nas amostras processadas com 0,0%, 1,0% e 1,5% de grafeno.	97
Tabela 16 – Composição Química da liga de Alumínio SAE 323, dados do fabricante e referência normativa SAE 323.....	98
Tabela 17 – Resultado da análise de EDX do teor de carbono em regiões específicas para as 4 concentrações.	99
Tabela 18 – Difusividade térmica e condutividade térmica.....	102
Tabela 19 – Valores de resistividade elétrica do material.	106
Tabela 20 – Valores de resistividade de referência.....	109
Tabela 21 – Microdureza Vickers para a liga virgem e concentração 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% das amostras processadas.	109
Tabela 22 – Valores médios de microdureza para a liga virgem e concentração 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% das amostras processadas e referência SAE 323.	110
Tabela 23 – Apresentação sucintamente as propriedades dos nanocompósitos....	114

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio (Alumina)
Ar	Argônio
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
C	Carbono
Cu	Cobre
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CFC	Cúbica de face centrada
CPs	Corpos de Prova
Cu	Cobre
CVD	Deposição química de vapor
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
DRX	Difração de raios X (XRD – <i>X-ray Diffraction</i>)
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
Fe	Ferro
FRX	Fluorescência de Raios X (XRF – <i>X-ray Fluorescence</i>)
G	Grafeno
GNP	Nanoplaquetas de grafeno (<i>Graphene Nano Platelets</i>)
GO	Óxido de grafeno
HV	Dureza Vickers
IACS	Padrão Internacional de Cobre Recozido (<i>International Annealed Copper Standard</i>)
MEV	Microscopia eletrônica por varredura
MO	Microscopia ótica
N ₂	Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
R	Resistência elétrica
RBC	Rede Brasileira de Calibração
rGO	Óxido de grafeno reduzido
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
–OH	Hidroxila
C–O–C	Carbonila
–COOH	Ácido carboxílico

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

g	Gramas
GPa	Giga Pascal
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
I	Corrente
J	Joules
k	Condutividade térmica
kg	Quilograma
kgf/mm ²	Quilograma força por milímetro quadrado
m	metro
mm	milímetro
μm	Micrômetro
m ² /g	Metro quadrado por grama
N	Newton
nm	Nanômetro
T	Temperatura
t	Tempo
W	Watts
°C	Grau Celsius
°F	Grau Fahrenheit
%m/m	Porcentagem por peso
α	Difusividade térmica
φ	Fluxo de calor

SUMÁRIO

ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	12
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES	13
SUMÁRIO.....	14
1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo geral.....	23
2.2 Objetivos específicos	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 Alumínio e suas ligas	25
3.1.1 Liga SAE J425 323	32
3.2 Grafeno, Óxido de Grafeno e Óxido de Grafeno Reduzido	33
3.2.1 Contexto Histórico do Grafeno.....	33
3.2.2 Propriedades Físico-químicas.....	35
3.2.3 Métodos de Síntese do Grafeno	40
3.3 Materiais Compósitos	45
3.3.1 Fase Matriz	48
3.3.2 Fase Dispersa.....	49
3.4 Nanocompósitos	49
3.4.1 Nanocompósitos reforçados por dispersão.....	50
3.4.2 Nanocompósitos com matriz metálica	50
3.4.3 Nanocompósitos com matriz metálica com reforço de Grafeno.....	55
3.4.4 Nanocompósitos com matriz metálica de Alumínio com reforço de Grafeno.....	55
3.5 Fundição	56
3.5.1 Fundição por gravidade em molde de areia.....	57
3.5.2 Fundição por gravidade em coquilha	58
3.5.3 Fundição em forno a indução eletromagnética	59
3.5.4 Fundição em atmosfera inerte	60
3.5.5 Agitação eletromagnética provocada por correntes de Foucault induzidas no material.....	60
3.5.6 Rotação mecânica	61
3.6 Ensaios Físico-químicos e mecânicos	61
3.6.1 Metalografia	61

3.6.2 Microscopia eletrônica por varredura (MEV).....	62
3.6.3 Espectroscopia por energia dispersiva (EDS).....	62
3.6.4 Ensaio de dureza de ligas metálicas.....	63
3.6.4.1 Microdureza Vickers (HV)	63
3.6.5 Resistência e Resistividade Elétrica	64
3.6.5.1 Ponte Wheatstone e Ponte Kelvin (Ohmímetro)	65
3.6.6 Difusividade térmica.....	67
3.6.6.1 Método quadrupolo térmico	67
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
4.1 Materiais e Equipamentos	69
4.1.1 Grafeno.....	69
4.1.2 Alumínio SAE 323.....	71
4.1.3 Forno à indução eletromagnética com atmosfera inerte	72
4.1.3.1 Cadinhos e suporte de sustentação (acessórios)	73
4.2 Procedimento experimental	74
4.3 Técnicas de Caracterização	79
4.3.1 Metalografia	79
4.3.2 Microscopia óptica (MO)	80
4.3.3 Microscopia eletrônica por Varredura (MEV) e Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X (EDS).....	80
4.3.4 Difração de Raios X (DRX)	80
4.3.5 Microdureza Vickers	81
4.3.6 Resistência elétrica.....	81
4.3.7 Difusividade térmica.....	83
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1 Metalografia	85
5.1.1 Microscopia ótica	85
5.1.1 Microscopia eletrônica por varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X com energia dispersiva (EDS)	93
5.2 Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX).....	98
5.3 Difração de Raio X (DRX).....	99
5.4 Difusividade Térmica	101
5.5 Resistividade Elétrica.....	105
5.6 Microdureza Vickers	109
5.7 Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE)	114
6 CONCLUSÃO.....	119
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122

7 REFERÊNCIAS	123
Apêndice 1 – Tentativas de dispersão homogênea do grafeno na matriz de Al.....	132
Apêndice 2 – Data Sheet Alumínio SAE 323 - Capixaba	135
Anexo I – Data Sheet HP10 Powder HEXOGRAFENO 2025.....	136

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o impacto ambiental dos combustíveis fósseis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e sustentáveis. A busca por materiais condutores elétricos eficientes e econômicos tem sido um tema relevante na área de engenharia materiais. Nesse contexto, a indústria automotiva vem passando por grande transformação nas últimas décadas, com a crescente demanda por veículos mais sustentáveis e eficientes em termos de energia. Os carros elétricos ou híbridos vêm ganhando destaque como uma alternativa mais eficiente e menos poluente aos veículos movidos a combustíveis fósseis (ZIEGLE, 2022).

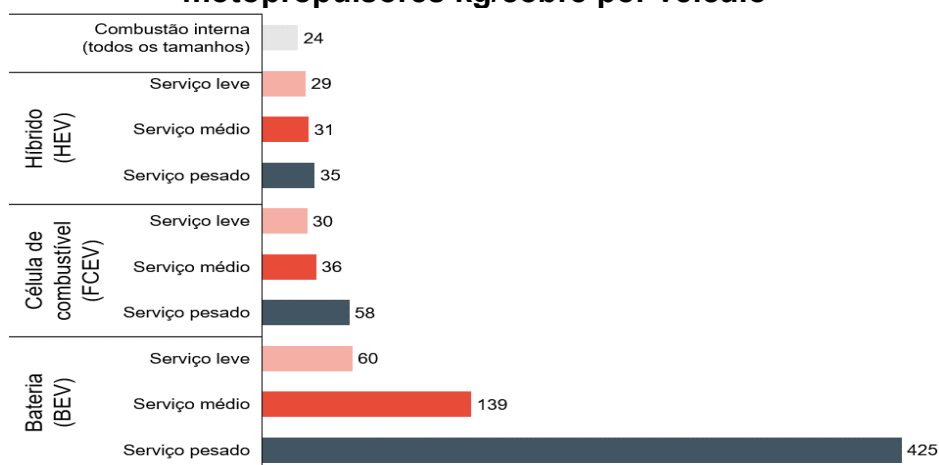
O aumento das pesquisas e investimentos nessa área tem levado a uma crescente demanda por materiais essenciais na fabricação de componentes de carros elétricos, como baterias e motores, bem como dos cabos e fios elétricos necessários para o sistema de armazenamento e transmissão de energia (STAFF, 2022). Como consequência direta deste crescimento, a demanda por materiais condutores elétricos de alumínio puro mais eficientes possuindo uma condutividade elétrica de 62% da IACS (*International Annealed Copper Standard*), o que significa conduzir a mesma quantidade de corrente do que um condutor de cobre, sendo que o cobre e suas ligas são cerca de duas vezes mais densos e de maior custo. Além disso, a matéria-prima para obtenção do alumínio é abundante na natureza, tendo o alumínio e suas ligas baixa densidade e alta resistência à corrosão, tornando-os talvez uma primeira escolha para diversas aplicações elétricas.

Dentre os materiais para aplicações elétricas na indústria automotiva e aeroespacial hoje, destacam-se o cobre e o alumínio, dois excelentes condutores que vem impactando a economia global na rápida eletrificação desses setores. Os preços elevados permitirão às empresas utilizem novas tecnologias para aumentar a vida útil dos seus projetos e extrair mais cobre de recursos minerários de qualidade inferior. À medida que a reciclagem ganhar eficácia, as suas necessidades do cobre devido a um déficit iminente do metal vermelho, provavelmente se tornará mais comum a utilização do alumínio, além de várias estratégias como aumento da eficiência energética dos condutores, reduzindo desperdícios e impactos ambientais, para satisfazer a demanda forçada também pela indústria 4.0 (MOORS, 2022).

Nos últimos anos, alguns usuários finais de cobre vêm substituindo o metal por alumínio ou reduzem a quantidade de cobre necessária (MOORS, 2022). Segundo

Daniel da S&P Global (2022) “o preço é sem dúvida um poderoso motivador. Portanto, será dada ênfase à inovação, substituição, reciclagem e utilização mais eficaz do cobre”. Mas tudo isso requer esforço tecnológico e tempo, para alterar as bases energéticas de uma economia global de 88 trilhões de dólares até 2050 (MOORS, 2022). A Figura 1 apresenta o consumo de cobre por veículos (base ano de 2022) para os principais grupos motopropulsores.

Figura 1: Quantidade atual de cobre por veículo para os principais grupos motopropulsores kg/cobre por veículo



Em 1º de julho de 2022. BEV = Veículo elétrico a bateria; FCEV = veículo elétrico com célula de combustível; HEV = Veículos elétricos híbridos. Dados e gráfico modificados do relatório "O Futuro do Cobre".

Fonte: S&P Global Market Intelligence; S&P Global Mobility Group.

A pesquisa e o desenvolvimento desses materiais condutores têm ganhado cada vez mais destaque, com um aumento significativo no número de patentes e publicações científicas relacionadas a este tema. Nessa conjuntura, é fundamental compreender o papel desses materiais e o desafio de atender à crescente demanda por eles. O alumínio pode ser um substituto ecológico e economicamente aceitável para diversos usos do cobre. A condutividade do alumínio é apenas 60% da do cobre, exigindo fios mais grossos para transportar a mesma quantidade de energia e, ocasionalmente, mais isolamento devido à menor condutividade térmica do alumínio. No entanto, pode substituir o cobre em algumas aplicações, incluindo linhas aéreas de energia em que o peso é um fator importante (ZIEGLE, 2022).

A partir de 2020 o alumínio começa a competir fortemente na participação de mercado com o cobre (vide Figura 2). O ponto de inflexão das commodities ocorreu quando o preço do cobre atingiu cerca de três e meia vezes o do alumínio. Segundo S&P Global em setembro de 2022 este patamar foi atingido, enquanto o preço do

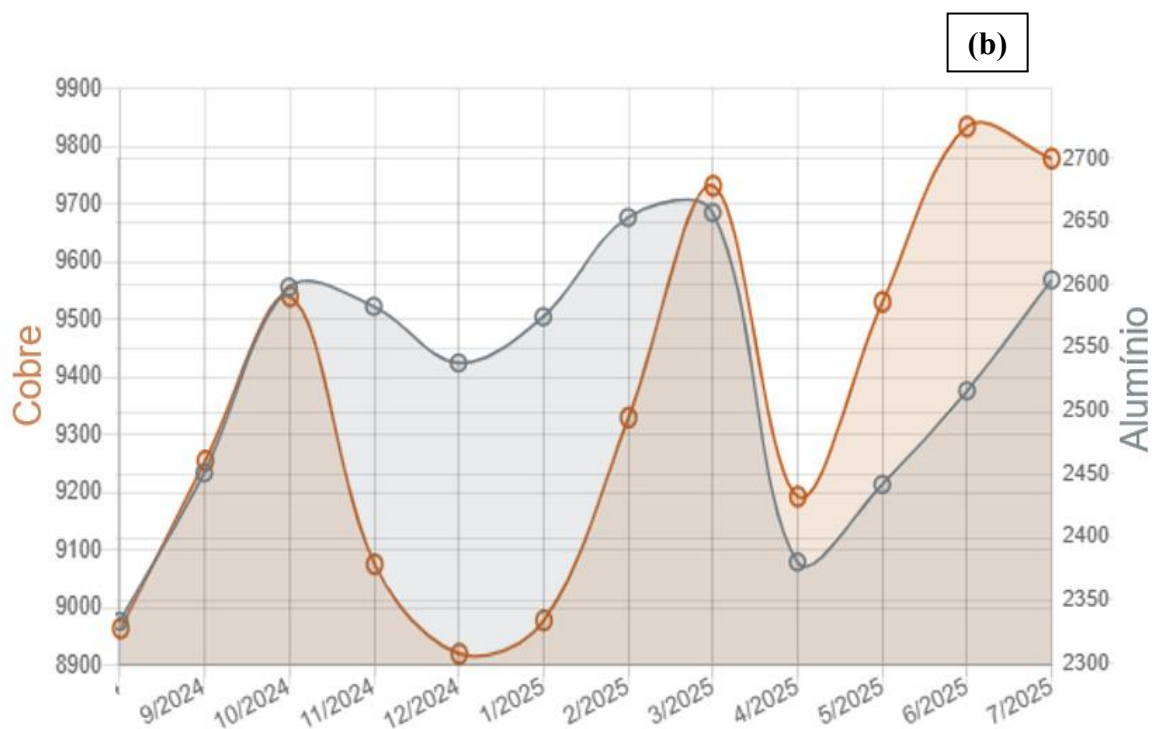
alumínio era de US\$ 2.254,00/tonelada, o preço do cobre superava os US\$ 7.751,00/tonelada, ou cerca de 3,4 vezes mais alto. Os preços médios comparativos apresentados no gráfico, referente aos últimos 12 meses, agosto de 2021 a agosto de 2022, foram para o cobre (US\$ 9.500,00/tonelada) e o alumínio (US\$ 2.500,00/tonelada), vem apresentando uma relação de aproximadamente de 4 vezes ao preço internacional desses metais (MOORS, 2022).

Figura 2: a) Preço do Cobre e Alumínio entre 2019 a 2022 b) Evolução mensal do preço nos últimos 12 meses (\$/tonelada).



Em 31 de agosto de 2022. Dados da Bolsa de Metais de Londres (LME – London Metal Exchange).

Fonte: S&P Global Market Intelligence.



Fonte: <https://shockmetais.com.br/lme>

Dentre os materiais comumente utilizados para condução de energia elétrica, o alumínio (Al) e suas ligas, são materiais amplamente utilizados devido à sua alta condutividade elétrica, baixo custo em relação ao cobre como visto acima e abundância no mercado. Ele é considerado hoje o material de primeira opção para seleção e aplicação nas linhas de transmissão elétrica, subterrâneas e aéreas, também em rede distribuição, em cabos para-raios que protegem os sistemas, armaduras de motores elétricos, trocadores de calor e motores/cambio de veículos de combustão (ABAL^A, 2024). Diversas empresas estão buscando apresentar seus produtos em todas as fases da cadeia de valor do setor elétrico também com foco para atendimento à parques de geração de energia renovável em direção ao futuro sustentável de energia (ALUAUTO, 2019).

O Brasil produziu aproximadamente 1,022 milhões de toneladas de alumínio em 2023, com a indústria brasileira do alumínio gerando cerca de 27 bilhões de reais e contribuindo com 5,6% do PIB industrial do país. A produção brasileira de alumínio primário aumentou 24% em 2023, o Brasil passou de décimo segundo produtor de alumínio primário (2022) e se tornou o oitavo maior produtor de alumínio primário do mundo. Além disso, a indústria extrativa brasileira de bauxita é quarta produtora mundial, atrás da Austrália, Guiné e China e a terceira em produção de Alumina, atrás da China e Austrália, e apresentando no ano de 2021, 2545 postos de trabalho diretos e/ou indiretos gerando um faturamento de R\$ 29,8 bilhões. O valor total das exportações de produtos do alumínio no Brasil cresceu 16,7% em relação ao ano 2022 (USD FOB 4,47 bilhões em 2021) totalizando USD FOB 5,21 bilhões em 2022, concentrado em grande parte na Indústria de transformação mineral (96,8%), com tendência maior de crescimento do alumínio semiacabado, tendo um forte compromisso com a sustentabilidade, utilizando fontes de energia limpa e com menor emissão de CO₂ (ABAL^B, 2024). Em comparação com o cobre que o Brasil ocupa a décima posição no ranking mundial com produção de 554 mil toneladas em 2021, com representatividade na receita mineral brasileira de 5,2% e bauxita 1,5%, os demais são ferro com 73,7%, ouro 8,0% isso de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME).

O alumínio também apresenta outro potencial emergente devido suas características mecânicas, que de acordo com estudo encomendado pela *The*

Aluminum Association (AA) e realizado pela consultoria Scenaria, a Aluauto afirmou em artigo que as ligas e compostos de alumínio seriam os melhores materiais para a indústria automotiva por ser um material de menor densidade e alta resistência poderia gerar economias significativas de combustível (ALUAUTO, 2019). E se tratando de indústria elétrica, o transporte de energia elétrica por todo o país pelas concessionárias são por meio de fios e cabos de alumínio, e por sua vez uma razoável condutividade elétrica e resistência mecânica com diferenças na densidade do alumínio e do cobre de cerca de 3,29 vezes ($2,7\text{g/cm}^3$ e $8,9\text{g/cm}^3$, respectivamente). Essas diferenças resultam em maior capacidade de transferência de energia, resistência a altas temperaturas sem perda de propriedades físicas e economia significativa de custos na montagem, processamento e manutenção do sistema (ABAL^C, 2024).

Portanto, a fundição de alumínio com reforço de grafeno em atmosfera inerte oferece uma série de vantagens, incluindo a redução da oxidação, melhor dispersão do grafeno, melhor controle da composição química, redução de defeitos e melhor controle da temperatura, resultando em peças fundidas de maior qualidade e desempenho. Nos últimos anos o grafeno surgiu como um material promissor na fabricação de materiais compósitos. O grafeno é um alótropo de carbono e um nanomaterial que consiste em camadas de átomos de carbono dispostos em uma estrutura hexagonal com ligações Sp^2 . Esta propriedade estrutural confere a este material propriedades únicas, como alta condutividade térmica e elétrica, boa resistência mecânica, flexibilidade, grande área superficial e transparência, dentre outras. Estas propriedades encorajaram uma extensa investigação sobre este material e o estabelecimento de centros de pesquisa dedicados para melhor compreender este material e as suas potenciais aplicações. De acordo com pesquisas de mercado, o mercado global de grafeno deverá valer 2,1 bilhões de dólares até 2025, com uma taxa média de crescimento de cerca de 46,3%, esperando-se que até lá seja ultrapassado um dos principais desafios relacionados com este material, relacionado com a redução dos custos de produção e o aumento da produção em série. (GRAPHEFENE, BBC e T. REISS, 2019). Extensas pesquisas sobre compósitos de alumínio nas últimas décadas levaram a melhorias no desempenho elétrico com a adição de grafeno (COURA, 2021). O grafeno (G) e seu derivado (óxido de grafeno (GO)) são conhecidos por suas propriedades excepcionais, como alta condutividade

elétrica e mecânica. Nesse sentido, a combinação de alumínio e grafeno tem sido uma área de interesse crescente na pesquisa de materiais compósitos condutores elétricos. Dado que estas são as variáveis mais importantes, a concentração do material de base, a percentagem de G ou GO, bem como o método de processamento e fabrico, têm todos um impacto significativo nesta propriedade. De acordo com a literatura, a adição de grafeno ou óxido de grafeno a materiais com matrizes de alumínio produzidos por meio de diferentes processos de fabricação, como metalurgia do pó, extrusão a quente e fundição, pode melhorar as propriedades mecânicas, a resistência à tração, compressão, flexão e aumento da condutividade elétrica e térmica, bem como o potencial para aumentar a dureza do revestimento (COURA, 2021).

Neste contexto, esta dissertação de mestrado aborda a produção e caracterização de compósito de matriz de alumínio, reforçados com nanomateriais à base de grafeno visando a melhoria das propriedades mecânicas, térmicas e elétrica do material. Estudos tem se desenvolvidos utilizando estes procedimentos e percentuais de mistura, entretanto a rota aqui apresentada utilizou a fundição com atmosfera inerte em forno de indução eletromagnética, a fim de adquirir uma melhor dispersão do grafeno propiciada por meio das correntes parasitas do forno de indução. A matéria prima de alumínio e o grafeno foram caracterizados e posteriormente, fundidos, tratados termicamente. Foram caracterizados os compósitos produzidos na fundição em diferentes composições de grafeno, quanto a presença desses nanomateriais à base de grafeno, quanto as propriedades elétricas e térmicas do compósito.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo serão apresentados o objetivo geral e objetivos específicos proposto nesta dissertação, que têm como propósito atender às metas de otimizar o processamento dos nanocompósitos com adição de nanoplacas de grafeno de poucas camadas (GNP), em atmosfera inerte por meio de um forno a indução eletromagnética, além disso, pretende-se realizar caracterização dos materiais obtidos e compará-los com as propriedades do alumínio fundido (SAE J425 323).

2.1 Objetivo geral

Produzir nanocompósitos de matriz da liga de alumínio SAE J425 323 com reforço de grafeno (GNP) por meio do método de fundição em forno de indução eletromagnética com atmosfera inerte protetora, com o objetivo de investigar e avaliar as propriedades físico-químicas e mecânicas do materiais obtidos, para aproveitamento como materiais de engenharia nos setores elétrico, automotivo e aeroespacial, em aplicações que exigem materiais de alta resistência mecânica, boa condutividade elétrica e térmica, baixo peso específico e viabilidade econômica.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar rotas de processamento buscando formas de otimizar os parâmetros de obtenção dos nanocompósitos a partir da liga comercial de Al (SAE J425 323) reforçada com nanoplacas de grafeno (GNP), num forno a indução eletromagnética com atmosfera inerte de argônio (Ar). As amostras foram processadas de forma a favorecer uma maior dispersão das nanoplacas de grafeno (GNP) por meio de mistura mecânica, sem provocar a pirólise do carbono ou a oxidação do alumínio, ainda na fase líquida, antes da solidificação da matriz dos nanocompósitos.
- Caracterizar as amostras a partir dos parâmetros otimizados de processamento para os nanocompósitos de matriz metálica (liga de Al SAE J425 323) com reforço de grafenos (GNP), variando a concentração de GNP na matriz entre 0,5 e 2,0% m/m (0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%). O processamento de fusão (liga Al 323 fundida) se deu no forno de indução

eletromagnética com atmosfera inerte de argônio (Ar), mantendo-se um platô de temperatura em torno de 800°C por de 3 min, sendo adicionado o GNP ao banho para haja mistura/homogeneização nos últimos 10 min sob agitação mecânica, antes de serem vertidas nas lingoteiras e resfriadas ao forno. As amostras produzidas, cada um com réplicas em triplicatas, para estudo da dispersão dos nanoreforços (GNP) e demais propriedades.

- Avaliar a influência do processamento sobre a microestrutura dos nanocompósitos, por meio da análise das matrizes de alumínio reforçadas com GNP, utilizando técnicas caracterizações físico-químicas e estrutural.
- Avaliar as propriedades mecânicas dos nanocompósitos de Al/GNP produzidos em função do aumento da concentração de reforço na matriz por meio de ensaios de microdureza Vickers (HV).
- Realizar comparações das propriedades térmicas e elétricas dos nanocompósitos de liga Al/GNP por meio de ensaios de medição da resistência elétrica micro ohmímetro com Ponte Kelvin, e medição da difusibilidade térmica por meio do método do quadrupolo térmico.
- Desenvolver um estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE) ao final do trabalho levantando as vantagens e/ou desvantagens de utilização dos nanocompósitos de Al/GNP desenvolvidos para o setor industrial (elétrico, automotivo e aeroespacial).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A possibilidade de realizar a fundição de compósito de matriz metálica de alumínio com reforço de Grafeno ou Óxido de Grafeno em atmosfera inerte oferece várias vantagens, incluindo: 1 - **Redução da oxidação:** A atmosfera inerte, como nitrogênio ou argônio, cria um ambiente livre de oxigênio, o que minimiza a oxidação do alumínio e do grafeno durante o processo de fusão. Isso resulta em peças fundidas com menos porosidade e melhor qualidade superficial, como também é crucial para preservar as propriedades do grafeno. 2 – **Melhor dispersão do grafeno:** A falta de oxigênio reduz a formação de aglomerados de grafeno e facilita sua incorporação homogênea na liga de alumínio. 3 - **Melhor controle da composição química:** A presença de oxigênio pode causar alterações na composição química do alumínio durante a fundição. Com uma atmosfera inerte, é possível manter a composição química desejada, garantindo a consistência e a qualidade das peças fundidas. 4 - **Redução de defeitos:** A atmosfera inerte ajuda a reduzir a formação de inclusões de gás e impurezas, o que pode levar a defeitos nas peças fundidas. Isso resulta em produtos de maior qualidade e desempenho. 5 - **Melhor controle da temperatura:** A atmosfera inerte pode ajudar a manter uma temperatura mais estável durante o processo de fundição, o que é crucial para garantir a integridade das peças e a precisão dimensional, como também é importante para garantir a distribuição uniforme do grafeno na matriz.

3.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio é considerado o terceiro elemento mais abundante na crosta da terra, atrás apenas do oxigênio e do silício. A sua descoberta ocorre em 1808 quando o químico britânico Sir H. Davy por meio de eletrólise conseguiu isolá-lo da alumina (Al_2O_3) (DAVY, 1812 e KVANDE, 2008). Contudo somente em 1825 foi processado pelo físico dinamarquês H.C. Ørsted que o isolou como metal puro, isto foi obtido por meio da reação de amálgama de potássio com cloreto de alumínio anidro, AlCl_3 (KVANDE, 2008). O processamento em escala industrial ocorre apenas 1886 (KVANDE, 2008), por meio de um processo eletrolítico reduzindo a alumina em alumínio, realizados por C.M. Hall (USA) e por P.L.T. Héroult (França), por isto o processo foi batizado de Hall-Héroult. Ele é utilizado ainda hoje em escala industrial

junto com o processo Bayer, processo de transformação da bauxita em alumina (Al_2O_3), desenvolvido por K.J. Bayer, químico austríaco em 1888 (HABASHI, 1995).

O alumínio é atualmente considerado um material estratégico, amplamente utilizado em diversas aplicações industriais e com grande potencial em outras áreas emergentes. Sua presença é comum nos setores alimentício, automotivo, aeroespacial, da construção civil e elétrico. Esse amplo espectro de aplicações se deve às suas excelentes propriedades físico-químicas, que, quando combinadas, conferem ao alumínio um caráter multifuncional e altamente versátil. A Tabela 1 apresenta um resumo de algumas propriedades físicas do alumínio comparado com o aço e do cobre, metais que são também muito importantes e de grande relevância para o estudo deste trabalho (ABAL^C, 2024). A Tabela 2 apresenta a proporção do alumínio em relação ao cobre.

Tabela 1 - Propriedades físicas do alumínio, cobre e aço.

Propriedades Físicas	Unid.	Alumínio	Cobre	Aço
Densidade	g/cm^3	2,7	8,96	7,86
Temperatura de fusão	$^{\circ}\text{C}$	660	1083	1500
Módulo de Young	GPa	70	110	205
Coefficiente de dilatação térmica	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	23.10^{-6}	$16,5.10^{-6}$	$11,7.10^{-6}$
Condutividade térmica a 25°C	$\text{Cal/cm}/^{\circ}\text{C}$	0,53	0,94	0,12
Condutividade elétrica	% IACS	61	100	14,5

Fonte: ABAL, 2007, adaptado.

Tabela 2: Proporção alumínio em relação ao Cobre.

Propriedades Físicas	Unid.	Alumínio	Cobre	Proporção AL em relação CU
Densidade	g/cm^3	↓	↑	Densidade de Al é 30% de Cu
Temperatura de fusão	$^{\circ}\text{C}$	↓	↑	Temperatura de Al é 61% de Cu
Módulo de Young	GPa	↓	↑	Módulo de Al é 64% de Cu
Coefficiente de dilatação térmica	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	↑	↓	CDT do Al é 1,4x de Cu
Condutividade térmica a 25°C	$\text{Cal/cm}/^{\circ}\text{C}$	↓	↑	CT do Al é 56% de Cu
Condutividade elétrica	% IACS	↓	↑	CE do Al é 61% de Cu

Fonte: Elaboração próprio autor, 2024.

Observa-se na Tabela 2 acima o alumínio é apresentado por uma massa específica relativamente baixa de $2,7\text{g/cm}^3$ que equivale a 30% do cobre e a 1/3 do

aço, e com módulo de elasticidade de 70GPa sendo equivalente a 64% do cobre e 34% do aço. Essas características se aplicam também para as suas ligas e incluindo a resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, como também atmosfera ambiente (ABAL ^B, 2024, EAA, 2022).

A razão resistência mecânica-densidade das ligas de alumínio são excelente em comparação às do aço, apesar de terem propriedades de tração inferiores. Outras características/propriedades que agregam valor ao alumínio são (ABAL ^C, 2024):

- a) Boa resistência à oxidação e alta resistência à corrosão, devido à formação de uma camada passiva fina, contínua e estável de óxido de alumínio (Al_2O_3) em sua superfície em consequência à alta afinidade entre Al e O do ar, conferindo-lhe boa estabilidade química;
- b) Apresenta estrutura CFC (cúbica de face centrada), resultando em grande número de planos de escorregamento o que lhe confere elevada ductilidade, ou seja, facilidade de conformação, isso fica evidente nas finas folhas de papel-alumínio nas quais o material relativamente puro pode ser laminado, sua ductilidade é mantida mesmo em temperaturas muito baixas, implica que pode ser processado mecanicamente com facilidade;
- c) Antimagnetismo, comportamento não ferromagnético, interessante para aplicações eletroeletrônicas;
- d) Atóxico, ou seja, não é tóxico, permitindo que seja utilizado como utensílio doméstico e equipamentos da indústria alimentícia, além de embalagens de alimentos;
- e) Não apresenta transição frágil-dúctil em baixas temperaturas;
- f) Infinitamente reciclável sem perda de propriedades, gastando neste caso apenas cerca de 5% da energia necessária para produzi-lo a partir da alumina;
- g) Alumínio e suas ligas não apresentam o limite de fadiga como mostrado pelos aços de baixo carbono nas curvas S-N, ou seja, não possuem um valor definido de resistência à fadiga, de modo que trincas por fadiga podem ocorrer depois de algum tempo, mesmo sob condições de baixa tensão;
- h) Por fim, as ligas de alumínio têm baixa dureza, resultando em baixa resistência ao desgaste por mecanismos tribológicos.

Apesar dessas vantajosas características do alumínio, esse quando puro possui baixa resistência mecânica. Com isso limitando-se a sua utilização. À vista disso, com o objetivo de melhorar o desempenho são utilizadas ligas de alumínio por meio de adição de elementos químicos na sua fabricação, que aferem propriedades à aplicação desejada. A resistência mecânica do alumínio pode ser aumentada por trabalho a frio e pela formação de ligas, entretanto, ambos os processos tendem a diminuir a resistência a corrosão. Os principais elementos de liga incluem cobre, magnésio, silício, manganês e zinco.

De acordo com a ABAL atualmente as ligas de alumínio se classificam em dois grupos principais dependendo do método de fabricação:

- a) Ligas para fundição;
- b) Ligas trabalháveis.

Essas por sua vez são regidas por um sistema de nomenclatura capaz de identificar o tipo de liga utilizado. As Tabela 3, Tabela 3 e Tabela 5 a seguir discriminam o sistema de nomenclatura, com o elemento principal da liga e suas principais aplicações.

Tabela 3 - Nomenclatura e aplicações das ligas de Al para fundições.

Série	Teor de Al ou Principal Elemento de Liga	Aplicações
1XX.X	Al puro (Mínimo 99% pureza)	Rotores, condutores elétricos e equipamentos industriais
2XX.X	Cobre (Al-Cu)	Pistões e cabeçotes para aviões, motores a diesel e de motocicletas
3XX.X	Silício + Cobre e/ou Magnésio (Al-Si-Cu e Al-Si-Mg)	Cabeçote de cilindros, corpo de válvulas, blocos de motores, dentre muitos outros
4XX.X	Silício (Al-Si)	Moldes para artefatos de borracha, utensílios domésticos, peças externas de motores
5XX.X	Magnésio (Al-Mg)	Peças submetidas a elevadas tensões na engenharia de aviação, marítima e de transporte
6XX.X	Não utilizada	-
7XX.X	Zinco (Al-Zn e Al-Zn-Mg)	Peças fundidas para conjuntos de brasagem
8XX.X	Estanho (Al-Sn)	Para ligas com baixo ponto de fusão

Fonte: ABAL, 2007, adaptada.

Para fundição usualmente as ligas de alumínio precisam de uma melhor fluidez e resistência a trincas de contração na etapa de solidificação, e o elemento que garante essas propriedades é apontado aos altos teores de silício (Si). Contudo esse elemento dificulta que as ligas sejam trabalháveis, isto é, não se sujeitam a variações dos processos de aquecimento e resfriamento. As propriedades são resultantes diretamente do produto da fundição, consistem em uma única fase, e um aumento na resistência é obtido por meio do endurecimento por solução sólida, posto que algumas ligas apresentem alteração nas propriedades mecânicas por meio de alguns casos de tratamento térmico, capazes de serem endurecidas por precipitação devido a adição de elementos de ligas. Em várias dessas ligas, o endurecimento por precipitação é devido à precipitação de dois elementos, diferentes do alumínio, que formam um composto intermetálico (ABAL ^A, 2024).

As ligas trabalháveis, deformadas plasticamente por meio de conformação mecânica, têm composição e microestrutura muito diferentes das ligas para fundição, refletindo as diferentes características exigidas pelo processo de fabricação. (ASKELAND e WRIGHT, 2014).

Tabela 4 - Nomenclatura e aplicações das ligas de Al trabalháveis.

Série	Teor de Al ou Principal Elemento de Liga	Aplicações
1XXX	Al puro (Mínimo 99% pureza)	Equipamentos para indústrias alimentícia, químicas, trocadores de calor, utensílios domésticos
2XXX	Cobre (Al-Cu)	Peças usinadas e forjadas, indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos
3XXX	Manganês (Al-Mn e Al-Mn-Mg)	Equipamentos rodoviários e veículos em geral, vagões ferroviários, carrocerias de ônibus e furgões, indústrias alimentícias, química, construção civil e elementos estruturais
4XXX	Silício (Al-Si)	Soldagem das ligas das séries 1XXX, 3XXX e 6XXX.
5XXX	Magnésio (Al-Mg)	Literalmente as mesmas aplicações da série 3XXX.
6XXX	Magnésio e Silício (Al-Mg-Si)	Literalmente as mesmas aplicações da série 3XXX
7XXX	Zinco (Al-Zn e Al-Zn-Mg)	Indústria aeronáutica, militar, máquinas e equipamentos, moldes para injeção de plásticos e estruturas
8XXX	Outras Ligas (Al-Fe, Al-Sn, Al-Li...)	Ligas modernas voltadas para produção de folhas de alumínio para aplicação em embalagens

Fonte: ABAL, 2007, adaptada.

Dentro da categoria das ligas trabalháveis, estas subdividem-se em duas classes:

- a) Ligas tratáveis termicamente (endurecíveis por precipitação): Séries 2XXX, 6XXX e 7XXX e algumas 8XXX;
- b) Ligas não tratáveis termicamente (endurecíveis por encruamento): Séries 1XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX e algumas 8XXX.

