

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DIONATHAN ALVES CAMPANELLI

**INFLUÊNCIA DO GRAFENO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ DE ALUMÍNIO**

DIONATHAN ALVES CAMPANELLI

**INFLUÊNCIA DO GRAFENO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais e meio ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Luis Enrique Gomez Armas

Coorientador: Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C186i Campanelli, Dionathan Alves
INFLUÊNCIA DO GRAFENO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ DE ALUMÍNIO / Dionathan Alves Campanelli.
81 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2025.
"Orientação: Luis Enrique Gomez Armas".

1. Grafeno. 2. Compósitos de matriz de alumínio. 3.
Propriedades mecânicas. I. Título.

DIONATHAN ALVES CAMPANELLI

**INFLUÊNCIA DO GRAFENO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE
MATRIZ DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 05/12/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Enrique Gomez Armas

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt

Coorientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes

UNIPAMPA

Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier
UNIPAMPA

Prof. Dr. Lizandro Baldomero Reyna Zegarra
Universidad Nacional del Santa- Chimbote, Perú



Assinado eletronicamente por **LUIS ENRIQUE GOMEZ ARMAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/12/2025, às 21:57, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2025, às 09:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO DURLO TIER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2025, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Lizandro Baldomero Reyna Zegarra, Usuário Externo**, em 18/02/2026, às 17:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/02/2026, às 11:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1902866** e o código CRC **39672150**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me proporcionar saúde e forças para continuar nesta jornada;

Agradeço aos meus pais Rita e Adão, por sempre me apoiarem e me incentivarem em minhas escolhas;

Agradeço à minha vó, Eloir Alves, que até seu último dia de vida acreditou em mim;

Agradeço à Victória Assunção de Freitas, pelo incentivo para que eu continuasse minha jornada e concluísse este trabalho;

Agradeço especialmente ao meu orientador Professor Dr. Luis Enrique Gomez Armas, pela orientação e paciência desde o início desta jornada;

Agradeço ao Professor Dr. Cristian Pohl Meinhardt por disponibilizar seus cadinhos para iniciar as atividades de fundição;

Agradeço à Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA e seus técnicos dos laboratórios de mecânica e metalografia.

RESUMO

Nas últimas décadas, os materiais bidimensionais (2D) têm sido alvo de intensa pesquisa multidisciplinar devido ao seu potencial revolucionário. O grafeno se destaca nessa classe por exibir propriedades únicas, especialmente eletrônicas, ópticas e mecânicas excepcionais, que o tornam um material altamente promissor para diversas aplicações tecnológicas como: supercapacitores, baterias, transistores, sensores ultrasensíveis, entre outras aplicações. Existem diversos estudos onde o grafeno é usado como reforço de compósitos de matriz de alumínio, mas em grande parte das pesquisas é utilizado pó de alumínio para criar o compósito utilizando o método de sinterização. No entanto, este trabalho tem como o intuito de usar resíduos de processo de usinagem (cavaco) para produzir compósitos de matriz de alumínio reforçados com grafeno. Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é produzir compósitos de alumínio-grafeno (Al-Graf) utilizando cavaco de alumínio. Para esse propósito, produziu-se cavaco de alumínio, que foi misturado com diferentes concentrações de grafeno (0,1%, 0,2%, 0,5%, 0,7% e 1,0%) em relação à massa do alumínio. Em seguida, a mistura cavaco e material 2D posteriormente foi prensada e transformada em pastilhas. Essas pastilhas foram, então, fundidas junto com alumínio líquido, mantido a 800°C, para obtenção do material compósito Al-Graf. Após misturar as pastilhas com alumínio fundido, o novo compósito foi vazado em moldes para a fabricação dos corpos de prova, os quais foram caracterizados por meio das seguintes técnicas de caracterização: fluorescência de raios-X (FRX), espectroscopia Raman confocal e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a uma série de ensaios mecânicos, incluindo testes de microdureza, compressão, impacto, desgaste e tração. Os espectros Raman confirmaram a interação entre o alumínio e os materiais 2D, evidenciando a homogeneidade da mistura. Quanto aos resultados de microdureza, observou-se um aumento progressivo com a adição de reforço quando comparado com o Al puro, atingindo um valor de 19% para amostras com 1%, este aumento progressivo também é observado no ensaio de compressão. Outros resultados que se mostraram promissores foram o ensaio de impacto, onde teve um aumento na energia de 97% para amostras com 1% de grafeno, quando comparado com a amostra referência. Em forma geral, os resultados apresentados neste trabalho, mostram um leve aumento das propriedades mecânicas do alumínio depois da adição

de grafeno em sua estrutura. De forma semelhante, este trabalho evidencia que o cavaco de alumínio (resíduo de usinagem) aprimorado com grafeno possui potencial significativo para promover a reciclagem e atender às demandas industriais. A incorporação desse compósito em processos produtivos pode viabilizar rotas de reciclagem mais eficientes, reduzir o desperdício de materiais e gerar produtos mais leves, duráveis e de maior desempenho. Além disso, suas propriedades avançadas ampliam as possibilidades de aplicação em setores industriais e em tecnologias de remediação ambiental, contribuindo simultaneamente para a inovação e para a mitigação de impactos ambientais.

Palavras-chave: Grafeno, compósitos de matriz de alumínio, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

In recent decades, two-dimensional (2D) materials have been the subject of intense multidisciplinary research due to their revolutionary potential. Graphene stands out in this class for exhibiting unique properties, especially exceptional electronic, optical, and mechanical properties, which make it a highly promising material for various technological applications such as: supercapacitors, batteries, transistors, ultrasensitive sensors, among others. There are several studies where graphene is used as reinforcement for aluminum matrix composites, but in most research, aluminum powder is used to create the composite using the sintering method. However, this work aims to use machining process waste (swarf) to produce graphene-reinforced aluminum matrix composites. In this sense, the main objective of this work is to produce aluminum-graphene (Al-Graf) composites using aluminum swarf. For this purpose, aluminum chips were produced and mixed with different concentrations of graphene (0.1%, 0.2%, 0.5%, 0.7%, and 1.0%) relative to the mass of the aluminum. The chip and 2D material mixture was then pressed and formed into pellets. These pellets were then melted with liquid aluminum, maintained at 800°C, to obtain the Al-Graf composite material. After mixing the pellets with molten aluminum, the new composite was poured into molds to manufacture test specimens, which were characterized using the following techniques: X-ray fluorescence (XRF), confocal Raman spectroscopy, and scanning electron microscopy (SEM). Subsequently, the test specimens were subjected to a series of mechanical tests, including microhardness, compression, impact, wear, and tensile tests. Raman spectra confirmed the interaction between aluminum and 2D materials, demonstrating the homogeneity of the mixture. Regarding microhardness results, a progressive increase was observed with the addition of reinforcement when compared to pure Al, reaching a value of 19% for samples with 1% graphene. This progressive increase was also observed in the compression test. Other promising results were obtained in the impact test, where there was a 97% increase in energy for samples with 1% graphene, compared to the reference sample. Overall, the results presented in this work show a slight increase in the mechanical properties of aluminum after the addition of graphene to its structure. Similarly, this work demonstrates that aluminum shavings (machining waste) enhanced with graphene have significant potential to promote recycling and meet industrial demands. The incorporation of this composite into production processes can enable more efficient recycling routes, reduce material waste, and generate lighter, more durable, and higher-performance products. Furthermore, its advanced properties broaden the possibilities for application in industrial sectors and environmental remediation technologies, simultaneously contributing to innovation and the mitigation of environmental impacts.

Keywords: Graphene, aluminum matrix composites, mechanical properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema representando a estrutura do a) grafeno, b) grafeno várias camadas e c) grafite.....	19
Figura 2.2 - Ilustração de gap de um semicondutor e gap nulo do grafeno.	20
Figura 2.3 - Representação do método de esfoliação micromecânica do grafeno.	22
Figura 2.4 - Tipo de espalhamento da luz.....	24
Figura 2.5 – Espectro Raman mostrando as bandas D, G e 2D.	25
Figura 2.6 – Comparação do espectro Raman do Go, rGO e grafite.....	26
Figura 2.7 - Representação simples do Processo Bayer.	27
Figura 2.8 - Representação simples do Processo de Hall-Hérault.....	27
Figura 3.1 - (a) Barra de Al de 3/4 polegadas, (b) grafeno.....	37
Figura 3.2 - Organograma da Etapa 1.	38
Figura 3.3 - Organograma da Etapa 2.	39
Figura 3.4 - (a) Barra de Al cortada com 35 mm e 150 mm; (b) torno usado para a usinagem da barra de Al; (c) liquidificador; (d) cavaco após a usinagem (antes do liquidificador) e (e) cavaco após moagem pelo liquidificador.	40
Figura 3.5 - (a) Equipamento de FRX; (b) Microscópio Raman confocal e (c) Microscópio eletrônico de varredura.	42
Figura 3.6 - (a) Balança de precisão e (b) pilão.	43
Figura 3.7 - (a) Prensa hidráulica; (b) molde usado para o embutimento da mistura; (c) pastilhas de cavaco com material 2D.....	44
Figura 3.8 - (a) Cadinho para fundição; (b) Forno mufla.	45
Figura 3.9 - Molde usado para fazer os corpos de prova fundidos; (b) Corpos de provas retirados do molde.	46
Figura 3.10 - (a) Medidas do corpo de prova usado para ensaio de tração; (b) máquina universal de ensaio.	47
Figura 3.11 - (a) Corpos de prova antes da usinagem; (b) Corpos de prova após usinagem.	48
Figura 3.12 – a) Microdurômetro e b) imagem ilustrativa dos pontos onde foram feitas medidas de microdureza.....	49
Figura 3.13 – (a) Medidas do corpo de prova para ensaio de charpy; (b) máquina usada para fazer entalhe e (c) máquina de ensaio de charpy.	50
Figura 3.14 – (a) Molde usado para fazer corpos de prova do ensaio de charpy; (b) corpos de provas usinados e com entalhe.....	51
Figura 3.15 - Equipamento usado no ensaio de desgaste.	52
Figura 4.1 – a) Imagem do grafeno usando microscópio óptico após ser misturado com cavaco de alumínio, b) espectro raman do grafeno misturado com cavaco.	55
Figura 4.2 – Imagem do grafeno e espectro Raman após fundição, sendo: a)-b) 0,1% de grafeno, c)-d) 0,2% de grafeno, e)-f) 0,5% de grafeno, g)-h) 0,7% de grafeno e i)-j) 1,0% de grafeno.....	56
Figura 4.3 – Imagem MEV do Al puro.....	59
Figura 4.4 – Imagem MEV do Al-Graf_0,1%.....	59
Figura 4.5 – Imagem MEV do Al-Graf_0,2%.....	60
Figura 4.6 – Imagem MEV do Al-Graf_0,5%.....	60
Figura 4.7 – Imagem MEV do Al-Graf_0,7%.....	61
Figura 4.8 – Imagem MEV do Al-Graf_1%.....	61
Figura 4.9 – Microdureza dos compósitos de matriz de alumínio reforçado com grafeno.	62
Figura 4.10 – Tensão de compressão do Al e Al-Graf para 0,6 de deformação	