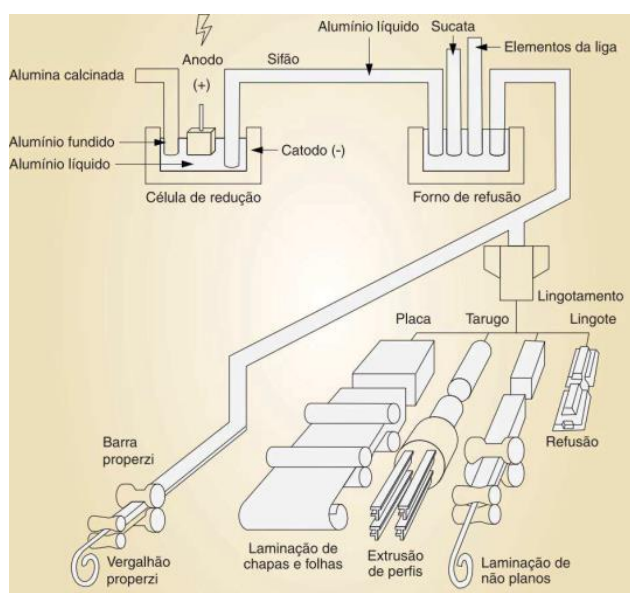
Na indústria do alumínio o tratamento térmico ou têmpera, especifica ao estado de propriedades mecânicas da liga de alumínio. Distintivamente da têmpera de aços, que especifica a um tratamento térmico para aumento de suas propriedades mecânicas. Assim sendo as ligas de alumínio obtêm propriedades mecânicas específicas por meio destes tratamentos termomecânicos. A tabela abaixo apresenta as faixas de resistências obtidas para algumas ligas forjadas (DAVIS, 2001).

Tabela 5 - Faixas de resistência à tração de algumas ligas de alumínio forjadas.

Série	Tipo de Liga	Método de Endurecimento	Faixa de Resistência à Tração (Mpa)
1XXX	Al	Encruamento	70 - 175
2XXX	Al-Cu-Mg (1-1,15% Cu)	Têmpera	170 - 310
2XXX	Al-Cu-Mg-Si (3 - 6% Cu)	Têmpera	380 - 520
3XXX	Al-Mn-Mg	Encruamento	140 - 280
4XXX	Al-Si	Encruamento	105 - 350
5XXX	Al-Mg (1 - 2,5% Mg)	Encruamento	140 - 280
5XXX	Al-Mg-Mn (3 - 6% Mg)	Encruamento	280 - 380
6XXX	Al-Mg-Si	Têmpera	150 - 380
7XXX	Al-Zn-Mg	Têmpera	380 - 520
7XXX	Al-Zn-Mg-Cu	Têmpera	520 - 620
8XXX	Al-Li-Cu-Mg	Têmpera	280 - 560

Fonte: DAVIS, 2001, adaptada.

O alumínio apresenta uma grande vantagem devido seus produtos semiacabados normalmente requeridos pela indústria serem adquiridos por todos os processos metalúrgicos regulares, a depender da conformação requerida. A Figura 3 apresenta um fluxograma esquemático de transformação do alumínio, além desses apresentados podem ser citados o forjamento, estampagem, trefilação e metalurgia do pó.

Figura 3 - Fluxograma esquemático das operações de transformação do alumínio.

Fonte: ABAL, 2007, adaptado.

Dentre os processos de produção industrial viáveis para o desenvolvimento de compósitos com matriz metálica de alumínio, tem-se o da fundição em atmosfera inerte. Esse é processo de fabricação no qual o alumínio é submetido a sua temperatura de fusão para derretimento e moldado em uma forma desejada e pode ser submetida a processos adicionais, como usinagem ou acabamento. As principais características e vantagens deste processo para o alumínio incluem: baixo ponto de fusão do alumínio, facilitando o processo de fundição. Boa capacidade de moldagem, permitindo a produção de peças complexas com detalhes precisos. Alta condutividade térmica e elétrica do alumínio, tornando-o adequado para aplicações em dissipação de calor e componentes elétricos. Resistência à corrosão do alumínio, proporcionando durabilidade às peças fundidas. Reciclabilidade do alumínio, permitindo um processo de fabricação mais sustentável.

3.1.1 Liga SAE J425 323

A liga SAE J425 323 é semelhante as ligas UNS A03560 e a ANSI A356.0. A liga é apropriada para fundição tanto em areia, em que a cavidade é moldada por um modelo ou placa de fundição, quanto para coquilha, em que possuímos a cavidade para envase do material derretido usinada normalmente em material metálico.

A liga é caracterizada por possuir uma boa resistência à corrosão, fluidez e estanqueidade, além de boa condutividade elétrica. A liga é extremamente comercial, isto quer dizer que é fácil de encontrar no mercado e está em constante aplicação e utilização em empresas de fundição e nas mais variadas peças de diferentes aplicações e é normalmente encontrada sob a forma de lingotes, em que posteriormente são fundidos dando início ao ciclo do processo de fundição, mas também pode ser encontrada na forma de pó.

Em sua composição química pode-se observar como elemento predominante além do alumínio, o silício entre 6,5% e 7,5%, também chamada de liga alumínio-silício. Na Tabela 6 apresenta a composição química dos elementos e as respectivas porcentagens de concentração nesta liga com base normativa.

Tabela 6 - Composição química da liga de alumínio SAE 323.

Elemento	Composição
Silício (Si) %	6,5 – 7,5
Ferro (Fe) %	0,6 máx.
Cobre (Cu) %	0,25 máx.
Manganês (Mn) %	0,35 máx.
Magnésio (Mg) %	0,20 - 0,45
Cromo (Cr) %	-
Níquel (Ni) %	-
Zinco (Zn) %	0,35 máx.
Estanho (Sn) %	-
Titânio (Ti) %	0,25 máx.
Outros (Individual) %	0,05 máx.
Outro (Total) %	0,15 máx.

Fonte: Norma SAE J452, 2003, adaptador.

Sua temperatura de vazamento ideal é entre 680°C e 740°C, e depois de fundidas as peças da liga SAE 323 podem ser tratadas termicamente, conseguindo assim um incremento das características mecânicas. O tratamento mais indicado é o T6 e após este procedimento, pode-se obter peças com as seguintes propriedades apresentadas pela Tabela 7 (SAE J452, 2003).

Tabela 7 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio SAE 323.

Propriedade mecânica	Unid.	Fundição em coquilha	Fundição em areia
Resistência à tração	MPa	145 - 230	130 – 215
Alongamento %	%	3,0	2,0 – 3,0
Dureza Brinell	kgf/mm ²	40 - 90	40 - 90

Fonte: Norma SAE J452, 2003, adaptado.

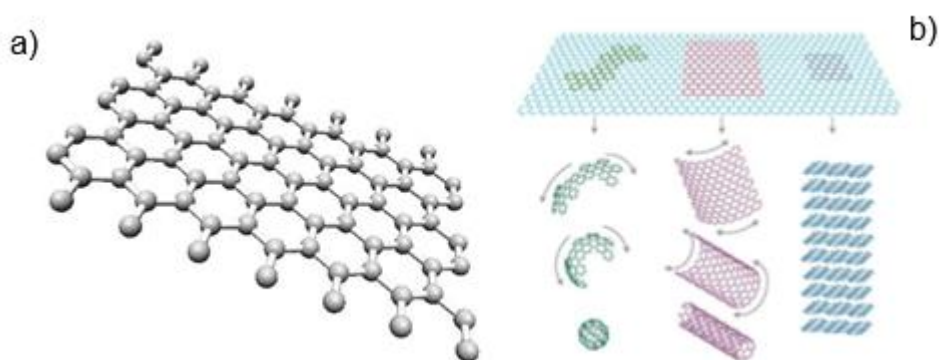
3.2 Grafeno, Óxido de Grafeno e Óxido de Grafeno Reduzido

3.2.1 Contexto Histórico do Grafeno

Desde a sua primeira citação feita por Lavoisier em “*Elémentaire Traité de Chimie*”, o carbono sempre mostrou sua enorme versatilidade, pois já era anteriormente descrito aplicações nas formas alotrópicas do diamante bem como na

forma de grafita. Porém foi já final do século XX que os materiais de carbono mostraram ao mundo suas formas mais interessantes, como os fulerenos, nanotubos, e por fim o grafeno, que pode ser considerado como unidade básica estrutural dessas formas alotrópicas. A grafita é formada pela superposição de camadas planas, com distâncias entre essas de 0,335nm as quais estão unidas por forças de Van der Waals (MOTA et al., 2003), e os átomos de carbono das camadas, ou seja, lâminas estão ligados entre si por forte ligação covalente. O grafeno por sua vez pode ser descrito como um arranjo bidimensional (2D) de uma única camada de átomos de carbono com hibridização sp^2 entre os átomos de carbono (GEIM e NOVOSELOV, 2007), e que é constituído de uma monocamada isolada de grafite, análogo à face de uma colmeia, apresentando espessura entre 0,4 e 1,7nm (NEMES et al., 2008 e SHEARER et al., 2016), conforme Figura 4, apresentando anéis hexagonais (GEIM e NOVOSELOV, 2007) e (HAKIMI et al., 2012). Contudo, embora descrito como monocamada, é considerado como grafeno estruturas que possuem até 10 camadas. Verificou-se que estruturas cristalinas com camadas <10 apresentavam pequenas variações em sua estrutura eletrônica, mas não a ponto de configurar grafite (GEIM e NOVOSELOV, 2007 e PARTOENS et al. 2006). Estruturas mais espessas deveriam ser consideradas filmes finos de grafite.

Figura 4 - Formas alotrópicas do grafeno.



(a) Representação esquemática de uma folha de grafeno mostrando os átomos de carbono arranjados em uma rede hexagonal (b) Grafeno é à base de todas as estruturas gráficas. Da esquerda para direita são mostradas as estruturas do fulereno, do nanotubo de carbono e do grafite.

Fonte: adaptado de CAMARGO et. al., 2017.

Foi pelos pesquisadores André Geim e Konstantin Novoselov da Universidade de Manchester na Inglaterra, que o grafeno caracterizado e sinterizado

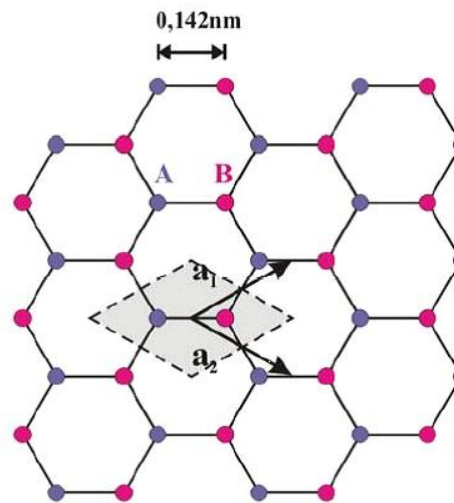
experimentalmente pela primeira vez no ano de 2004. Apesar de que já fosse estudado e conhecido teoricamente desde 1947 (WALLACE, 1947). O método que eles utilizaram para a obtenção do grafeno, foi por meio da técnica de clivagem micromecânica das folhas de grafite utilizando fita adesiva, e na sequência depositadas em um substrato de sílica, com isso obteve-se os filmes finos de grafeno, que apresentou propriedades elétricas excelentes e que garantiu a eles o prêmio Nobel de Física em 2010.

3.2.2 Propriedades Físico-químicas

As propriedades do grafeno são melhor compreendidas quando se observa a estrutura cristalina e distribuição eletrônica. Os seis elétrons do carbono estão distribuídos sob o arranjo $1s^2 2s^2 2p^2$, sendo o orbital s, uma esfera simétrica ao redor do núcleo atômico e o orbital p um alongamento vertical ao plano dos átomos. Como os elétrons do orbital $1s^2$ estão muito próximos do núcleo, eles não participam de ligações, já os elétrons dos orbitais $2s^2 2p^2$, por estarem mais afastados, podem ser compartilhados e realizar ligações com outros elementos. Quando átomos de carbono compartilham esses elétrons (4 elétrons), igualmente entre si, formam ligações sp^3 , apresentando uma estrutura tetraédrica (3D) podendo, por exemplo, formar diamantes. Quando esses elétrons são compartilhados com átomos de hidrogênio, por exemplo, são estabelecidas ligações sp^2 ou sp , apresentando estruturas 0D, 1D ou 2D, associadas aos fulerenos, nanotubos e ao grafeno, respectivamente.

O grafeno apresenta distância de ligação carbono-carbono de 0,142nm (Brant, 2011). Sua estrutura cristalina é uma rede de Bravais com dois átomos de carbono por células unitárias (Brant, 2011) Figura 5

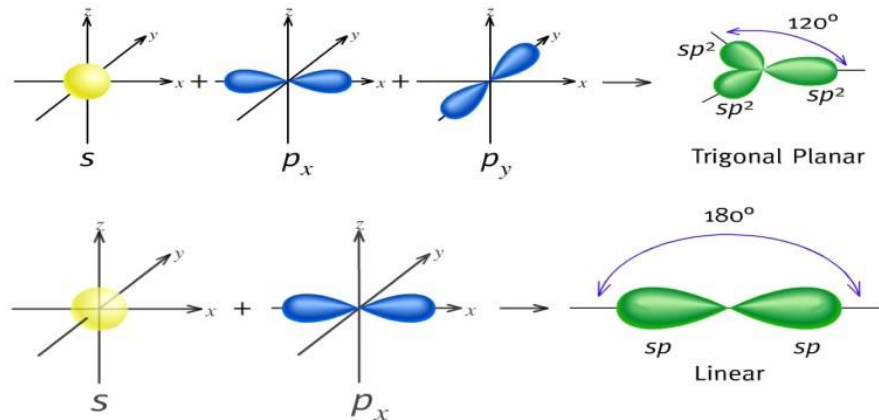
Figura 5 - Estrutura molecular bidimensional do grafeno com arranjos hexagonais de carbono.



Fonte: BRANT, 2011.

Conforme apresentado na Figura 6 os átomos de carbono no grafeno apresentam hibridização do tipo sp^2 co-planares (resultado da superposição dos orbitais 2s, 2px e 2py) que um átomo de carbono faz com três átomos vizinhos apresentam um ângulo de ligação de 120° (Trigonal Planar). Nesses orbitais os elétrons fazem ligações σ no plano da camada com os átomos de carbono vizinhos, proporcionando a esse material uma dureza nunca alcançada por nenhum outro material. Essa hibridização contribui para a estabilidade e força das ligações no grafeno, além de permitir a condução de eletricidade devido à presença de elétrons livres. Sendo o orbital não hibridizado 2pz responsável pelas propriedades elétricas e térmicas, está localizado perpendicularmente ao plano, em que realiza uma ligação π com orbital 2pz de outro átomo (BHUSHAN, 2016 e Yang, 2012).

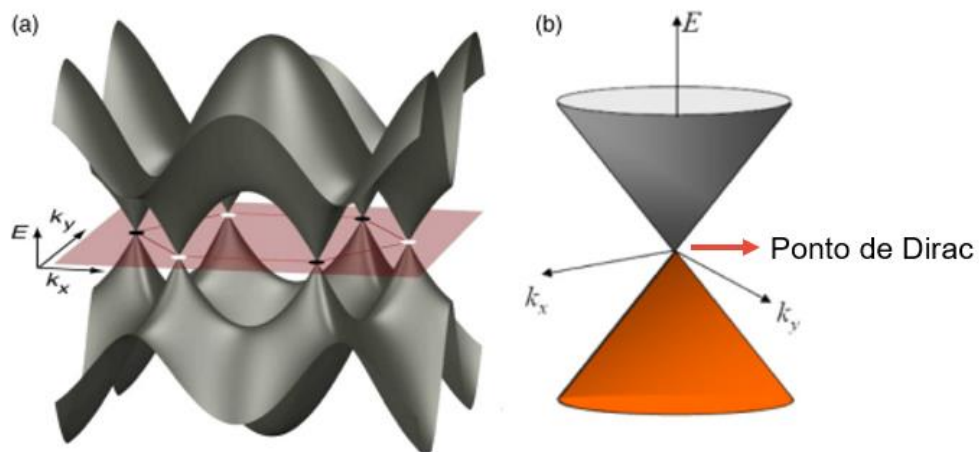
Figura 6 - Hibridização sp^2 formando ângulos de aproximadamente 120° .



Fonte: FONSECA, 2014.

Desta forma, os átomos promovem a formação de um orbital molecular com um ligante π e um antiligante π^* , caracterizando a presença de uma banda de valência e uma banda de condução respectivamente. São denominados pontos de Dirac, zona de *Brillouin* em que essas bandas se tocam, lugar onde os elétrons se comportam com férmions de Dirac ou elétrons “sem massa”, agindo como partículas relativísticas, capaz de atingir velocidades na ordem de 10^6 m/s (NOVOSELOV, GEIM, et al. 2005). A Figura 7 apresenta de forma completa e esquemática as bandas do grafeno na zona de Brillouin e o cone de Dirac (ANDREI, 2012).

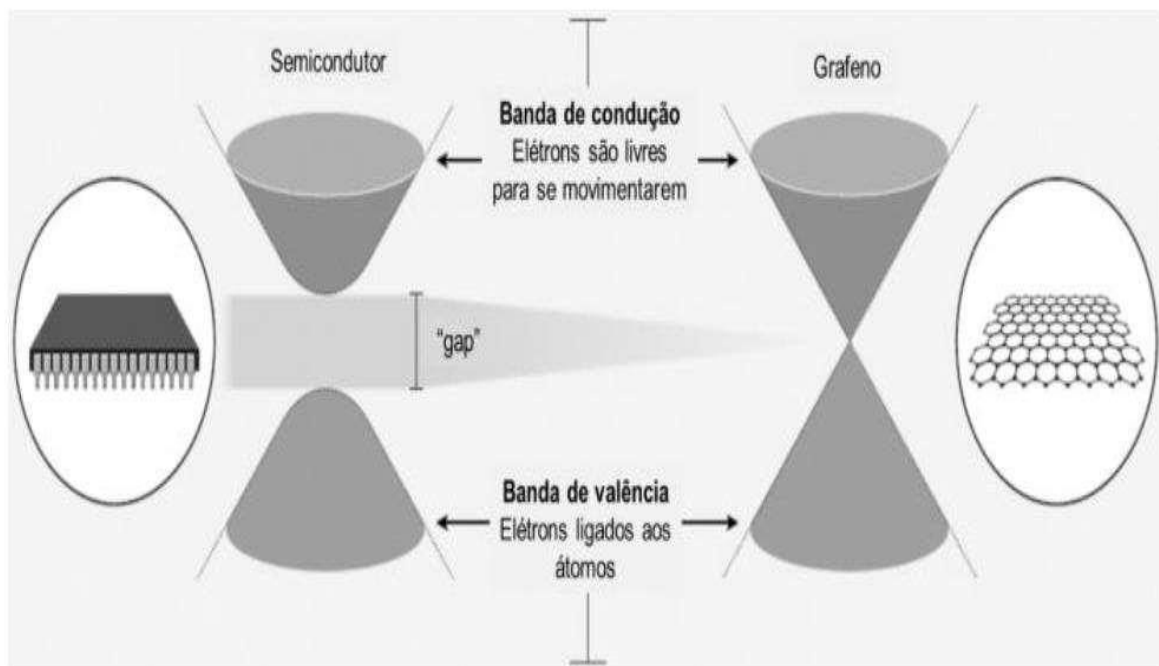
Figura 7 - Representação esquemática da zona de *Brillouin* e cone de *Dirac*.



Em (a) estrutura da banda de grafeno e (b) ampliação na dispersão de baixa energia em um dos pontos k , ponto de Dirac. Fonte: ANDREI et. al. 2012, adaptado.

Sendo assim, o grafeno se torna um extraordinário condutor elétrico comparado a outros materiais, devido o gap zero na condução de carga elétrica. Um comparativo entre o comportamento eletrônico do grafeno com o de semicondutores pode ser observado na Figura 8. Observa-se um gap de energia perceptível na condução elétrica do semicondutor (SEGUNDO J & O, 2016).

Figura 8 - Comparativo esquemático entre o comportamento eletrônico do grafeno como de semicondutor.



Fonte: Segundo J & O, 2016, adaptado.

As incessantes investigações a respeito do grafeno, foram devido a esses incríveis comportamentos atípico com relação ao efeito Hall quântico (JIANG, 2007).

Uma das principais características do grafeno são:

- a) condutividade elétrica na ordem de 10^8S/m (MARINHO, 2012);
- b) mobilidade de cargas elétricas entre 15.000 a $200.000 \text{cm}^2/\text{V.s}$ (BOLOTIM, 2008 e MAHMOUDI, 2018);
- c) área superficial específica aproximadamente $2.600 \text{m}^2/\text{g}$ (GHOSH, 2018 e LIU, 2010);

- d) condutividade térmica de aproximadamente 5.000 W/m.K (BALANDIN, 2011).

Com esses valores apresentado acima o grafeno se torna um futuro candidato à substituir o silício cristalino ou o antimoneto de Índio (InSb) em sistema microeletrônicos, visto que a mobilidade de carga desses últimos à temperatura ambiente é apresentada e algumas condutividades térmicas para comparação:

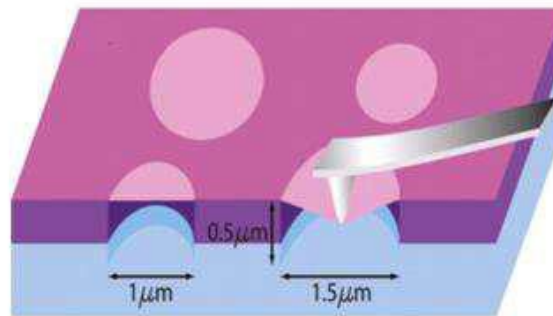
- a) silício $1.400\text{cm}^2/\text{V.s}$;
- b) antimoneto $77.000\text{cm}^2/\text{V.s}$;
- c) condutividade térmica cobre aproximadamente 400W/m.K;
- d) condutividade térmica prata aproximadamente 430W/m.K;
- e) condutividade térmica diamante aproximadamente 2.000 a 2.200W/m.K.

Devido às suas propriedades elétricas e à elevada área superficial específica, o grafeno tem sido objeto de intensas pesquisas científicas, englobando setores de soluções energéticas, como baterias (KIM, 2014), super capacitores (LIU, 2010 e SUR, 2012 e LI, 2013) e células a combustível (QU. et al, 2010). Se mostra promissor considerando o para adsorção e dessorção de gases como H_2 , CH_4 e CO_2 , tendo potencial de atuar com armazenador e separador de gases (SUR, 2012 e GADIPELLI, 2015). Há também outras potencialidades que não serão detalhadas aqui para o uso promissor do grafeno considerando propriedades eletrônicas e ópticas (NAIR, 2008 e CZERMIK, 2015, MAHMOUDI, 2018 e VLASOV, 2017 e AHN, 2014 e JO, 2012). *Drug delivery* (SHAREENA, 2018 e GURUNATHAN, 2016). Como também um potente agente antibacteriano quando combinado com nanopartículas de Ag (SHAREENA, 2018), ou funcionalizado (NANDA). E em engenharia e regeneração de tecidos de cartilagem, adiposo, neural e muscular esquelético (SHIN, 2016), como também biossensores (SU, 2010 e AFSABI, 2018).

Considerando as propriedades mecânicas o grafeno é classificado como o material mais fino, leve e resistente desde então. Isso é devido a suas ligações $\sigma(\text{sp}^2)$ entre os carbonos na rede hexagonal. Propriedades elásticas e tensão de ruptura de uma monocamada suspensa e isolada de grafeno, tem sido estudada e o primeiro

resultado obtido por meio de nanoindentação em um microscópio de força atômica (AFM) (LEE, 2008). A Figura 9 abaixo apresenta o esquemático do experimento.

Figura 9 - Nanoindentação sobre uma monocamada de grafeno.



Fonte: LEE, CHANGGU et. al., 2008.

O resultado obtido para a tensão de ruptura independia do tamanho da folha do grafeno e variava com o raio da ponteira. O comportamento elástico demonstrou não sofrer influência pela geometria da ponteira. Os valores obtidos no experimento foram:

- a) módulo de Young $E = 1,0 \pm 0,1 \text{ TPa}$ (5x maior que o do aço);
- b) limite de resistência $\sigma_{ULT} = 130 \pm 10 \text{ GPa}$ (>100x que o do aço).

Isso o torna um material de expressiva relevância como reforço em compósitos. E esses se concentram no desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica (RAFIEE et. al. 2009 e CHEN, 2012) e matriz metálica, sendo o último relacionado com o presente trabalho.

3.2.3 Métodos de Síntese do Grafeno

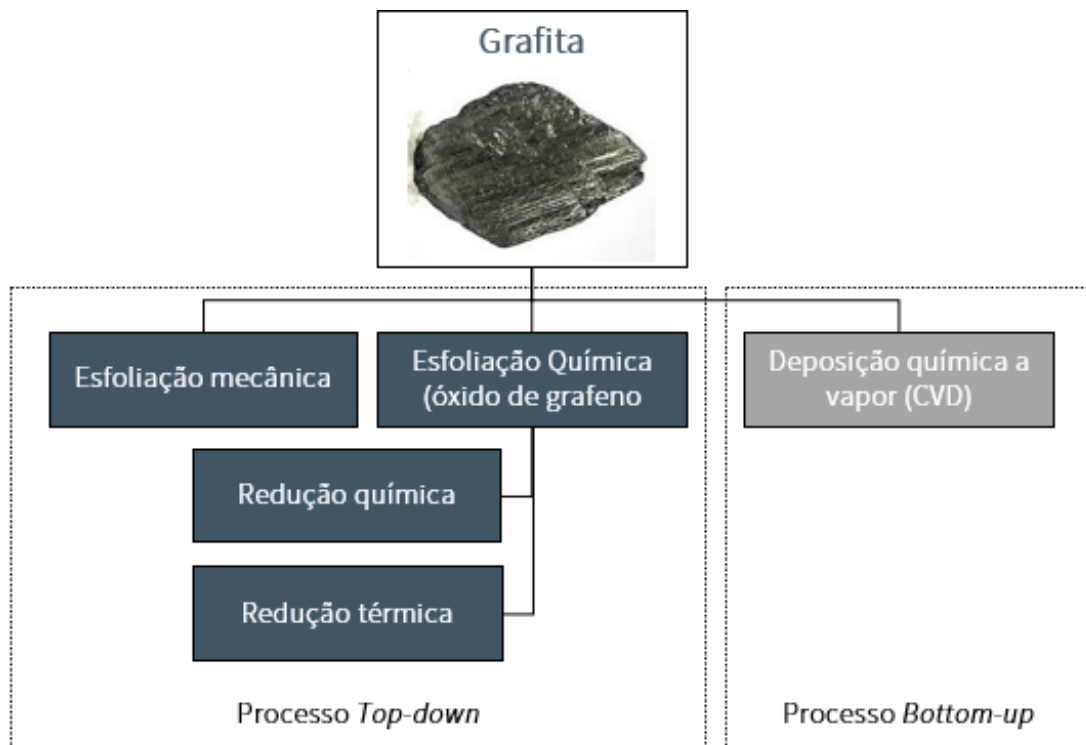
Os métodos de obtenção de grafeno apresentados na literatura são performados e classificados de duas formas (CORDEIRO, 2015 e EDWARDS, 2013):

- a) *bottom-up* (de baixo para cima): que se baseia na manipulação de átomos simples de carbono, como metano e etanol, por meio de processos de construção atômicamente precisos, por meio dos métodos de crescimento epitaxial e deposição química de vapor (CVD), por exemplo, SiC ou CH₄;

- b) *top-down* (de cima para baixo): que consiste na separação das camadas empilhadas da grafita, ou seja, bulk do grafite, produzindo folhas individuais ou grupo pequenos rompendo as forças van der Waals.

De uma forma geral esses dois processos apresentam seus diversos métodos de síntese do grafeno, conforme apresentado na Figura 10.

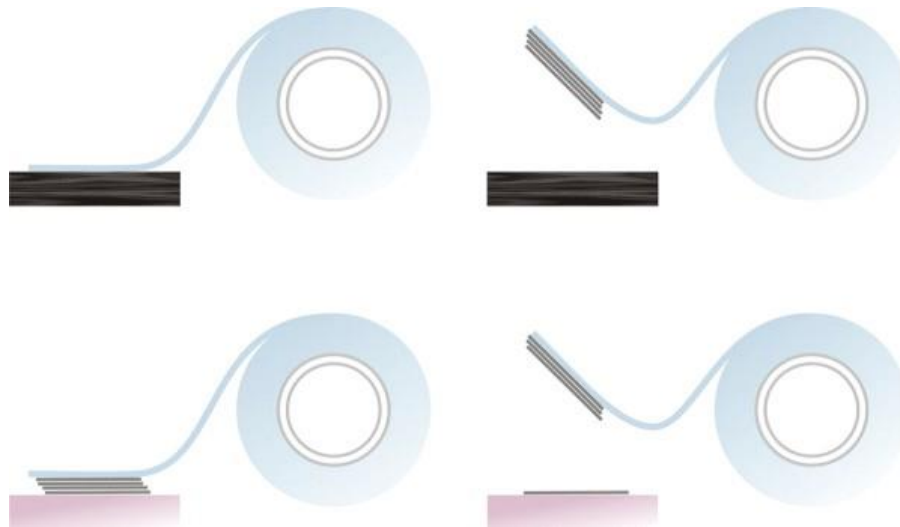
Figura 10 - Métodos de síntese do grafeno por processo *top-down* e *bottom-up*.



Fonte: Elaboração próprio autor, 2024.

Dentre os métodos que se destacam na sua obtenção encontram-se o método de peeling (esfoliação mecânica), que consiste em retirar a camada superior do grafite com uma fita adesiva e depois é pressionado sobre o substrato, Figura 11, se a aderência do grafeno com o substrato for maior que a entre as camadas haverá deposição deste no substrato (BRANT, 2011) e (NOVOSELOV et al., 2011).

Figura 11 - Clivagem micromecânica – Peeling- (Esfoliação mecânica).

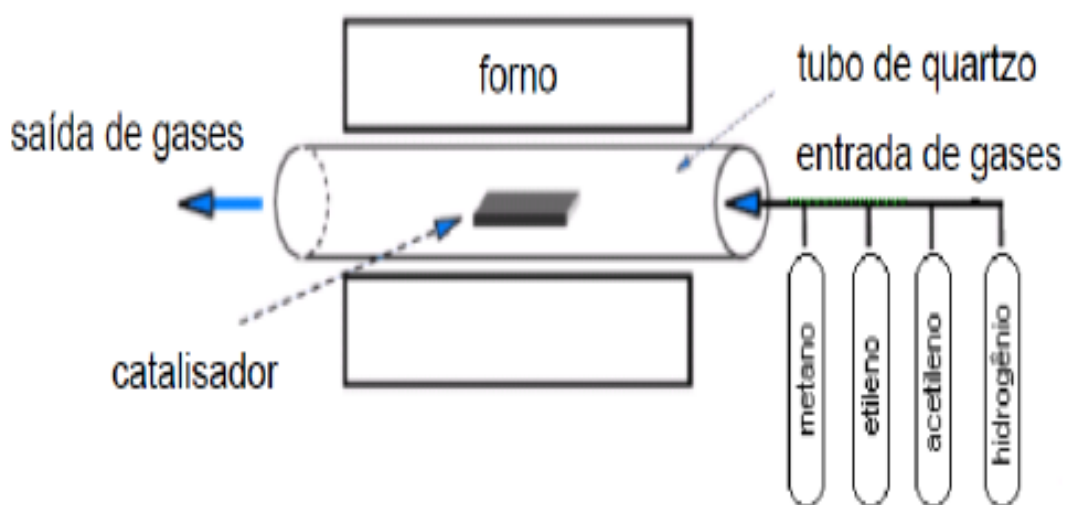


Fonte: NOVOSELOV et. al., 2011.

O método de microesfoliação química do grafite *bulk*, que é constituído por sucessivas etapas de oxidação, consiste na inserção de reagentes entre as camadas de grafeno para romper as ligações de Van der Waals, e causar esfoliação destas camadas de grafeno, e redução de folhas de grafite (Camargo et. al., 2017). Este efeito pode ser aumentado com a aplicação de um banho ultrassônico.

Pode ser também obtido pelo método de deposição química a vapor (CVD), que consiste na deposição de carbono sobre a superfície de um substrato sólido de metais e/ou ligas metálicas conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Método de síntese por CVD.

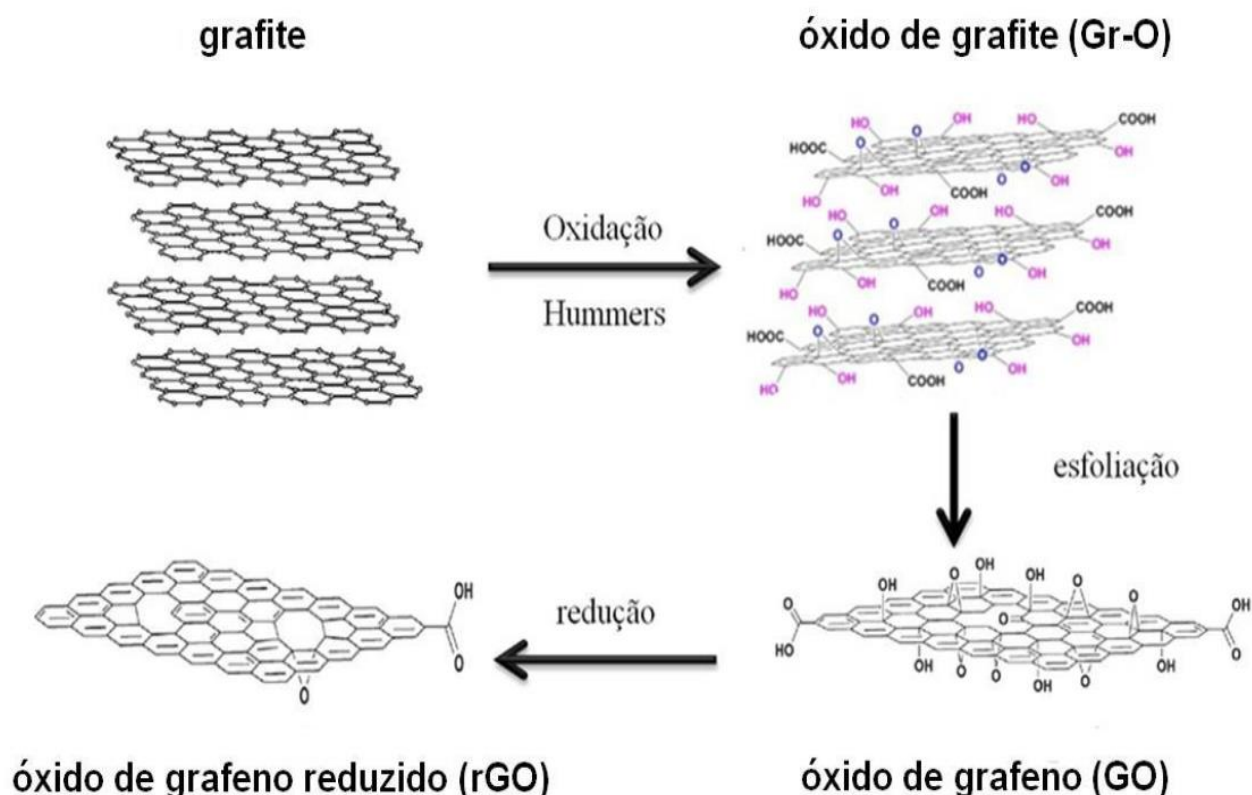


Fonte: Gonçalves, 2012.

Ainda é possível obter grafeno por meio do crescimento deste material sobre carbeto metálicos, em especial SiC, por sublimação por deposições seguidas de redução de óxido de grafeno por meio de métodos eletroquímicos; e pelo método de “*unzipping*”, que consiste no rompimento das paredes de nanotubos, formando folhas de grafeno (Jesus et al., 2012).

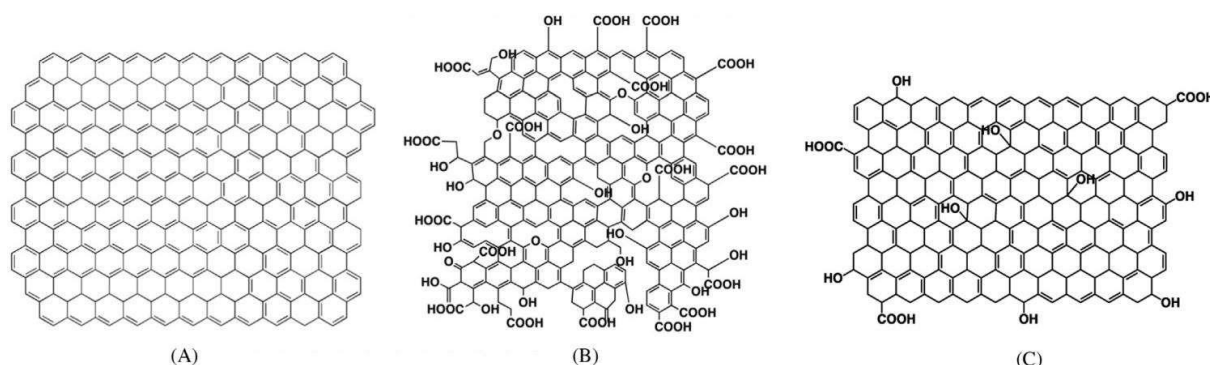
Devido as seguintes características de processamento: elevado rendimento; fácil obtenção de óxidos de grafenos e óxidos de grafenos reduzidos de multicamadas; processabilidade simples do material final e custo de processo relativamente baixo, o método de esfoliação química da grafita *bulk* é um dos mais utilizados para a obtenção do grafeno. A Figura 13 apresenta as características do esquema geral deste processo e a Figura 14 a representação esquemática das estruturas do (a) Grafeno, (b), GO e (c) rGO (119).

Figura 13 - Esquema geral da reação de esfoliação química do grafite *bulk* para a obtenção de OG ou OGR.



Fonte: Camargo et. al., 2017

Figura 14 - Representação esquemática das estruturas do (a) Grafeno, (b) GO e (c) rGO.



Fonte: KUMAR, 2017.

As principais propriedades físico-químicas do grafeno são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo das propriedades do Grafeno.

Propriedade	Unid.	Valor	Valor referência
Número de elétrons	-	6	-
Distância de ligação carbono-carbono	nm	0,142	-
Distâncias entre as camadas do grafeno na grafita	nm	0,335	-
Rede de Bravais	átomo/célula	2	-
Velocidade dos elétrons "sem massa"	m/s	106	-
Condutividade elétrica	S/m	108	-
Condutividade térmica	W/m.K	±5.000	Cobre: ±400 Prata: ±430 Diamante: ±2.000 a 2.200
Mobilidade de cargas elétricas	cm ² /V.s	15.000 a 200.000	-
Área superficial específica	m ² /g	±2.600	-

Fonte: Resumo, elaboração próprio autor.

O grafeno possui, portanto, uma combinação única de propriedades que o tornam potencialmente candidato para diversas aplicações graças a baixa densidade, altas condutividades elétrica/térmica, resistência mecânica, flexibilidade e transparência. Uma folha de grafeno possui um módulo de elasticidade (~1 TPa) e uma resistência à tração (~130 GPa). A expectativa, portanto, é que a incorporação de mesmo uma pequena fração de grafeno em uma matriz metálica resulte em um aumento significativo das propriedades mecânicas do nanocompósito.

3.3 Materiais Compósitos

O aparecimento dos compósitos se deu na metade do século XX como uma classe de materiais, com a ideia de misturar materiais diferentes durante o processamento. São materiais conhecidos e utilizados desde a antiguidade. A civilização do antigo Egito, por exemplo, utilizava adobe, um material constituído por terra, água e palha ou outras fibras naturais, na confecção de monumentos e principalmente na construção civil. No geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, ou seja, definidos pela união de dois ou mais materiais insolúveis entre si que se diferem na forma e na composição química, tal que é obtida melhor combinação exclusiva e superiores de propriedades de maneira equilibrada desses materiais precursores, em resumo é modificar um material existente por meio de incorporação de outros componentes a fim de uma aplicação específica (MATTHEWS, 1999, CONTRERAS, 2018).

Materiais compósitos podem ser selecionados para resultar em combinações incomuns de rigidez, resistência mecânica, densidade, desempenho em altas temperaturas, resistência à corrosão, dureza ou condutividade (ASKELAND e WRIGHT, 2014).

Os compósitos são projetados e processados com os seguintes objetivos:

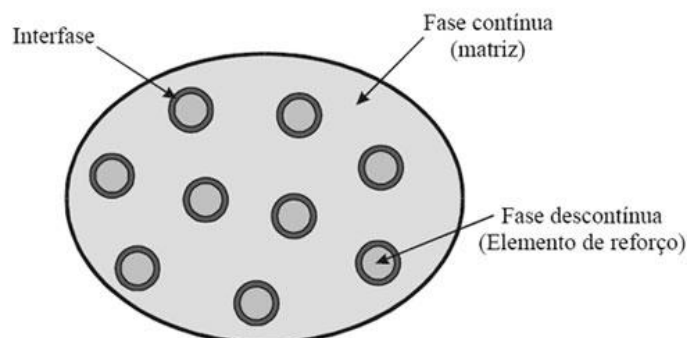
- a) combinar melhores características de distintos materiais em um único;
- b) melhorar as propriedades mecânicas, elétricas e térmicas;
- c) melhorar a resistência à corrosão;
- d) melhorar a razão peso-resistência;
- e) proporcionar benefícios nas etapas de processamento;
- f) possibilitar a existência de materiais com boa relação custo-benefício.

Um material compósito pode ser natural ou sintético e é uma combinação entre pelo menos duas fases, uma é denominada fase matriz, caracterizada pela sua forma contínua que atua como enchimento e outra denominada fase dispersa incorporada como reforço (composta por uma ou mais cargas de reforço).

Um dos compósitos naturais mais famosos é a madeira, formada por uma matriz de lignina reforçada com cadeias fibrosas de celulose. Já com relação aos compósitos sintéticos, os mais clássicos são a fibra de vidro (utilizada em piscinas, carenagem de veículos, cascos de embarcações etc.), a fibra de carbono (utilizada em varas de pesca, bicicletas de competição, transmissão de carros esportivos, revestimento de veículos espaciais e etc.), ambos atuantes como reforço em matrizes poliméricas, e o concreto, composto por uma matriz de aluminossilicato de cálcio (cimento), reforçado com brita (agregado grosso) e areia (agregado fino).

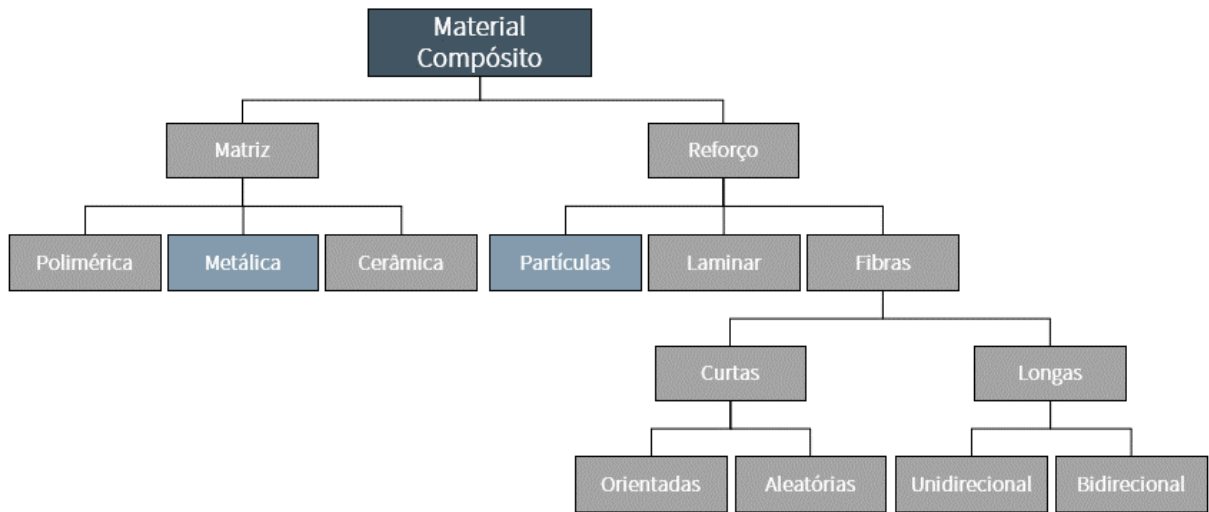
Em engenharia de materiais classifica-se os compósitos conforme sua natureza, ou seja, matriz polimérica, matriz cerâmica ou matriz metálica. E pelo tipo de fase de reforço, cujo são fibras, laminar ou partículas, além da geometria e disposição destes na matriz. A Figura 15 apresenta a distribuição da fase dispersa na fase matriz de uma forma genérica e as Figura 16, Figura 17 e Figura 18 apresentam um exemplo do conceito (CONTRERAS, 2018).

Figura 15 - Representação das fases matriz e dispersa de um nanocompósito.



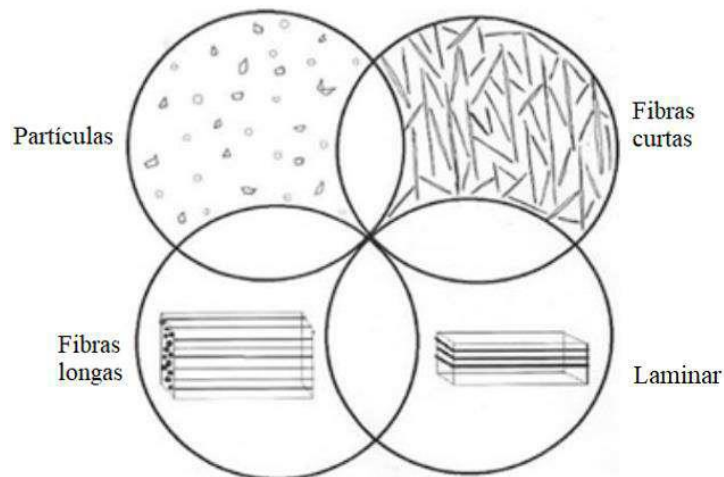
Fonte: Elaboração próprio autor.

Figura 16 - Classificação dos compósitos segundo sua matriz e o tipo de reforço.



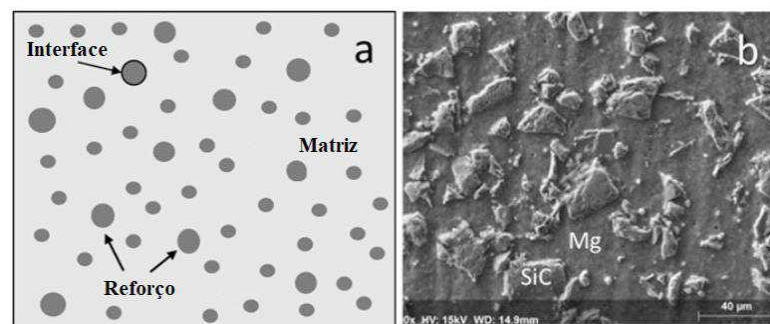
Fonte: CONTRERAS, 2018, adaptado.

Figura 17 - Exemplo de disposição de reforço na matriz.



Fonte: CONTRERAS, 2018, adaptado.

Figura 18 - a) Representação esquemática de um material compósito e b) Imagem MEV de um compósito de Mg/SiC.



Fonte: CONTRERAS, 2018, adaptado.

Devido ao contexto deste trabalho, foi dado um foco maior aos compósitos de matriz metálica com reforço de partículas, conforme realçado na Figura x acima.

Os compósitos multifásicos oferecem a oportunidade de obtenção de materiais com atributos superiores aos das fases constituintes iniciais. Desta forma, melhores propriedades podem ser criadas e exploradas, por meio da combinação de porções da fase dispersa na fase matriz, no qual uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes é obtida dentro de um equilíbrio.

3.3.1 Fase Matriz

A fase matriz em um compósito tem diversas funções importantes, no quais a torna indispensável para a estrutura de um material. Entre elas pode-se citar a de que é a responsável por ligar as partes da fase dispersa umas às outras, deve ser composta por um material dúctil e seu módulo de elasticidade deve ser menor que o da fase dispersa.

A matriz é quem recebe a carga de tensão aplicada externamente e a transmite para a fase dispersa, protegendo-as contra danos superficiais decorrentes de esforços abrasivos e/ou reações químicas do ambiente. Ela também é a responsável em prevenir a propagação de trincas frágeis entre os componentes da fase dispersa ou do reforço, assim mesmo que algumas partes individuais dos reforços falhem a fratura total do nanocompósito não ocorrerá até que uma grande porção da fase dispersa adjacentes tenha falhado.

O mecanismo de aumento da resistência é semelhante ao de endurecimento por precipitação, enquanto a matriz suporta a maior parte da carga aplicada, as pequenas partículas dispersas impedem ou dificultam o movimento das discordâncias. Dessa forma a deformação plástica fica restrita de modo tal que os limites de escoamento e de resistência a tração, assim como dureza, são melhorados (MATTHEWS, 1999).

É muito importante que as forças de ligação entre a fase matriz e a fase dispersa sejam grandes e fortes, minimizando assim o arrancamento dos reforços. A resistência de um nanocompósito depende basicamente da intensidade desta ligação, para que a transmissão de tensões ocorra de uma boa forma entre a fase matriz de

baixa resistência e a fase dispersa de boa resistência e responsável por suportar e sustentar o nanocompósito.

3.3.2 Fase Dispersa

A fase dispersa de um compósito é aquela responsável por suportar e resistir aos esforços nos quais o material é submetido. Os materiais utilizados na fase dispersa apresentam altos limites de resistência à tração.

Para maioria dos nanocompósitos, a fase particulada é mais dura e mais rígida que a matriz. Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula. Essencialmente a matriz transfere parte da tensão aplicada as partículas, as quais suportam uma fração da carga. O grau de reforço ou melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface matriz-partícula (DEODATI, 2009).

Nanocompósitos particulados contêm partículas de 10nm a 250nm de diâmetro. Estes dispersóides, normalmente um óxido metálico, são inseridos na matriz e mesmo que não sejam cristalograficamente coerentes com a matriz, elas bloqueiam o movimento das discordâncias, resultando num efetivo endurecimento do material.

Os materiais da fase dispersa podem ser classificados como fibras ou whiskers. As fibras podem ser materiais policristalinos ou amorfos e possuem diâmetros pequenos, sendo geralmente polímeros ou cerâmicas. Já os whiskers são monocristais muito finos, com razões comprimento-diâmetro extremamente grande.

Em consequência disso esses nanomateriais apresentam alto grau de perfeição cristalina e são virtualmente livres de defeitos, o que lhes proporcionam resistências extremamente elevadas.

3.4 Nanocompósitos

Os nanocompósitos estabelecem uma categoria de materiais que vem sendo estudados desde o século passado, mas principalmente no século XXI têm sido amplamente desenvolvidos e aprimorados em aplicações e produtos inovadores. Nestes materiais a fase dispersa incorporada como reforço, possui escala nanométrica, de grandeza na ordem 10^{-9}m .

Ligas endurecidas por dispersão são exemplos de materiais tradicionais que podem ser considerados compósitos em nanoescala. Em um nanocompósito, a fase dispersa consiste em partículas em escala nano distribuídas em uma fase matriz (ASKELAND e WRIGHT, 2014).

3.4.1 Nanocompósitos reforçados por dispersão

Os metais e ligas metálicas podem ter sua resistência aumentada e ser endurecidos pela dispersão uniforme de diversas porcentagens volumétricas de partículas finas de um material inerte e muito duro. A fase dispersa pode ser metálica e não metálica; óxidos são usados com frequência. Novamente, o mecanismo de aumento da resistência envolve interações entre as partículas e as discordâncias na matriz. O efeito do aumento da resistência por dispersão é mantido em temperaturas elevadas e por períodos de tempos prolongados, pois as partículas dispersas são escolhidas para não serem reativas com a fase matriz.

Em geral, a síntese de solidificação de matriz de compósitos metálicos, envolve a produção de um fundido do material da matriz selecionada, seguido pela introdução de um material de reforço no fundido, obtendo uma dispersão adequada. A próxima etapa é a solidificação do fundido contendo dispersóides sob condições selecionadas para obter a distribuição desejada da fase dispersa na matriz fundida (HASHIM et al., 1999).

3.4.2 Nanocompósitos com matriz metálica

Os nanocompósitos com matriz metálica possuem um metal dúctil como material da matriz, e podem ser usados em temperaturas de serviço mais elevadas que seus respectivos metais base. Além disso, o reforço pode melhorar a rigidez específica, a resistência específica, a resistência a abrasão, a resistência a fluência, a condutividade térmica, condutividade elétrica e a estabilidade dimensional. As superligas, assim como ligas de alumínio (Al), magnésio (Mg), titânio (Ti) e cobre (Cu), zinco, ferro, aço, níquel são empregadas como materiais da matriz. O reforço pode ser na forma de particulados de fibras contínuas, incluindo as de carbono, carbetos de silício (SiC), boro (B), óxido de alumínio (Al_2O_3) e metais refratários. Normalmente o

processamento destes nanocompósitos envolve pelo menos duas etapas, uma de introdução do reforço na matriz, denominada de consolidação ou síntese, seguida de uma operação de conformação (GENG, 2017, CHAWLA, 2012).

Compostos de matriz metálica se tornaram materiais de engenharia cruciais, combinando ductilidade e tenacidade de metais com alta resistência e propriedades de alto módulo de elasticidade, alta resistência a tração e compressão e usabilidade em altas temperaturas. Embora todos os tipos de metais leves possam ser usados como material de matriz na produção de compósitos de matriz metálica, o alumínio e suas ligas geralmente ocupam o primeiro lugar. A razão de preferir essas ligas é que elas têm baixa densidade e baixa temperatura de fusão, normalmente a escolha está relacionada essencialmente à matriz metálica, ao processo de fabricação e as propriedades desejadas para a aplicações específicas. Baixa densidade relativa, módulo de Young elevado, compatibilidade química e mecânica com a matriz, alta condutividade térmica e elétrica e baixo coeficiente de expansão térmica (CET) são as principais propriedades almejadas para reforços em compósitos metálicos. No entanto, a fim de melhorar essas propriedades ainda mais, compósitos com matrizes metálicas vêm sendo reforçados com materiais de nova geração mostrando propriedades superiores. Atualmente, os melhores resultados desses reforços são obtidos a partir de compósitos de matriz metálica reforçados com grafeno (GULER e BAGCI, 2020 e 221).

Na preparação de compósitos com matriz de metal pela fundição, há vários fatores que precisam de considerados, incluindo:

- a) a dificuldade de alcançar uma distribuição uniforme do material de reforço;
- b) molhabilidade entre as duas substâncias principais;
- c) porosidade nos compósitos com matriz de metal fundido;
- d) reações químicas entre o material de reforço e a liga da matriz.

A fim de alcançar as propriedades ideais do metal compósito de matriz, a distribuição do reforço material na liga da matriz deve ser uniforme, e a molhabilidade ou ligação entre essas substâncias deve ser otimizado. Os níveis de porosidade precisam ser minimizados, e reações químicas entre os materiais de reforço e a liga da matriz deve ser evitada (HASHIM et al., 1999).

As Tabela 9 e Tabela 10 apresentam, respectivamente, os reforços mais utilizados atualmente segundo seu tipo e dimensões e as propriedades de alguns

deles (GENG, 2017 e CHAWLA, 2012 e PRAMANIK, 2016 e HAGHSHENAS, 2016 e SABOORI, 2018).

Tabela 9 - Reforço utilizados em compósitos de matriz metálica.

Tipo	Razão de Aspecto	Diâmetro	Reforço
Partícula	1-4	1-25 μm	SiC, Al_2O_3 , WC, TiC, BN, B ₄ C
Fibras Curtas ou Whisker	10-10.000	1-5 μm	SiC, Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$, C
Fibra Contínua	> 1.000	3-150 μm	SiC, Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$, C, B, W, NbTi, Nb ₃ Sn
Nanopartícula	1-4	< 100 nm	C, Al_2O_3 , SiC
Nanotubo/Grafeno	> 1.000	< 100 nm	C

Fonte: CHAWLA, K. 2012 & HAGHSHENAS, M. 2016, adaptado.

Tabela 10 - Propriedades dos reforços utilizados em matrizes metálicas.

Material	Densidade (g/cm ³)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Coefficiente de Expansão Térmica (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Ponto de Fusão (°C)	Módulo de Young (GPa)
SiC	3,2	200 - 270	4,0 - 5,0	2500	260 - 480
Al_2O_3	3,98	35 - 39	7,1 - 9	2050	365 - 393
TiC	4,92	20,5	7,4	3200	310 - 460 ²
B ₄ C	2,52	29	5,73	2450	360 - 460
AlN	3,3	170 - 200	2,5 - 5,3	2200	308 - 346
C (diamante)	3,5	2.200	0,4 - 1,0 ¹	3550	930
C (grafite)	2,25	25 - 470	0,6 - 4,3	3593	4,8 - 2,7
SWCNTs	1,8	> 2.900	0,2 ³	3550	±1.000
Grafeno (monocamada)	1,05	5.000	-6	5727	1.000

¹ (MOELLE, 1997), ² (TÖRÖK, 1987), ³ (DENG, 2014)

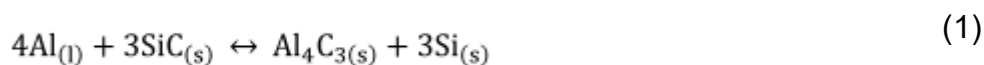
SWCNTs (Single-Walled Carbon Nanotubes) são estruturas cilíndricas compostas por uma camada de grafeno, formando um tubo semelhante a uma parede única.

Fonte: Adaptado pelo autor (GENG, 2017 e PRAMANIK, 2016 e SABOORI, 2018).

A expectativa que se tem de um compósito de matriz metálica eficaz, é que este demonstre harmonização entre a ductilidade e tenacidade dos metais com a alta resistência e o alto módulo elástico do reforço. Em termos gerais, matriz e reforço

precisam estabelecer um vínculo capaz de promover satisfatoriamente uma distribuição homogênea de cargas da matriz para o reforço. Este vínculo é efetivado por meio da interação interfacial entre a matriz e o reforço, a qual representa um dos parâmetros que determina o desempenho do compósito para a aplicação objetivada (CHAWLA, 2012). Dessa forma é preciso conhecer, além das características da matriz, os aspectos físicos do reforço como, forma e dimensão, bem como sua natureza química relacionada a sua composição.

A interface entre a matriz e o reforço é definida como uma região bidimensional de espessura limitada, na qual há descontinuidade de alguma característica ou propriedade (estrutura cristalina, módulo elástico, densidade, coeficiente de expansão térmica etc.), podendo ser acentuada ou gradual. Os mecanismos que originam essa interface podem ocorrer sob ligação química, interdifusão, ligação de van der Waals ou intertravamento mecânico e exigem, em todos os casos, contato desmedido entre matriz e reforço (CHUNG, 2010). A relevância dos mecanismos interfaciais está associada à sua proporção no material compósito e no fato do sistema matriz/reforço estar fora do equilíbrio termodinâmico (PRAMANIK, 2016 e CHAWALA, 2012), podendo proporcionar determinados tipos de reações durante a manufatura do compósito, tais quais fenômenos de difusão entre matriz/reforço ou a produção de compostos interfaciais. Por exemplo, compósitos de alumínio reforçados com SiC, processados por rota de infiltração de metal líquido tendem a formar carbeto de alumínio (Al_4C_3) na interface Al/SiC, segundo a reação (1) (CHAWALA, 2012 e CHUNG, 2010 e CHAWLA, 2013 e XIONG, 2011):



Além da interação interfacial, a distribuição ou dispersão do reforço na matriz também se revela como um fator determinante nas propriedades do compósito. Por essa razão, compósitos reforçados descontinuamente ou com partículas são os mais usuais, em virtude do menor custo de fabricação e propriedades relativamente isotrópicas comparado a compósitos reforçados continuamente (GENG, 2017 E CHAWLA, 2012).

Algumas áreas de destaque em que são aplicados compósitos de matriz metálica num geral, podem ser citadas: satélites espaciais (compósitos à base de Ti e Al) (PRAMANIK, 2016), aeronaves civis e militares (compósitos a base de Al ou Mg)

(PRAMANIK, 2016), potenciais aplicações na indústria biomédica na manufatura de próteses (compósitos Ag/CNT e Ti/Ti-CNT) (FENG, 2005 E LI, 2013), lâminas de turbinas (Ni/Ni₃Nb), supercondutores (Cu/Nb, Cu/Nb₃Sn) e eletrodos de soldagem (Cu/W) (HAGHSHENAS, 2016).

A indústria aeronáutica sempre foi a maior entusiasta dos compósitos de matriz metálica devido suas excelentes propriedades físicas e mecânicas. Esses materiais estão presentes em componentes de turbinas, em subsistemas mecânicos, bem como na fuselagem (DANIEL, 2001). Com as mudanças de paradigmas no setor automotivo, a indústria automobilística vem adotando cada vez mais estes materiais em seus projetos, principalmente compósitos de matriz de alumínio, pelas seguintes razões (HAGHSHENAS, 2016):

- a) redução do peso das peças do motor;
- b) aumento da temperatura de operação dos motores;
- c) melhoria das propriedades tribológicas de movimento e contato;
- d) componentes (resistência ao desgaste, lubrificação);
- e) aumento de rigidez e resistência mecânica;
- f) coeficiente de dilatação térmica correspondente (aço ou ferro fundido em relação a ligas de alumínio);
- g) uso de técnicas de fabricação convenientes (sobretudo para ligas de alumínio reforçadas de forma descontínua).

As formas de ligação na interface dos compósitos com matriz de alumínio, durante o processo de mistura molecular, visto que existem grupos funcionais nas cargas de carbono, é o mais importante para a transferência de carga entre a matriz e o reforço. As interfaces e a forte ligação interfacial entre o reforço de grafeno e a matriz de metal da liga de alumínio, desempenham um papel importante na determinação da resistência à tração dos compósitos e, conseqüentemente, nas propriedades mecânica (VENKATESAN e XAVIOR, 2019).

Baseado neste contexto a matriz de alumínio com reforço de grafeno reivindicaram para si a atenção não só dos pesquisadores, mas da indústria, promovendo extensivas pesquisas relacionadas a manufatura de compósitos de matrizes metálicas reforçadas com grafeno, almejando materiais com propriedades

superiores, de modo que, se esses materiais, principalmente os compósitos de alumínio, atingirem as expectativas, somado a um baixo custo de manufatura. Sendo assim, os próximos tópicos irão abordar acerca de compósitos Metal/Grafeno com maior destaque a compósitos de matriz de alumínio reforçados com grafeno.

3.4.3 Nanocompósitos com matriz metálica com reforço de Grafeno

Com já apresentado anteriormente, compósitos metálicos reforçados com C, Al_2O_3 ou SiC são já de conhecimento relativamente sólido entre a comunidade acadêmica e indústria, tornando o grafeno o protagonista da vez, com a expectativa de prover compósitos melhores a custos de manufatura reduzidos. Contudo, há desafios no processamento deste material, por exemplo, a utilização de técnicas adequadas para sua dispersão na matriz, devido a desproporcional diferença de densidade entre grafeno e matriz, sem comprometer sua estrutura, além de sua alta área superficial específica, possibilitando maiores interações físicas e químicas com a matriz e com o meio (atmosfera), podendo ser tanto positivas (com o estabelecimento de ligações interfaciais satisfatórias, desempenhando seu papel efetivo na transferência de carga entre matriz/reforço, elevando suas propriedades mecânicas), quanto negativas (com a formação de compostos interfaciais como Al_4C_3 quando a matriz é de Al) e também a interação do carbono com o oxigênio em altas temperaturas quando na fundição. Além destes, outros fatores que afetam o desempenho final do compósito estão relacionados à qualidade do grafeno, intrinsecamente associado ao método de sua produção, bem como dimensão e número de suas camadas, os quais já demonstraram impactar nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos (GONG, 2010 e GONG, 2012), esse último foi resolvido uma vez que iremos utilizar um grafeno já qualidade comprovada e certificada, a fim de eliminarmos essa possível variável no processo.

3.4.4 Nanocompósitos com matriz metálica de Alumínio com reforço de Grafeno

O alumínio e suas ligas representam as principais matrizes para confecção de compósitos, isso é devido a sua baixa densidade, baixo ponto de fusão, versatilidade e custo/benefício. Como já mencionado, para obter propriedades apropriadas para

uma aplicação específica, seja ela melhorar condutividade elétrica em cabos de condução, melhorar a dissipação das carcaças de alumínio de motores elétricos, é necessária a escolha de um reforço conveniente. O alumínio puro não é indicado para aplicações de engenharia estrutural por apresentar baixa resistência mecânica, sendo assim, para esse tipo de aplicação, a escolha de um reforço com alto módulo e alta resistência mecânica, seria ideal para manufatura de um compósito com propriedades específicas para esse tipo de aplicação. No caso em aplicações elétricas ou térmicas, baixo coeficiente de dilatação térmica e elevados valores de condução (elétrica ou térmica) seriam um pré-requisito para um reforço compor o material compósito. Com relação ao grafeno, suas propriedades apresentam um grande potencial de aprimorar o alumínio e suas ligas abrangendo aplicações tanto elétricas e térmicas, quanto mecânicas. Contudo, conforme já mencionado, iremos focar neste trabalho apenas na liga de alumínio SAE 323. A Tabela 11 expõe um comparativo entre as propriedades do alumínio (Puro) e as do grafeno (SEYED, 2019).

Tabela 11 - Comparativo entre as propriedades do alumínio e as do grafeno.

Propriedade	Unid.	Alumínio	Grafeno
Ponto de Fusão	°C	660	5727
Densidade	g/cm ³	2,7	1,05
Resistência à tração	MPa	80	130.000
Módulo de Young	GPa	70	1.000
Condutividade elétrica	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$	$3,2 \cdot 10^7$	10^8
Condutividade térmica	$\text{W}^{-1}\text{K}^{-1}$	237	5.000
Coeficiente de expansão térmica	K^{-1}	$24 \cdot 10^{-6}$	$-6 \cdot 10^{-6}$
Área de Superfície específica	m^2g^{-1}	-	2630

Fonte: SEYED, 2019, adaptado.

3.5 Fundição

A fundição é um processo de fabricação no qual um metal totalmente fundido é derramado na cavidade de um molde que apresenta a forma desejada; com a solidificação, o metal assume a forma do molde, mas sofre certa contração. Em comparação com outros processos de fabricação, a fundição é o processo mais econômico. Técnicas diversas de fundição são comumente empregadas, incluindo a fundição em molde de areia, com matriz, de precisão, com cera perdida e a fundição contínua.

O processo de fundição pode dar origem a peças acabadas, já em seu formato final, ou em peças que posteriormente serão submetidas a outros processos de conformação mecânica, como por exemplo, a forja, soldagem ou usinagem. Entretanto, de um modo geral, as peças fundidas passam por processos de acabamentos padrões, como corte de canais, rebarbação e jateamento. É muito comum, após a fundição, as peças serem submetidas a tratamentos térmicos, quando se é necessário obter maior resistência mecânica, uma vez que o processo de fundição confere menor resistência mecânica do que outros processos de conformação.

Entre a variedade de processos de fabricação disponíveis para compósitos de matriz de metal descontínuo, a fundição é geralmente aceita como um caminho particularmente promissor, atualmente praticado comercialmente. Suas vantagens residem em sua simplicidade, flexibilidade e aplicabilidade para grandes quantidades. Também é atraente porque, em princípio, permite que uma rota de processamento de metal convencional seja usada, e, portanto, minimiza o custo final do produto. Esta técnica de metalurgia líquida é a mais econômica de todas as rotas disponíveis para a produção de compósitos com matriz de metal e permite que componentes de tamanhos muito grandes sejam fabricados (HASHIM et al., 1999)

O custo de preparação de materiais compósitos usando um método de fundição é cerca de um terço a metade dos métodos competitivos e para alto volume produção, projeta-se que o custo pode cair para um décimo (SKIBO et al., 1988).

3.5.1 Fundição por gravidade em molde de areia

Na fundição em molde de areia, que é provavelmente é o método mais comum, a areia comum é utilizada como o material do molde. Um molde em duas partes é formado pela compactação da areia ao redor de um modelo que tem a forma da peça que se deseja fundir. Além disso, um sistema de canais de alimentação é geralmente incorporado ao molde, para possibilitar e acelerar o escoamento do metal fundido para o interior da cavidade e para minimizar defeitos internos da fundição.

Podem ainda ser utilizados para modelamento das peças, componentes chamados de machos de fundição, que servem para formar canais ou furos em peças que precisem ser vazadas. Os machos devem ser feitos de um material resistente o

suficiente para suportar o processo de vazamento do metal fundido, mas devem ser quebráveis após o processo de solidificação e esfriamento para que possa ser retirado da peça.

3.5.2 Fundição por gravidade em coquilha

O método de fundição por gravidade em coquilha é um processo de fabricação de peças metálicas. Funciona despejando metal líquido em uma coquilha (molde permanente) por gravidade, sem a necessidade de aplicar pressão externa. O metal líquido é vertido diretamente na coquilha, em que solidifica para formar a peça desejada. Este método é adequado para produzir peças de geometria complexa com alta precisão dimensional e acabamento superficial. Ele é amplamente utilizado na indústria devido à sua eficiência e capacidade de produção em larga escala.

Abaixo apresentamos alguns pontos de comparação básica entre os processos de fundição em areia e coquilha:

A peça fundida em coquilha possui um custo final menor (por peça), pois a fundição em areia varia em função das quantidades e o que interfere pouco no coquilhamento;

- a) a produção é maior e mais rápida no coquilhamento;
- b) possui uma qualidade superior em acabamento;
- c) as peças podem ser fundidas com buchas, insertos e postiços;
- d) na mesma ferramenta (coquilha) é possível alterar os diâmetros dos furos ou dimensões das buchas e insertos sem alterar o molde, apenas alterando os postiços do molde;
- e) a fabricação de pequenas quantidades para teste ou amostras não depende de programação de produção (exceto casos especiais com ferramentas muito grande);
- f) o custo de molde é bem superior comparando-se com molde de madeira para fundição em areia, tomando o processo muito caro para pequenas quantidades não seriadas (esporádicas), exceto em caso que o custo da usinagem posterior é muito elevado.

3.5.3 Fundição em forno a indução eletromagnética

O processo de fundição em forno a indução eletromagnética funciona induzindo correntes elétricas no metal por meio de um campo magnético oscilante, que é gerado pela bobina indutor do forno, ocorrendo o aquecimento por meio de efeito joule por correntes parasitas induzidas, correntes de Foucault (em inglês: *eddy current*). Quando uma peça metálica é colocada dentro deste campo, correntes elétricas são induzidas no metal devido às leis da indução eletromagnética, gerando calor por meio da resistência elétrica do material. A corrente elétrica é induzida no metal pela bobina indutora, gerando calor devido à resistência elétrica do material. Isso promove um aquecimento rápido e uniforme. As correntes elétricas induzidas no metal encontram resistência elétrica em seu percurso, o que resulta na geração de calor. Esse calor aquece o metal de maneira rápida e uniforme. Esse processo possui maior eficiência energética, pois o consumo de energia é menor em comparação com fornos elétricos convencionais, devido à eficiência do processo de indução, pois o calor é gerado diretamente no interior do metal, eliminando perdas associadas à transferência de calor. Além disso, permite um controle preciso da temperatura, facilitando o ajuste para diferentes ligas metálicas e processos de fundição. O controle da temperatura é alcançado ajustando a potência do campo magnético e a frequência de oscilação da corrente elétrica. Isso permite um aquecimento preciso, evitando o superaquecimento ou subaquecimento do metal. Uma vez que o metal atinge a temperatura desejada, ele está pronto para a fundição. Dependendo da aplicação, o metal pode ser despejado em moldes pré-fabricados ou moldado diretamente no interior do forno. O aquecimento rápido resulta em tempos de ciclo mais curtos, aumentando a produtividade e reduzindo os custos de produção. Esse processo também pode ser caracterizado como mais ecológico, uma vez que reduz a emissão de gases e resíduos, proporcionando um ambiente de trabalho mais limpo e seguro.

É um processo de fundição rápido, uniforme e altamente adaptável às necessidades da indústria.

3.5.4 Fundição em atmosfera inerte

O termo inerte significa "quimicamente inativo", de modo que uma atmosfera inerte é um ambiente em que a fusão pode ocorrer sem risco de contaminação pelos gases reativos que existem no ar, como o oxigênio e o dióxido de carbono. O gás argônio é bastante utilizado para ambientes de manufatura com fundição nestas características, devido ao fato de que ele é inerte e abundante (o terceiro gás mais abundante na atmosfera terrestre).

Uma atmosfera inerte é essencial para o processo de fusão para garantir que as peças metálicas que estão sendo construídas não sejam contaminadas pelas moléculas de ar que podem alterar as propriedades físicas e químicas das peças finais.

3.5.5 Agitação eletromagnética provocada por correntes de Foucault induzidas no material

Durante o processo de fusão em fornos de indução, a interação entre o campo magnético gerado pela bobina e as correntes de Foucault induzidas no metal fundido promove uma agitação interna significativa. Essa agitação força o metal a se mover do centro para as bordas e vice-versa, formando um menisco característico na superfície do banho metálico. A intensidade desse movimento depende da potência e da frequência aplicadas, além da geometria da bobina e das propriedades físicas do metal, como densidade e viscosidade.

A frequência da corrente alternada influencia diretamente a profundidade e a intensidade das correntes induzidas: frequências mais altas geram correntes superficiais e agitação localizada, enquanto frequências mais baixas promovem correntes mais profundas e mistura mais homogênea (JAKOBSEN, 2014).

Essa agitação é benéfica para a homogeneização térmica e química do banho, favorecendo a dissolução de elementos de liga e a distribuição de reforços, como nanopartículas de grafeno. No entanto, agitação excessiva pode aumentar a absorção de gases, acelerar o desgaste do revestimento refratário e intensificar a oxidação da liga (ISPAT, 2021).