.....	65
Figura 4.11 – Comparação entre os ensaios de compressão do Al e compósitos.....	66
Figura 4.12 – Comparação entre os gráficos de compressão do Al e do Al-Graf_1,0%.	68
Figura 4.13 – Resultado da energia absorvida pelo Al e os compósitos.....	70
Figura 4.14 – Resultados do ensaio de desgaste abrasivo para a) 50 ciclos, b) 100 ciclos e 150 ciclos	73
Figura 4.15 -- Resultados da resistência à tração do Al e compósitos.....	76
Figura 4.16 – a) Gráfico tensão versus deformação do Al e dos compósitos Al-Graf, e b) Comparação entre os gráficos do Al puro, com 0,5% de Graf e com 1,0% de Graf.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades físicas do alumínio e do aço.	26
Tabela 2.2 - Ligas de Al trabalháveis.	27
Tabela 2.3 - Ligas de Al para fundição.....	28
Tabela 2.4 - Propriedades físicas de alguns reforços usados em matrizes metálicas. ...	32
Tabela 2.5 - Compósito de matriz de alumínio e aplicações na indústria automobilística.	33
Tabela 2.6 - Resultado obtidos em alguns trabalhos com compósitos de matriz alumínio reforçados com grafeno.	34
Tabela 3.1- Procedimento Etapa 1.	37
Tabela 3.2 – Procedimento da Etapa 2.....	43
Tabela 3.3 – Montagem dos dados para uso da ANOVA com um único fator.	54
Tabela 3.4 – Fórmulas de cálculos para ANOVA de um fator.....	54
Tabela 4.1 – Elementos químicos do Alumínio.	56
Tabela 4.2 – Microdureza (HV) e aumento percentual dos compósitos em relação ao Al puro.....	62
Tabela 4.3 – Medidas de microdureza, suas somas totais e médias.....	64
Tabela 4.4 – Análise de Variância em termos de microdureza.	64
Tabela 4.5 – Tensão de compressão para 60 % de deformação dos Al-Graf e seu aumento percentual relação ao Al puro.....	65
Tabela 4.6 – Valores das deformações encontradas para 0,2 de deformação, 0,4 de deformação e 0,6 de deformação.	67
Tabela 4.7 – Medidas da tensão de compressão para 0,6 de deformação, suas somas totais e médias.....	68
Tabela 4.8 – ANOVA, para os dados da tensão de compressão, com um único fator. .	69
Tabela 4.9 – Tabela mostrando energia absorvida e seu aumento percentual em relação ao Al.	70
Tabela 4.10 – Medidas da energia absorvida obtida no ensaio de charpy, somas totais e médias.	71
Tabela 4.11 – Análise de Variância em termos de energia absorvida.	72
Tabela 4.12 – Apresentação dos resultados do ensaio de desgaste abrasivo para 150 ciclos, suas somas totais e médias.	74
Tabela 4.13 – Análise de Variância do desgaste abrasivo para 150 ciclos.....	75
Tabela 4.14 -- Resistência à tração (Mpa) e aumento percentual dos compósitos em relação ao Al puro.....	76
Tabela 4.15 – Algumas propriedades extraídas do gráfico tensão versus deformação.	78
Tabela 4.16 – Medidas da resistência à tração obtidas com ensaio de tração uniaxial, suas somas totais e médias.....	79
Tabela 4.17 – Análise de Variância em termos de resistência à tração.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Al - Alumínio

Al-Graf – Alumínio com grafeno

SiO₂ - Óxido de Silício

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio

CFC – Cubo de Fase Centrada

Si - Silício

CMM – Compósito de matriz metálica

CMA – Compósito de matriz de alumínio

FRX - Fluorescência de raios-X

MSR – Metodologia de superfície de resposta

Graf – Grafeno

CV – Cavaco

ANOVA – Análise de Variância

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Grafeno	19
2. 2 Novas tecnologias à base de grafeno	21
2. 3 Formas de Obtenção do Grafeno.....	22
2.3.1 Esfoliação Micromecânica.....	22
2.3.2 Esfoliação química.....	22
2.3.3 Esfoliação química em Fase Vapor (CVD).....	23
2.3.4 Esfoliação por intercalação.....	23
2.4 Caracterização do grafeno por espectroscopia Raman	23
2.5 Alumínio	26
2.5.1 Alumínio e suas ligas.....	26
2.5.2 Cavaco de alumínio.....	30
2.6 Compósitos de Matriz Metálica	31
2.6.1 Compósito de Matriz de Alumínio reforçada com grafeno	33
2.7 Estado da Arte.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	38
3.1 Materiais.....	38
3.1.1 Alumínio (Al)	38
3.1.2 Grafeno (Graf).....	38
3.2 Métodos Experimentais	39
3.2.1 Etapa 1.....	40
3.2.2 Etapa 2.....	43
3.2.3 Ensaio de tração.....	47
3.2.4 Ensaio de compressão	49
3.2.5 Ensaio de microdureza	49
3.2.6 Ensaio de Impacto modificado.....	50
3.2.7 Ensaio de desgaste.....	52
3.3 Análise de Variância (ANOVA) com um único fator e Teste de significância.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 Caracterização das matérias primas	55

4.2 Espectroscopia Raman do Al-Graf	56
4.3 Análise dos compósitos por MEV	58
4.4 Microdureza	62
4.5 Resistência à compressão	65
4.6 Energia absorvida	69
4.7 Desgaste abrasivo.....	72
4.8 Ensaio de tração.....	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
5.1 Conclusões	81
5.2 Sugestões de trabalhos futuros.....	82
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O grafeno é um material bidimensional (2D) que cada vez mais vem atraindo a atenção de diversas áreas das ciências e engenharia, isso devido às suas propriedades e suas capacidades de ser aplicado em diversas áreas (Haak, M. S., 2017).

O grafeno é um material 2D da espessura de um átomo, com seus átomos arranjados de forma hexagonal, na forma de favo de mel, confere características únicas, como alta condutividade elétrica e térmica, boa transparência, boa resistência mecânica, flexibilidade inerente e grande área superficial específica (Sun et al., 2011; Khoshghadam-Pireyousefan, Mohammad et al., 2020). Devido a suas propriedades e estrutura o grafeno vem sendo foco de pesquisas, na indústria eletrônica para substituir o silício (chips e transistores), no armazenamento de energia (baterias e supercapacitores), na medicina os sensores biomédicos ultrassensíveis, na desinfecção e purificação da água, além de ser usado na engenharia de materiais para criar compósitos ultraleves e super-resistentes para utilização nas áreas como aeronáutica e automobilística (SUN et al., 2021 ; LIU, C., et al., 2024). Estes são alguns exemplos das áreas onde o grafeno pode ser aplicado, fazendo com que haja uma grande evolução e avanço tecnológico (WANG et al., 2010).

Paralelamente, o alumínio (Al) destaca-se como um metal abundante no território brasileiro e amplamente utilizado pela indústria. Suas características — baixa densidade, resistência à corrosão, boa condutividade elétrica e térmica, uma boa ductilidade — o tornam relevante para setores como aeronáutica, automotivo, construção civil e embalagens (ABAL). Além disso, o alumínio possui alta reciclabilidade, podendo ser reaproveitado infinitamente sem perda significativa de suas propriedades originais, o que o configura como um material sustentável (SOUZA, 2015). Adicionalmente, o alumínio possui destaques em vários setores da indústria, setores como embalagens para bebidas e alimentos, setor automotivo e aeronáutico, onde é utilizado em partes estruturais de carros e aviões, além de ser utilizado no setor de construção civil (janelas, portas, fachadas etc.) e o setor de eletrônicos também faz uso deste material excepcional (WALSH, 2017).

Atualmente, a busca por novas tecnologias em materiais metálicos é impulsionada não apenas por demandas econômicas, mas também por questões ambientais. Uma das questões mais discutidas é a emissões de gases poluente,

especialmente por veículos movidos a combustíveis fósseis, exige soluções como o desenvolvimento de ligas e compósitos mais leves, que permitam diminuir o peso dos automóveis e, conseqüentemente, seu consumo energético e impacto ambiental ;(ASM INTERNACIONAL). Desta forma a utilização de novas ligas ou compósitos surge como uma solução para redução de peso de automóveis, e como consequência a uma diminuição na emissão de poluentes, já que estes automóveis ficariam mais leves, este é um exemplo, de o porquê a necessidade de novos materiais é um caminho para resolver diversos problemas industriais e ambientais.

Na última década o grafeno vem tendo um destaque como um material emergente e capaz de resolver e melhorar estruturas de outros materiais já existentes. Por este motivo se faz necessário a produção de novas ligas onde o grafeno entre como aditivo para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, um exemplo é o desenvolvimento de compósitos de matriz metálica usando alumínio juntamente com grafeno (Al-Graf).

Neste contexto, esta dissertação de mestrado tem como objetivo a produção e caracterização de compósitos de matriz de alumínio, reforçado com grafeno (Al-Graf). Existem diversos estudos que empregam técnicas, como fundição e metalurgia do pó. Essas técnicas são as principais para produção de compósitos de matriz de alumínio, mas o que diferencial este trabalho dos outros, é a utilização do cavaco de alumínio como base de mistura do grafeno. Na grande maioria dos estudos, a produção desses compósitos é realizada por técnicas da metalurgia do pó. Mas este trabalho usa como matéria prima resíduos de cavaco de alumínio que saí de processos mecânicos. O cavaco foi produzido pelo processo de tornearia, posteriormente misturado com grafeno, caracterizado, compactado e fundido. Posteriormente, as amostras produzidas foram caracterizadas por espectroscopia Raman, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e fluorescência de Raios-X, entre outras. Em seguida todos os compósitos produzidos passaram por uma série de ensaios mecânicos de: microdureza, ensaio de compressão, ensaio de impacto, ensaio de desgaste e ensaio de tração, com o intuito de estudar suas novas propriedades.