3.5.6 Rotação mecânica

A agitação mecânica é uma técnica amplamente empregada na produção de compósitos metálicos, especialmente em processos de fundição, com o objetivo de melhorar a molhabilidade entre matriz e reforço, promover a desaglomeração de partículas, garantir uma distribuição homogênea dos reforços e reduzir porosidades e gases aprisionados nas interfaces sólido-líquido (ZHOU, 1997; HASHIM et al., 1999).

O sistema de agitação é composto por um motor, eixo e impulsor, sendo este último responsável por gerar o movimento do fluido metálico no interior do cadinho. A rotação do impulsor imerso no alumínio fundido favorece a transferência de massa, a degaseificação e a homogeneização térmica do banho metálico (GONÇALVES, 2023).

Impulsores axiais geram fluxo paralelo ao eixo, sendo mais eficazes na mistura de líquidos e sólidos em suspensão, enquanto impulsores radiais produzem correntes tangenciais, mais adequadas para a dispersão de gases (GARAVITO, 2013; McCABE et al., 1993). A escolha do tipo de impulsor influencia diretamente o padrão de mistura e a eficiência do processo.

Estudos recentes demonstram que a agitação contínua no estado líquido, seguida de agitação isotérmica no estado semi-sólido, resulta em melhor molhabilidade e dispersão das partículas reforçantes, como o grafeno, na matriz de alumínio (ZHOU, 1997; COURA, 2021).

3.6 Ensaios Físico-químicos e mecânicos

3.6.1 Metalografia

O termo metalografia é bastante genérico, causando assim controvérsia quanto a sua definição. Porém, utiliza-se do conceito de que é o estudo das características estruturais ou da constituição dos metais e suas ligas, para relacioná-los com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Para se conseguir essa relação entre estrutura observada a olho nu, lupa ou microscópio com as propriedades mecânicas, deve-se seguir uma linha definida de procedimentos, que chamamos de exame metalográfico (FERNANDES, 2011).

Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as interfaces entre os diferentes constituintes do material (FERNANDES, 2011).

3.6.2 Microscopia eletrônica por varredura (MEV)

O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. Sua utilização é comum em biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia (DEDAVID, 2007).

O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1nm (NAGATANI et al. 1987).

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura, consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação (DEDAVID, 2007).

3.6.3 Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

A espectroscopia de raios X por dispersão em energia, é uma técnica analítica acoplada ao microscópio eletrônico de varredura, que permite uma análise elementar, caracterização química dos elementos presentes na amostra, microanálise qualitativa e semi-quantitativa de elementos químicos, e também uma porcentagem de fase em microestruturas (DA COSTA, 2016).

Essa detecção dos raios da amostra pode ser executada pela medida de suas energias (EDS), ou ainda, pelo seu comprimento de onda (WDS). A detecção a partir da EDS é a mais recorrida por possuir maior rapidez na quantificação dos elementos. Estatisticamente, as análises de amostras contendo apenas 10% dos elementos que a compõe levaria cerca de 10s, proporcionalmente, uma contendo 1%, demandaria 100s (EVERHART, 1960).

Característica primordial dessa técnica é o fato de obter-se o mapa constitucional da região analisada podendo correlacionar a morfologia, obtida por MEV e composição (DA COSTA, 2016).

3.6.4 Ensaios de dureza de ligas metálicas

A dureza é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada, provocada por um pequeno penetrador, quando este é forçado contra a superfície do material testado. A profundidade ou o tamanho da impressão é medida, então relacionada a um número de dureza; quanto mais macio for o material, maior e mais profunda será a impressão, e menor será o número índice de dureza.

3.6.4.1 Microdureza Vickers (HV)

Utiliza-se muito a dureza Vickers para pesquisas, estudos e mais especificamente para determinação da profundidade de têmpera nos aços, para ensaios de metais muito duros ou moles. Essa dureza foi introduzida em 1925 por Smith e Sandland, levando o nome Vickers, pela companhia Vickers-Armstrong Ltda, que fabricou as máquinas mais conhecidas para operar com este tipo de dureza. O penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada, praticamente indeformável, com um ângulo de 136° entre as faces opostas. Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes à dureza Brinell e o número de dureza obtido é o mesmo para qualquer carga usada de escala para materiais homogêneos. Para este tipo de dureza, a carga varia de 1 a 120 kgf e a mudança de carga é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível para medida de suas dimensões no visor da máquina.

Entretanto para cargas muito pequenas, a dureza Vickers pode variar de uma carga para outra, sendo então necessário mencionar a carga usada toda vez que se ensaiar um metal. A área tem que ser medida com precisão, e para este fim existe um microscópio acoplado à máquina para determinação das diagonais, com grande precisão, cerca de 1 micron. A carga é aplicada levemente na superfície da amostra, por meio de um pistão movido por uma alavanca e é mantida por cerca de 18 segundos, depois do qual é retirada e o microscópio é movido manualmente até que focalize a impressão.

As principais vantagens do método Vickers são:

- a. escala contínua;
- b. impressões extremamente pequenas que não inutilizam a peça;
- c. grande precisão de medida;
- d. deformação nula do penetrador;
- e. existência de apenas uma escala de dureza;
- f. aplicação para toda gama de durezas encontradas nos diversos materiais;
- g. aplicação em qualquer espessura de material, podendo, portanto, medir também durezas superficiais.

3.6.5 Resistência e Resistividade Elétrica

Resistência elétrica (R) é a capacidade de um corpo qualquer se opor à passagem de corrente elétrica mesmo quando existe uma diferença de potencial aplicada. Quando uma corrente elétrica é estabelecida em um condutor metálico, um número muito elevado de elétrons livres passa a se deslocar nesse condutor. Nesse movimento, os elétrons colidem entre si e contra os átomos que constituem o metal. Portanto, os elétrons encontram uma certa dificuldade para se deslocar, isto é, existe uma resistência à passagem da corrente no condutor. A unidade de medida da resistência elétrica é ohm (Ω).

A resistividade elétrica é uma medida da capacidade de um material de resistir ao fluxo de corrente elétrica. É uma propriedade específica do material e é representada pela letra grega rho (ρ). A resistividade elétrica depende da temperatura

e da composição do material. A unidade de medida da resistividade elétrica é o ohm-metro ($\Omega \cdot m$).

Resumidamente, a resistência elétrica é a medida da oposição ao fluxo de corrente elétrica em um objeto específico, enquanto a resistividade elétrica é uma propriedade do material que indica sua capacidade de resistir ao fluxo de corrente elétrica.

A correlação entre si se dá pela equação (Eq. 01) abaixo:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad \text{Eq. (01)}$$

Em que A é a área da seção transversal para a amostra (m^2), L é o comprimento da amostra (m) e o R é a resistência (Ω) medida da amostra, a condutividade elétrica é o inverso da resistividade.

O cobre eletrolítico puro, a $20^\circ C$, possui condutividade elétrica de $5,8 \times 10^7 S/m$. Esse valor foi adotado como padrão internacional pela Comissão Eletrotécnica Internacional, conhecido como IACS (*International Annealed Copper Standard*), e representa 100% de condutividade. Outros metais são comparados com esse valor: o alumínio 6N, por exemplo, tem cerca de 65% da condutividade do cobre, ou aproximadamente $3,77 \times 10^7 S/m$. Já a prata, que é o metal mais condutor, alcança 106% do IACS, equivalente a $6,15 \times 10^7 S/m$. Esse padrão é amplamente usado como referência para avaliar a condutividade de materiais condutores.

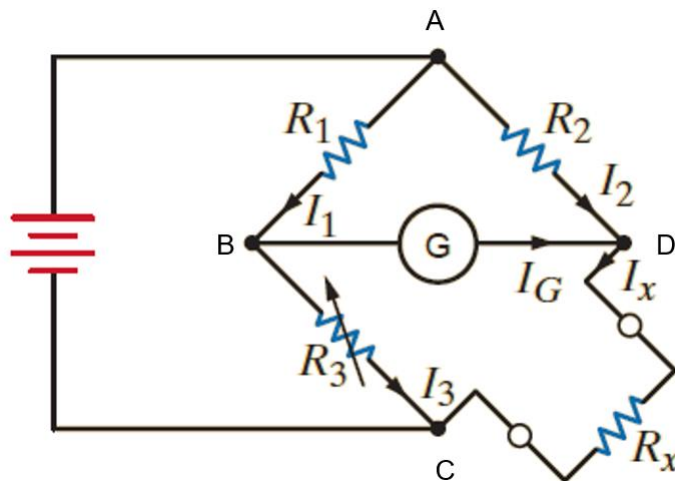
3.6.5.1 Ponte Wheatstone e Ponte Kelvin (Ohmímetro)

A medição da resistência elétrica é realizada por uma variedade de métodos e instrumentos, dependendo da magnitude do resistor e da precisão ou escala desejada. No intervalo de alguns ohms (Ω) a um megohm ($M\Omega$), um ohmímetro pode ser usado com boa precisão. Porém, para medições de resistência em menores escalas, os métodos de ponte são aplicados, porque são métodos nos quais duas ou mais proporções podem ser igualadas e porque as medições podem ser feitas por comparação com padrões conhecidos com precisão. Para resistores de dois terminais, a ponte de Wheatstone pode ser usada; para medições de quatro terminais,

e para escala de medição de baixa (menor que 1Ω) a ponte Kelvin é o instrumento mais adequado aplicado. (BEATY, 2012).

Segundo Irwin e Nelms (2005), um circuito de ponte, Figura 19, é um dispositivo preciso para medir a resistência. Este circuito, é usado para medir o resistor desconhecido. A perna central do circuito contém um galvanômetro, que é um dispositivo muito sensível usado para medir corrente (I). Quando o resistor desconhecido é conectado à ponte, é ajustado até que a corrente no galvanômetro seja zero, ponto em que a ponte é equilibrada.

Figura 19 - Circuito em ponte de Wheatstone para medição de um resistor.



Fonte: IRWIN e NELMS, 2005.

Na Ponte Kelvin, a corrente é aplicada por meio de dois dos terminais e a tensão é medida por meio dos outros dois. Dado que a corrente é conhecida e a tensão é medida diretamente sobre a resistência que queremos determinar, a resistência pode ser calculada usando a lei de Ohm (Eq. 02), nesta condição equilibrada:

$$V = I \cdot R_x \qquad \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_x} \qquad \text{Eq. (02)}$$

Em que: R_x é a resistência a ser determinada, V é a tensão medida e I é a corrente aplicada.

A ponte de Kelvin (ohmímetro) é uma modificação do circuito da ponte de Wheatstone que possibilita a medição de resistências muito baixas e com elevada precisão, menor suscetibilidade as interferências (resistência dos contatos ou fios) ou maior confiabilidade e ainda apresentando adaptabilidade tanto para medições

estáticas quanto dinâmicas. Quando a resistência a ser medida é da ordem da resistência dos fios de ligação, a ponte de Wheatstone produz erros significativos devido à queda de tensão nesses fios. No entanto, apesar da Ponte Kelvin ser uma ferramenta poderosa, é importante entender suas limitações e os cuidados necessários ao utilizá-la, tais como: calibração, como qualquer instrumento de medição, o dispositivo necessita de calibrações regulares para garantir a precisão das medidas. É fundamental ter um entendimento claro de como funciona e como interpretar os resultados, para evitar erros ou más interpretações, e principalmente entender como as interferências eletromagnéticas do ambiente podem afetar as medições (IRWIN e NELMS, 2005).

3.6.6 Difusividade térmica

O significado físico da difusividade térmica está associado à difusão de calor dentro do produto durante as mudanças da temperatura com o tempo. Um elevado valor da difusividade térmica significa uma rápida transferência do calor dentro do produto e pouco tempo para o calor sair do corpo (DINCER, 1995).

3.6.6.1 Método quadrupolo térmico

O método do quadrupolo térmico foi desenvolvido por Degiovanni (2000; 2002) cuja resolução é aproximada pelo método dos mínimos quadrados, conduzindo assim à determinação da difusividade térmica em toda a duração do termograma. Diferente de outros métodos, o Quadrupolo Térmico inclui as perdas térmicas existentes, convectivas e/ou radiativas, em todas as direções. Este método oferece um modelo que conduz à solução da equação geral de difusão de calor (eqs. 03, 04, 05):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad \text{Eq. (03)}$$

Em que T a temperatura, t o tempo, e α é a difusividade térmica:

$$\left(\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \right) \quad \text{Eq. (04)}$$

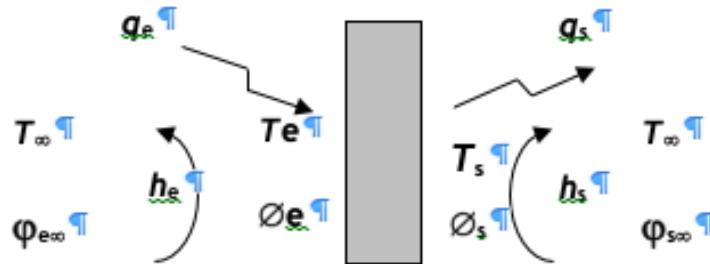
O fluxo de calor φ em qualquer ponto dentro do sistema é dado por:

$$\varphi = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Eq. (05)}$$

Em que k é a condutividade térmica e A é a área.

A Figura 20 apresenta a modelização para o método Quadrupolo térmico:

Figura 20 - Modelização para o método Quadrupolo térmico.



Fonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), 2021.

Uma maneira de visualizar a difusividade térmica é como a razão entre a derivada da curvatura em função do tempo para um dado gradiente de temperatura, quantificando a taxa na qual a concavidade da temperatura é "suavizada para fora do sistema". Em certo sentido, a difusividade térmica é a medida da inércia térmica. Em uma substância com alta difusividade térmica, o calor se move rapidamente através dela porque a substância conduz calor rapidamente em relação à sua capacidade volumétrica de calor ou "thermal bulk". Na análise de transferência de calor, difusividade térmica é a condutividade térmica do material dividida pela densidade e o calor específica a pressão constante (eq. 04). Ela mede a taxa de transferência de calor de um material do lado quente para o lado frio, tendo sua unidade no SI dado por m^2/s (VENKANNA, 2010).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais e Equipamentos

4.1.1 Grafeno

O grafeno utilizado foi fornecido pela empresa HEXO GRAPHENE INDUSTRIA QUÍMICA LTDA sob o nome comercial de HP10 Powder. Este material consiste em nanoplacas de grafeno de poucas camadas (denominação do fabricante de GPC) sendo formado um pó preto muito fino com uma composição química de 99,5% de C (m/m), com distribuição de até 10 camadas, tendo uma razão de aspecto elevada (da ordem de até 10^4 m de lateralidade), ou seja, possui uma razão elevada entre as comprimento das nanoplacas em função da espessura de camadas, que implica um material muito fino e muito largo, conforme determinado pelo data sheet do fornecedor (vide Anexo I a ficha técnica do produto). A Figura 21 mostra a embalagem comercial do produto da Hexo HP10, e a Tabela 12 apresenta as propriedades físico-químicas do HP10 Powder.

Figura 21 - Grafeno fornecido pela Hexo Graphene HP10 Powder



Fonte: Hexo Graphene, adaptado e Autor, 2025

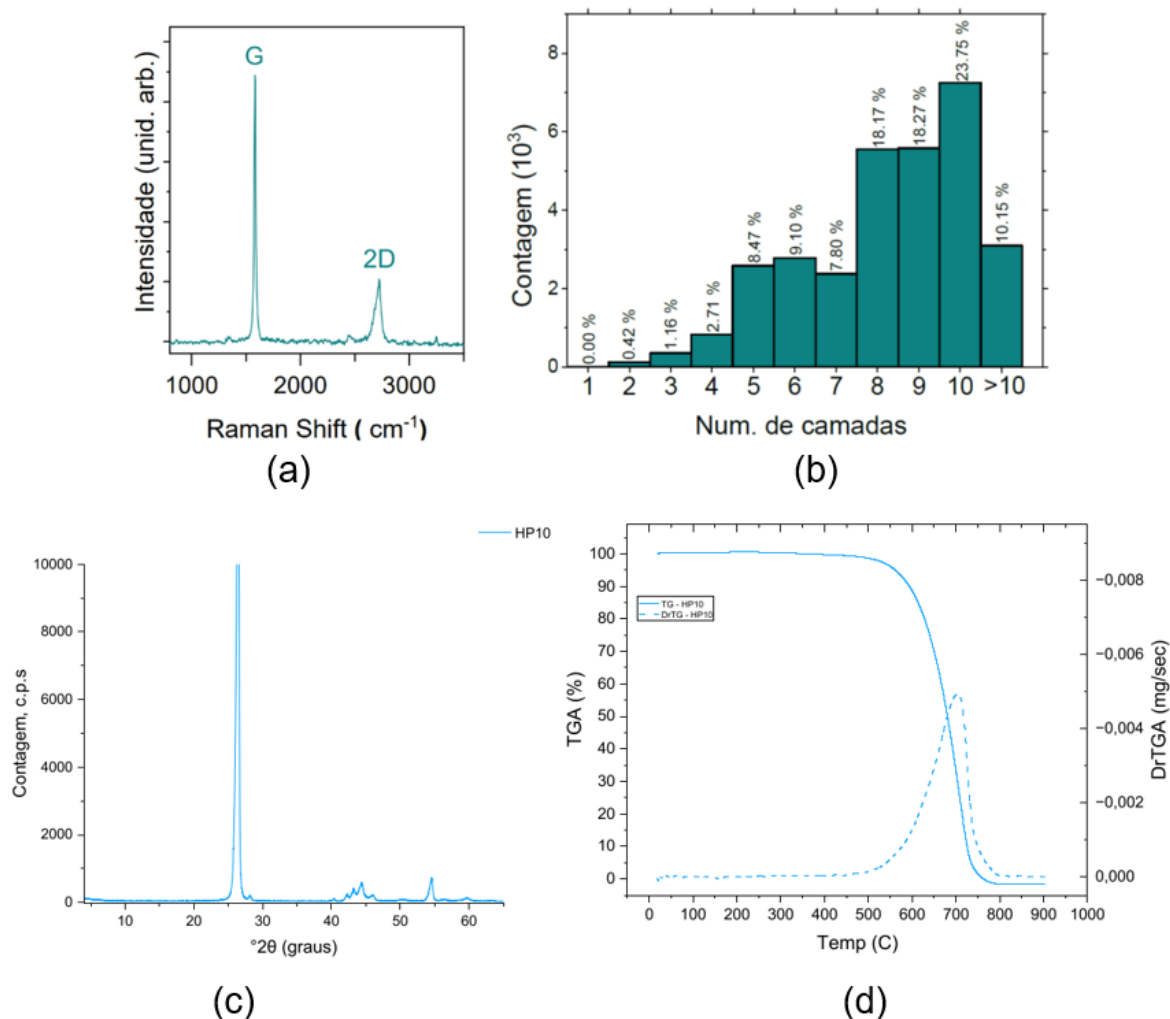
Tabela 12 – Propriedades físico-químicas do Grafeno Phoster HP10 Powder.

Especificação química	Parâmetros	Valor
C	%m/m	99.50
Outros: O, K, Al, S, Ni, Cl, Si, Mg, Fe, Cr	%m/m	0.50
Densidade	g/cm ³	0,17
Número de camadas	-	1 - 10
Diâmetro de partículas máximo	μm	20
Área superficial	m ² /g	64,6

Fonte: Hexo Graphene, 2025, adaptado.

As caracterizações de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e espectroscopia RAMAN são apresentadas na Figura 22 e no Anexo I, conforme fornecido e apresentado no *datasheet* pela empresa Hexo Graphene.

Figura 22 – Caracterizações do grafeno HP10. a) Espectro Raman; b) Histograma do número de camadas; c) Difratoograma de raio X; d) Análise termogravimétrica TGA



Fonte: Hexo Graphene adaptado, 2025

4.1.2 Alumínio SAE 323

O alumínio utilizado na produção das amostras foi adquirido pelo autor de fabricação da empresa Metais Capixaba. Lingotes de alumínio de lote: 235807, ordem 56-D, OPE: 30933129, estação: 112, com um peso bruto total de 14 kg e composição química, mostrados na Figura 23 e na Tabela 13. Conforme certificado de análise enviado pelo fornecedor, é possível afirmar que o material se encontra dentro dos limites especificados pela norma SAE J425 323, classificando o material como alumínio silício.

Figura 23 - Lingotes de alumínio SAE 323



Fonte: Elaboração próprio autor, 2024.

Tabela 13 – Composição Química da liga de Alumínio SAE 323, dados do fabricante e referência normativa SAE 323.

Composição Química		
Elemento (%)	Valor Analisada	Valor Nominal SAE 323
Alumínio	92,3000	89,95 a 93,30
Silício	6,9000	6,50 a 7,50
Ferro	0,2200	máx. 0,60
Cobre	0,0180	máx. 0,25
Manganês	0,1100	máx. 0,35
Magnésio	0,3000	0,20 a 0,45
Cromo	0,0050	máx. 0,05
Níquel	0,0290	máx. 0,05
Zinco	0,0080	máx. 0,35
Estanho	0,0010	máx. 0,05
Titânio	0,0650	máx. 0,25
Chumbo	0,0110	máx. 0,05
Cálcio	0,0008	máx. 0,05
Estrôncio	0,0000	máx. 0,05

Fonte: CAPIXABA, 2024, SAE J245 323, adaptado.

A composição química completa da liga é apresentada na Tabela 13 acima em conjunto com o valor nominal por norma para os principais elementos químicos presentes na liga utilizada no processamento das amostras, para maiores detalhes dos limites de composição são apresentados no Apêndice 2 – Data Sheet Alumínio SAE 323 - Capixaba. Esta liga é indicada para fundição em areia e em coquilha, sendo ideal para componentes que demandam resistência à corrosão, estanqueidade e/ou boa condutividade.

4.1.3 Forno à indução eletromagnética com atmosfera inerte

Para o processamento das amostras, foi utilizado o forno de indução eletromagnética do Laboratório de Combustível Nuclear (LabCoN) do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), marca Leibold-Heraeus, modelo IW-7P, (Figura 24), operado com atmosfera de gás inerte e sob vácuo.

Figura 24 – Forno de indução do CDTN



Fonte: Autor, 2025.

O forno de indução utilizado é largamente empregado na fusão de ligas metálicas, especialmente em processos de produção de ligas alumínio, cobre ou aço, pela sua eficiência energética e pelo controle preciso da temperatura, permitindo o desenvolvimento de ligas com propriedades específicas. O processo de fusão em

forno de indução eletromagnética ocorre por meio da indução de correntes elétricas alternadas em uma bobina, e geram um campo magnético variável. Esse campo induz correntes parasitas (correntes de *Foucault*) diretamente na carga metálica contida no cadinho, resultando em aquecimento por efeito Joule. Dessa forma, o calor é gerado internamente no material metálico, promovendo sua fusão de maneira eficiente e controlada, promovendo sua fusão de forma rápida e eficiente (em atmosfera inerte ou vácuo), com menor risco de contaminação, resultando em peças de alta qualidade.

Para produzir o vácuo, este forno tem adaptado a ele uma bomba de difusão, marca Heraeus, modelo DI 1000, com capacidade de bombeamento de 1000 l/s, e uma bomba de vácuo mecânica de duplo estágio marca Heraeus, modelo DK 25, com capacidade de bombeamento de 25 m³/h.

Este forno do laboratório de fusão tem incorporado a ele uma fonte universal, marca EMA, modelo MFAS 50, projetada para operações de aquecimento indutivo, com uma saída de 50 kW de potência. Esta fonte contém um gerador de média frequência 4,8 kHz, um banco de capacitores em paralelo com o gerador para compensação da potência de saída, uma unidade para excitar o gerador e um painel de instrumentação e controle. Para a sua operação é necessária uma tensão de 220 V e um sistema de refrigeração para retirar o calor produzido no gerador, nos capacitores, barramento de ligação, e na bobina de trabalho que fica dentro da câmara do forno.

4.1.3.1 Cadinhos e suporte de sustentação (acessórios)

A Figura 25 apresenta os principais componentes em grafite utilizados em processos de fundição por indução. As formas típicas desses dispositivos, evidenciando suas características construtivas e aplicações práticas.

Figura 25 – Cadinho, lingoteira e lança em grafite.

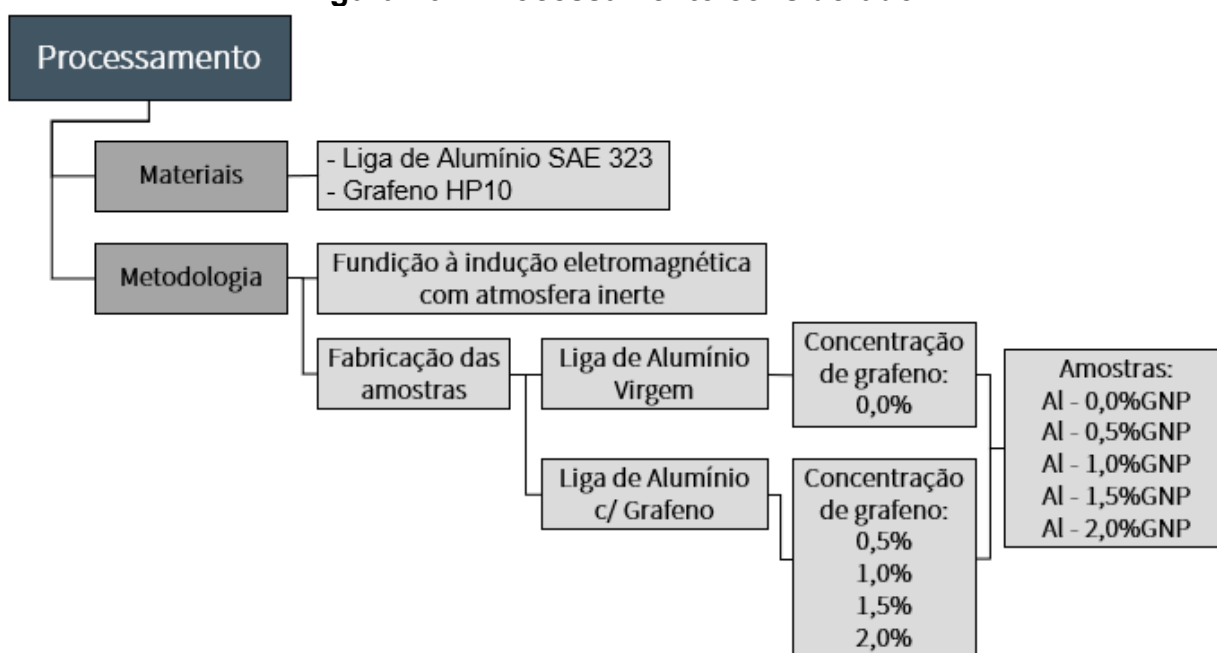


Fonte: Autor, 2025.

O cadinho, a lingoteira e a lança, desempenham funções essenciais na fusão e asseguram a adequada conformação e solidificação do lingote, otimizando o processo e a qualidade desses lingotes. Sendo o cadinho responsável pela contenção e aquecimento do metal, a lingoteira pelo molde e solidificação dos lingotes, e a lança por verter o metal líquido na lingoteira. A escolha do grafite como material base para esses componentes se justifica por suas propriedades excepcionais, como alta resistência térmica, baixa reatividade química com o alumínio e excelente condutividade, que contribuem para a eficiência do processo e a qualidade do produto final.

4.2 Procedimento experimental

Na Figura 26 é apresentado um fluxograma do processamento realizado para obtenção dos corpos de prova com e sem o grafeno (GNP).

Figura 26 – Processamento considerado

Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

As proporções utilizadas neste estudo foram escolhidas com base em trabalho correlato que empregou o mesmo material, porém processado em forno elétrico (COURA, 2021).

Para investigar a eficácia do grafeno como reforço em uma matriz de alumínio, 4 lingotes, 1 para cada concentração de grafeno de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% m/m foram processadas em forno de indução, inicialmente duplicatas foram realizadas a fim de confirmar a repetibilidade do processo. Como amostra controle, também foi preparado um 1 lingote sem a adição de reforços (sem GNP), chamado de liga virgem, para comparar as propriedades do material com reforço, ou seja, 0,0% de grafeno, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Balanço de massa utilizado na produção dos lingotes.

Corrida	Alumínio		Grafeno		Lingote
	Massa (g)	Peso (%)	Massa (g)	Peso (%)	Massa (g)
Al – 0,0%GNP Controle	235,76	100,0%	0,00	0,0%	235,76
Al – 0,5%GNP	234,58	99,5%	1,18	0,5%	235,76
Al – 1,0%GNP	233,40	99,0%	2,36	1,0%	235,76
Al – 1,5%GNP	232,22	98,5%	3,54	1,5%	235,76
Al – 2,0%GNP	231,04	98,0%	4,72	2,0%	235,76

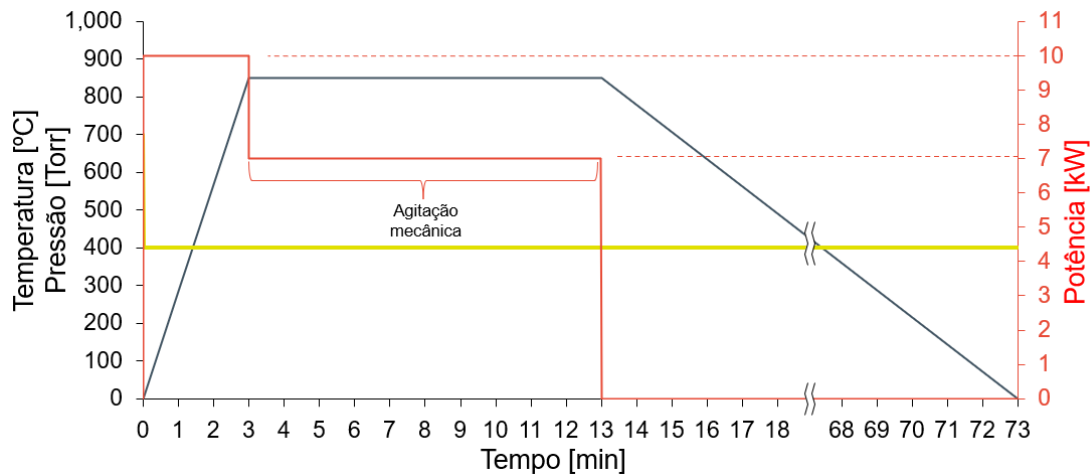
Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

A massa total dos lingotes foi fixada em 235,76 g seguiu em função da limitação de volume da lingoteira. Para cada corrida um lingote foi produzido com diferente concentração. O primeiro procedimento para o processamento dos materiais foi a pesagem do alumínio e grafeno, uma balança analítica calibrada de precisão digital com 2 (duas casas decimais) da BEL Engineering. Foram usadas massas distintas para alumínio e grafeno que contabilizou de acordo com as diferentes concentrações do planejamento experimental conforme a tabela 13. O alumínio foi cortado em tamanhos prismáticos de acordo com o espaço disponível no interior do cadinho otimizando o seu carregamento e o balanço de massa, seguida da fusão em atmosfera com gás inerte de argônio (Ar).

Devido ao fato do forno ser fechado hermeticamente, não foi realizado preparação de pré-banho de fundição durante os testes. Considerando apenas a adição em conjunta da liga de Al e GNP, observou-se que essa abordagem não foi suficiente para evitar a aglomeração do grafeno. Contudo, um dispositivo de agitação manual foi aprimorado e acoplado ao forno a fim de propiciar uma mistura mecânica manual do banho de Al-GNP, buscando melhorar a dispersão do GNP na fase fundida do Al e evitando a aglomeração do GNP. Para tal ao ciclo de fusão foi acrescentado esta agitação mecânica, o ciclo de fundição é apresentado na Figura 27. O processamento para a fundição seguiu com a adição do material previamente pesado dentro do cadinho, foi estabelecido com purgas a vácuo seguida da injeção do gás inerte (argônio ultrapuro, pureza 5.0) a uma pressão de enchimento de 10 a 15 kgf/cm², até a pressão de 700 Torr (0,09 MPA ou 0,92 atm), e após 3 purgas a pressão de argônio foi estabilizada finalmente em 40 Torr. Este procedimento foi realizado para a eliminação do oxigênio e utilizar esta atmosfera inerte para a fusão. Inicialmente, o forno de indução eletromagnética foi configurado para operar com potência reativa de 10kW, mantendo essa condição por um período de 3 min com corrente e tensão de acordo com acoplamento de impedância da carga e o fator de potência corrigido por bancos de esteatores, em que pela experiência de operação do técnico do LabCoN com estas ligas de Al, estimasse uma temperatura de aproximadamente 850 °C, por meio de uma janela de vidro em que pode observar e controlar a fundição do alumínio. Após a fundição da carga metálica de Al, a potência do forno foi reduzida para 7kW a fim de se manter a temperatura do fundido aproximadamente 850 °C, em que por 10

min foi realizada a agitação mecânica por meio do dispositivo acoplado internamente ao forno com uma agitação de 30 RPM.

Figura 27 – Ciclo de operação, fusão e agitação para obtenção dos lingotes com resfriamento ao forno.



Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

Após esse período foi realizado o vazamento na lingoteira que está dentro do forno e que permaneceu com o material internamente por aproximadamente 60min até ser retirado para a temperatura ambiente. Não houve a realização de um tratamento térmico a fim de melhorar os contornos de grãos ou aumento de resistência. Os lingotes das 5 corridas são apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Aspectos dos lingotes após a retirada do forno.

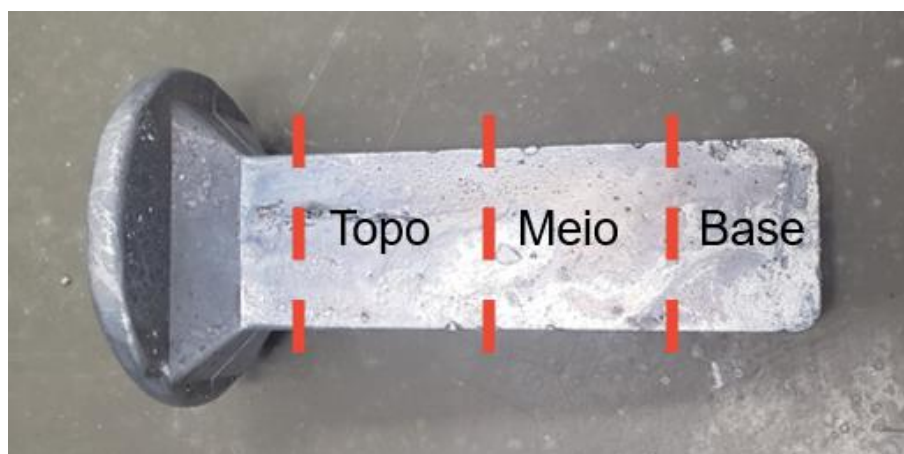


Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

A Figura acima mostra o resultado do processo de fundição de alumínio, com lingotes já solidificados, uma lingoteira contendo alumínio no estado sólido e uma vista de cima de um dos lingotes. Pode-se perceber as condições de conformação do metal, do vazamento à solidificação dos lingotes.

Na Figura 29 é possível identifica as regiões onde foram retiradas amostras em quintuplicatas totalizando 15 amostras por cada nanocompósito.

Figura 29 – Identificação das 3 regiões de amostragens dos nanocompósitos.