Neste trabalho será abordado a introdução; objetivos gerais e específicos; revisão bibliográfica; metodologia desenvolvida no trabalho; e Resultados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como principal objetivo fabricar compósitos de matriz de alumínio, produzidos a partir da compactação e fusão de cavaco de alumínio com diferentes porcentagens de grafeno, e determinar as propriedades mecânicas dos compósitos.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Fabricar amostras de compósitos de matriz de alumínio utilizando como matéria prima alumínio, cavaco de alumínio oriundo de processos de usinagem e grafeno em percentuais de 0.1%, 0.2%, 0.5%, 0.7% e 1%.
- Caracterizar às amostras de Al e Al-Graf usando as técnicas de: fluorescência FRX, espectroscopia Raman, microscópio eletrônico de varredura (MEV), entre outras;
- Realizar ensaio mecânicos (tração, compressão, microdureza, desgaste e impacto) afim de comparar amostras com e sem grafeno em sua composição;
- Determinar a melhor porcentagem de grafeno para produção dos compósitos (ligas) de matriz metálica de Al-Graf;

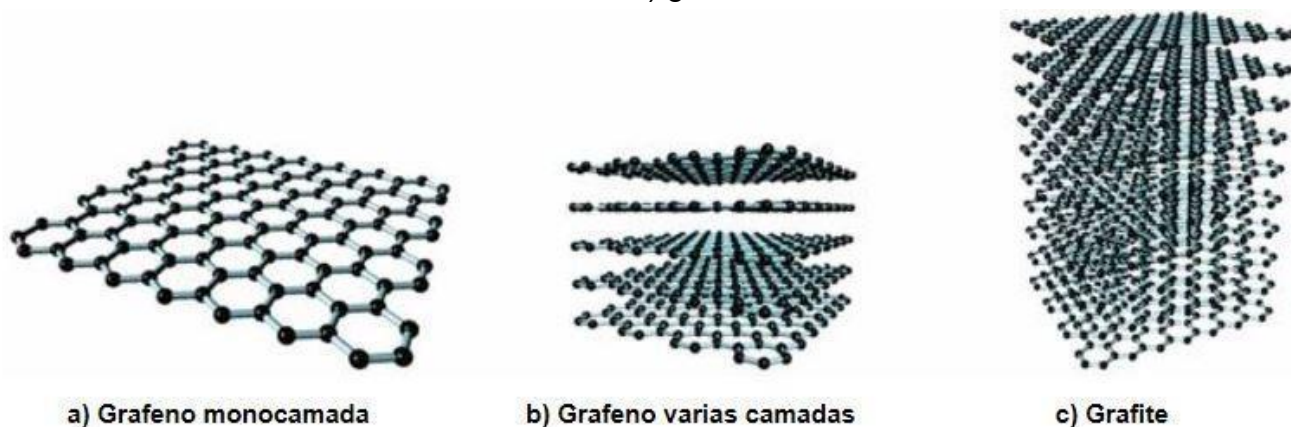
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Grafeno

O grafeno é uma das formas alotrópicas do carbono, o qual é constituído de uma camada isolada de grafite, com uma espessura entre 0,4 e 1,7 nm, tornando-o um material 2D no qual os átomos de carbono estão arranados como uma rede de forma hexagonal (SHEARER et al. 2016).

O grafeno foi isolado e caracterizado pela primeira vez em 2004 por pesquisadores da Universidade de Manchester (NOVOSELOV et al., 2004.). Para isolar a primeira folha de grafeno, os pesquisadores fizeram uso do método de clivagem micromecânica das folhas de grafite por meio de fita adesiva, resultando no menor número possível de folhas de grafeno. Na Figura 2.1 mostra a representação da estrutura do grafeno monocamadas (a), grafeno várias camadas (b) e grafite (c).

Figura 2.1 - Esquema representando a estrutura do a) grafeno, b) grafeno várias camadas e c) grafite.



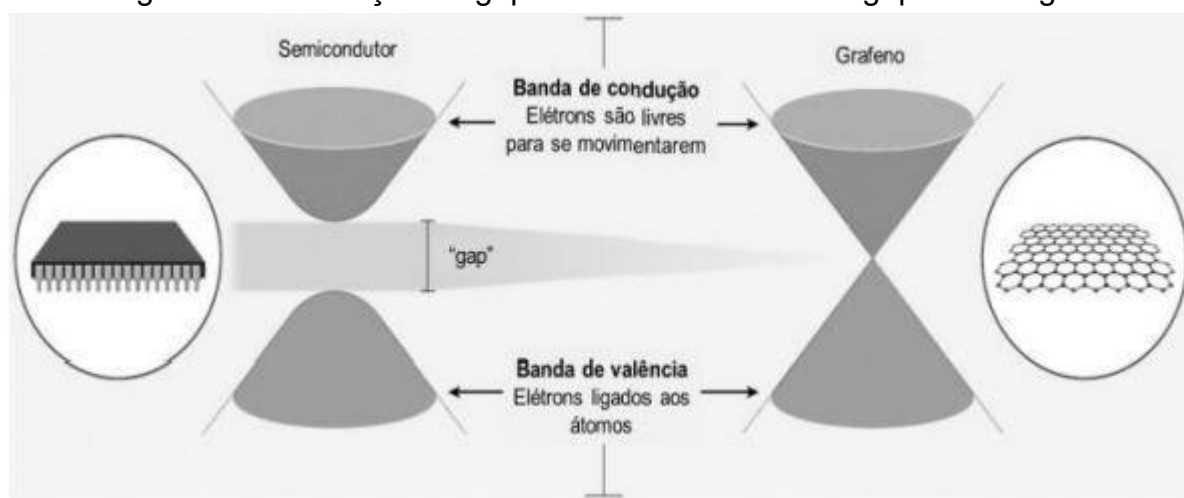
Fonte: adaptado de Zhang et al., (2018).

As propriedades do grafeno permitem sua aplicação em diversas áreas da ciência e da engenharia. Dentre essas propriedades, destacam-se sua alta condutividade elétrica e térmica (NOVOSELOV et al., 2004 e BALANDIN et al., 2008), alta resistência mecânica (LEE et al., 2008), flexibilidade e transparência (GEIM e NOVOSELOV, 2007), entre outras propriedades que o tornam singular. Devido à sua estrutura, que é organizada em forma hexagonal com átomos hibridizados na forma sp^2 , isso faz com que o grafeno tenha um elétron livre por átomo de carbono no orbital p, tornado assim o grafeno um ótimo condutor elétrico (GEIM e NOVOSELOV, 2007).

As ligações sp^2 são extremamente resistentes, fazendo do grafeno um dos materiais mais fortes conhecidos (GHANY et al. 2017).

Outra propriedade notável é sua alta mobilidade eletrônica, superior à do silício, decorrente de seu gap nulo de energia — também conhecido como ponto de Dirac. Este termo refere-se à distância infinitesimal entre a banda de valência e a banda de condução (CASTRO NETO et al., 2009). Como essas bandas possuem uma distância infinitesimal, conforme Figura 2.2, os elétrons comportam-se como se não possuíssem massa, fazendo com que esses elétrons se movem rapidamente podendo atingir velocidades na ordem de 10^6 m/s (XU et al. 2013).

Figura 2.2 - Ilustração de gap de um semicondutor e gap nulo do grafeno.



Fonte: adaptado de Xu et al., (2013).

O grafeno possui excelente condutividade térmica, alcançando valores próximos a 5000 W/m.K — mais de dez vezes superior à do cobre (XU et al. 2013). Essa eficiência na transferência de calor deve-se à sua estrutura de ligações covalentes fortes entre os átomos de carbono. Além de ser um material flexível, elástico e com uma elevada resistência mecânica — chegando ser 200 vezes maior que a do aço — com leveza e flexibilidade (LEE et al., 2008). Outra característica relevante é sua elevada área superficial, chegando próximo a $2600 \text{ m}^2/\text{g}$, o que corresponde a 260 vezes maior que a do grafite e o dobro do observado em nanotubos de carbono (GHOSH et al., 2008, LIU et al., 2010).

Devido a esse conjunto de características, o grafeno pode ser incorporado a outros materiais, possibilitando a obtenção de compósitos com características únicas, que podem tornar os materiais mais leves, resistentes e aprimorar suas propriedades mecânicas (GIUSCA et al., 2015).

2. 2 Novas tecnologias à base de grafeno

O grafeno tem impulsionado avanços em diversas áreas tecnológicas. Hoje, pesquisas e desenvolvimentos em eletrônica avançada, armazenamento de energia, medicina e materiais avançados demonstram seu potencial para transformar a indústria inteira. Nos tópicos abaixo temos alguns exemplos de pesquisas em áreas distintas.

- Eletrônica avançada: Podendo ser aplicado em transistores de alta frequência, onde é mostrado que transistores de grafeno podem atingir frequências de corte superiores a 400 GHz (LIU, C., et al., 2024). Já na eletrônica flexível, estudos recentes mostram que filmes de grafeno CVD apresentam resistência mecânica superior a 50 GPa mantendo condutividade elétrica mesmo após 100000 ciclos de dobra (KIM, Y., et al., 2021). Além disso, a flexibilidade do grafeno viabiliza dispositivos vestíveis e telas dobráveis, como as desenvolvidas pela Samsung e Huawei, que prometem revolucionar o mercado de smartphones e wearables
- Armazenamento de energia: Baterias de Íon-Lítio que utilizam anodos de grafeno mostraram uma capacidade específica de 1200 mAh/g, superando em 3 vezes os anodos convencionais (SUN et al., 2021). Supercapacitores baseados em grafeno que atingem densidade energética de 80 Wh/kg (ZUOZHAO ZHAI et al., 2022).
- Aplicações biomédicas: Chen et al., (2021) desenvolveram sensores de grafeno capazes de detectar concentrações extremamente baixas de biomoléculas, com aplicação promissora em diagnósticos médicos e monitoramento de saúde personalizado. Pesquisas envolvendo eletrodos de grafeno mostraram impedância 10 vezes menor que platina em implantes corticais (PARK et al., 2014).
- Materiais avançados: Compósitos Estruturais que utilizam grafeno como reforço estão sendo estudados. Para Shin et al. (2015) que adicionou 0,7% de grafeno em compósitos de matriz de alumínio, teve um aumento de 71,7% no limite de escoamento do material. Já a pesquisa que envolve membranas de óxido de grafeno mostra fluxo de água 10 vezes maior que membranas convencionais para dessalinização e purificação (Mi, B. 2014).

Apesar dos desafios de escalabilidade e custo, o grafeno já está saindo dos

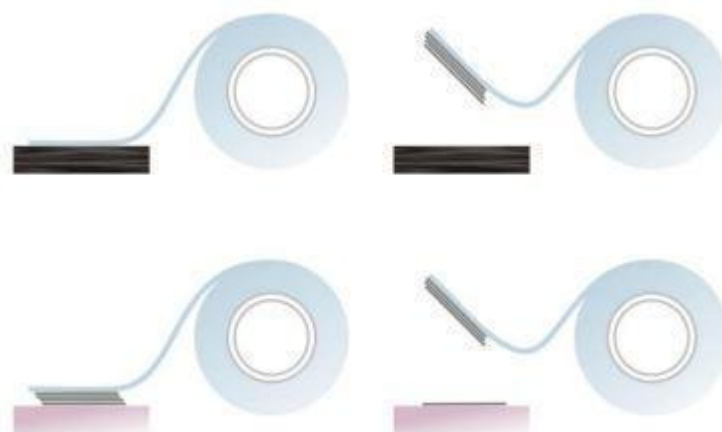
laboratórios e chegando ao mercado. Com investimentos crescentes e novas técnicas de produção, esse material está pronto para redefinir o futuro da tecnologia, desde a eletrônica do dia a dia até soluções globais em energia e saúde.

2. 3 Formas de Obtenção do Grafeno

2.3.1 Esfoliação Micromecânica

O método de esfoliação micromecânica, do grafeno, foi utilizado pela primeira vez em 2004 pelos pesquisadores André Geim e Konstantin Novoselov. Este método é o mais simples e eficaz para conseguir folha de grafeno de alta qualidade e poucas impurezas. A técnica consiste em repetidas exfoliações do grafite natural com uma fita adesiva, como as ligações entre as folhas que compõem o grafite é da ordem de grandeza de Van der Waals (forças suficientes fraca), as forças são rompidas pela fita adesiva e como consequência obtém-se o grafeno. O material depositado na fita é transferido para um substrato, conforme ilustrado Figura 2.3. Este substrato, geralmente de SiO₂ possui aproximadamente 300 nm de espessura. As amostras depositadas no substrato são caracterizadas por microscopia ótica, microscopia de força atômica (AFM), microscopia de varredura (MEV) e espectroscopia Raman (SINCLAIR et al., 2019).

Figura 2.3 - Representação do método de esfoliação micromecânica do grafeno.



Fonte: Novoselov, K. S. 2011.

2.3.2 Esfoliação química

Essa técnica consiste na separação das camadas atômicas de um material

tridimensional, fazendo uso de agentes químicos para fazer com que as ligações entre as camadas do grafeno enfraqueçam. Os reagentes penetram entre as camadas de grafeno e devido a sua produção de gases entre as folhas ocorre uma sobrepressão, provocando rompimento parcial das ligações. Devido ao processo de reação química que ocorre, é obtido o óxido de grafite, que posteriormente passa pela redução química para grafeno usando compostos redutores (SOLDANO, 2010).

2.3.3 Esfoliação química em Fase Vapor (CVD)

Essa técnica é utilizada para obter filmes finos de diversos materiais, o método CVD é um processo químico onde ocorre uma reação de produtos químicos na fase de vapor (reagentes) que contêm os componentes necessários. Este processo afeta com frequência a integridade e o desempenho do material produzido, além de aumentar a formação de impurezas e defeitos estruturais.

Uma vantagem deste método de produção de grafeno é a possibilidade de produção em larga escala, além de grafenos com grande área e alta qualidade.

2.3.4 Esfoliação por intercalação

Essa técnica consiste na imersão de cristas 3D de MoS_2 em solução com íons como o lítio ou mais recentemente íons alcalinos de sódio para a intercalação de compostos de organolítio, tais como metil-lítio (Me-Li), n-butil-lítio (n-Bu-Li), e terc-butil-lítio (tBu-Li) entre as camadas. Essas substâncias intercalantes enfraquecem as forças de Van der Waals que são responsáveis por manter as camadas do material unidas, permitindo que as camadas sejam separadas com o uso de força mecânica, como ultrassom ou agitação. Em muitos casos, os intercalantes podem ser compostos químicos como amônia, ácidos ou sais metálicos.

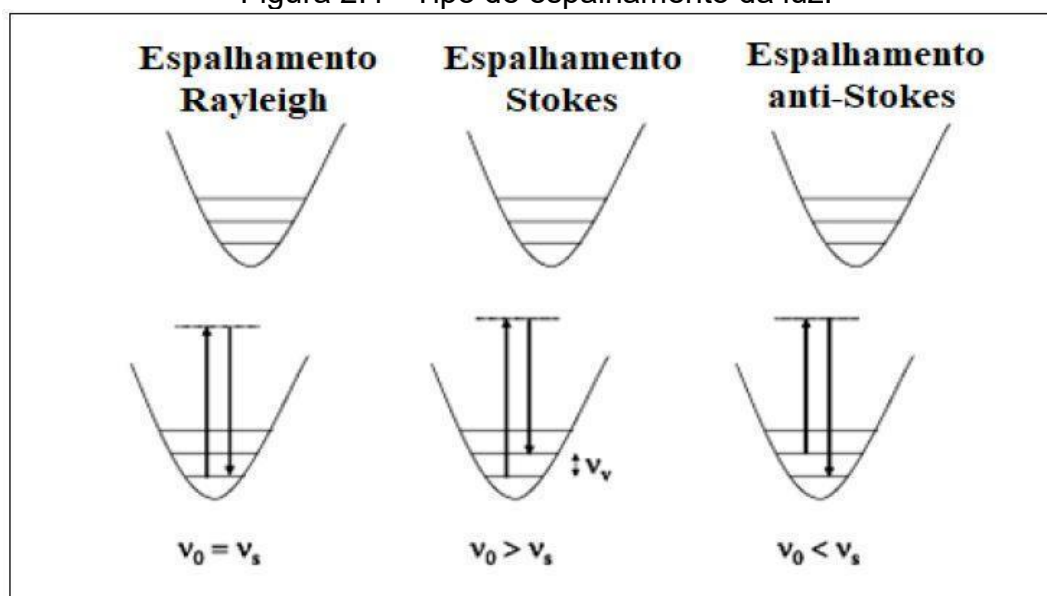
2.4 Caracterização do grafeno por espectroscopia Raman

Espectroscopia Raman é uma técnica analítica não destrutiva e principal ferramenta para a caracterização do grafeno, fornecendo informações essenciais sobre estrutura, qualidade, número de camadas e propriedades eletrônicas (FERRARI et al., 2006). A técnica se baseia na dispersão inelástica da luz pela superfície da amostra, fornece informações detalhadas sobre a composição química,

estrutura molecular e interações intermoleculares (LUO, R. et al., 2022).

A análise Raman se baseia em um feixe de luz monocromática (laser) que incide sobre uma amostra, isso faz com que a maioria dos fótons sejam espalhados elasticamente, sem alteração de energia — fenômeno conhecido como espalhamento Rayleigh. No entanto, uma pequena fração dos fótons sofre espalhamento inelástico, ganhando ou perdendo energia devido às vibrações moleculares da amostra, este efeito é conhecido como espalhamento Stokes (energia emitida é menor que a incidente) e espalhamento anti-Stokes (energia emitida é maior que a incidente). A variação de energia é característica das ligações químicas e da estrutura molecular, gerando um espectro Raman único para cada material (LUO, R. et al., 2022). A Figura 2.4 ilustra o espalhamento da luz.

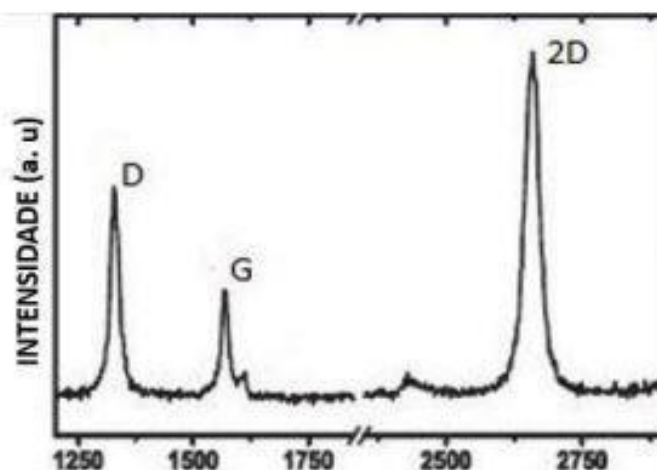
Figura 2.4 - Tipo de espalhamento da luz.



Fonte: disponível em maxwell.vrac.puc-rio.br/33005/33005_6.PDF

A aplicabilidade da espectroscopia Raman na caracterização de grafeno tem como objetivo principal identificar a presença de carbono e avaliar a qualidade do material. Na Figura 2.5 é apresentado os picos que são analisados no grafeno, sendo as bandas D ($\sim 1340 \text{ cm}^{-1}$), G ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$) e 2D ($\sim 2700 \text{ cm}^{-1}$), as quais são característicos de materiais grafiticos. A banda D é referente à desordem e defeitos estruturais, a banda G é a banda do grafite, refere-se às ligações sp^2 entre átomos de carbono na configuração planar. A banda 2D é utilizada para identificação de grafeno ou camadas de grafeno, este pico é o mais intenso do grafeno e possui uma largura a meia altura (FWHM) próximo a 30 cm^{-1} (HAAK, M. S., 2017).

Figura 2.5 – Espectro Raman mostrando as bandas D, G e 2D.



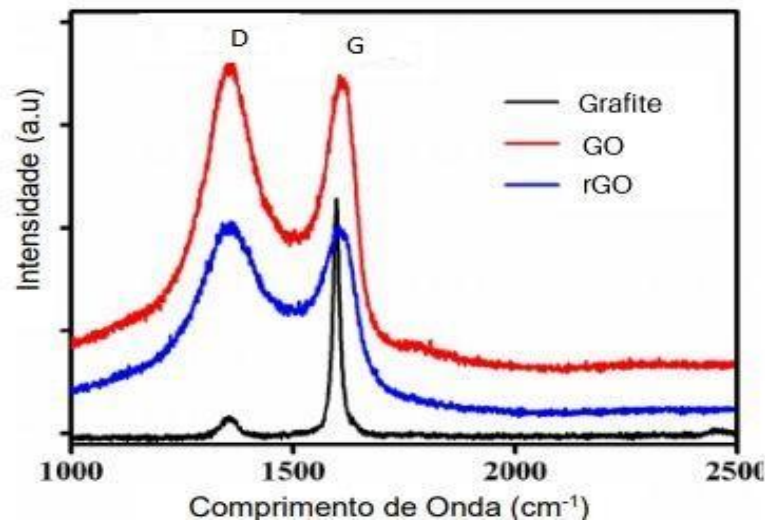
Fonte: Campanelli, D. A., 2023.