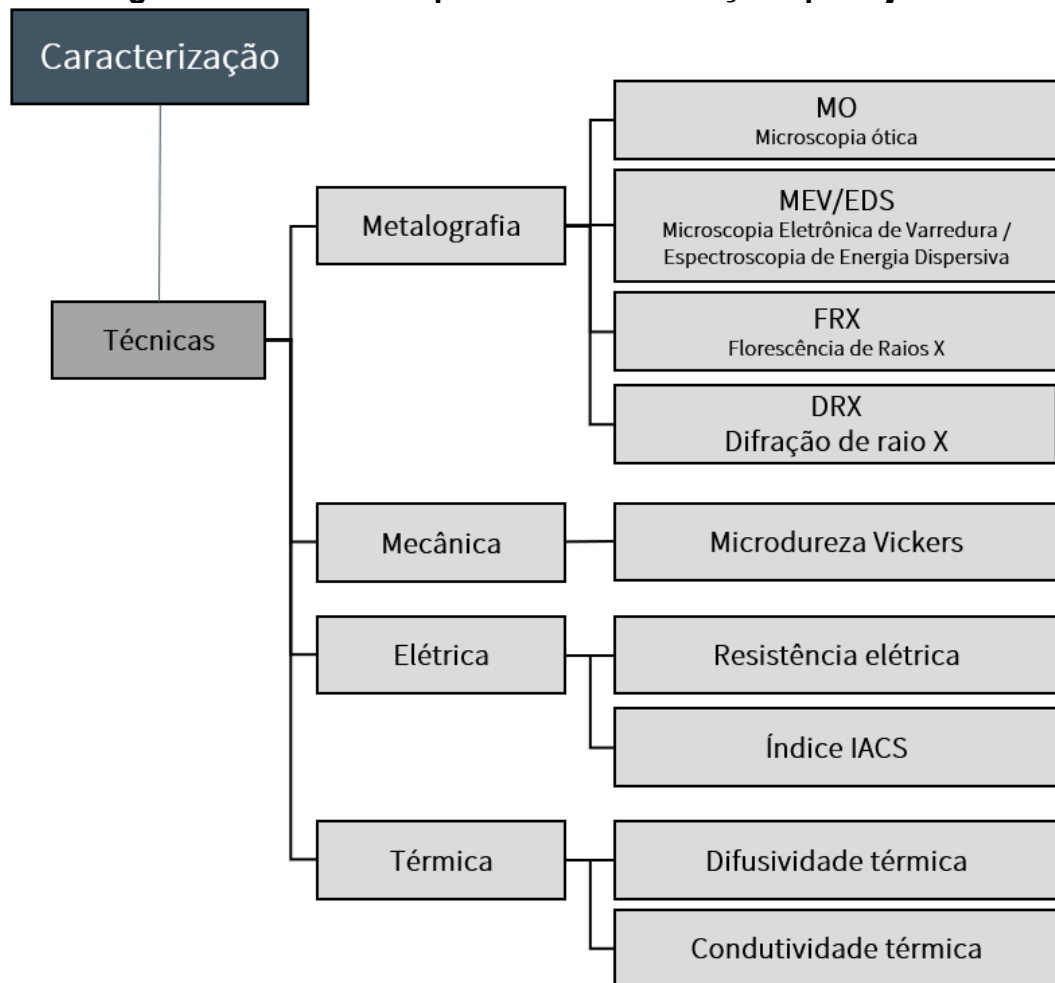


Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

Foram seccionadas amostras das regiões da base, meio e topo dos lingotes, de acordo com o número de amostras prevista para as caracterizações dessas amostras.

A partir da obtenção dos lingotes nas concentrações 0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% m/m de GNP sobre a liga SAE J425 323 foram confeccionadas amostras em quintuplicatas e réplicas por seccionamentos dos lingotes para as caracterizações físico-químicas e levantamento propriedades físicas das amostras por meio das médias e desvio padrão, conforme apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Amostras para as caracterizações planejadas



Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

Os detalhamentos e os parâmetros considerados para cada técnica são apresentados a seguir.

4.3 Técnicas de Caracterização

4.3.1 Metalografia

Para ensaios de metalografia, as amostras foram cortadas transversalmente e embutidas em moldes de silicone de diâmetro específico, com resina epóxi termo endurecível, que apresenta baixa contração e boa aderência. Em seguida ao embutimento, as amostras foram lixadas manualmente utilizando lixas 120, 240, 400, 600, 1200 e 2000 mesh. Foi efetuado polimento manual por meio de panos com diamante policristalino em suspensão de 9µm e 3µm, e por fim, polimento com sílica

coloidal de $0,05\mu\text{m}$, até que a superfície apresentasse aspecto de espelhada (Figura 31).

Figura 31 – Amostras embutidas da Liga SAE 323.



Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

A figura acima apresenta cinco amostras com diferente concentração com as regiões base, médio e topo do lingote.

4.3.2 Microscopia óptica (MO)

Para a obtenção das micrografias por meio do microscópio óptico foi utilizado o microscópio óptico do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG de marca Fortel, Modelo Kontrol MI713 gerando ampliações de 100x, 200x, 400x e 800x.

4.3.3 Microscopia eletrônica por Varredura (MEV) e Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X (EDS)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para verificar a topografia (microestrutura do material) de caracterização das micrografias por meio de imagens de alta resolução da superfície das amostras, a fim de identificar as morfologias dos principais constituintes microestruturais e suas distribuições por meio do EDS, e verificar a análise química das fases das amostras. MEV utilizado foi o modelo JEOL JSM-IT300, com ampliações de 500x e 1200x e aceleração de voltagem de 30kV da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC-MG.

4.3.4 Difração de Raios X (DRX)

A técnica de DRX foi utilizado com o objetivo de determinar as estruturas cristalinas nas amostras além de identificar a presença dos materiais carbonáceos

presente nos materiais. Foi utilizado o difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD 7000 do CEFET-MG. O difratômetro foi operado com radiação de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$), tensão de 30kV e corrente de 30mA. Os dados da curva DRX foram coletados em intervalos de varredura de 4 a 850 com passo de 0,020 a cada 40s a uma velocidade de 20 por minuto, filtro de Ni. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente. As difrações obtidas foram comparadas com a base de dados ICDD (International Center for Diffraction Data) para identificação das fases.

4.3.5 Microdureza Vickers

Para a análise das propriedades mecânicas dos nanocompósitos e da liga de referência, foram realizadas medições de microdureza Vickers. Os ensaios foram conduzidos no laboratório de metalografia do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, utilizando o Microdurômetro SHIMADZU HMV-2T. Em cada uma das regiões amostradas — topo, meio e base — foram efetuadas três microidentações. Os parâmetros adotados incluíram uma carga de 0,05 Kgf (50 gramas) e um tempo de aplicação de 15 segundos. As diagonais das marcas de indentação foram medidas manualmente com o auxílio de uma objetiva de 40x,

A microdureza Vickers foi realizada em tréplicas em três posições do lingote, base, meio e topo para as duas fases, Al- α e Al-Si.

4.3.6 Resistência elétrica

A resistividade do material foi determinada por meio da medição da resistência elétrica das amostras utilizando micro-ohmímetro e Ponte Kelvin Digital 10A modelo: Microhm 10I do fabricante de marca INSTRUM, de propriedade interna. A Figura 32 apresenta o Micro-ohmímetro.

Figura 32 - Micro-ohmímetro e Ponte Kelvin Digital.



Fonte: Fabricante Instrum, 2024, adaptado.

O instrumento utiliza o método de Kelvin para medição, faz leitura direta de baixas resistências com alcance entre 1 micro-ohms até 200 ohms e correntes de 1mA até 10A. Para resistências entre 0,001 a 1.999 miliohms, a resolução é de 1 microhms com corrente de medição de 10^8 . Este instrumento é composto por um medidor de corrente interno, ligado por meio de cabos a um material com resistência conhecida em uma das extremidades, e na outra extremidade dos cabos, possui dois grampos com conectores pré-dispostos para ligação no material a ser testado. Por meio da circulação de uma pequena tensão aplicada no circuito, é possível medir a resistência do material a ser testado pelo princípio da proporcionalidade.

Foi considerado triplicata para cada amostra, considerando as concentrações 0,0% liga virgem, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% nas 3 regiões, base, meio e topo, sendo um total de 15 amostras, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Amostras para Medidas de Resistividade.



Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

Conforme o procedimento adotado para todas as amostras, a leitura da resistência foi considerada válida apenas após 15 segundos, período estipulado para a estabilização do valor medido. De posse das resistências e das medidas geométricas de cada amostra foi calculado a resistividade do material de cada.

4.3.7 Difusividade térmica

A condutividade térmica é essencial no design de materiais em liga metálica, pois uma boa gestão do calor garante desempenho eficiente e maior durabilidade. Com o avanço da tecnologia, o desenvolvimento de materiais com melhores propriedades térmicas e novas técnicas de dissipação continua sendo um foco central na engenharia térmica (UGARTECHE, 2015).

A difusividade térmica foi determinada utilizando o método do Quadrupolo Térmico (Degiovanni, et al., 2000) (Degiovanni, 1997) na temperatura ambiente. Esse método baseia-se na solução da equação geral de difusão de calor cuja resolução é aproximada pelo método dos mínimos quadrados, conduzindo assim à determinação

da difusividade térmica em toda a duração do termograma. Foi utilizado o difusímetro QuadruFlash 1200, com incerteza de $\pm 7,5\%$, marca Protolab, do Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas (LMPT/CDTN). Este difusímetro consiste em uma lâmpada de xenônio de 1200 J responsável pelo pulso de energia, um detector de infravermelho para medição de temperatura, um forno e uma unidade de aquisição e de tratamento do sinal elétrico. Todas as amostras possuíram $\varnothing 12\text{mm} \times 2,0\text{mm}$ de espessura e foram recobertas com uma fina camada de tinta preta (grafite coloidal) em ambas as faces para melhorar a emissividade e absorção uniforme de calor. As amostras foram ensaiadas sob condições de reprodutibilidade. Para garantir a validade dos resultados, foi utilizado uma amostra de referência de alumínio antes do início dos ensaios.

A Figura 34 apresenta as amostras elaboradas para o ensaio de difusividade térmica.

Figura 34 – Amostras para o difusímetro QuadruFlash 1200.



Fonte: Elaboração próprio autor, 2025.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

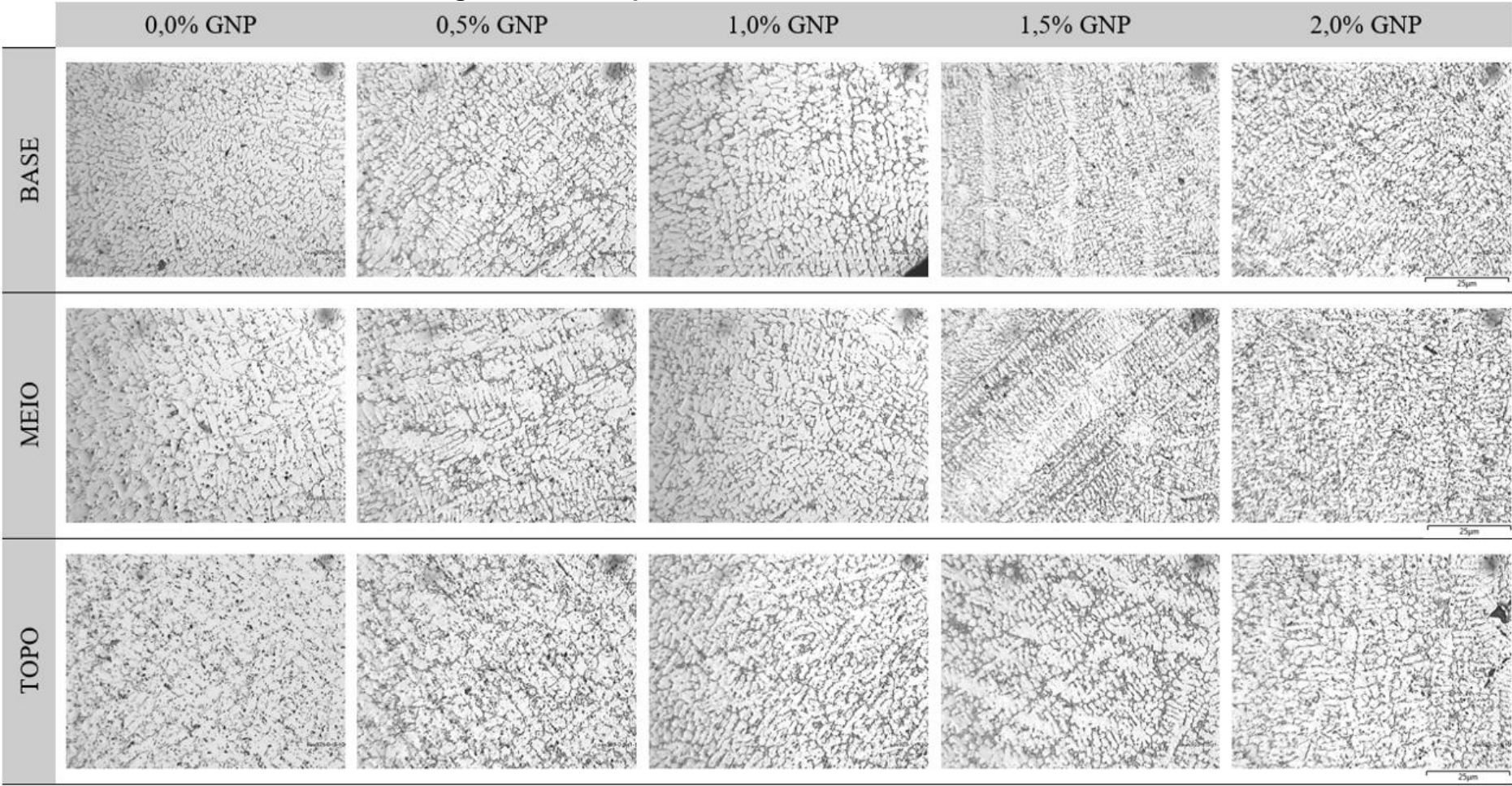
Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos a partir dos procedimentos descritos na metodologia. As análises foram conduzidas com base nas amostras produzidas e submetidas aos ensaios, considerando diferentes concentrações de reforço com grafeno: 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%, além da amostra de referência, sem adição do material reforçador (amostra virgem).

5.1 Metalografia

5.1.1 Microscopia ótica

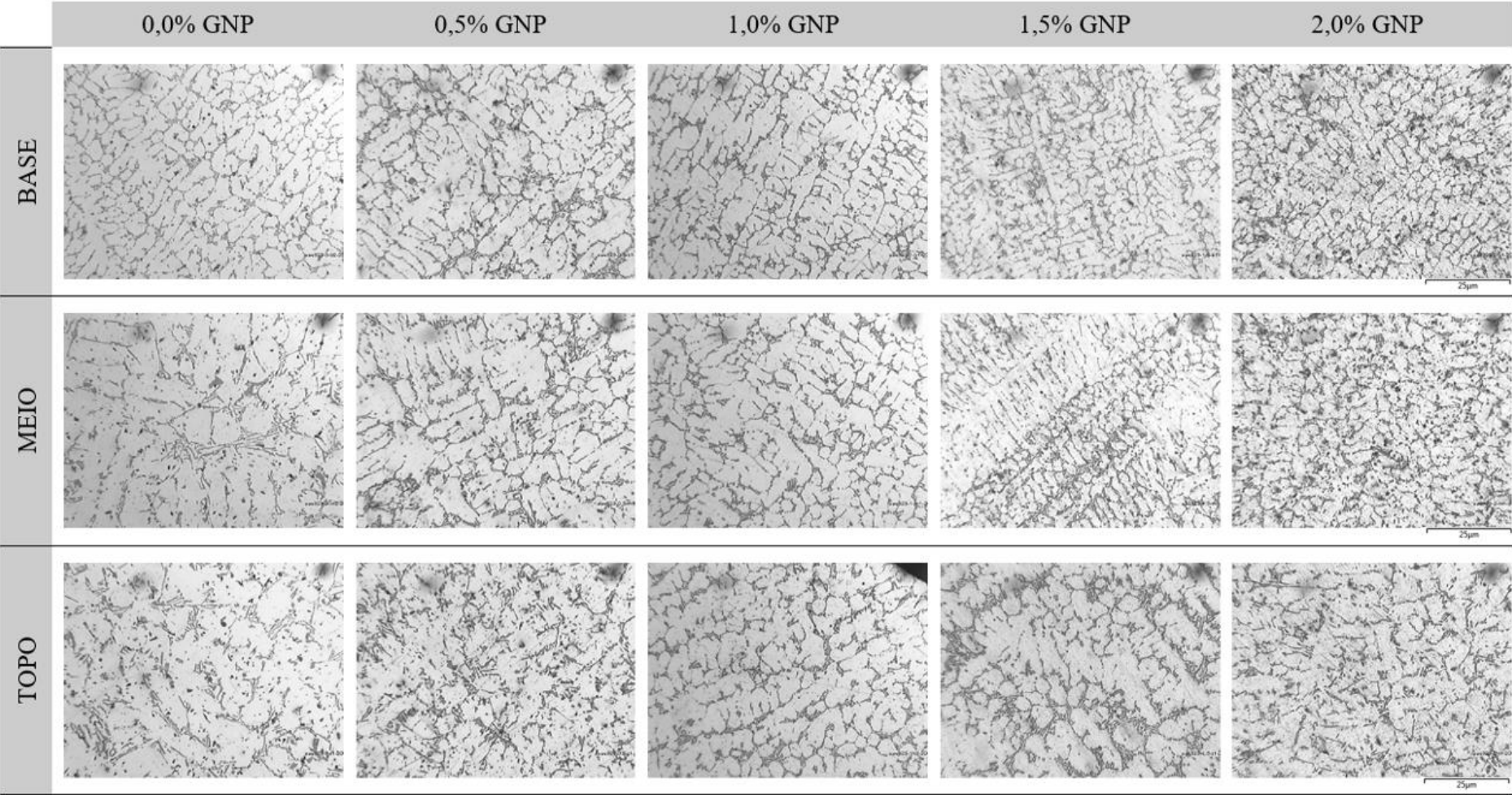
A Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38 apresenta as micrografias obtidas por Microscópio Óptico (MO) do DEMAT/CEFET para as amostras de alumínio, incluindo a amostra de controle (sem adição de grafeno) e aquelas reforçadas com grafeno nas concentrações de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. As imagens foram registradas nas regiões base, meio e topo de cada amostra, com ampliações de 100x, 200x, 400x e 800x, permitindo uma análise comparativa da morfologia superficial em diferentes condições de composição e localização. A amostra de controle corresponde ao alumínio fundido sem adição de reforço, servindo como referência para avaliação dos efeitos da incorporação de grafeno.

Figura 35 – Compósito SAE 323 com Grafeno – 100x.



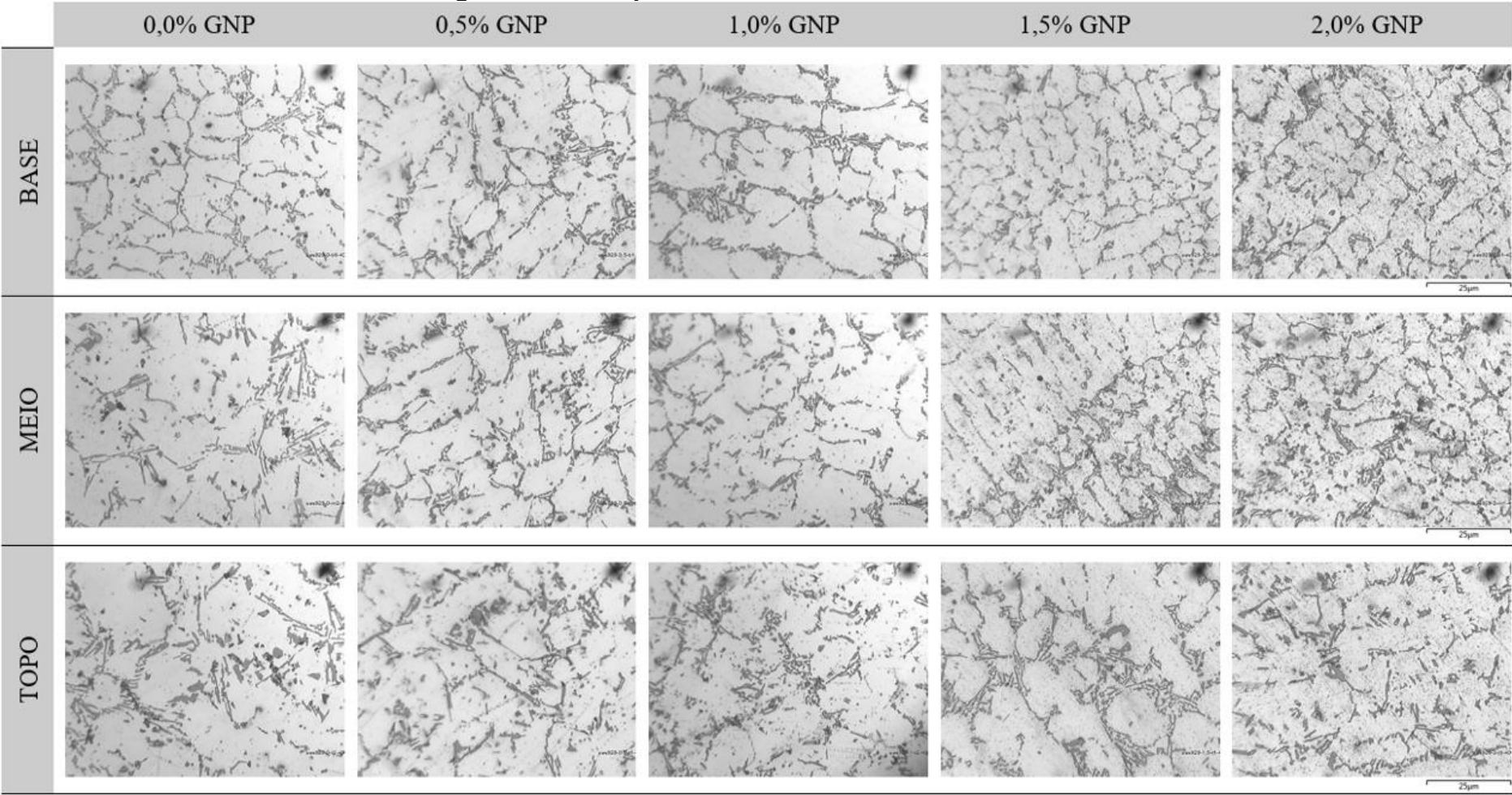
Fonte: CEFET, 2025.

Figura 36 – Compósito SAE 323 com Grafeno – 200x.



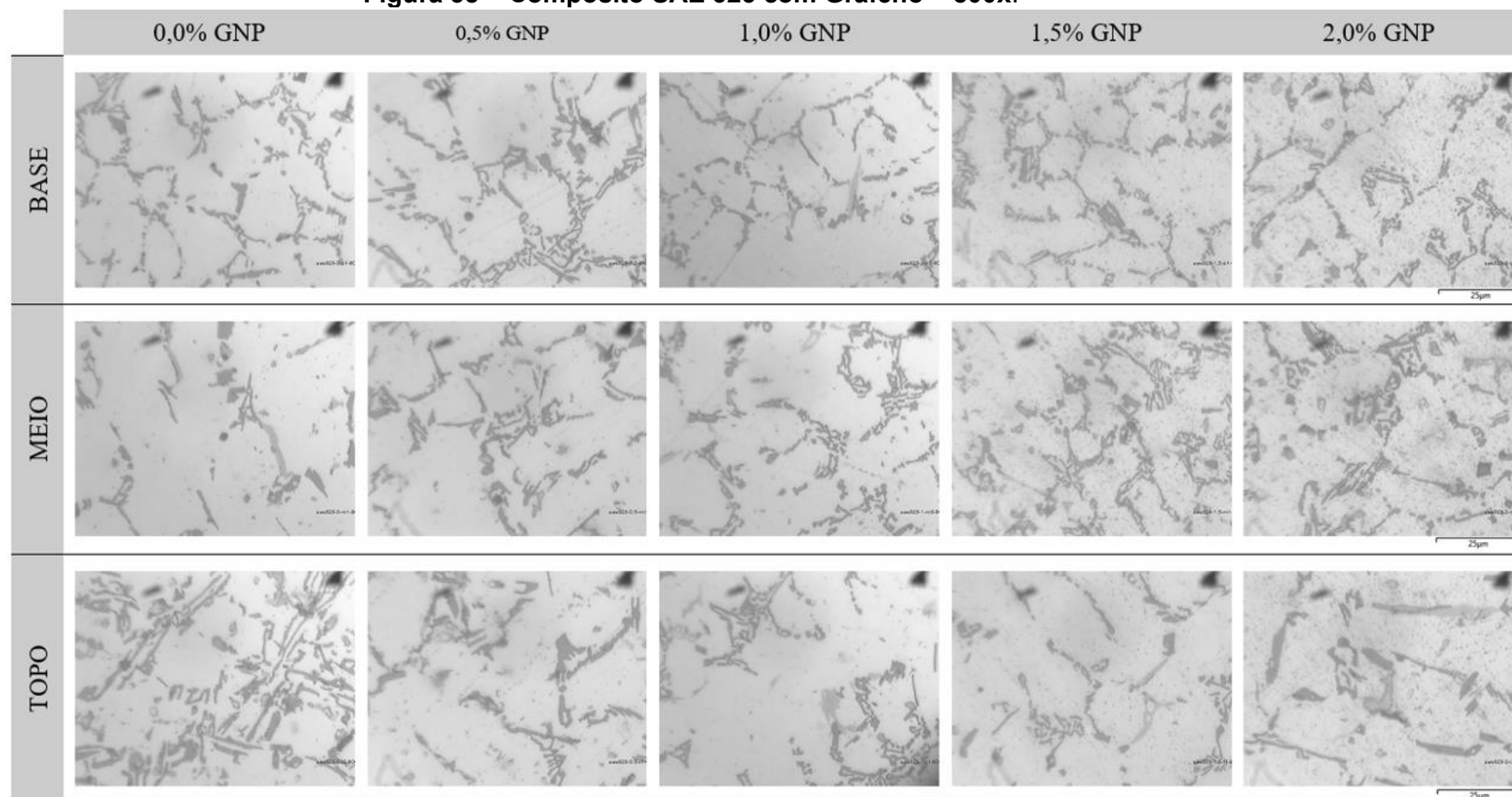
Fonte: CEFET, 2025.

Figura 37 – Compósito SAE 323 com Grafeno – 400x.



Fonte: CEFET, 2025.

Figura 38 – Compósito SAE 323 com Grafeno – 800x.



Fonte: CEFET, 2025.

As micrografias apresentam marcas recorrentes na região superior das imagens, possivelmente relacionadas a pequenas impurezas ou manchas na lente do sistema óptico utilizado.

As micrografias das amostras de controle e com adição de grafeno permitem observar que:

- para 0,0% GNP: A estrutura da matriz de alumínio sem adição de grafeno apresentou-se homogênea em todas as regiões e ampliações, com grãos bem definidos e baixa porosidade. Essa condição serviu como referência para avaliar os efeitos da adição do reforço.
- para 0,5% GNP: Observou-se boa dispersão do grafeno, especialmente nas regiões meio e base. A morfologia permaneceu relativamente uniforme, com poucas aglomerações visíveis, mesmo nas maiores ampliações.
- para 1,0% GNP: A presença de aglomerados começou a se tornar mais evidente, principalmente nas regiões topo e base. A porosidade aumentou levemente, e a distribuição do grafeno tornou-se menos homogênea, com formação de microdefeitos visíveis nas ampliações de 400x e 800x.
- para 1,5% GNP: Aglomerações mais pronunciadas foram observadas em todas as regiões, com destaque para a topo, em que a segregação do grafeno foi mais intensa. A matriz apresentou falhas de coesão e aumento da porosidade, indicando limitação na capacidade de dispersão do reforço.
- para 2,0% GNP: A saturação do grafeno resultou em severa aglomeração e formação de clusters, especialmente nas regiões topo e meio. A estrutura tornou-se desorganizada, com poros interconectados e perda de homogeneidade. As imagens em 800x revelaram falhas estruturais significativas, comprometendo a integridade do compósito.

Considerando uma comparação entre Regiões, observa-se que:

- base: Apresentou melhor dispersão do grafeno nas concentrações mais baixas, mas também foi a primeira a evidenciar aglomerações em concentrações mais altas.
- meio: Mostrou comportamento intermediário, com boa distribuição até 1,0% GNP, mas com aumento de porosidade a partir de 1,5%.

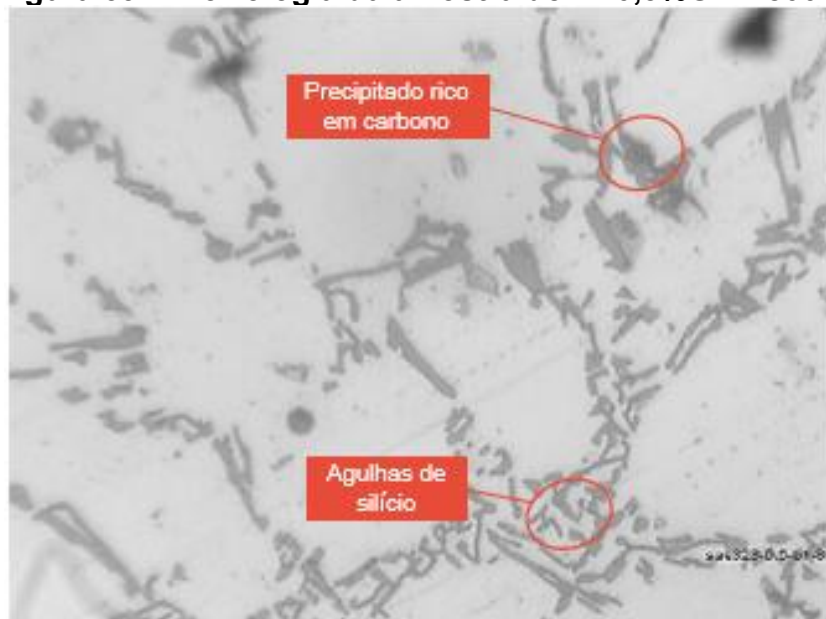
- topo: Foi a região mais sensível à segregação do grafeno, apresentando maior concentração de aglomerados e porosidade em todas as composições acima de 0,5%.

Considerando a influência da ampliação, observa-se que:

- 100x e 200x: Permitiram a visualização geral da morfologia e distribuição do reforço.
- 400x: Evidenciaram a formação de aglomerados e microdefeitos com maior clareza.
- 800x: Revelaram detalhes da interface matriz-reforço, porosidade interconectada e falhas de coesão, especialmente nas amostras com 1,5% e 2,0% de GNP.

A Figura 39 e Figura 40 das microestruturas obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras de alumínio com ampliação de 800x é possível observar uma matriz clara rica em alumínio (fase α) com regiões escuras dispersas, provavelmente fases ricas em silício ou intermetálicos (fase β). A morfologia da fase eutética (Si) é característica das ligas SAE 323, em que o silício se apresenta em forma de partículas alongadas ou arredondadas. As regiões escuras indicam a presença de silício eutético ou compostos intermetálicos como Mg_2Si , $AlFeSi$ etc.

Figura 39 – Morfologia da amostra de Al-0,5%GNP 800x.



Fonte: Próprio autor, 2025

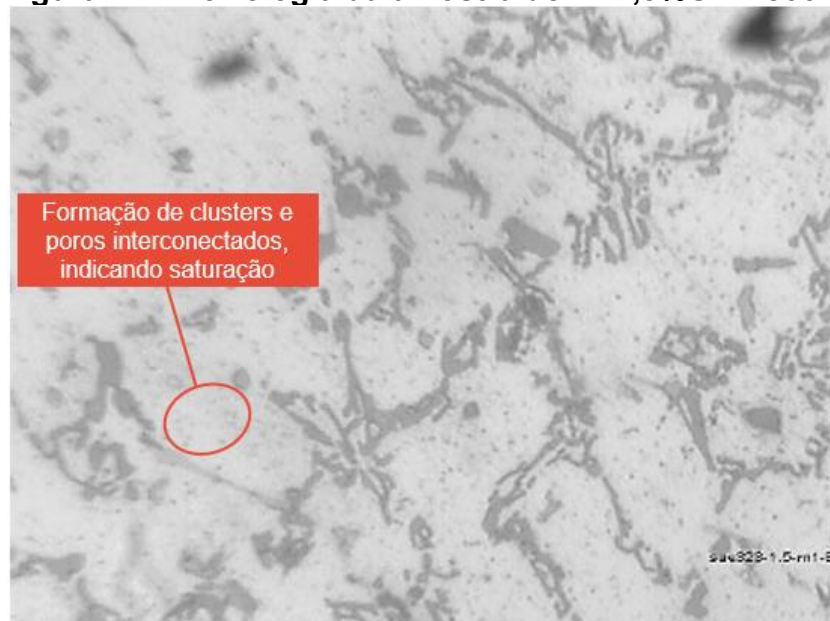
Figura 40 – Morfologia da amostra de Al-1,0%GNP 800x.



Fonte: Próprio autor, 2025

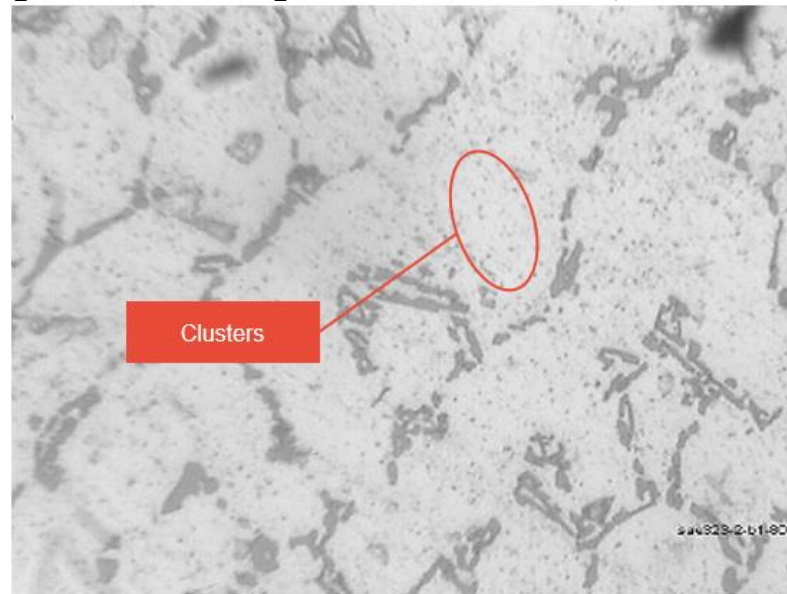
A Figura 41 e Figura 42 apresenta a formação de clusters e possíveis poros interconectados, indicando saturação.

Figura 41 - Morfologia da amostra de Al-1,5%GNP 800x.



Fonte: Próprio autor, 2025

Figura 42 - Morfologia da amostra de Al-2,0%GNP 800x.



Fonte: Próprio autor, 2025

A Figura 41 e Figura 42 acima são dados destaque as agulhas de alumínio-silício (fase β) numa matriz de alumínio (fase α) e o precipitado rico em carbono (estrutura peritética). As microestruturas dos nanocompósitos observadas por MO e no MEV caracterizam-se por uma estrutura possivelmente peritética, referente a solidificação de uma liga metálica (Al α e β) com presença de uma fase sólida (GNP). Essas estruturas são formadas a partir da reação entre um líquido e uma fase sólida, resultando em uma nova fase sólida, e.g. sistema peritético Al_4C . As microestruturas podem variar dependendo da razão entre o gradiente térmico e a velocidade de solidificação, e podem incluir frentes planos, células, bandas e estruturas tipo eutéticas.

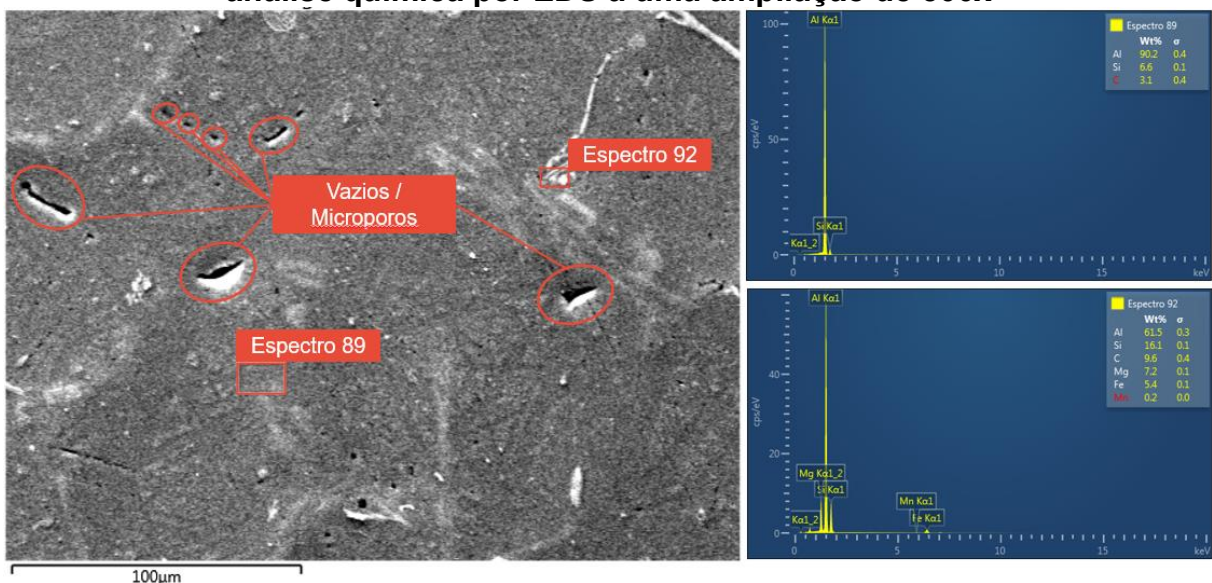
5.1.1 Microscopia eletrônica por varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X com energia dispersiva (EDS)

Foi realizado o ensaio de espectroscopia por energia dispersa com o objetivo de determinar de forma qualitativa a composição química das microestruturas em algumas regiões específicas.