Com a espectroscopia Raman também fica fácil identificar se um material carbonoso é amorfo ou cristalino, isso é devido as bandas D e G, que apresentam maior largura nos materiais amorfos.

Materiais amorfos caracterizam-se pela ausência de ordem atômica de longo alcance, sua estrutura é composta por uma mistura de hibridizações sp^2 (grafítica) e sp^3 (diamantóide), além de ligações desordenadas, defeitos estruturais, presença de poros e cadeias alifáticas. Essa desordem confere propriedades únicas, como alta resistência química, condutividade elétrica ajustável e excelente desempenho tribológico. Uma forma de controlar a desordem estrutural nesses materiais é por meio de métodos de síntese, como deposição químico a vapor (CVD), pirólise de polímeros ou técnica de sputtering (WANG, L. et al., 2013).

Na Figura 2.6, é possível comparar os espectros de óxido de grafeno (GO), óxido de grafeno reduzido (rGO) e grafite. Observar-se que tanto no GO quanto no rGO a banda D apresenta intensidade significativamente maior em relação ao grafite, isso é devido a desordem dos átomos que ocorre em materiais carbonosos amorfos.

Figura 2.6 – Comparação do espectro Raman do Go, rGO e grafite.



Fonte: Perumbilavil, S., et al., 2015.

2.5 Alumínio

2.5.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio (Al) é um material cujas principais matérias-primas são a bauxita e a alumina. A bauxita é o mineral extraído diretamente da natureza, caracterizado por sua heterogeneidade e composição rica em um ou mais hidróxidos de alumínio. Para se obter o Al em sua forma metálica, a bauxita tem de passar pelo processo denominado Bayer, seguido pela eletrólise da alumina (Associação Brasileira de Alumínio – ABAL, (2023)).

O processo Bayer, é representado de forma simplificado pela Figura 2.7, consiste é a purificação da bauxita, sendo a primeira para obtenção do alumínio. Este processo consiste em triturar e misturar a bauxita com soda cáustica (NaOH) em altas temperaturas, o que dissolve o alumínio na forma de aluminato de sódio. As impurezas, que não reagem com a soda cáustica, são removidas através de filtração. A alumina é então precipitada e calcinada para produção de Al_2O_3 puro (ABAL).

Figura 2.7 - Representação simples do Processo Bayer.



Fonte: Comissão Técnica da Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2023).

A alumina obtida é dissolvida em criolita (Na_3AlF_6) para reduzir seu ponto de fusão de ($\sim 2072\text{ C}^\circ$ para $\sim 950\text{ C}^\circ$). Posteriormente é usado o processo de Hall-Héroult para obtenção do alumínio, este processo usa de uma cuba eletrolítica onde uma corrente decompõe a alumina, liberando alumínio líquido no cátodo e oxigênio no ânodo (que reage com os eletrodos de carbono, formando CO_2) (ABAL, 2023). O processo Hall-Héroult é mostrado de forma simples pela Figura 2.8.

Figura 2.8 - Representação simples do Processo de Hall-Héroult.



Fonte: Comissão Técnica da Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2023).

Segundo a ABAL (2023), o Brasil é o quarto maior produtor de bauxita do

mundo, sendo que o Pará é o maior produtor representando 85,175% da produção de bauxita. No ano de 2023, a produção de alumina foi aproximadamente 10,44Mt, uma diminuição de 3,93% quando comparado com o ano anterior. A produção de metal primário no Brasil, em 2023, foi de 1022 mil toneladas, já em 2022 foi de 811 mil toneladas, um aumento percentual 26,02%. Já o metal reciclado teve um aumento de 17,4%, atingindo um total de 683 mil toneladas (ABAL, 2023). Na atualidade o alumínio é um dos metais de grande importância na indústria, devido às suas propriedades como, alta resistência à corrosão, excelente condutividade térmica e elétrica, é maleável e leve. Este material é bastante aplicado na indústria automotiva, aeroespacial, construção, embalagem, eletrônica e comunicação. Na tabela 2.1 é mostrado as propriedades físicas do alumínio comparada com a do aço.

Tabela 2.1 - Propriedades físicas do alumínio e do aço.

Propriedades Físicas	Alumínio	Aço
Densidade (g/cm^3)	2,70	7,86
Temperatura de fusão ($^{\circ}C$)	660	1500
Módulo de Young (GPa)	70	205
Coefficiente de dilatação térmica ($L/^{\circ}C$)	$23 \cdot 10^{-6}$	$11,7 \cdot 10^{-6}$
Condutividade térmica a $25^{\circ}C$ ($Cal/cm/^{\circ}C$)	0,53	0,12
Condutividade elétrica (%IACS)	61	14,5

Fonte: adaptado de Comissão Técnica da Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2023).

O alumínio possui características que o destaca quando comparado com outros materiais, característica como, alta resistência à corrosão devido a fina e invisível camada de óxido e sua afinidade com oxigênio (O) do ar (ABAL, 2023). O Al possui uma estrutura do tipo CFC que facilita o escorregamento dos planos, fazendo do Al um material dúctil. O Al é um material antimagnetismo, atóxico e infinitamente reciclável sem perda de propriedades. Mas uma de suas principais características é sua leveza, seu peso específico é de cerca de aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre (ABAL, 2023).

Apesar do Al apresentar características que fazem dele um material interessante, sua resistência mecânica é baixa quando comparada com outros metais, limitando sua aplicação na indústria. Por este motivo, a melhor forma de melhorar o desempenho do Al, é adicionando elementos químicos (maioria metálicos)

em sua composição, conferindo assim características e propriedades ajustadas à aplicação desejada.

As principais ligas de alumínio são categorizadas em séries numéricas de acordo com a sua composição e propriedades. E podem ser classificadas entre, ligas para fundição (Tabela 2.3) ou ligas trabalháveis (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Ligas de Al trabalháveis.

Série	Al e principal elemento de liga	Características	Aplicações
1XXX	Al puro (Mínimo 99%)	Alta condutividade elétrica e térmica, boa resistência à corrosão.	Cabos, utensílios de cozinha, embalagens e produtos eletrônicos
2XXX	Cobre (Al-Cu)	Alta resistência mecânica e fadiga.	Componentes de aviões, estruturas aeronáuticas e aplicações militares.
3XXX	Manganês (Al-Mn)	Boa resistência à corrosão, boa conformidade.	Utensílios de cozinha e construção civil.
4XXX	Silício (Al-Si)	Alta resistência ao desgaste e boa fluidez.	Usado em aplicações de soldagem e para peças automotivas, como radiadores e sistemas de arrefecimento.
5XXX	Magnésio (Al-Mg)	Excelente resistência à corrosão, boa resistência mecânica.	Embarcações, construção de plataformas offshore, e estrutura de veículos.
6XXX	Silício ou Manganês (Al-Mg-Si)	Alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão e boa soldabilidade.	Perfis de construção, aeronáutica, transportes e estrutura gerais.
7XXX	Zinco (Al-Zn)	Alta resistência mecânica.	Usado para aplicações de alta carga, como indústria aeronáutica, esportes e equipamentos militares.
8XXX	Estanho ou Lítio (Al-Sn)	Resistência à corrosão e leveza.	Usado em embalagens, filmes e em componentes eletrônicos.

Fonte: adaptado de Comissão Técnica da Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2007).

Dentre as ligas trabalháveis existem duas subdivisões, que são: Ligas tratáveis termicamente (endurecíveis por precipitação), das séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e algumas 8XXX; Ligas não tratáveis termicamente (endurecíveis por encruamento), das séries 1XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX e algumas da 8XXX.

As ligas de Al para fundição geralmente possuem altos teores de silício (Si) em sua composição, isso para melhorar a fluidez do Al líquido e aumentar a resistência a trincas durante a solidificação. A elevada quantidade de Si presente na composição também inviabiliza que essas ligas sejam trabalháveis, ou seja, não se sujeitam a variações dos processos de aquecimento e resfriamento.

Tabela 2.3 - Ligas de Al para fundição.

Série	Al e principal elemento de liga	Características	Aplicações
1XX.X	Al puro (Mínimo 99%)	Alta condutividade elétrica e térmica, boa resistência à corrosão.	Rotores, condutores elétricos e equipamentos industriais.
2XX.X	Cobre (Al-Cu)	Alta resistência mecânica.	Pistões e cabeçote para aviões, motores a diesel e de motocicletas.
3XX.X	Silício+Cobre e/ou Magnésio (Al-Si-Cu e Al-Si-Mg)	Boa resistência à corrosão.	Cabeçote de cilindros, corpo de válvulas, blocos de motores.
4XX.X	Silício (Al-Si)	Boa resistência ao desgaste, boa fluidez.	Moldes para artefatos de borracha, utensílios domésticos, peças externas de motores.
5XX.X	Magnésio (Al-Mg)	Boa resistência mecânica.	Peças submetidas a elevadas tensões na engenharia de aviação, marítima e de transporte.
6XX.X	Al-Magnésio + Cobre, Silício ou Manganês (Al-Mg-Mn-Si)	Alta resistência, boa resistência à corrosão.	Usado na indústria aeroespacial.
7XX.X	Zinco (Al-Zn e Al-Zn-Mg)	Boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão.	Peças fundidas para conjuntos de brasagem.
8XX.X	Estanho (Al-Sn)	Resistência à corrosão e baixo ponto de fusão.	Para ligas com baixo ponto de fusão.

Fonte: adaptado de Comissão Técnica da Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2007).

Pode-se observar que o alumínio já está consolidado em diversas áreas da indústria, mesmo assim existem desafios relacionados à produção deste material, desafios como alto consumo de energia e ao impacto ambiental relacionados à mineração da bauxita. Algumas pesquisas têm focado no desenvolvimento de métodos mais sustentáveis de produção e reciclagem de resíduos de alumínio (Hirsch, 2014)

2.5.2 Cavaco de alumínio

Os resíduos obtidos dos processos mecânicos, como cavaco de alumínio, são subprodutos gerados em atividades de usinagem, fresagem, furação e outros processos de remoção de material.

O cavaco de alumínio é um resíduo fino removido do material durante os processos de usinagem. O alumínio é um metal leve e relativamente macio, o que facilita sua usinagem e a formação de cavaco. Este resíduo por si só não é considerado altamente tóxico, mas a gestão inadequada dos resíduos pode gerar impactos ambientais. O descarte sem controle pode resultar em acúmulo de materiais em aterros, além de contaminação por fluidos de corte ou outros contaminantes

usados durante a usinagem (Faria, R. T., & Moura, R.D. 2016).

2.6 Compósitos de Matriz Metálica

Compósitos de matriz metálica (CMM) é algo que chama muita atenção de diversos grupos de pesquisas. A ideia básica da tecnologia de materiais compósitos é a de otimizar as propriedades dos materiais pelo processo de combinação, a combinação de metais com partículas ou fibras de reforço.

A principal característica dos CMM é a sua capacidade de melhorar propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e de desgaste do metal base, ao mesmo tempo que mantém muitas das vantagens dos metais puros, como a alta ductilidade e resistência à corrosão (Geng, L., & Wu, K. 2017). Existem diversos metais e ligas que podem constituir a matriz de um CMM, por exemplo, zinco, ferro, aço, níquel, prata, nióbio, no entanto as mais comuns são matrizes de alumínio, cobre, titânio e magnésio.

A estrutura de um CMM é composta por dois componentes principais, sendo estes, matriz metálica e o reforço. O CMM pode ser dividido em três tipos de reforços, sendo:

- Compósitos de Matriz Metálica Particulada: Utilizam partículas de reforços dispersas na matriz metálica. Essas partículas podem ser carbetos de silício (SiC) ou alumina (Al_2O_3), que ajudam a melhorar a resistência ao desgaste, dureza e estabilidade térmica.
- Compósitos de Matriz Metálica Fibrosa: Incorporam fibras longas de material reforçante, como fibra de carbono ou cerâmicas. As fibras fazem com que o material adquira uma ótima resistência à tração, além de melhorar a resistência à fadiga e a rigidez.
- Compósitos de Matriz Metálica Híbrido: Combinam partículas e fibras de reforço para otimizar uma gama mais ampla de propriedades. Esse tipo de compósito pode ser projetado para atender a necessidades específicas de desempenho, como resistência a altas temperaturas e ao desgaste.

As propriedades dos CMMs dependem da interação entre a matriz metálica e o reforço. Na grande maioria das fabricações dos CMMs, o reforço tem como objetivo melhorar as propriedades mecânicas do material, propriedades como, resistência à tração, dureza e resistência ao desgaste, além das propriedades térmicas, como

condutividade térmica e estabilidade térmica. Na Tabela 2.4 podemos observar alguns reforços utilizados nas matrizes metálicas e suas principais propriedades, que melhoram as propriedades de alguns metais quando adicionados em sua estrutura.

Tabela 2.4 - Propriedades físicas de alguns reforços usados em matrizes metálicas.

Material	Densidade (g/cm^3)	Módulo de Young (GPa)	Condutividade Térmica ($W/m.K$)	Coefficiente de Expansão Térmica ($10^{-6}K^{-1}$)	Ponto de fusão ($^{\circ}C$)
<i>SiC</i>	3,2	260 – 480	200 – 270	4,0 – 5,0	2500
<i>Al₂O₃</i>	3,98	365 – 393	35 – 39	7,1 – 9	2050
<i>B₄C</i>	2,52	360 – 460	29	5,73	2450
<i>C(grafite)</i>	2,25	4,8 – 27	25 – 470	0,6 – 4,3	3593
<i>SWCNTs</i>	1,8	~1000	< 2900	0,2	3550
<i>Grafeno (monocamada)</i>	1,05	1000	5000	–6	5727

Fonte: adaptado de Geng, L., & Wu, K. (2017) e Pramanik et al., (2016)

Atualmente, compósitos de matriz metálica já são utilizados em diversos setores industriais, destacando-se em aplicações como: satélites espaciais (compósito à base de Titânio e Alumínio), aeronaves civis e militares (compósitos à base de Alumínio e Magnésio), manufatura de prótese na indústria biomédica (compósitos Ag/CNT e Ti/Ti – CNT), lâminas de turbinas (Ni/Ni₃Nb), supercondutores (Cu/Nb, Cu/Nb₃SN) e eletrodos de soldagem (Cu/W).

Um dos setores que mais investe em CMMs é a indústria aeronáutica, já que neste setor são necessários materiais com propriedades excepcionais. Componentes como turbinas, subsistemas mecânicos e partes da fuselagem já incorporam esses materiais. A indústria automobilística também tem se mostrado entusiasta dos CMMs, especialmente com os compósitos de matriz de alumínio, que permitem redução de peso, maior temperatura de trabalho de motores, aumento da resistência ao desgaste e mecânica. Na Tabela 2.5 mostram-se algumas aplicações de compósitos de matriz de alumínio na indústria automobilística.

Tabela 2.5 - Compósito de matriz de alumínio e aplicações na indústria automobilística.

Compósito de matriz de alumínio	Propriedades melhorada	Aplicação	Fabricante
Al/Al_2O_{3w}	Resistência à abrasão	Anel de pistão	Toyota
Al/Al_2O_{3w}	Desempenho em alta temperatura	Reforço seletivo do bloco do motor	Peugeot
Al/Al_2O_{3w}	Melhor rigidez, resistência ao desgaste e melhor condução de calor	Forro do cilindro	Honda
Al/SiC_p	Força específica, rigidez específica	Biela do motor	Nissan
Al/Al_2O_{3w}	Força específica, rigidez específica	Biela do motor	Chrysler

Fonte: adaptado de Haghshenas, M. (2016).

Diante da crescente demanda por materiais com propriedades notáveis, intensificam-se as sobre CMMs reforçados com materiais bidimensionais. O grafeno, por exemplo, vem sendo usado como reforço de CMMs, com intuito de obter propriedades superior ao do metal puro. Sendo assim os próximos tópicos irão abordar acerca de compósito de matriz metálica/grafeno com maior destaque.

2.6.1 Compósito de Matriz de Alumínio reforçada com grafeno

Devido às suas propriedades notáveis, o grafeno (Graf) tem sido considerado, nos últimos anos, um excelente candidato para atuar como reforço em compósitos de matriz metálica (CMM). Esses materiais despertam grande interesse em setores como aeronáutica, aeroespacial e automobilística (YANG, Shuai et al., 2024). Embora alguns CMMs já sejam bem conhecidos e aplicados comercialmente, o grafeno surge como um material promissor para o desenvolvimento de compósitos superiores, com potencial para reduzir custos de manufatura.

Ao comparar as propriedades de uma monocamada de Graf com as do alumínio, observa-se uma superioridade significativa do primeiro. Por isso, o Graf vem sendo utilizado como reforço para aprimorar diversas propriedades do Al. Nos últimos anos, diversos centros de pesquisas têm investigado o desempenho mecânico de compósitos de Al reforçados com grafeno.

Em um estudo conduzido por Wang (2012), a adição de apenas 0,3% de grafeno a uma matriz alumínio puro, isso resultou em um aumento de 62% na resistência à tração. Gao (2016), utilizando a mesma porcentagem de reforço, obteve

um ganho de 30% na resistência à tração do compósito. Tais resultados ilustram o potencial do Graf para melhorar as propriedades mecânica do Al, tendência observada na maioria dos trabalhos sobre compósitos de matriz de alumínio (CMA) reforçados com Graf. Na Tabela 2.6 é mostrado alguns estudos que usaram grafeno para reforçar o Al puro.

Tabela 2.6 - Resultado obtidos em alguns trabalhos com compósitos de matriz alumínio reforçados com grafeno (Graf).

Matriz	% de grafeno utilizada (em peso)	Propriedades Mecânicas	Tipo de reforço	Referência
Al Puro	0,1%	Dureza reduzida devido a formação de Al_4C_3	Nanoplaquetas de grafeno	Bartolucci et al. (2011)
	0,25%	38% de aumento na resistência ao escoamento	Nanofolhas de grafeno	Li, (2017)
	0,3%	62% de aumento na resistência à tração	Nanofolhas de grafeno	Wang et al. (2012)
	0,3%	30% de aumento na resistência à tração	Óxido de grafeno	Gao et al. (2016)
	0,54%	116% de aumento na resistência à tração antes da extrusão e 228% após extrusão	Nanoplaquetas de grafeno	
	0,7%	71,7% de aumento no limite de escoamento	Grafeno poucas camadas	Shin et al. (2015)
	2%	50% de aumento na resistência à tração	Partículas de grafeno	Yolshina et al. (2016)
	1%	113% e 300% de aumento na resistência à tração e à flexão	Óxido de grafeno	Kwon et al. (2017)

Fonte: adaptado de Yang et al. (2018).

Os estudos demonstram que, ao aumentar a quantidade de Graf adicionado ao CMA — até um limite suportado pela matriz —, as propriedades mecânicas tendem a piorar ou apresentar ganhos insignificantes, isso faz com que haja uma maior probabilidade de o Graf ficar aglomerado em pontos específicos da matriz. Além disso, observa-se que o aumento resistência mecânica geralmente resulta em uma diminuição na ductilidade do material. Portanto, a composição do compósito sempre dependerá de onde será aplicado, podendo ter um equilíbrio entre resistência mecânica e a ductilidade (Seyed Pourmand, N. & Asgharzadeth, H. 2019).

Nos estudos que envolvendo CMAs reforçados com grafeno, diversos fatores influenciam as propriedades finais do material. Os mais relevantes incluem: quantidade de reforço adicionada, o aspecto físico do Graf, dispersão homogênea do Graf na matriz, danos na estrutura no Graf durante processamento, formação de carbonetos e ligação interfacial Al/Graf (Seyed Pourmand, N. & Asgharzadeth, H.

2019).

2. 7 Estado da arte

A demanda de materiais leves, resistentes e de alta performance tem impulsionado desenvolvimento de compósitos de alumínio reforçados com grafeno. Os compósitos destacam-se pelo potencial de combinar a ductilidade e baixa densidade do Alumínio com a excepcional resistência mecânica e condutividade térmica do grafeno. Contudo, ainda há diversas variáveis a serem investigadas para otimizar as propriedades finais desses materiais.