É apresentada na Figura 43, a morfologia da amostra de alumínio de controle (amostra virgem) e os valores nas regiões analisadas. A microestrutura com

ampliação de 500x é possível observar uma matriz escura/cinza rica em alumínio com regiões claras dispersas, possíveis fases ricas em silício ou intermetálicos. A morfologia da fase eutética (Si) é característica das ligas SAE 323, em que o silício se apresenta em forma de partículas alongadas ou arredondadas. Nas regiões claras indicam a presença de silício eutético ou compostos intermetálicos como Mg_2Si , $AlFeSi$ etc. Há presença de vazios / microporos e ausência de trincas visíveis na ampliação de 500x.

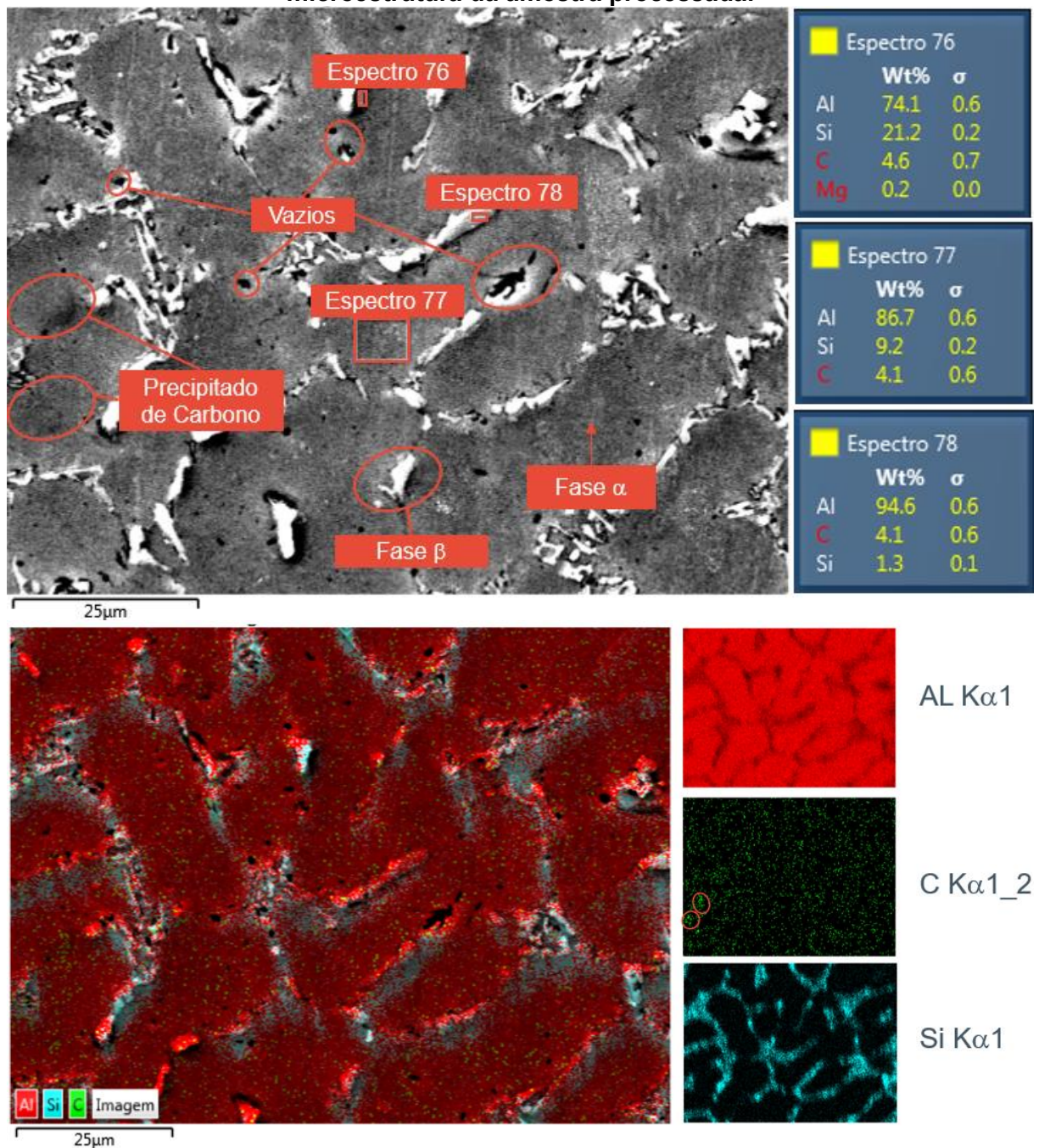
Figura 43 - Morfologia do alumínio de controle (Alumínio virgem) e regiões de análise química por EDS a uma ampliação de 500x



Fonte: Próprio autor, 2025

Da mesma maneira, procedeu o ensaio para a amostra de alumínio com 1% de grafeno, Figura 44. É apresentada a ampliação de 1200x, os valores nas regiões analisadas e de forma qualitativa as principais composições em camadas da microestrutura da amostra. Pode-se observar com maior definição os detalhes da matriz metálica e das fases secundárias. A região mais uniforme e cinza e contínua formando a matriz da liga. As partículas mais claras aparecem em formatos irregulares, alongadas ou aciculares, indicativas de silício eutético e distribuídas entre os grãos de alumínio, e há regiões de contraste mais intenso que podem representar o grafeno disperso ou intermetálicos densos como Mg_2Si ou $AlFeSi$, comuns nestas ligas. Há presença de vazios / microporos e ausência de trincas visíveis na ampliação de 1200x.

Figura 44 – Ampliação de 1200x – a) Morfologia do alumínio com 1,0% de grafeno e regiões de análise química por EDS, b) EDS em camadas da microestrutura da amostra processada.

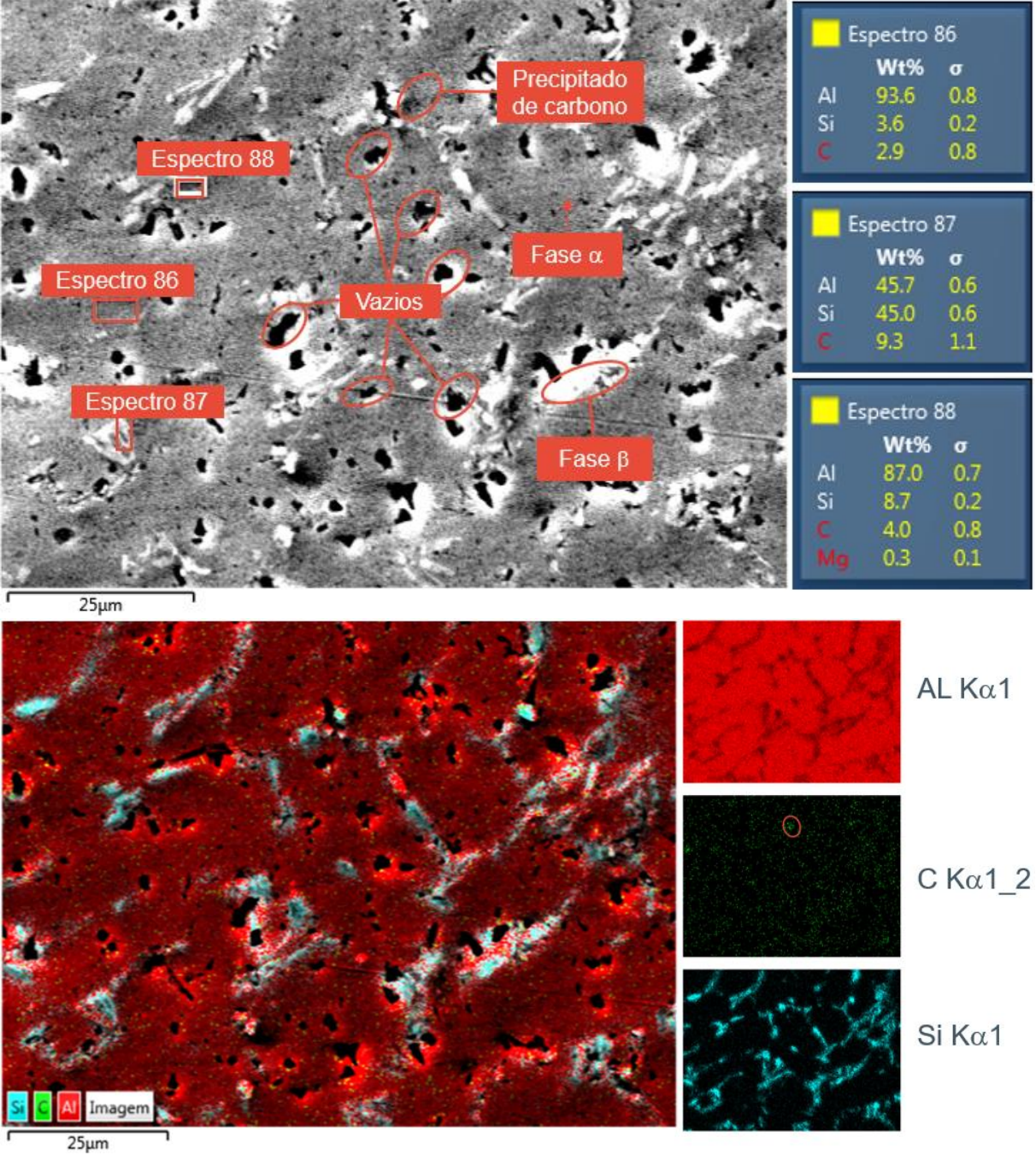


Fonte: Próprio autor, 2025

Por fim, a amostra de alumínio com 1.5% de grafeno, é apresentada Figura 45. Na ampliação de 1200x, os valores nas regiões analisadas e de forma qualitativa as principais composições em camadas da microestrutura da amostra. Pode-se observar também uma definição aos detalhes da matriz metálica e das fases secundárias. A região mais uniforme e cinza e contínua formando a matriz da liga. As partículas mais

claras aparecem em formatos irregulares, alongadas ou aciculares, indicativas de silício eutético e distribuídas entre os grãos de alumínio, e há regiões de contraste mais intenso que podem representar o grafeno disperso ou intermetálicos densos como Mg_2Si ou $AlFeSi$, comuns nestas ligas. Há presença de vazios / microporos mais dispersos e ausência de trincas visíveis na ampliação de 1200x.

Figura 45 – Ampliação de 1200x - a) Morfologia do alumínio com 1,5% de grafeno e regiões de análise química por EDS, b) EDS em camadas da microestrutura da amostra processada.



Fonte: Próprio autor, 2025

Os resumos das concentrações dos principais elementos químicos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Concentração de principais elementos químicos encontrados nas amostras processadas com 0,0%, 1,0% e 1,5% de grafeno.

Amostra	Região analisada	% Carbono (C)	% Alumínio (Al)	% Silício (Si)	% Magnésio (Mg)
Al – 0,0%GNP	Espectro 89	3,1	90,2	6,6	-
Al – 0,0%GNP	Espectro 92	9,6	61,5	16,1	7,2
Al – 1,0%GNP	Espectro 76	4,6	74,1	21,2	0,2
Al – 1,0%GNP	Espectro 77	4,1	86,7	9,2	-
Al – 1,0%GNP	Espectro 76	4,1	94,6	1,3	-
Al - 1,5%GNP	Espectro 86	2,9	93,6	3,6	-
Al - 1,5%GNP	Espectro 87	9,3	45,7	45,0	-
Al - 1,5%GNP	Espectro 88	4,0	87,0	8,7	0,3

Fonte: Próprio autor, 2025.

Com base nos dados apresentados na tabela anterior, observa-se que a amostra controle apresentou presença de carbono em ambos os espectros analisados. O material utilizado para o estudo por EDS foi empregado conforme fornecido pelo fabricante, com o propósito de calibração. Conforme indicado no Apêndice 2 – Data Sheet Alumínio SAE 323 - Capixaba, esse material não possui carbono em sua composição. Portanto, entende-se que o valor detectado é de natureza qualitativa, uma vez que a técnica apresenta limitações na identificação de elementos leves, ou seja, baixo número atômico, resultando em baixa precisão. Entretanto é confirmado a presença significativa dos principais elementos de ligas apresentados nas Figura 43, Figura 44 e Figura 45 como, silício, magnésio entre outros, confirmando os dados do fabricante apresentado na Tabela 16 para conferência.

Tabela 16 – Composição Química da liga de Alumínio SAE 323, dados do fabricante e referência normativa SAE 323.

Composição Química		
Elemento (%)	Valor Analisada	Valor Nominal SAE 323
Alumínio	92,3000	89,95 a 93,30
Silício	6,9000	6,50 a 7,50
Ferro	0,2200	máx. 0,60
Cobre	0,0180	máx. 0,25
Manganês	0,1100	máx. 0,35
Magnésio	0,3000	0,20 a 0,45
Cromo	0,0050	máx. 0,05
Níquel	0,0290	máx. 0,05
Zinco	0,0080	máx. 0,35
Estanho	0,0010	máx. 0,05
Titânio	0,0650	máx. 0,25
Chumbo	0,0110	máx. 0,05
Cálcio	0,0008	máx. 0,05
Estrôncio	0,0000	máx. 0,05

Fonte: METAIS CAPIXABA e SAE J245 adaptados, 2025.

Nas Figura 44 e **Figura 45** foram observados pontos com concentração de carbono, podendo assim inferir a presença de grafeno, ou seja, placas de grafeno conforme apresentado nas imagens.

5.2 Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)

As 12 amostras analisadas correspondentes a quatro diferentes teores de grafeno em três regiões distintas do lingote, sendo base, meio e topo apresentaram um valor constante de 0,01% de carbono. Esse resultado indica que o método não conseguiu detectar variações na dispersão de carbono para concentrações de grafeno inferiores a 2%. A Tabela 17 apresenta alguns dos resultados das 12 amostras analisadas para as 4 concentrações.

Tabela 17 – Resultado da análise de EDX do teor de carbono em regiões específicas para as 4 concentrações.

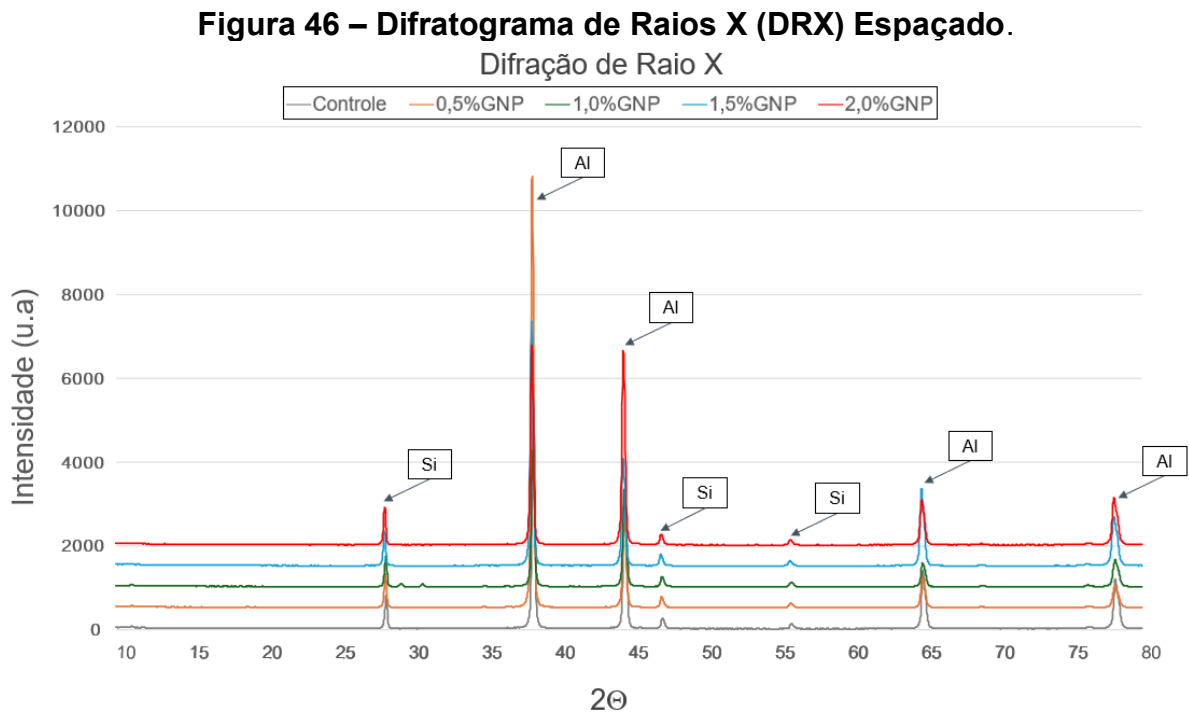
Elemento	SAE 323 nominal	Amostra comercial	Amostra				
	Al - 0,0%GNP	Al - 0,0%GNP	Al - 0,0%GNP	Al - 0,5%GNP	Al - 1,0%GNP	Al - 1,5%GNP	Al - 2,0%GNP
			Topo	Base	Meio	Meio	Topo
% Al	89,950 - 93,300	92.300	95,660	94,960	96,010	95,020	95,670
% C	0,000	0,000	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
% Si	6,500 - 7,500	6,900	4,130	4,140	3,770	4,670	4,080
% Mn	Máx. 0,350	0,110	0,001	0,003	0,002	0,006	0,006
% Fe	máx. 0,600	0,220	0,100	0,090	0,090	0,160	0,110

Fonte: Próprio autor, 2025

Dessa forma, embora a FRX seja altamente eficaz para elementos de número atômico médio a elevado, sua aplicação na análise de elementos leves ou em baixas concentrações requer cautela.

5.3 Difração de Raio X (DRX)

A Figura 46 apresenta, de forma agrupada, os difratogramas de raios X obtidos tanto para a liga virgem 323 quanto para os nanocompósitos de alumínio reforçados com grafeno.

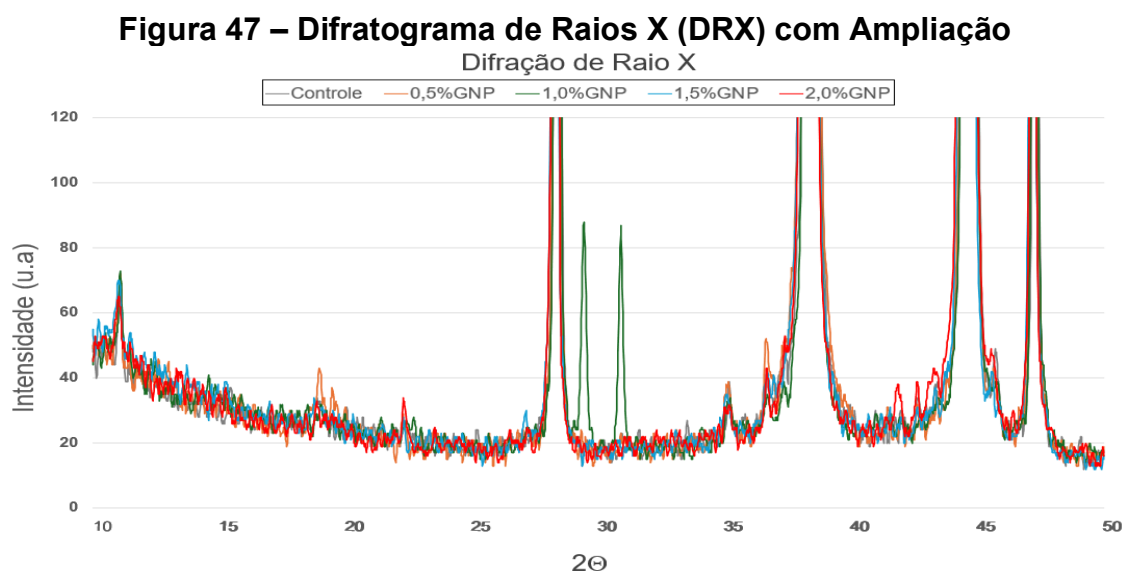


Fonte: Próprio autor, 2025

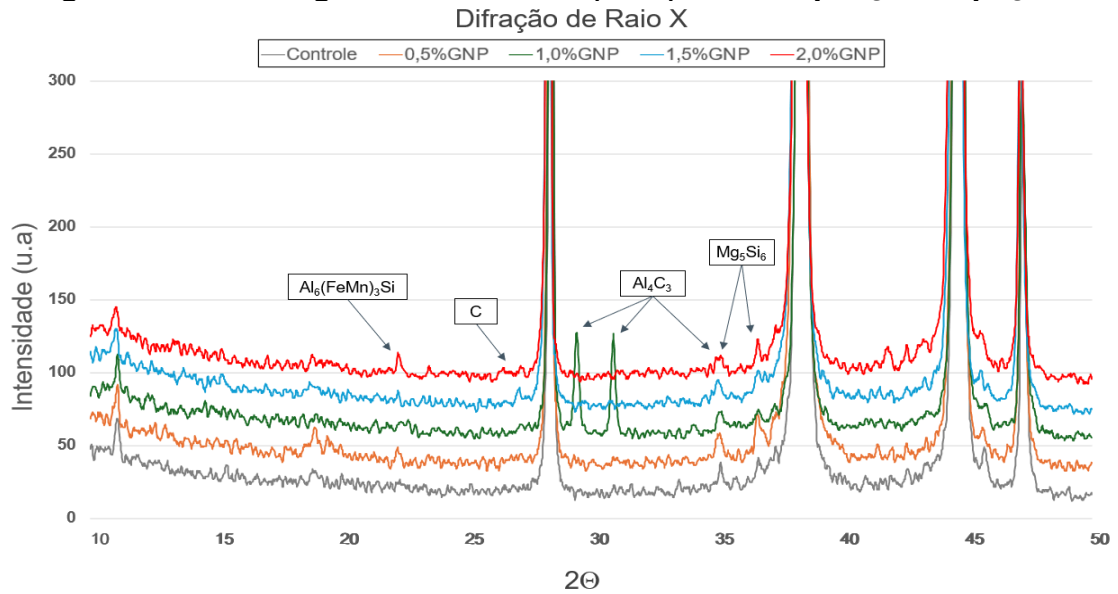
Os resultados mostrados acima confirmam a presença da fase Alumínio- α , cujos picos característicos 2Θ a cerca de 38° , 44° , 65° e 78° foram confirmados na comparação com o banco de dados JCPDS #65-2869.

A presença do silício é confirmada em $2\Theta \approx 27^\circ$, 47° e 56° que foram confirmados com o banco de dados JCPDS #27-1402 que podem ser atribuídos à dispersão tanto dos cristais primários de silício quanto dos cristais de silícios presentes no eutético Al-Si.

A Figura 47 apresenta uma ampliação de 2Θ entre 10° e 50° nas intensidades 0 a 120 u.a. a fim de uma melhor visualização dos espectros.



Foram observados picos distintos nos compósitos contendo nanoplaquetas de grafeno, localizados em torno de $2\Theta \approx 19^\circ$ e 23° , além de um sinal em $2\Theta \approx 29^\circ$, 31° e 35° , que pode estar relacionado à presença de carbeto de alumínio (Al_4C_3), segundo BIBIK, 2024. Esse último pode indicar uma possível interação lateral entre as nanoplaquetas de grafeno e a matriz de alumínio, sugerindo uma assinatura espectral característica dessa ligação (Figura 48).

Figura 48 – Difratoograma de Raios X (DRX) com Ampliação Espaçada.

Fonte: Próprio autor, 2025, BIBIK, 2024.

Pode observar que a presença de carbeto de alumínio (Al_4C_3) foi intensa em $2\theta \approx 29^\circ$ e 31° apenas para a liga com a composição de 1,0%GNP.

5.4 Difusividade Térmica

Os dados obtidos nas medições de difusividade térmica das amostras da liga-controle SAE 323 e dos nanocompósitos de alumínio reforçados com GNP, assim como os valores de condutividade térmica calculados a partir desses resultados, estão organizados na Tabela 18. A Figura 49 apresenta a representação gráfica correspondente, permitindo uma visualização comparativa entre os diferentes materiais analisados.

Tabela 18 – Difusividade térmica e condutividade térmica.

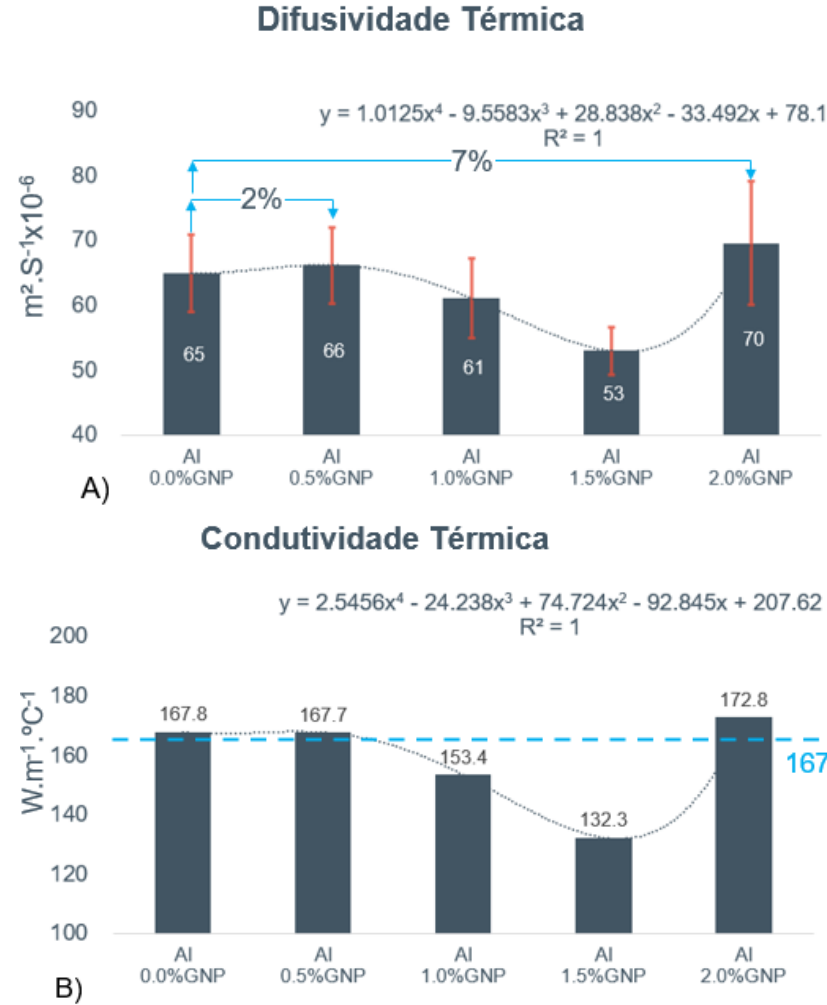
Amostra	Densidade (kg.m ⁻³)	Difusividade térmica (m ² .S ⁻¹)	Condutividade Térmica (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)		
	Calculada aparente	Obtida	Calculada	Δ% da Al - 0.0%GNP	Δ% da referência SAE 323
Al - 0.0%GNP Controle	-	6.49E-05	167.8	-	0.5%
Al - 0.5%GNP	2629,9	6.62E-05	167.7	-0.1%	0.4%
Al - 1.0%GNP	2606,7	6.11E-05	153.4	-8.6%	-8.2%
Al - 1.5%GNP	2591.6	5.30E-05	132.3	-21.2%	-20.8%
Al - 2.0%GNP	2577.5	6.96E-05	172.8	2.9%	3.4%

Capacidade térmica específica C_p = 963.0 J.kg⁻¹.°C⁻¹
Condutividade térmica de referência SAE J425 k = 167 W.m⁻¹.°C⁻¹
Densidade teórica = 2685,0 kg.m⁻³

Fonte: Próprio autor, 2025, SAE J425, 2003.

Figura 49 – Apresentação gráfica das propriedades térmicas.

A) Difusividade térmica, B) Condutividade térmica



Fonte: Próprio autor, 2025

Pode se observar que com uma adição de 0,5% de GNP obteve-se um ganho de difusividade de 2%, enquanto uma adição de 2% de GNP teve-se 7%.

De acordo com a Figura 49 B) a liga de alumínio com 2% obteve-se uma condutividade acima da referência apresentada em norma de 3,5% acima.

De forma geral o perfil da condutividade térmica seguiu o perfil da difusividade térmica, demonstrando proporcionalidade com C_p e densidade.

Observa-se que a condutividade térmica apresenta flutuações com o aumento da concentração de GNP. A amostra com 0.0% de GNP, (amostra de controle) e 0,5% de GNP, apresentam condutividades próximas a de referência de $167 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$. As demais amostras com 1,0% e 1,5% apresentaram percentuais abaixo do valor da referência, 8,1% e 20,8% respectivamente, ambas concentrações apresentaram abaixo da amostra de controle, sugerindo possível aglomeração das nanopartículas, amostras menos homogêneas ou poros nas amostras, não representando o perfil da densidade.

Observa-se também que a partir da amostra de controle, sugere-se que as amostras com GNP em 1,0% e 1,5% tiveram alteração na estrutura que proporcionou o decréscimo da difusividade devido a presença de poros.

Curiosamente, com 2.0% de GNP, há um aumento significativo para $172,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$, o maior valor registrado, sugerindo que, em concentrações mais altas, pode haver uma reorganização estrutural que favoreça a condução térmica, como também uma amostra mais homogênea, menos quantidades de poros.

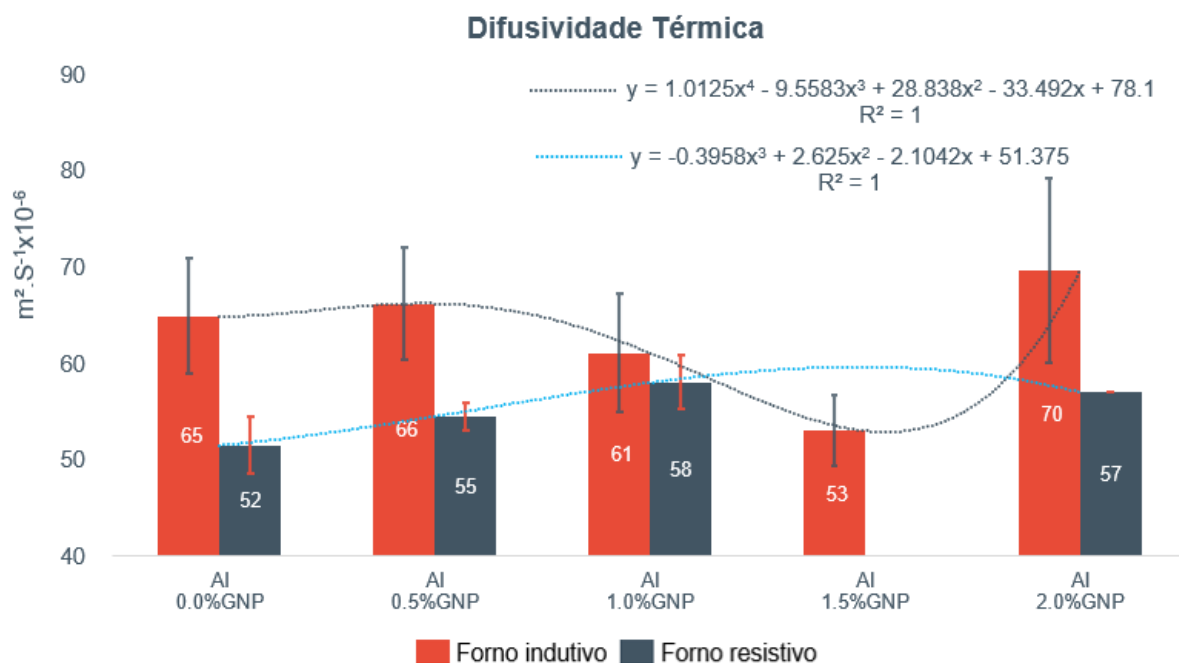
De acordo com Wang et al. (2015), a condutividade térmica de materiais não é influenciada apenas pelas propriedades térmicas intrínsecas, mas também pela densidade das amostras. Por outro lado, a difusividade térmica está relacionada à espessura da amostra, ao tempo necessário para a propagação do calor e à temperatura, sendo, portanto, independente da densidade.

A melhoria observada na difusividade térmica em compósitos com baixa fração mássica de reforço pode ser atribuída à maior eficiência na dispersão do material reforçante. Em contrapartida, quando há aglomeração do grafeno em compósitos com alta concentração, ocorre uma redução no desempenho térmico. Isso se deve à presença de carbono nas interfaces, o que pode gerar porosidade e, conseqüentemente, barreiras térmicas adicionais. Esses fatores contribuem para a diminuição da difusividade térmica. Além disso, o aumento da quantidade de reforço

pode formar aglomerados que interferem na homogeneidade microestrutural, prejudicando a eficiência da condução térmica (WANG et al., 2019). Entretanto o tamanho e quantidade de poros não foram estimados neste estudo, e o método de cálculo de densidade ao ar não são perceptíveis para confirmação dos poros.

A Figura 50 apresenta o comparativo dos valores de difusividade térmica obtidos neste estudo em relação a outro em forno elétrico resistivo. Observa-se que o reforço de grafeno tem seu papel como ativador da condutividade térmica e que o processo de fundição tem influência.

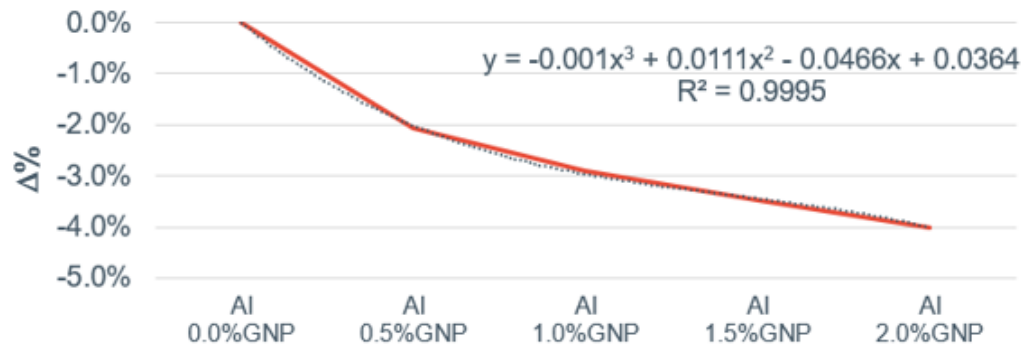
Figura 50 – Difusividade térmica - Forno a indução vs forno resistivo.



Fonte: Próprio autor, 2025 e Coura, 2021.

Os dados de densidade normalizada das amostras foram calculados em condições ambiente, considerando a medição do volume e a pesagem da massa em balança. O perfil dos resultados está apresentado na

Figura 51. Observa-se que a densidade das amostras com adição de grafeno apresenta redução, o que é uma tendência esperada, dado que a densidade do grafeno é aproximadamente 15,8 vezes menor que a do alumínio. A densidade do grafeno HP10 é de 0,17 g/cm³ (HEXO grafeno, 2025), enquanto a da liga de alumínio SAE 323 é de 2,685 g/cm³ (SAE J425, 2003).

Figura 51 – Densidade das amostras.

Fonte: Próprio autor, 2025

5.5 Resistividade Elétrica

A Tabela 19 apresenta os valores de resistividade elétrica calculadas para as amostras processadas. As medições de resistência elétrica foram realizadas em ambiente laboratorial com temperatura controlada, estabilizada em 19 °C, e umidade relativa do ar de 41%. Para cada amostra, as medições de resistência elétrica foram efetuadas em tréplicas em três posições do lingote, base, meio e topo para diferente concentração., permitindo a obtenção de uma média representativa dos resultados do ensaio.

Tabela 19 – Valores de resistividade elétrica do material.

Compósito Grafeno wt %	Posição lingote	Resistência medida [Ω]	Resistividade Elétrica [Ω.cm]		% IACS	
		$R_{\text{média}}$	Média por compósito	$\Delta\%$ p/ liga base	Média por compósito normalizado	$\Delta\%$ p/ referência
Al - 0,0%GNP Controle	Base	0,000020	0.00000555	-	43,0	-
	Meio	0,000036				
	Topo	0,000022				
Al - 0,5%GNP	Base	0,000025	0.00000516	-6,9%	45,1	4,9
	Meio	0,000027				
	Topo	0,000031				
Al - 1,0%GNP	Base	0,000021	0.00000486	-12,4%	47,2	9,9
	Meio	0,000021				
	Topo	0,000022				
Al - 1,5%GNP	Base	0,000017	0.00000500	-9,8%	46,2	7,5
	Meio	0,000016				
	Topo	0,000020				
Al - 2,0%GNP	Base	0,000018	0.00000499	-9,9%	46,4	7,9
	Meio	0,000021				
	Topo	0,000019				

Fonte: Próprio autor, 2025. Nota:¹ considerado condutividade do cobre de $5,8\text{E}+7 \text{ S.m}^{-1}$, referência IACS da liga SAE J425 323 de 43%, ²resistividade elétrica de referência da liga SAE 323 0,0000040 Ω.cm e condutividade elétrica de $2,5 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$. informações baseadas no MatWeb, acesso Julho, 2025.

Observa-se que a resistividade diminui com o aumento do teor de grafeno até 1,0%, indicando melhor condução elétrica. A partir de 1,5%, há uma leve reversão ou estabilização, sugerindo possível saturação ou aglomeração do grafeno (dispersão não homogêneas) ou a formação de interfaces resistivas. A maior redução ocorre com 1,0% de grafeno (-12,4%), indicando o ponto de melhor desempenho elétrico relativo e um desempenho de 47,2%IACS com um aumento de 9,9%.

A Figura 52 apresenta a variação da resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$) em função da adição de grafeno em compósitos de alumínio-silício. Observa-se que a amostra de referência, SAE 323-Base, apresenta a maior resistividade elétrica, com valor próximo de $5,6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$. Com a adição de grafeno, há uma tendência clara de redução da resistividade, é mais evidente na amostra com 1,0% de grafeno (SAE 323-1,0GNP), que apresenta a menor resistividade, com uma redução de 12,4% em relação à liga base.

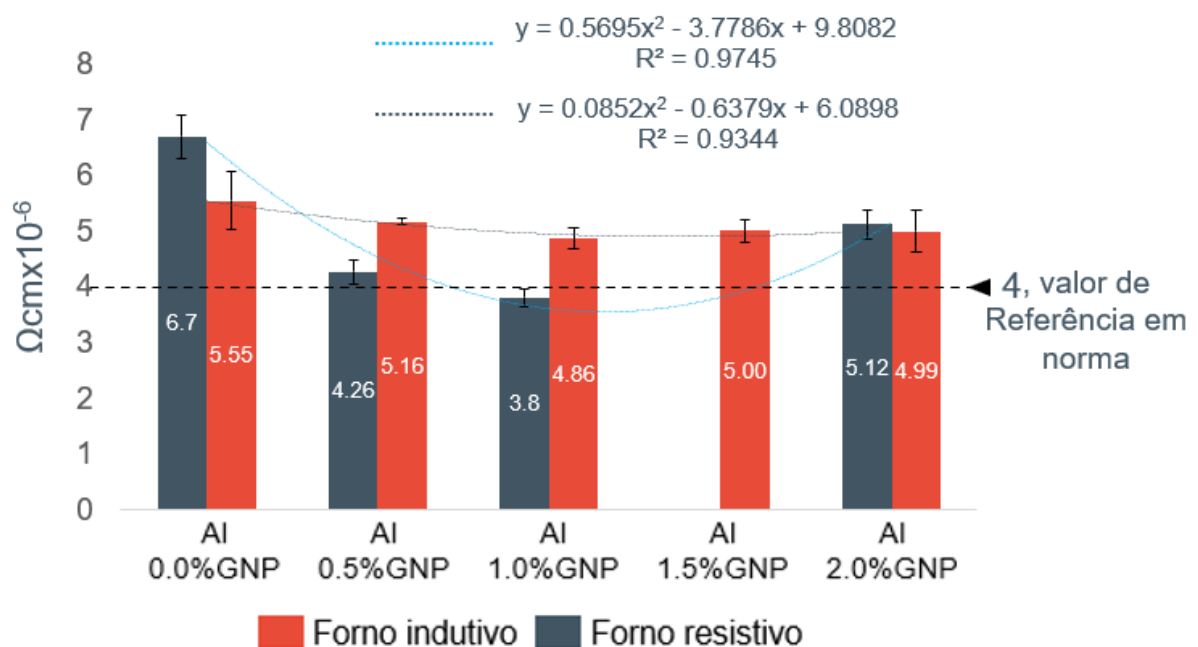
Essa redução pode ser atribuída à atuação do grafeno como um reforço condutor, promovendo maior mobilidade eletrônica na matriz metálica.

Esses resultados indicam que a eficiência do grafeno como agente condutor depende não apenas do seu teor, mas também da sua distribuição e interação com a matriz metálica, sendo o teor de 1,0% o mais promissor dentro da faixa estudada.

Comparando-se os dados obtidos no forno elétrico à indução estudo deste trabalho apresenta uma variação menos significativa em relação ao forno elétrico resistivo (COURA, 2021). De uma forma geral o perfil de resistividade se assemelha, apresentando menor resistividade elétrica da liga em 1,0%.

Além do tipo de forno utilizado, o processo também se diferencia pela metodologia de mistura, pelo tipo de molde que, neste caso, é de areia, e pela qualidade do grafeno empregado. O grafeno utilizado é do tipo HP50, caracterizado por conter 80% de partículas com até 10 camadas e 100% com menos de 50 camadas, ou seja, trata-se de um material com maior número de camadas. O trabalho de referência não considerou a concentração de 1,5%GNP em seus estudos.

Figura 52 – Resistividade das amostras.



Fonte: Próprio autor, 2025, COURA, 2021 e SAE J425, 2003.

A Figura 53 apresenta os resultados de %IACS calculados e normalizados a partir dos resultados de resistência elétrica das amostras da liga em diferentes concentrações. Observa-se um aumento da condutividade até 1,0% de GNP

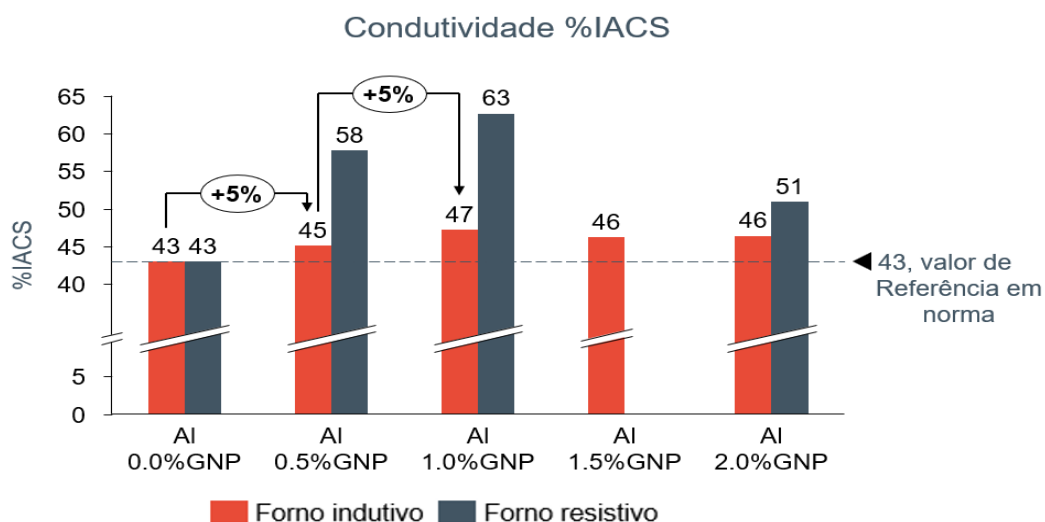
praticamente linear de 5% de aumento em 5% de adição de material de reforço e uma queda após essa concentração, possivelmente devido a saturação em ambos os casos comparados.

O maior valor de condutividade é atingido na amostra com 1,0% de GNP, e esse resultado sugere que, nesse teor, o grafeno está suficientemente disperso na matriz metálica, formando caminhos condutores eficientes para o transporte de elétrons.

Entretanto, para teores superiores (1,5% e 2,0%), a condutividade apresenta uma leve redução, embora ainda superior à da amostra base normalizada. Essa queda pode estar associada à aglomeração de partículas de grafeno, que pode gerar interfaces resistivas ou descontinuidades na rede condutora, reduzindo a eficiência do reforço.

Portanto, os resultados indicam que o teor de 1,0% de GNP é o mais eficaz para a melhoria da condutividade elétrica do compósito, desde que haja controle adequado da dispersão do reforço na matriz.

Figura 53 – Condutividade Elétrica.



Fonte: Próprio autor, 2025, COURA, 2021 e SAE J425, 2003.

De uma forma geral observou-se adição de grafeno ao compósito Al-Si melhora as propriedades elétricas até certo limite. O teor de **1,0% de grafeno** apresenta o melhor equilíbrio entre baixa resistividade e alta condutividade, com desempenho de 47%IACS acima do valor de referência da literatura (43% IACS) (SAE J425, 2003). Teores superiores não resultam em ganhos adicionais significativos, podendo indicar

saturação do efeito condutor ou problemas de dispersão do reforço. Na Tabela 20 apresenta a relação da liga de alumínio SAE 323 em relação aos outros principais materiais condutores. E pode-se observar que para a mesma concentração 1,0% de GNP utilizando-se forno resistivo obteve-se um valor de 63%IACS próximo ao ouro.

Tabela 20 – Valores de resistividade de referência

Amostra	%IACS	Resistividade. Elétrica [Ω .cm]
Ag	108	1,59E-06
Cu	100	1,68E-06
Au	71	2,44E-06
Al-323	43	4,00E-06
Pb	9	20,6E-06

Fonte: Próprio autor, 2025, CALLISTER, 2015, SAE J425, 2003

5.6 Microdureza Vickers

Na Tabela 21 apresenta os valores obtidos da microdureza Vickers com carga 0,05 kgf nas amostras virgem, com concentração 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% de grafeno.

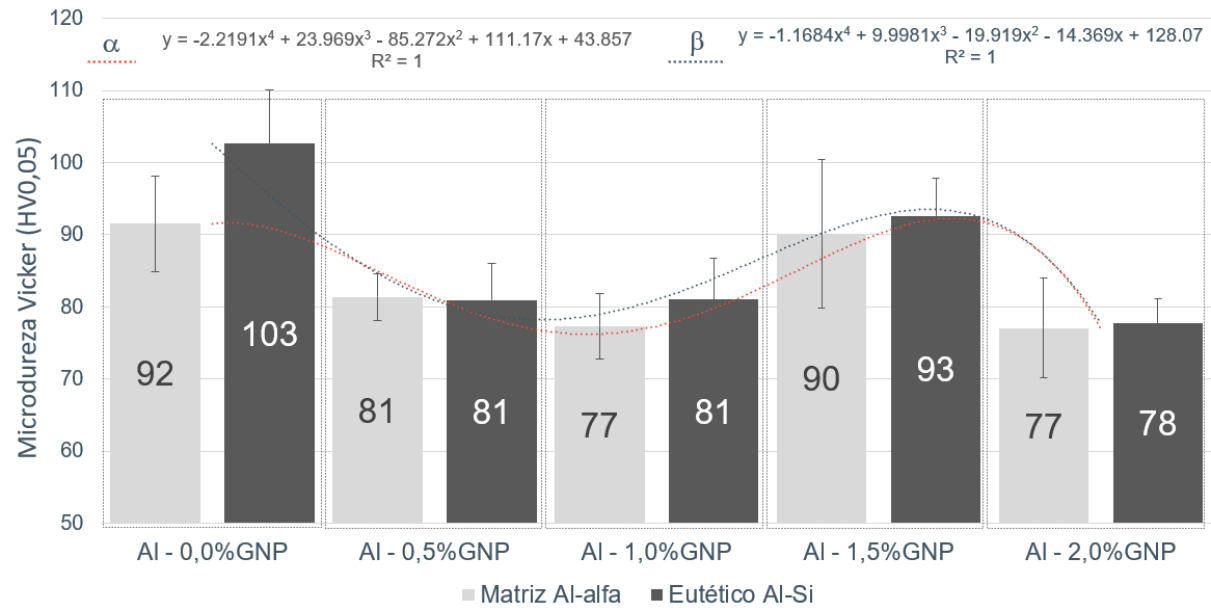
Tabela 21 – Microdureza Vickers para a liga virgem e concentração 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% das amostras processadas.

Compósito	Grafeno %wt	Posição lingote	Microdureza Vickers (HV _{0,05})					
			HV _{Alα}	DP _{Alα}	HV _{eutético (Al-Si)}	DP _{eutético (Al-Si)}	HV _{médio}	DP _{médio}
Al - 0,0%GNP Controle	0.0	Base	92.5	3.4	110.5	7.6	101.5	11.2
		Meio	89.1	8.2	96.5	0.0	92.8	6.6
		Topo	92.9	9.2	100.8	3.8	96.9	7.6
Al - 0,5%GNP	0.5	Base	81.9	2.8	77.2	2.6	79.5	3.5
		Meio	80.3	4.7	82.1	7.6	81.2	5.8
		Topo	81.9	2.8	83.5	2.8	82.7	2.7
Al - 1,0%GNP	1.0	Base	75.8	4.3	77.2	2.6	76.5	3.3
		Meio	75.8	4.3	78.7	2.6	77.3	3.6
		Topo	80.3	4.7	87.1	6.0	83.7	6.1
Al - 1,5%GNP	1.5	Base	96.7	6.2	96.7	6.2	96.7	5.6
		Meio	80.3	4.7	92.5	3.4	86.4	7.6
		Topo	93.2	11.7	88.7	3.1	91.0	8.1
Al - 2,0%GNP	2.0	Base	83.8	7.5	77.2	2.6	80.5	6.2
		Meio	71.5	0.0	80.3	4.7	75.9	5.7
		Topo	75.8	4.3	75.7	0.0	75.8	2.7

Fonte: Próprio autor, 2025.

Na Figura 54 apresenta os valores médios por fase obtidos da microdureza Vickers com carga 0,05 kgf nas amostras virgem com 0,0% de grafeno e para as concentrações 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% de grafeno.

Figura 54 – Influência da adição de grafeno na microdureza Vickers HV de 0,05 kgf das fases do compósito Al-Si.



Fonte: Próprio autor, 2025

A Tabela 22 apresenta os valores médios para as composições em comparativo com o valor informado por norma. Pode-se observar que os valores médios encontrados de uma forma geral estão dentro da faixa informada.

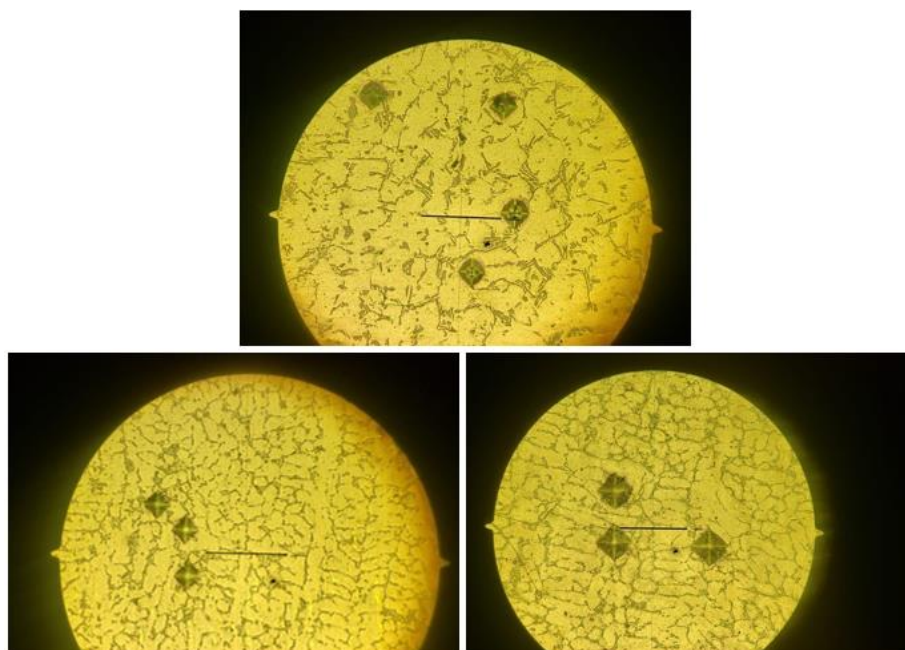
Tabela 22 – Valores médios de microdureza para a liga virgem e concentração 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% das amostras processadas e referência SAE 323.

Amostra	HV0,05
SAE 323	62 - 98
Al - 0.0%GNP	97
Al - 0.5%GNP	81
Al - 1.0%GNP	79
Al - 1.5%GNP	91
Al - 2.0%GNP	77

Fonte: Próprio autor, 2025

Na Figura 55 apresenta uma das imagens tirada durante a execução do ensaio de microdureza. A matriz de alumínio ($\text{Al } \alpha$) representada pelas regiões em amarelo e as escura/cinzas pela fase eutética de silício.

Figura 55 – Regiões dos ensaios de Microdureza Vickers - HV com carga de 0,05 kgf.



Fonte: Próprio autor, 2025

Pode-se observar que a dureza da matriz de alumínio ($\text{Al-}\alpha$) diminui com a adição de grafeno até 1,0%, indicando possível interferência na estrutura da matriz. A partir de 1,5% há um aumento significativo da dureza 96,7 HV0,05, sugerindo melhor dispersão do grafeno e reforço efetivo. Com 2,0% a dureza volta a cair para 83,8 HV0,05, possivelmente por aglomeração de grafeno, que pode atuar como defeito.

Para a fase eutética Al-Si, a média da dureza cai com 0,5% e 1,0% de grafeno para 80,9 HV0,05 e 81,0 HV0,05 respectivamente, entretanto apresenta em 1,5% um pico de dureza de 92,6%, indicando possível refinamento da morfologia ou interação positiva com o grafeno.

A dureza média do compósito sem grafeno apresenta a maior dureza média de 101,5 HV0,05, devido à contribuição elevada da fase eutética.

A adição de grafeno até 1% reduz a dureza média, sugerindo que o reforço não foi efetivo ou causou defeitos.

Com 1,5% de grafeno há uma recuperação significativa da dureza média de 96,7 HV0,05, indicando melhor sinergia entre matriz e reforço.

Com 2,0%, a dureza média volta a cair para 80,5 HV0,05, reforçando a hipótese de aglomeração ou saturação do reforço. Na literatura obteve-se resultados de microdureza variando $39,0 \pm 1,5$ HV0,05 para Al puro até $62,6 \pm 12,2$ HV0,05 para Al puro com adição de óxido de grafeno reduzido considerando agitação mecânica (GONÇALVES, 2023). Para demais métodos apresentado como, ultrassom e rotoevaporador obtiveram valores menores (GONÇALVES, 2023)

Entretanto pode observar que os valores obtidos de microdureza da amostra virgem e dos compósitos com 0,5% a 2% de GNP estão dentro da faixa apresentada pela norma de referência, conforme SAE J452 (2003).

Durante o processamento de compósitos à base de alumínio com adição de grafeno, há uma tendência à formação do intermetálico carbeto de alumínio (Al_4C_3) na interface AL/SiC, considerado um constituinte interfacial frágil (CHAWLA, 2012, XIONG, 2011, HUANG, 2014), o que pode comprometer e reduzir as propriedades mecânicas como a dureza e a resistência à tração (BARTOLUCCI, et al., 2011). Essa formação indesejada está associada, em grande parte, à presença de defeitos estruturais no grafeno sintetizado, os quais favorecem a oxidação e, conseqüentemente, reações com o alumínio fundido. Segundo (BARTOLUCCI et al., 2011), tais características estruturais do grafeno são determinantes na promoção da formação de carbeto durante o processamento do material. A formação desse intermetálico foi observada também em outros estudos que envolvia alumínio e adição de carbono (grafite). Embora os estudos sejam com outra liga de alumínio, os mecanismos de formação de Al_4C_3 por adição de carbono são análogos aos da liga SAE 323. A presença de silício não impede a formação do carbeto de alumínio. (SANTOS, 2012). Dada a presença de Al_4C_3 nas amostras, os ensaios de tração se mostram mais adequados para avaliar o desempenho mecânico dos compósitos, considerando que esse composto compromete significativamente as propriedades relacionadas à tração, conforme evidenciado por LI e XIONG (191)

A obtenção de uma distribuição homogênea do reforço de grafeno na matriz de alumínio representa um dos principais desafios na produção de compósitos. A não uniformidade na dispersão das partículas pode comprometer significativamente as propriedades mecânicas do material, resultando em regiões com dureza elevada e

outras com valores reduzidos. Isso devido a diferença de densidade entre o grafeno e o alumínio e as interações de van der Waals entre os grafenos, em que estes tendem a se aglomerar (200). A dureza ideal do compósito está diretamente relacionada à dispersão eficiente e uniforme do grafeno na matriz, a qual depende, entre outros fatores, das condições de agitação durante o processamento. Há outros processamentos considerado um denominado método semi-pó (mistura de grafeno com pós-metálicos, em meio líquido), que também envolve a agitação mecânica ou sonicação do grafeno, porém com o pó metálico em um solvente, segundo (M. RASHAD et al., 2014, X. GAO et al., 2010, J. LIU et al., 2016, H. ASGHARZADEH, 2017, WU, Y. et al., 2019), contudo o método de agitação mecânica se destaca por ter apresentado nos valores de dureza (GONÇALVES, 2023). Quando essa dispersão não é alcançada, mesmo o aumento do teor de reforço pode não resultar em melhorias nas propriedades mecânicas, podendo inclusive ocasionar sua redução. De acordo com (VENKATESAN E XAVIOR, 2019), a variabilidade nos valores de dureza observada em diferentes regiões do compósito está associada à distribuição não homogênea das partículas de grafeno na matriz de alumínio.

Baseado nisso pode-se perceber que a adição de grafeno ao compósito Al-Si apresenta comportamento não linear em relação à microdureza:

- até 1,0%: O grafeno pode atuar como defeito ou não estar bem disperso;
- 1,5%: Apresenta o melhor desempenho combinado, com aumento da dureza tanto na matriz quanto na fase eutética.
- 2,0%: Indica possível saturação ou aglomeração, prejudicando a eficiência do reforço.
- a concentração de 1,5% de grafeno apresenta ser o mais eficiente para melhorar a microdureza do compósito, desde que haja controle adequado da dispersão.

5.7 Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE)

A Tabela 23 apresenta o sumário dos resultados obtidos neste trabalho com os valores apresentados a fim de se obter um melhor panorâmico dos resultados.

Tabela 23 – Apresentação sucintamente as propriedades dos nanocompósitos.

Amostra	Densidade (kg/m³)			Difusividade térmica (m².S⁻¹)		Condutividade Térmica (W.m⁻¹.°C⁻¹)			Resistividade Elétrica (Ω.cm) e %IACS			Microdureza Vickers (HV)		
	Calculada aparente	Teórica	Δ%	Obtida	Desvio Padrão experimental	Calculada	Δ% da Al - 0.0%GNP	Δ% da referência	Resistividade de Elétrica (Ω.cm)	Δ% p/ liga base	%IACS Normalizado	HVAla	HVutético	HVmedio
Al - 0.0%GNP	-	2685.0	0.0	6.49E-05	5.93E-06	167.8	-	0.5	5.55E-06	-	43.0	92	103	97
Al - 0.5%GNP	2629.9	2685.0	-2.1	6.62E-05	5.86E-06	167.7	-0.1	0.4	5.16E-06	-6.9	45.1	81	81	81
Al - 1.0%GNP	2606.7	2685.0	-2.9	6.11E-05	6.14E-06	153.4	-8.6	-8.2	4.86E-06	-12.4	47.2	77	81	79
Al - 1.5%GNP	2591.6	2685.0	-3.5	5.30E-05	3.70E-06	132.3	-21.2	-20.8	5.00E-06	-9.8	46.2	90	93	91
Al - 2.0%GNP	2577.5	2685.0	-4.0	6.96E-05	9.57E-06	172.8	2.9	3.4	4.99E-06	-9.9	46.4	77	78	77

Fonte: Próprio autor, 2025

Os valores foram sumarizados a fim de melhor visualização da viabilidade técnica e econômica da implementação dos nanocompósitos de Al-G.

O mercado brasileiro de alumínio é um dos mais expressivos do mundo, sendo o oitavo maior produtor de alumínio primário, o quarto maior produtor de bauxita e o terceiro maior produtor de alumina, o que representa cerca de 1,5% do PIB do país. Portanto, espera-se uma maior atividade no setor produtivo local, em especial o de alumínio para o setor elétrico, para atender à nova demanda. Um dos maiores fornecedores nacionais para o setor automotivo é a Companhia Brasileira de Alumínio - CBA, portanto, é do interesse da empresa promover o desenvolvimento de inovações tecnológicas no setor.

Assim, a literatura sugere que, na avaliação de resultados, é mais adequado adotar uma abordagem que avalie o aumento percentual (%) nas propriedades do que considerar valores absolutos. Como acontece com qualquer novo material em fase de desenvolvimento, a produção de nanocompósitos de alumínio reforçados com grafeno apresenta uma série de desafios técnicos que impactam severamente as propriedades finais do compósito, limitando seu desempenho. Dentre esses desafios, destacam-se.

- **Dispersão homogênea do grafeno na matriz:**

Devido à grande diferença de densidade entre o grafeno e o alumínio, e à interação de van der Waals entre os grafenos, eles tendem a se aglomerar, o que

pode resultar em propriedades mecânicas ruins do compósito final. Portanto, técnicas de mistura eficientes, capazes de dispersar o grafeno homogeneamente na matriz, são necessárias. Técnicas como, mistura em meio líquido por ultrassonicação ou agitação mecânica, (BAIG et al., 2018 e SABOORI, 2018), mistura em moagem de bolas (SEYED, 2019), Métodos de metalurgia do pó e/ou fusão avançada têm se mostrado capazes de superar esse obstáculo, de acordo com a maioria dos estudos publicados (BAIG et al., 2018, SABOORI, 2018 e SEYED, 2019). Conforme sugerido pela literatura a incorporação de nanopartículas de grafeno em folhas metálicas de alumínio poderiam talvez ajudar a superar as forças de *van der Waals* entre elas, contribuindo para a dispersão adequada do grafeno na matriz (G. LIU et al., 2017 e XU, 2008).

• **Danos estruturais ao grafeno durante o processamento:**

Esse desafio é recorrente no processamento em altas temperatura é observado principalmente durante a etapa de mistura do líquido com o pó, tanto por meio de misturas por correntes de Foucault e convecção quanto por mistura mecânica na base líquida por agitação ou ultrassom. Geralmente, a técnica de aquecimento envolve fenômenos oxidativos ou termolises afetando tanto o alumínio quanto o material de grafeno, potencialmente causando defeitos estruturais, quanto as propriedades mecânicas do alumínio, causando alterações em sua dureza e ductilidade. Isso requer um controle rigoroso dos parâmetros nesta etapa de processamento. Além disso, há a presença inconveniente de impurezas (óxidos ou outros compostos cerâmicos) resultantes das reações em elevada temperatura, que se tornam parte da composição e podem causar intemperismo adverso durante as etapas de fusão e solidificação. Em relação à mistura mecânica em meios líquidos por agitação, o tempo de operação e a rotação têm uma influência significativa na estrutura do nanocompósito. As literaturas relatam que há uma fragmentação considerável das GNPs durante a fusão com o aumento do tempo de processamento e da rotação, resultando em uma redução nos domínios sp^2 e no tamanho das GNPs, além de favorecer a formação de defeitos do tipo borda na ligação interfacial Al/Gr (GONÇALVES, 2023).

• **Formação de carbetos (Al_4C_3):**

A formação deste composto interfacial em nanocompósitos Al/G, sendo o processamento em altas temperaturas por períodos prolongados um dos fatores relacionados a este fenômeno de formação dos carbetos de alumínio. Em geral, a

formação de compostos interfaciais frágeis é um problema para compósitos de qualquer natureza, como observado no item 5.2 anteriormente. Em sistemas com materiais contendo alumínio e carbono, a reação (1) pode ocorrer durante o processamento (temperatura e tempo):



A reação (1) apresenta baixa energia livre de formação (BARTOLUCCI et al., 2011) e, em sistemas Al/Gr, o crescimento da fase Al_4C_3 ocorre preferencialmente nos planos prismáticos de alta energia livre superficial do carbono, nucleando-se nos defeitos estruturais presentes no grafeno, sendo responsável talvez pela fragilização do nanocompósito (LI et al., 2017). A literatura discute que a fase Al_4C_3 é extremamente prejudicial às propriedades mecânicas em especial a resistência a tração do nanocompósito, e a reação interfacial também danifica as propriedades do próprio grafeno. (CHAWLA, 2012, XIONG, 2011, HUANG, 2014),

Em contraste, diversos autores mencionam que existe ainda um entendimento incompleto dos mecanismos de formação de Al_4C_3 , que estão relacionados à forma, tamanho e local de formação desse composto interfacial, uma vez que estão fortemente associados aos métodos e parâmetros do processo antecedendo o presente estudo em que foram estudadas 6.130 patentes que correspondem aos critérios e objetivos desta pesquisa, que verificaram e outros que não verificaram a presença do composto. Além disso, há pouco esclarecimento sobre a transferência de carga, que é potencializada pela formação eficiente da fase Al_4C_3 na interface Al/Gr. Estudos vem relatando (LI et al., 2017), que em relação ao desempenho de compósitos Al/Gr com uma fase Al_4C_3 induzida, que uma reação interfacial apropriada com pequenas quantidades de nanobarras de Al_4C_3 monocristalinos (induzidos a aproximadamente 610°C em sinterização por plasma de faísca por 20 min) proporcionou transferência de carga eficiente.

A viabilidade técnica e econômica dos nanocompósitos de alumínio com grafeno é alta, apresentando grande potencial de aplicação em diversas áreas devido às propriedades únicas de ambos os materiais. O grafeno, com sua alta resistência e condutividade, pode melhorar significativamente as propriedades do alumínio, como resistência mecânica, condutividade elétrica e térmica, e resistência à corrosão.

Podendo ser traduzido em aumento da resistência mecânica (o grafeno atua como um reforço na matriz de alumínio, tornando o material composto mais resistente a deformações e fraturas), melhorias na condutividade elétrica (a alta condutividade do grafeno pode aumentar a condutividade elétrica do nanocompósito, o que é importante em aplicações como eletrônicos e sistemas de energia), melhorias na condutividade térmica (a capacidade do grafeno de dissipar calor pode ser aproveitada para melhorar a condutividade térmica do nanocompósito, útil em aplicações que exigem dissipação de calor eficiente, como dissipadores de calor e componentes eletrônicos), e aumentar a resistência à corrosão (a interação entre o grafeno e o alumínio pode criar uma barreira protetora contra a corrosão, prolongando a vida útil do material composto).

Aplicações potenciais dos nanocompósitos de Al/GNP:

- Setor aeroespacial - o nanocompósito pode ser utilizado na fabricação de componentes leves e resistentes para aeronaves, como fuselagens e peças estruturais.
- Indústria automobilística - a redução de peso e o aumento da resistência mecânica são importantes na indústria automobilística, e o nanocompósito pode ser usado em componentes de veículos, como chassis e peças de suspensão.
- Eletrônicos - a alta condutividade elétrica e térmica do nanocompósito o torna adequado para aplicações em eletrônicos, como placas de circuito impresso e dissipadores de calor.
- Energia - o nanocompósito pode ser utilizado em sistemas de armazenamento de energia, como baterias e células de combustível, devido à sua alta condutividade e capacidade de dissipação de calor.
- Construção civil - a resistência mecânica e à corrosão do nanocompósito podem ser aproveitadas na construção de estruturas e materiais de construção.

Apesar do grande potencial, a produção de nanocompósitos de alumínio e grafeno ainda enfrenta desafios, como a dificuldade de dispersão uniforme do grafeno na matriz de alumínio e o alto custo de produção do grafeno. No entanto, o desenvolvimento de novas técnicas de processamento e a redução do custo do grafeno estão impulsionando a viabilidade econômica e técnica do nanocompósito.

O nanocompósito de alumínio e grafeno tem grande potencial de aplicação devido às suas propriedades aprimoradas, mas requer avanços tecnológicos e redução de custos para sua produção em larga escala. A expectativa é que este material compósito desempenhe um papel importante em diversas áreas no futuro próximo.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia experimental voltada à produção de nanocompósitos da liga de alumínio SAE 323 reforçados com nanoplaquetas de grafeno multicamadas (GNP), em concentrações de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% em massa, utilizando o processo de fundição em forno de indução. Os resultados obtidos demonstraram que o aprimoramento das etapas de processamento contribuiu significativamente para a melhoria das propriedades elétricas, térmicas e mecânicas do material. Essas melhorias reforçam sua viabilidade como alternativa tecnológica para componentes que de alguma forma são condutores elétricos e térmicos e exigem uma certa resistência mecânica e boa fluidez na fundição, como grampo de aterramento, carcaça de equipamentos, aplicações em que a redução de densidade, resistência à corrosão e desempenho funcional são desejáveis entre outras aplicações.

Com base na pesquisa realizada e submetida à publicação, foram identificadas diversas técnicas voltadas à obtenção de uma dispersão homogênea do grafeno em matrizes de alumínio, bem como estratégias para controlar a atmosfera do processo, evitando a pirólise do material. A solução adotada neste estudo consistiu na utilização de um agitador mecânico acoplado ao forno de indução eletromagnética, dispositivo criado para a execução, operando a uma rotação aproximada de 30 RPM por 10 minutos. Simultaneamente, foi empregada uma atmosfera inerte com argônio, visando preservar a integridade do grafeno durante o processo de fusão e promover sua adequada incorporação à matriz metálica.

A partir do procedimento experimental, foram obtidas 15 amostras, cada uma com réplicas em triplicata, destinadas ao estudo da dispersão dos nanorreforços de grafeno (GNP) e das demais propriedades da liga. As concentrações de GNP na matriz de alumínio variaram entre 0,5% e 2,0% em massa (0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%). Além disso, foi considerada a fundição da liga virgem, sem adição de grafeno (0,0% GNP), utilizada como referência para controle. Esse conjunto de amostras permitiu atender ao objetivo específico proposto, possibilitando a análise comparativa entre a liga controle e os nanocompósitos desenvolvidos.

Os resultados obtidos nos ensaios de microdureza Vickers (HV) apresentaram divergências em relação ao comportamento esperado. A liga SAE 323, composta por alumínio e silício, apresenta uma microestrutura típica formada por duas fases: a fase

α -Al (matriz metálica de alumínio sólido), que se solidifica em torno de 660 °C, e a fase β -Si (silício eutético), que se forma após o ponto eutético, aproximadamente a 577 °C, na forma de partículas ou lamelas.

Contrariando as expectativas, a liga controle (sem adição de grafeno) apresentou maior dureza média (97 HV) em comparação às amostras reforçadas com GNP, cuja média foi de 82 HV. Apesar disso, os valores de dureza observados para a fase α -Al foram inferiores aos da fase β -Si, 83 HV e 87 HV respectivamente o que está em conformidade com o comportamento típico dessas fases.

Acredita-se que essa redução na dureza média das amostras com grafeno esteja relacionada à elevada fluidez da liga durante o processo de fundição, o que pode ter influenciado a distribuição e a interação do reforço na matriz, como também pode estar relacionado à formação de compostos interfaciais, como Al_4C_3 , que tendem a reduzir a resistência mecânica da liga. Dessa forma, um tratamento térmico tipo T6 (SAE J425, 2003) pós-fundição poderia ser necessário para promover o reagrupamento da microestrutura, ou seja, reorganizar as fases e partículas, tornando-a mais homogênea e melhorar a adesão entre o grafeno e matriz de alumínio, e alcançar os níveis de dureza esperados com a adição de GNP.

Assim, no contexto das propriedades mecânicas, os resultados obtidos não foram conclusivos quanto à efetividade do grafeno como reforço para aumento da dureza na liga SAE 323, indicando a necessidade de estudos complementares com ajustes no processamento térmico.

Com base nos resultados obtidos para as propriedades elétricas, observou-se que, embora a liga estudada não tenha como principal finalidade a condução elétrica, e sim fluidez na fundição e estanqueidade, ela apresentou uma redução significativa de 12% na resistência elétrica em comparação à liga controle sem reforço, especificamente na amostra com 1,0% de GNP. Esse desempenho resultou em um valor de condutividade elétrica de 47,2% IACS, acima do índice de referência da liga, que é de 43% IACS. Esse comportamento evidencia o papel do grafeno como agente promotor da condutividade elétrica na matriz de alumínio.

No que diz respeito às propriedades térmicas, os dados de condutividade térmica e densidade aparente indicam que a difusividade térmica foi o fator mais influente nos resultados. A amostra com 1,5% de GNP apresentou o menor valor de condutividade térmica, de $132 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$, enquanto a amostra com 2,0% de GNP

atingiu o maior valor, de $173 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$. Esses resultados sugerem uma forte interação entre o reforço de grafeno e a estrutura da matriz metálica, reforçando seu papel como ativador da condutividade térmica.

Os resultados obtidos foram satisfatórios indicam que a técnica de fundição a indução, combinada com agitação eletromagnética devido as correntes parasitas e mecânica manual em atmosfera inerte de argônio, mostrou-se promissora para incorporar o reforço. Além disso, o alumínio, por sua baixa densidade e alta resistência à corrosão, reforça seu potencial como alternativa econômica e sustentável para aplicações que exija resistência mecânica, condutividade térmica e elétrica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Expandir a caracterização mecânica por meio da inclusão de ensaios de resistência à tração, substituindo o teste de microdureza Vickers pela técnica de ultra-microdureza, visando maior precisão nas medições.

Realizar ensaios de impacto como complemento à caracterização mecânica, com o objetivo de investigar a formação do microconstituente carbeto de alumínio (Al_4C_3), e ensaio de EBSD (*Electron Backscatter Diffraction*).

Estudar a funcionalização química do nanografeno com diferentes elementos, com o propósito de melhorar sua molhabilidade durante os processos de fundição, como: hidroxilas e carboxilas, entre outros.