O principal desafio tecnológico reside na dificuldade de se obter uma dispersão homogênea e estável das nanoestruturas de carbono na matriz de alumínio, evitando a rejeição, a aglomeração e a formação de carbetos frágeis (Al_4C_3) na interface, que podem comprometer tanto as propriedades mecânicas quanto a condutividade (GONÇALVES, 2023; BARTOLUCCI et al., 2011). Consequentemente, a maioria dos estudos relata que a adição de mesmo pequenas frações de grafeno (geralmente abaixo de 2% em peso) pode levar a melhorias significativas em propriedades como dureza e resistência, mas frequentemente às custas de uma redução na ductilidade e, em alguns casos, na condutividade elétrica (GONÇALVES, 2023).

Essa redução na ductilidade e na condutividade está intimamente ligada a defeitos microestruturais induzidos pelo processamento. A introdução de reforços nanoestruturados, quando não perfeitamente dispersos, atua como sítio nucleador de porosidade e trincas durante a consolidação. Trabalhos como os de Rashad et al. (2014), Bartolucci et al. (2011) e Gonçalves (2023) observaram que a presença de aglomerados de grafeno ou óxido de grafeno reduzido (rGO) nos contornos de grão do alumínio cria barreiras à difusão atômica durante a sinterização, prejudicando a densificação e levando à retenção de porosidade. Esta porosidade, por sua vez, quebra a continuidade da matriz, prejudicando a transferência de carga e o caminho condutivo dos elétrons.

Para superar esses obstáculos, a literatura tem explorado intensivamente diferentes rotas de processamento, com foco em duas estratégias principais: (1) melhorar a adesão e a molhabilidade entre o Al e o grafeno através da funcionalização da superfície do carbono, e (2) empregar técnicas de consolidação que minimizem o tempo em altas temperaturas para inibir a formação de Al_4C_3 .

Um exemplo é a trabalho conduzida por Luo, Youming et al., (2023) que

demonstraram que o pré-revestimento de nanoplaquetas de grafeno (GNP) com nano partículas de cobre via deposição eletrolítica antes da mistura com o pó de alumínio resultou em uma dispersão superior e em uma interface fortalecida. Este “encapsulamento” metálico previne o contato direto Al-C que leva à formação de carbeto frágil Al_4C_3 durante o processamento térmico, um problema persistente relatado em estudos anteriores.

Entre as técnicas de fabricação, a Sinterização por Plasma Pulsado (SPS) se destaca em laboratórios de ponta, como nos trabalhos de Jiang et al. (2018). O SPS permite ciclos muito rápidos de aquecimento e resfriamento sob pressão, produzindo materiais muito densos com pouca reação prejudicial na interface. No entanto, é um processo caro e de baixa produtividade, o que limita sua aplicação em larga escala.

Por isso, alternativas mais viáveis economicamente, como a metalurgia do pó convencional (compactação a frio seguida de sinterização em forno), são amplamente estudadas. Saboori et al. (2018) fizeram um estudo detalhado com essa rota, variando metodicamente pressão e temperatura. Eles mostraram que é possível atingir alta densificação e ganhos de dureza com grafeno funcionalizado, um resultado importante, pois a maioria dos estudos com forno convencional não explora de forma sistemática todos esses parâmetros.

Outras técnicas incluem a mistura por moagem de bolas (ball milling), muito utilizada para promover a adesão física do grafeno ao pó de Al (BASTWROS et al., 2014), e a fabricação por fundição com assistência por ultrassom, que busca incorporar o reforço no metal líquido (YANG et al., 2017). Cada método apresenta seus próprios trade-offs entre homogeneidade, dano ao grafeno e praticidade industrial.

Em relação às propriedades, a literatura mostra tendências claras, mas com resultados variados. O principal mecanismo de fortalecimento é a barreira que o grafeno cria ao movimento de defeitos na estrutura do alumínio. Estudos como o de Li et al. (2015) relatam aumentos impressionantes de ~50% na resistência e ~100% na dureza com apenas 0,3% de grafeno. Jiang et al. (2018) também viram ganhos de 40% na resistência à tração mantendo uma ductilidade razoável.

Já a condutividade (térmica e elétrica) é mais imprevisível. Apesar do grafeno ser um excelente condutor, sua introdução pode tanto melhorar quanto piorar a condutividade geral do compósito. Isso depende crucialmente da qualidade da interface e da dispersão. Em geral, a condutividade elétrica tende a cair conforme

aumenta a quantidade de reforço, devido ao espalhamento de elétrons nas interfaces (LIU et al., 2019).

A resistência ao desgaste é uma propriedade que apresenta melhorias consistentes com a adição de grafeno, graças às suas propriedades autolubrificantes. Yan, Shuai et al. (2024) demonstraram reduções no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste, utilizando uma porcentagem de 0,3% de grafeno.

Resumindo, a pesquisa com compósitos de alumínio-grafeno é um campo dinâmico e promissor, mas que ainda enfrenta desafios fundamentais. Para avançar, é crucial superar o problema da dispersão homogênea e do controle da interface entre os materiais, onde a funcionalização do grafeno e técnicas de mistura inovadoras desempenham um papel central. Além disso, é necessário equilibrar desempenho e viabilidade: enquanto técnicas sofisticadas de laboratório, como a Sinterização por Plasma Pulsado (SPS), produzem os melhores resultados, métodos mais convencionais — como a metalurgia do pó — buscam um custo-benefício que permita a aplicação em escala industrial. Outro ponto essencial é a adoção de mais estudos sistemáticos, pois falta na literatura uma investigação ampla e metodológica dos parâmetros de processo nas rotas convencionais — algo que, como demonstrado por Saboori et al., (2018) é vital para isolar variáveis e entender claramente as relações de causa e efeito.

Por fim, é preciso gerenciar os trade-offs inerentes ao material, especialmente o conflito entre ganho de resistência e perda de ductilidade ou condutividade, que pode ser atenuado com uma interface bem projetada e uma microestrutura otimizada. Portanto, o caminho para a otimização e futura aplicação desses compósitos depende de pesquisas que desacoplem as variáveis de processo, aprofundem o conhecimento sobre as reações interfaciais e explorem sinergias entre diferentes formas de grafeno e tratamentos de superfície, sempre com o objetivo claro de maximizar a densificação e a qualidade da junção alumínio-carbono, desbloqueando assim todo o potencial dessa combinação inovadora.

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

As atividades pertinentes ao trabalho foram desenvolvidas nos laboratórios da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete.

3.1 Materiais

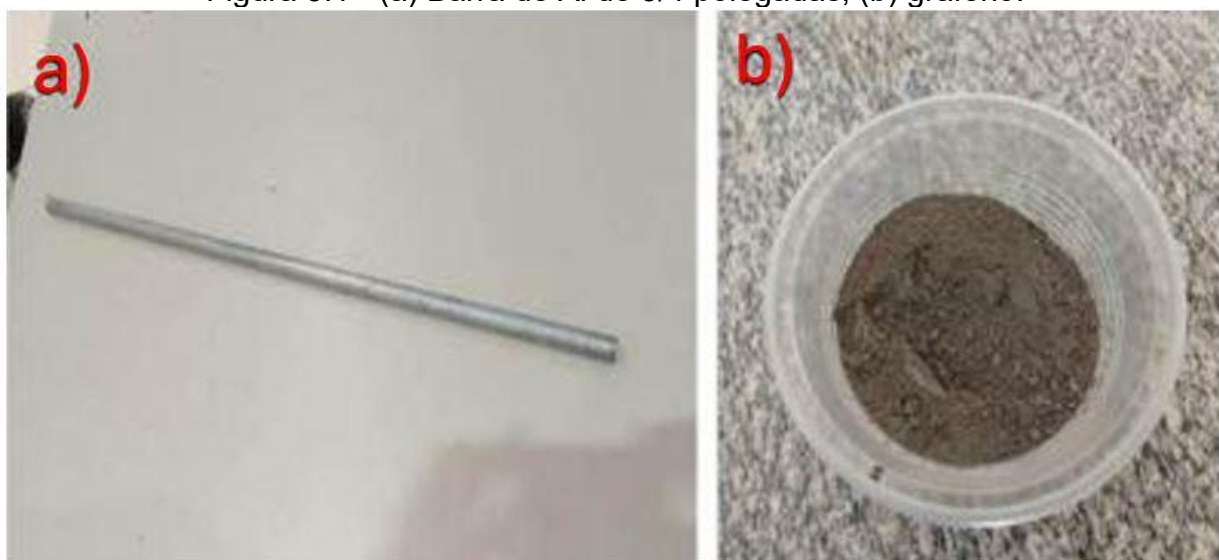
3.1.1 Alumínio (Al)

Para matéria prima foram compradas barras redondas de alumínio com diâmetro de 3/4 polegadas, conforme mostrado na figura 3.1 (a). Essas barras de alumínio são usadas para produção de cavaco e para fundição do alumínio usado para fazer os compósitos de Al-Graf.

3.1.2 Grafeno (Graf)

O grafeno (Graf) utilizado no trabalho foi doado pela empresa Graphene Amazonas, e pode ser visto na figura 3.1 (b).

Figura 3.1 - (a) Barra de Al de 3/4 polegadas, (b) grafeno.



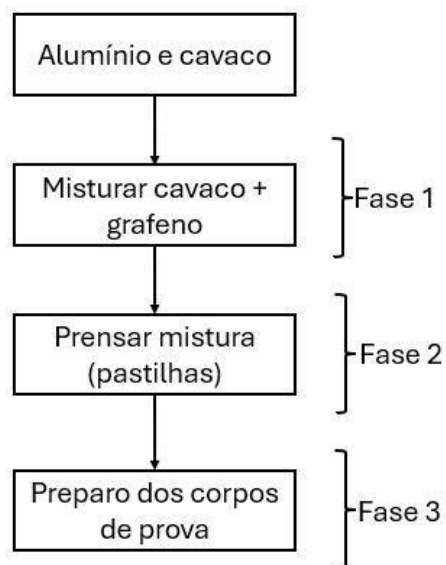
Fonte: Elaboração Própria.

3.2 Métodos Experimentais

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas: A Figura 3.2 apresenta-se o organograma referente à etapa 1, a qual refere-se ao processo de corte e usinagem do Al, até a obtenção do cavaco de Alumínio (CAL) e sua caracterização.

Na figura 3.2 é demonstrado o procedimento de corte e usinagem do alumínio.