Aprimorar a coleta de dados sobre a densidade verdadeira dos nanocompósitos obtidos por fundição, permitindo uma caracterização mais precisa da porosidade real, incluindo poros abertos e fechados.

Incorporar uma etapa de tratamento térmico ao lingote fundido, possivelmente “T6”, conforme indicado por norma para a liga, com o intuito de eliminar microvazios de contração e descontinuidades que comprometem as propriedades térmicas e mecânicas.

7 REFERÊNCIAS

ABAL ^A; <http://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>. Acessado em 10/02/2024.

ABAL ^B; <https://abal.org.br/aplicacoes/industria-eletrica/>. Acessado em 10/02/2024.

ABAL ^C; <https://abal.org.br/noticia/alubar-apresenta-produtos-para-o-mercado-de-energias-renovaveis-na-eleototec-2023/>. Acessado em 10/02/2024.

AFSAHI, S., LERNER, M. B., GOLDSTEIN, J. (2018). Novel graphene-based biosensor for early detection of Zika virus infection. *Biosensors and Bioelectronics*, 100, 85 88.

ALUAUTO; <http://aluauto.com.br/o-custo-da-eficiencia-energetica/>. Acessado em 1/10/2019.

AHN, J.-H., & HONG, B. H. (2014). Graphene for displays that bend. *Nature Nanotechnology*, 9(10), 737 738.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E1019. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustions and Inert Gas Fusion Techniques. 2011.

ANDREI, E. Y., Li, G., & Du, X. (2012). Electronic properties of graphene: a perspective from scanning tunneling microscopy and magnetotransport. *Reports on Progress in Physics*, 75(5), 056501.

ASKELAND D. R.; WRIGHT W. J. *Ciência e engenharia dos materiais*. 3 ed. norte-americana, 2015, São Paulo. Cengage Learning.

BAIG, Z., MAMAT, O., MUSTAPHA, M., MUMTAZ, A., MUNIR, K. S., & SARFRAZ, M. (2018). Investigation of tip sonication effects on structural quality of graphene nanoplatelets (GNPs) for superior solvent dispersion. *Ultrasonics Sonochemistry*, 45, 133-149.

BARTOLUCCI S. F. et al. Graphene-aluminum nanocomposites. *Journal Materials Science and Engineering A*. 258, 2011, 7933-7937. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509311008227?via%3DiDih>>. Acessado em novembro de 2023.

BALANDIN, A. A. (2011). Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials. *Nature Materials*, 10(8), 569 581.

BIBIK, N.; METEL, A.; CHERENDA, N.; SOTOVA, C.; ASTASHYNSKI, V.; KUZMITSKI, A.; MELNIK, Y.; VERESCHAKA, A. Structure of Eutectic Al-Si Alloy Subjected to Compression Plasma Flow Impact. *Metals* 2024, 14, 1415. <https://doi.org/10.3390/met14121415>

BOLOTIM, K. I., SIKES, K. J., JIANG, Z., KLIMA, M., FUDENBERG, G., HONE, J., STORMER, H. L. (2008) Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*, 146(9-10), 351 355.

BRANT, JULIANA CALDEIRA. Transporte elétrico em nanoestrutura de grafeno: influência da funcionalização, da geometria e da dopagem do substrato. 2011. 95 f. Tese (Doutorado em Ciência). Instituto de Ciências Exatas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

BEATY H. W.; FINK D. G. Standard handbook for electrical engineers. 16 ed., 2012, p. 145-154. Mc Graw Hill.

BHUSHAN, B. (Ed.). (2016). Encyclopedia of Nanotechnology.

DA COSTA F. R. T. Microscopia eletrônica de varredura: potencialidades e aplicações. UFMA. Química Industrial. 2016.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8 ed., 2015, Rio de Janeiro. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora.

MOTA, Ronaldo. Nanotubos de Carbono: história. Propriedades, dopagem, nanocones, aplicações e desafios. In: Santos, Coura, Dantas (Org). Escola Brasileira de Estrutura Eletrônica. Juiz de Fora, Livraria da Física, 2003. Pag 224 a 237.

CAMARGOS, JULIANA S. F. SEMMER. A. O. SILVA, SIDNEY N. Características e aplicações do grafeno e do óxido de grafeno e as principais rotas para síntese. The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC. ISSN: 2527-1075. Vol. 03 N.08 P 1118 – 1130. 2017.

CHAWLA, K. K. (2012). Metal Matrix Composites. Composite Materials, 197 248.

CHAWLA, K. K. (2012). Metal Matrix Composites. Composite Materials, 107 108.

CHAWLA, N., & Chawla, K. K. (2013). Interface. Metal Matrix Composites, 99 119.

CHEN, Z., & LU, H. (2012). Constructing sacrificial bonds and hidden lengths for ductile graphene/polyurethane elastomers with improved strength and toughness. Journal of Materials Chemistry, 22(25), 12479.

CHUNG, D. D. L. (2010). Composite Materials. Engineering Materials and Processes, pag 170-173.

Comissão Técnica da Associação Brasileira do Alumínio – ABAL. “Fundamentos e Aplicações do Alumínio”, Maio, 2007.

CONTRERAS CUEVAS, A., BEDOLLA BECERRIL, E., MARTÍNEZ, M. S., & LEMUS RUIZ, J. (2018). Introduction. Metal Matrix Composites, 1 5.

CORDEIRO G. L. Síntese química e caracterização de grafeno. 59º congresso brasileiro de cerâmica. 2015, p. 2324-2332.

COURA, IGOR MARTINS, SILVA, SIDNEY NICODEMOS DA, SOUZA, RITHYELI LAGE. O uso de grafeno e óxido de grafeno como reforço em compósito de matriz de alumínio. FMP- Fundação e Matérias-Primas. Ano XXIV Novembro 2021, nº 240.

CZERNIAK- (2015). Graphene as a Material for Solar Cells Applications. Advances in Materials Science, 15(4), 67 81.

DANIEL B. MIRACLE, Aeronautical Applications of Metal-Matrix Composites, Composites, Vol 21, ASM Handbook, Edited By Daniel B. Miracle, Steven L. Donaldson, ASM International, 2001, p 1043 1049

DAVIS, J.R. Aluminum and Aluminum Alloys. Light Metals and Alloys, ASM International, 2001.

DAVY, H. Elements of Chemical Philosophy Part 1, Vol.1, 1812.

DEDAVID B. A.; GOMES C. I.; MACHADO G. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DEGIOVANNI A.; MAILLET D.; ANDRÉ S.; BATSALE J. C.; MOYNE C. Thermal Quadrupoles: Solving the Heat Equation Through Integral Transforms. Wiley, London, 2000.

DEGIOVANNI A.; REMY B.; ANDRÉ S. Transient Radiation-Conductive Heat transfer Problems: The Quadrupole Method, Journal of Thermal Science, 11, issue 4, p. 359-371 2002.

DENG, L., YOUNG, R. J., KINLOCH, I. A., SUN, R., ZHANG, G., NOÉ, L., & MONTHIOUX, M. (2014). Coefficient of thermal expansion of carbon nanotubes measured by Raman spectroscopy. Applied Physics Letters, 104(5), 051907.

DEODATI, P.; DONNINI, R.; MONTANARI, R.; TESTANI, C.; VALENTE, T. Production and heat treatments of Ti6Al4V-SiCf composite. Part II- Mechanical characterization. Mater. Sci. Forum, 604–605, 341–350; 2009.

DINCER, I. Thermal diffusivities of geometrical objects subject to cooling. Applied Energy, London, v.51, p.111-8, 1995.

EDWARDS, R. S., & COLEMAN, K. S. (2013). Graphene synthesis: relationship to applications. Nanoscale, 5(1), 38-51.

EAA European Aluminum Association; european-aluminium.eu/blog/aluminium-automotive-manual, 2022.

EVERHART T. E.; THORNLEY R. F. M. Wide band detector for micro-microampere low-energy electron currents. J Sci Instrum. V. 37, p. 246-248, 1960.

FERNANDES, P. Metalografica: O que é e para que serve. Histórico. São Paulo-SP: IFSP, 2011.

FENG, Y., YUAN, H. L., & ZHANG, M. (2005). Fabrication and properties of silver-matrix composites reinforced by carbon nanotubes. Materials Characterization, 55(3), 211-218.

FONSECA, ALEXANDRE FONTES. Mini-Curso: Introdução às propriedades físicas e estruturais do grafeno e dos nanotubos de carbono. Rio de Janeiro 2011.

G. LIU, N. ZHAO, C. SHI, E. LIU, F. HE, L. MA, Q. LI, J. LI, C. HE, In-situ synthesis of graphene decorated with nickel nanoparticles for fabricating reinforced 6061Al matrix composites, Mater. Sci. Eng. A. 699 (2017) 85-193.

G. LI, B. XIONG, Effects of graphene content on microstructures and tensile property of graphene-nanosheets/aluminum composites, J. Alloy. Compd. 697 (2017) 31-36.

GADIPELLI, S., & GUO, Z. X. (2015). Graphene-based materials. Synthesis and gas sorption, storage and separation. Progress in Materials Science, 69, 1-60.

GEIM ANDRE K.; NOVOSELOV KONSTANTIN, S. The rise of graphene. Nature materials. VOL 6. Março. 2007.

GEIM, A. K., & NOVOSELOV, K. S. (2007). The rise of graphene. Nature Materials, 6(3), 183 191.

GENG, L., & WU, K. (2017). Metal Matrix Composites. Composite Materials Engineering, Volume 2, 305 487.

GHOSH, A., SUBRAHMANYAM, K. S., KRISHNA, K. S., DATTA, S., GOVINDARAJ, A., PATI, S. K., & RAO, C. N. R. (2008). Uptake of H₂ and CO₂ by Graphene. The Journal of Physical Chemistry C, 112(40), 15704 15707.

GONG, L., YOUNG, R. J., KINLOCH, I. A., RIAZ, I., JALIL, R., & NOVOSELOV, K. S. (2012). Optimizing the Reinforcement of Polymer-Based Nanocomposites by Graphene. ACS Nano, 6(3), 2086 2095.

GONG, L., KINLOCH, I. A., YOUNG, R. J., RIAZ, I., JALIL, R., & NOVOSELOV, K. S. (2010). Interfacial Stress Transfer in a Graphene Monolayer Nanocomposite. Advanced Materials, 22(24), 2694 2697.

GONÇALVES, R. L. P.. Avaliação de métodos de mistura na obtenção de compósitos á base alumínio reforçados com grafeno e óxido de grafeno. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia). Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2023.

Graphene: Technologies, applications and markets. BBC Research. Disponível em <<https://www.bccresearch.com/market-research/advanced-materials/graphene-technologies-applications-markets-report.html>>. Acessado em 11/02/2024.

GARAVITO, J. A. Agitação e mistura em reatores. In: Estudo experimental da agitação intermitente em reator batelada. 2013.

GULER O.; BAGCI N. A short review on mechanical properties of graphene reinforced metal matrix composites. Journal of Materials Research and Technology. 2020. Disponível em:< <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.077>>. Acessado em maio de 2021.

GURUNATHAN, S., & KIM, J.-H. (2016). Synthesis, toxicity, biocompatibility, and biomedical applications of graphene and graphene-related materials. International Journal of Nanomedicine, 1927.

H. ASGHARZADEH, M. SEDIGH, Synthesis and mechanical properties of Al matrix composites reinforced with few-layer graphene and graphene oxide, J. Alloy. Compd. 728 (2017) 47-62.

HABASHI, F. Bayer's process for alumina production: A historical perspective. Bull. Hist. Chem. 17/18 (1995), Laval University, Quebec City.

HAGHSHENAS, M. (2016). Metal Matrix Composites. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.

HAKIMI, MOHAMMAD; ALIMARD, PARANSA. Graphene: Synthesis and Applications in Biotechnology - A Review. World Applied Programming. Vol (2), No (6), Junho 2012.

HASHIM J.; LOONEY L.; HASHMI M. S. J. Metal matrix composites: production by the stir casting method. *Journal of Materials Processing Technology*. 92-93 (1999) 1-7.

[https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/secretario-destaca-crescimento-da-producao-de-cobre-em-evento-no-chile#:~:text=Segundo%20dados%20de%202021%2C%20o,toneladas%20\(dados%20de%202017\)](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/secretario-destaca-crescimento-da-producao-de-cobre-em-evento-no-chile#:~:text=Segundo%20dados%20de%202021%2C%20o,toneladas%20(dados%20de%202017).). Acessado em 14/04/2024.

HUANG, Y., OUYANG, Q., ZHANG, D., ZHU, J., LI, R., & YU, H. (2014). Carbon Materials Reinforced Aluminum Composites: A Review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27(5), 775-786.

IRWIN J. D.; NELMS R. M. Basic engineering circuit analysis. 10 ed., 2005, p. 74-75. John Wiley & Sons, Inc.

JAKOBSEN, H.A. (2014). Agitation and Fluid Mixing Technology. In: *Chemical Reactor Modeling*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05092-8_7.

J. LIU, U. KHAN, J. COLEMAN, B. FERNANDEZ, P. RODRIGUEZ, S. NAHER, D. BRABAZON, Graphene oxide and graphene nanosheet reinforced aluminium matrix composites: Powder synthesis and prepared composite characteristics, *Mater. Des.* 94 (2016) 87-94.

JESUS, KARLA ACEMANO; FREIRE, Estevão; GUIMARÃES Maria José. Grafeno: Aplicações e Tendências Tecnológicas. *Revista de Química Industrial*. Rio de Janeiro. N 737. P 14-19. 2012.

JIANG, Z., ZHANG, Y., TAN, Y.-W., STORMER, H. L., & KIM, P. (2007). Quantum Hall effect in graphene. *Solid State Communications*, 143(1-2), 14 19.

JO, G., CHOE, M., LEE, S., PARK, W., KAHNG, Y. H., & LEE, T. (2012). The application of graphene as electrodes in electrical and optical devices. *Nanotechnology*, 23(11), 112001.

LI, S., SUN, B., IMAI, H., & KONDOH, K. (2013). Powder metallurgy Ti TiC metal matrix composites prepared by in situ reactive processing of Ti-VGCFs system. *Carbon*, 61, 216 228.

LI, Z.-F., ZHANG, H., LIU, Q., SUN, L., STANCIU, L., & XIE, J. (2013). Fabrication of High-Surface-Area Graphene/Polyaniline Nanocomposites and Their Application in Supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(7), 2685 2691.

LIU, C., YU, Z., NEFF, D., ZHAMU, A., & JANG, B. Z. (2010). Graphene-Based Supercapacitor with an Ultrahigh Energy Density. *Nano Letters*, 10(12), 4863 4868.

LEE, C., WEI, X., KYSAR, J. W., & HONE, J. (2008). Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, 321(5887), 385 388.

KIM, H., PARK, K.-Y., HONG, J., & KANG, K. (2014). All-graphene-battery- bridging the gap between supercapacitors and lithium ion batteries. *Scientific Reports*, 4(1).

KUMAR, C. V., & PATTAMMATTEL, A. (2017). Discovery of graphene and beyond. *Introduction to Graphene*, 1 15.

KVANDE, H. (2008). Two hundred years of aluminum or is it aluminium? *JOM*, 60(8), 23 24.

M. RASHAD, F. PAN, A. TANG, M. ASIF, Effect of graphene nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method, *Prog. Nat. Sci.* 24 (2014) 101-108.

MARINHO, B., GHISLANDI, M., TKALYA, E., KONING, C. E., & DE WITH, G. (2012). Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder. *Powder Technology*, 221, 351 358.

MAHMOUDI, T., WANG, Y., & HAHN, Y.-B. (2018). Graphene and its derivatives for solar cells application. *Nano Energy*, 47, 51 65.

MATTHEWS, F. L., & RAWLINGS, R. D.; Composite materials: science and engineering. (Springer, Ed.) Engineering (Vol. 2nd editio, p. 483). Springer. doi:10.1016/S0140-6736(00)67208-2, 1999.

MATWEB – Especificações liga A356.0-F, Permanent Mold Cast, Tempera “F” Disponível em <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=cfbf4961e71544cb8c24ed8530386539&ckck=1>>. Acessado em 2025.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit Operations of Chemical Engineering. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

MOELLE, C., KLOSE, S., SZÜCS, F., FECHT, H. J., JOHNSTON, C., CHALKER, P. R., & WERNER, M. (1997). Measurement and calculation of the thermal expansion coefficient of diamond. *Diamond and Related Materials*, 6(5-7), 839 842.

MOORS, CAMELLIA; KEEN, KIP. Looming copper shortage shifts attention to alternative supply solutions. S&P Global Market Intelligence. 7 September 2022. Disponível em <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/looming-copper-shortage-shifts-attention-to-alternative-supply-solutions-71920158>>. Acessado em 2023.

NAGATANI T.; SAITO S.; SATO M.; YAMADA M. Development of an ultra-high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. *Sacanning Microscopy*. V 11, p. 901-909, 1987.

NAIR, R. R., BLAKE, P., GRIGORENKO, A. N., NOVOSELOV, K. S., BOOTH, T. J., STAUBER T., ... GEIM, A. K. (2008). Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene. *Science*, 320(5881), 1308 1308.

NANDA, S. S. et al. Study of antibacterial mechanism of graphene oxide using Raman spectroscopy. *Sci. Rep.* 6, 28443

NEMES-INCZE, P., OSVÁTH, Z., KAMARÁS, K., & BIRÓ, L. P. (2008). Anomalies in thickness measurements of graphene and few layer graphite crystals by tapping mode atomic force microscopy. *Carbon*, 46(11), 1435 1442.

NOVOSELOV, K. S., GEIM, A. K., MOROZOV, S. V., JIANG, D., KATSNELSON, M. I., GRIGORIEVA, I. V., FIRSOV, A. A. (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 438(7065), 197 200.

- PARTOENS, B., & PEETERS, F. M. (2006). From graphene to graphite: Electronic structure around the K point. *Physical Review B*, 74(7).
- PRAMANIK, S., CHERUSSERI, J., BABAN, N. S., SOWNTHARYA, L., & KAR, K. K. (2016). Metal Matrix Composites: Theory, Techniques, and Applications. *Composite Materials*, 369 411.
- QU, L., LIU, Y., BAEK, J.-B., & DAI, L. (2010). Nitrogen-Doped Graphene as Efficient Metal-Free Electrocatalyst for Oxygen Reduction in Fuel Cells. *ACS Nano*, 4(3), 1321 1326.
- RAFIEE, M. A., RAFIEE, J., WANG, Z., SONG, H., YU, Z.-Z., & KORATKAR, N. (2009). Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content. *ACS Nano*, 3(12), 3884 3890.
- SABOORI, A., MOHEIMANI, S., DADKHAH, M., PAVESE, M., BADINI, C., & FINO, P. (2018). An Overview of Key Challenges in the Fabrication of Metal Matrix Nanocomposites Reinforced by Graphene Nanoplatelets. *Metals*, 8(3), 172.
- SANTOS, G. A. Efeito da formação do intermetálico Al₄C₃ na liga MA2024 a partir da adição de carbono. 2025. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) - Udesc, 2012. Disponível em: <https://repositorio.udesc.br/handle/UDESC/12805>.
- SEGUNDO J & O. VILAR, EUDESIO. (2016). Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. *Revista Eletronica de Materiais e Processos*. 11. 54.
- SEYED POURMAND, N., & ASGHARZADEH, H. (2019). Aluminum Matrix Composites Reinforced with Graphene: A Review on Production, Microstructure, and Properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 1-49.
- SHAREENA, D. T. P., MCSHAN, D., Dasmahapatra, A. K., & Tchounwou, P. B. (2018). A Review on Graphene-Based Nanomaterials in Biomedical Applications and Risks in Environment and Health. *Nano-Micro Letters*, 10(3).
- SHEARER, C. J., SLATTERY, A. D., STAPLETON, A. J., SHAPTER, J. G., & GIBSON, C. T. (2016). Accurate thickness measurement of graphene. *Nanotechnology*, 27(12), 125704.
- SHIN, S. R., LI, Y.-C., JANG, H. L., KHOSHAKHLAGH, P., AKBARI, M., NASAJPOUR, A., KHADEMHOSEINI, A. (2016). Graphene-based materials for tissue engineering. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 105, 255-274.
- SKIBO D.M.; SCHUSTER D.M.; JOLLA L. Process for preparation of composite materials containing nonmetallic particles in a metallic matrix, and composite materials made by, US Patent No. 4 786 467,1988.
- STAFF, REUTERS. METALS-Copper rises on supply disruption concerns. *Discovery Thomson Reuters*. September 8, 2022. Disponível em <https://www.reuters.com/article/idUSL1N30F06K>>. Acessado em 2023.
- STANDART AMERICAN SOCIETY - SAE J452. General information – Chemical compositions, Mechanical and Physical properties of SAE Aluminum Casting Alloys. 2003.
- SU, B., TANG, J., HUANG, J., YANG, H., QIU, B., CHEN, G., & TANG, D. (2010). Graphene and Nanogold-Functionalized Immunosensing Interface with Enhanced Sensitivity for One-

Step Electrochemical Immunoassay of Alpha-Fetoprotein in Human Serum. *Electroanalysis*, 22(22), 2720-2728.

SUR, U. K. (2012). Graphene- A Rising Star on the Horizon of Materials Science. *International Journal of Electrochemistry*, 2012, 1-12.

T. REISS, K. HJELT AND A. C. Ferrari. Graphene is on track to deliver on its promises. *Nature Nanotechnology*. Vol. 14. Oct. 2019, 904-910.

TÖRÖK, E., Perry, A. J., Chollet, L., & Sproul, W. D. (1987). Young's modulus TiN, TiC, ZrN and HfN. *Thin Solid Films*, 153(1-3), 37-43.

UGARTECHE, C. V. Desenvolvimento de material sinterizado à base de ligas ferro-cobre para aplicações em condutividade térmica. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

VENKANNA, B.K. (2010). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New Delhi: PHI Learning. p. 38. ISBN 978-81-203-4031-2.

VLASOV, A. I., TEREENT'EV, D. S., & SHAKHNOV, V. A. (2017). Graphene flexible touchscreen with integrated analog-digital converter. *Russian Microelectronics*, 46(3), 192-199.

VENKATESAN S.; XAVIOR M. A.; Tensile behavior of aluminum alloy (AA7050) metal matrix composite reinforced with graphene fabricated by stir and squeeze cast processes. *Science and Technology of Materials*. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.02.005>>. Acessado em novembro de 2021.

WU, Y., ZHAN, K., YANG, Z., SUN, W., ZHAO, B., YAN, Y., & YANG, J. (2019). Graphene oxide/Al composites with enhanced mechanical properties fabricated by simple electrostatic interaction and powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 775, 233-240.

X. GAO, H. YUE, E. GUO, H. ZHANG, X. LIN, L. YAO, B. WANG, Preparation and tensile properties of homogeneously dispersed graphene reinforced aluminum matrix composites, *Mater. Des.* 94 (201) 54-60.

XIONG, B., XU, Z., YAN, Q., LU, B., & CAI, C. (2011). Effects of SiC volume fraction and aluminum particulate size on interfacial reactions in SiC nanoparticulate reinforced aluminum matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(4), 1187-1191.

XU, C., WANG, X., & ZHU, J. (2008). Graphene-Metal Particle Nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(50), 19841-19845.

YANG, ZHI et al. The Prospective Two-Dimensional Graphene Nanosheets: Preparation, Functionalization, and Applications. *Nano-Micro Lett.* Vol 4, No 1, 2012.

WALLACE, P. R. (1947). The Band Theory of Graphite. *Physical Review*, 71(9), 622-634.

ZIEGLE, BART. Electric Vehicles Require Lots of Scarce Parts. Is the Supply Chain Up to It? *The wall Street Journal*. 12 November 2022. Disponível em <<https://www.wsj.com/articles/electric-vehicles-scarce-parts-supply-chain-11668206037>>. Acessado em 2023.

ZHOU, M. Fundição com agitação mecânica: fundamentos e aplicações. In: Projeto de equipamento para obtenção de compósitos de matriz metálica particulados. 1997.

Apêndice 1 – Tentativas de dispersão homogênea do grafeno na matriz de Al

Durante as pesquisas foi investigado diversas rotas a fim de obter as amostras para caracterização. Durante as tentativas de fundição de ligas de alumínio com adição de grafeno em forno de indução, diversas abordagens foram testadas com o objetivo de melhorar a dispersão do nanomaterial na matriz metálica.

Inicialmente, buscou-se o uso de refratário ao longo do cadinho para minimizar reações indesejadas, apresentado na Figura 56.

Figura 56 – Revestimento do Cadinho com Concreto Refratário.



Fonte: Próprio autor, 2025

Na sequência, seguiu da inserção de grafeno em folhas de alumínio e, posteriormente, em papeletes distribuídos ao longo do cadinho, visando uma dispersão mais homogênea, conforme apresentado na Figura 57.

Figura 57 – Alternativas para Inserção do Grafeno Durante a Fusão.



Fonte: Próprio autor, 2025

Também foram utilizados dispositivos de alta rotação para promover a mistura entre o alumínio fundido e o grafeno, conforme apresentado na Figura 58. No entanto, enfrentaram-se desafios significativos, como o controle impreciso da temperatura baseado apenas na experiência do operador, falhas na bomba de vácuo que dificultaram a execução dos experimentos. Essas dificuldades evidenciaram a necessidade de melhorias no controle de processo, automação e infraestrutura para garantir maior confiabilidade e eficiência na incorporação de nanomateriais em ligas metálicas.

Figura 58 – Alternativas para Agitação Mecânica para Homogeneidade.



Fonte: Próprio autor, 2025

Após estas tentativas de insucesso conforme apresentado na Figura 59.

Figura 59 – Exemplos de alguns casos de Insucesso na Dispersão do GNP.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Foi definida uma alternativa que apresentou os melhores resultados, a partir da qual se deu continuidade à produção das amostras para caracterizações, conforme descrito no item 4.2 do capítulo de Materiais e Métodos.

Apêndice 2 – Data Sheet Alumínio SAE 323 - Capixaba

Constituintes químicos do material de liga de alumínio SAE J425 323



Certificado de Análise

Certificate of Analysis

Nota Fiscal :

Cliente / Client : **Amostra**

Data / Date : **22/09/2023**

Especificação Química do Cliente / Client Specification : SAE 323

Elementos / Elements %	Si Silício	Fe Ferro	Cu Cobre	Mn Manganês	Mg Magnésio	Cr Cromo	Ni Níquel	Zn Zinco	Sn Estanho	Ti Titânio	Pb Chumbo	Ca Cálcio	Sr Estrôncio	Al Alumínio	Mn/Fe Relação	Total Referência	IS Segregação
Mínimo Minimum	6,50				0,20									Restante			
Máximo Maximum	7,50	0,60	0,25	0,35	0,45	0,05	0,05	0,35	0,05	0,25	0,05	0,05	0,05	Restante		0,15	

Análise Média Espectrômetro / Spectrometer Average Analysis

Lotes Batches	Elementos Elements	Si Silício	Fe Ferro	Cu Cobre	Mn Manganês	Mg Magnésio	Cr Cromo	Ni Níquel	Zn Zinco	Sn Estanho	Ti Titânio	Pb Chumbo	Ca Cálcio	Sr Estrôncio	Al Alumínio	Mn/Fe Relação	Total Sem/Espec.	IS	Kg
235807	29200	6,90	0,220	0,018	0,110	0,300	0,005	0,029	0,008	0,001	0,065	0,011	0,0008	-0,000	92,30	0,5	0,015	0,44	14

Descrição para o Produto / Product Description : **SAE 323**

Peso / Weight : **0.014**

Observações do Certificado / Certificate Observations

Método de Análise conforme norma interna IT-02 / Analysis Method according to internal standard IT-02

Fe/Mn – Relação Ferro Manganês / Iron Manganese Ratio

IS – Índice de Segregação / Segregation Index

Controle de Qualidade / Quality Control

 ISMAEL PEREIRA
 CRQIV: 044107551

Anexo I – Data Sheet HP10 Powder HEXOGRAFENO 2025



HP10 Powder

FICHA DE DADOS

HP10 Powder

Grafeno (pó), Graphene few layer, Grafite esfoliado, Grafeno de Poucas Camadas (GPC)

Espectroscopia RAMAN analisada via software de ponta (rede neural) [1]:

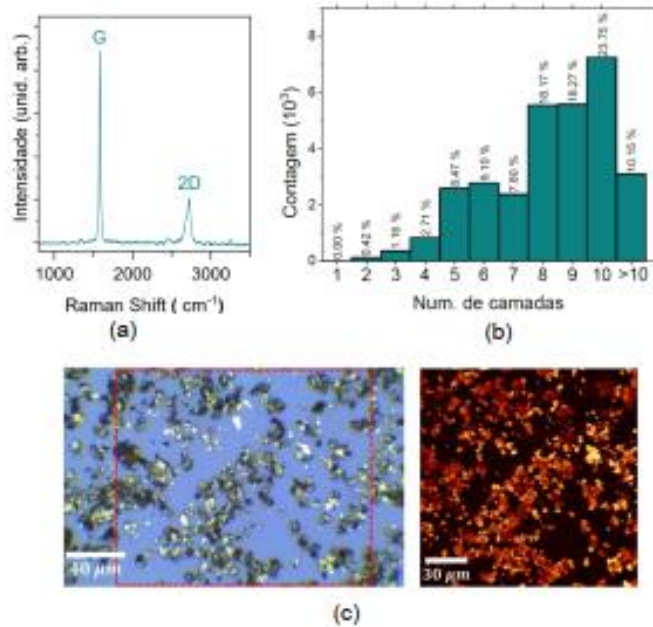


Figura 1 – (a) Espectro Raman predominante nas áreas analisadas, fora usado para as medidas o laser de comprimento de onda de 532 nm. (b) Distribuição do número de camadas obtida através de Mapeamento Raman característico do HP10 Powder. (c) A imagem da esquerda é uma imagem óptica da amostra depositada em substrato de silício e, a direita é uma imagem de Hiperespectro selecionando a intensidade da banda 2D (~2650 cm⁻¹) na região delimitada em vermelho na imagem óptica a esquerda. Figuras pelo grupo FABNS/UFMG.

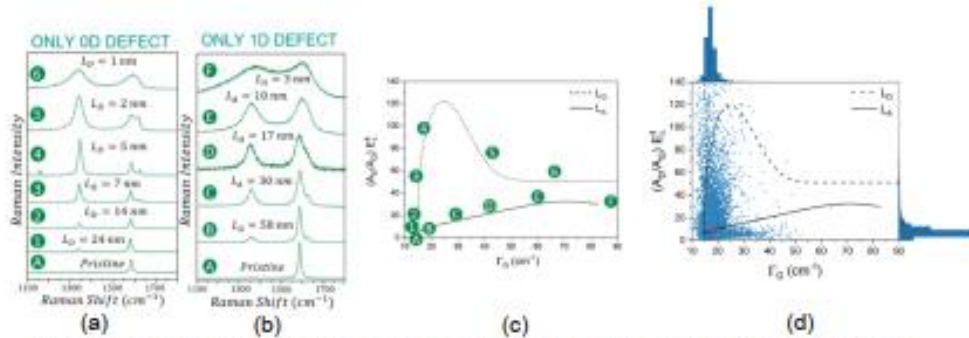


Figura 2 - Variação no espectro de materiais carbonosos devido à presença de (a) defeitos pontuais (0D), (b) defeitos de borda (1D). (c) Caminho de amorfização. (d) Resultado estatístico obtidos pelo tratamento via software pelo grupo FabNS-UFMG.

[1] Sessão com dados extraídos de relatório de análise fornecido e embasado em estado da arte e ISO21356-1. Os textos acadêmicos com os estudos são:

Diogo L. Silva, João V. Campos, Thales F.D. Fernandes, Jonathan G. Barbo, Lucas R.P. Martins, Edir M. Soares, Douglas B. Aguiar, Hudson Almeida, Cassiano Ribeiro, César P. Silva Neto, João Carlos, and Luis Gustavo Campello. Raman spectroscopy analysis of number of layers in monolayer and bilayer graphene flakes. Carbon 202, 281–288, 2020.
João Gustavo Campello, Hudson Almeida, Diogo Silva, Edir M. Soares, Francisco H. K. de Almeida, Carlos Ribeiro, and Luis Gustavo Campello. Raman spectroscopy analysis of graphene monolayer materials. 2D Materials, 6(2):025009, Apr 2019.
João Gustavo Campello, Hudson Almeida, Cassiano Ribeiro, Edir M. Soares, Francisco H. K. de Almeida, Carlos Ribeiro, Douglas B. Aguiar, and Luis Gustavo Campello. Application of Raman spectroscopy in graphene-based materials and the development of a software for large-scale data analysis. Journal of Raman Spectroscopy, 49(2):149–155, 2018.



Características do HP10 Powder

Tabela 1 – Propriedade físico-químicas do HP10 Powder obtidas através das técnicas de caracterização apresentadas acima.

Técnica	Parâmetros	Resultados
Espectroscopia Raman*	Γ_D (cm ⁻¹)	18,37
	A_{D/A_G} (eV ⁴)	8,87
	L_D (nm)	39,88
	L_A (nm)	3,27
	σ (10 ³ μm ⁻²)	2,00
Termogravimetria	C (%/min)	99,50
	Resíduo (%/min)	0,50
Análise Elementar	% C	98,65
	% H	0,05
	% N	0,04
Aparência (cor)		Preto
Densidade (g/cm ³)		0,17

* Dados Obtidos via FIBNS-UFMG via análise por software de ponta (rede neural).

Análise Granulométrica por CILAS

Gráfico 1 - Sobreposição do acumulativo de granulometria por CILAS 1190.

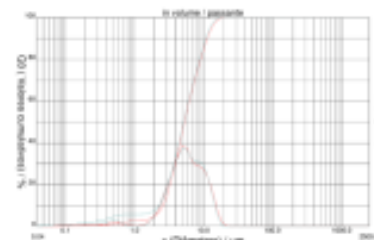


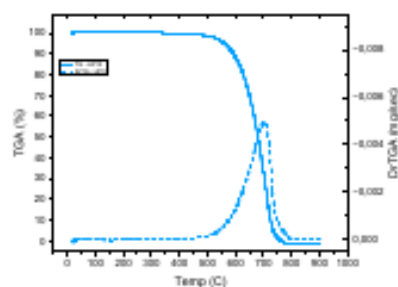
Tabela 2 - Distribuição dos diâmetros das partículas do HP10 Powder.

Características	
Diâmetro a 10%	2,49
Diâmetro a 50%	5,35
Diâmetro a 90%	11,30

Análise realizada pelo grupo LabCom-CDTN

Análise Termogravimétrica

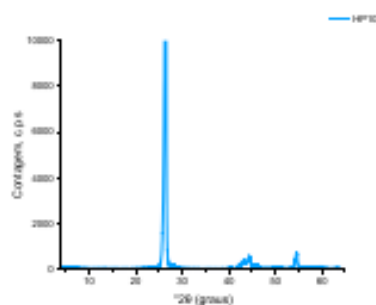
Gráfico 2 - Curva TG e DTG do HP10 em ar sintético de alta pureza e taxa de aquecimento a 10 °C/min.



Análise realizada pelo grupo GRUTAN-UFMG

Difração de raio-X (DRX)

Gráfico 3 - Difratoograma de raio-X do HP50 Powder



Análise realizada pelo grupo SEMAI-CDTN



Microscopia Eletrônica de Alta Resolução (MEV-FEG)

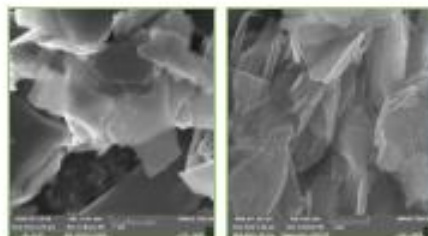


Figura 3 - Imagens alta resolução obtidas pela técnica de MEV-FEG representativas das partículas do HP10 Powder, medidas realizadas no INPE SP.

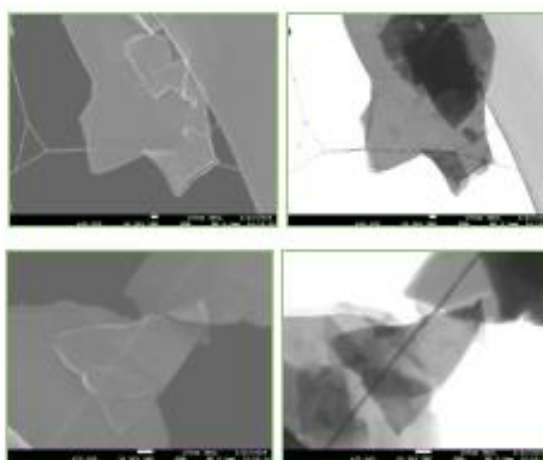


Figura 4 - Imagens de alta resolução obtidas pela técnica de MEV-FEG representativas das partículas do HP10 Powder, medidas realizadas no CIT SENAI MG.