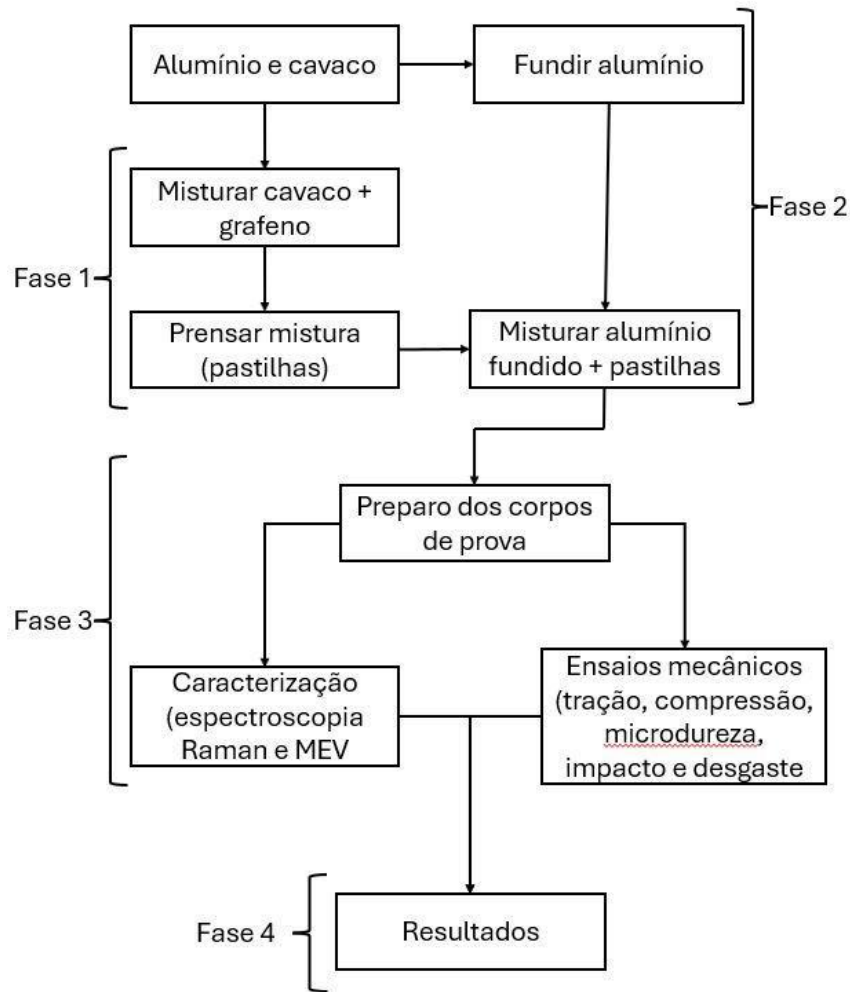
Figura 3.2 - Organograma da Etapa 1.



Fonte: elaboração própria.

Na Figura 3.3, mostra-se o organograma correspondente à etapa 2, a qual refere-se ao processo de fundição e obtenção das amostras, utilizando o alumínio e o cavaco obtidos na etapa 1.

Figura 3.3 - Organograma da Etapa 2.



Fonte: elaboração própria.

3.2.1 Etapa 1

Nesta primeira etapa descrita na Tabela 3.1, foi realizado o corte da barra de alumínio para produção de cavaco, além do corte de pequenas barras de alumínio com tamanho de 35 mm para fazer a fundição. Este alumínio é caracterizado para observar os elementos que compõem sua estrutura.

Tabela 3.1- Procedimento Etapa 1.

<i>Etapa</i>	<i>Fase</i>	<i>Processo</i>
<i>ETAPA 1</i>	1	Corte da barra de alumínio
	2	Produção de cavaco
	3	Caracterização do alumínio

Fonte: elaboração própria

Fase 1- Corte da barra de alumínio

Inicialmente, foi cortado uma barra de alumínio com diâmetro de 3/4 de polegadas, sendo essa cortada com pedaços de 150 mm para o processo de usinagem e pedaços com 35 mm que são usados para o processo de fundição.

Fase 2- Produção de cavaco

Para produção do cavaco de alumínio, utilizou-se uma barra de Al, da qual foram seccionados segmentos de 150 mm (Figura 3.4(a)). A processo de usinagem desses segmentos foi realizada em um torno mecânico (Figura 3.4 (b)), gerando cavacos que em seguida, foram submetidos a um processo de moagem em liquidificador (Figura 3.4 (c)) para redução granulométrica. A Figura 3.4 (d-e) ilustra o material antes e após a moagem.

Posteriormente, o cavaco de alumínio moído foi utilizado para misturar com grafeno, para fabricação de pastilhas.

Figura 3.4 - (a) Barra de Al cortada com 35 mm e 150 mm; (b) torno usado para a usinagem da barra de Al; (c) liquidificador; (d) cavaco após a usinagem (antes do liquidificador) e (e) cavaco após moagem pelo liquidificador.



Fonte: elaboração própria.

Fase 3 - Caracterização do alumínio

A terceira fase da etapa 1 consiste na caracterização da barra de alumínio, para caracterização do alumínio foram usados os seguintes equipamentos: fluorescência de raios-X (FRX), espectroscopia Raman e Microscópio eletrônico de varredura, com o propósito de ter informação da composição química e morfológica do material.

Fluorescência de raios-X (FRX)

A fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica analítica não destrutiva utilizada para caracterizar e determinar a composição elementar de materiais. O método baseia-se na fluorescência induzida por radiação altamente energética, como os raios-X, que excita os elétrons dos níveis mais internos dos átomos, ou seja, o elétron é retirado deixando uma vacância no seu nível eletrônico de baixa energia, e logo a vacância é preenchida por um elétron de um nível eletrônico de maior energia. Essa diferença de energia libera energia quântica na forma de um fóton de luz (Ferretti, 2009).

Devido à sua versatilidade, a FRX é amplamente aplicada para determinar elementos químicos em diversas áreas como geologia, medicina, biologia, entre outras (Santos et.al. 2013). Embora permita identificar a composição química de um material, a técnica apresenta limitações instrumentais: elementos com número atômico menor ou igual 12 ($Z \leq 12$) não são identificados, como por exemplo: carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N), não são detectados.

Neste estudo, utilizou-se um equipamento FRX da marca Epsilon, pertencente ao Grupo GOMNDI da Universidade Federal do Pampa-UNIPAMPA (Figura 3.6 (a)). O objetivo foi identificar os elementos químicos presentes na barra de Al, a fim de confirmar sua pureza.

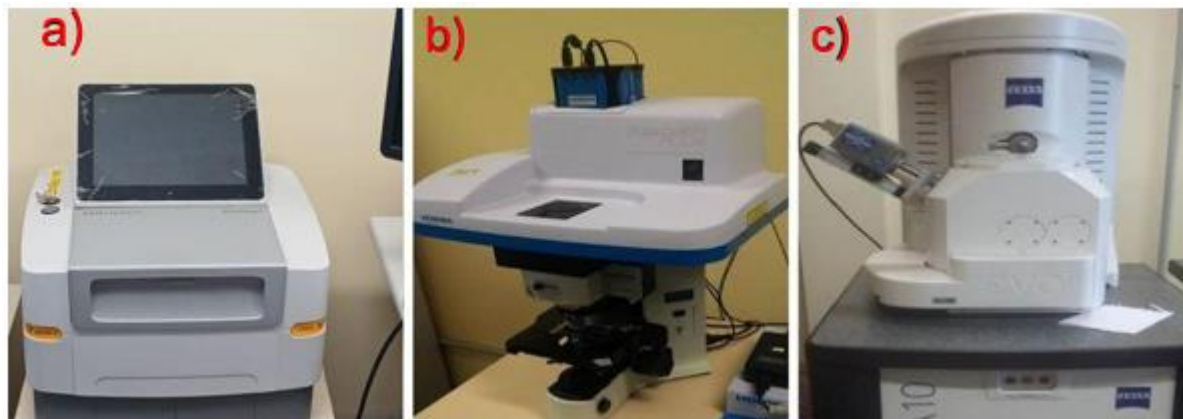
Espectroscopia Raman Confocal

Para complementar a fluorescência de raios-X, o alumínio foi caracterizado pela espectroscopia Raman (conforme ilustrado na Figura 3.5) para o qual usou-se o microscópio Raman confocal da marca HORIBA, modelo XploRA PLUS, da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete (Figura 3.5(b)).

Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para verificar a estrutura morfológica do alumínio, foi utilizado o microscópio da marca Zeis, modelo EVO MA10, conforme apresentado na Figura 3.5(c).

Figura 3.5 - (a) Equipamento de FRX; (b) Microscópio Raman confocal e (c) Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: elaboração própria

3.2.2 Etapa 2

Na segunda etapa (Tabela 3.2) desta pesquisa é abordada o processo da mistura do cavaco de Al com materiais 2D, preparo das pastilhas usadas para fundição, processo de fundição, assim como do preparo das amostras para caracterização e ensaio.

Tabela 3.2 – Procedimento da Etapa 2.

<i>Etapa</i>	<i>Fase</i>	<i>Processo</i>
<i>ETAPA 2</i>	1	Mistura do cavaco com Graf
	2	Prensar mistura (cavaco de alumínio + Graf)
	3	Fundir alumínio e misturar com as pastilhas
	4	Caracterização e ensaio mecânicos

Fonte: elaboração própria

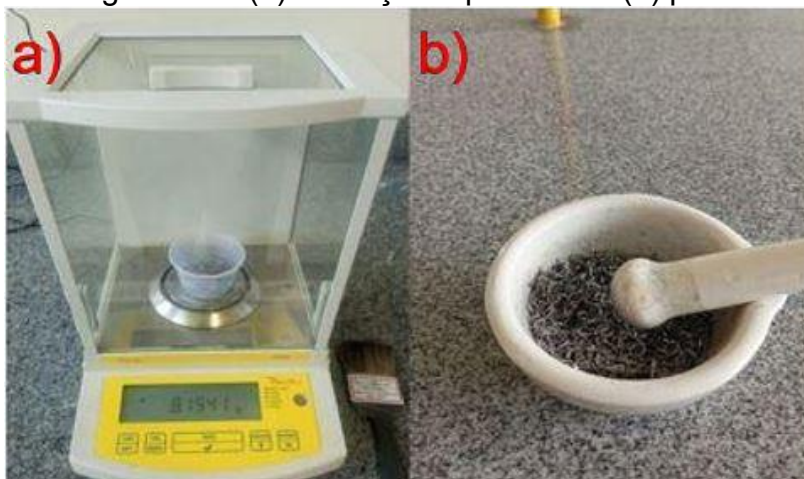
Fase 1- Mistura do cavaco com o Grafeno

Para a mistura, utilizou-se uma quantidade de cavaco de alumínio equivalente 10% do peso total do metal fundido. O grafeno foi adicionado em diferentes proporções (0,1%, 0,2%, 0,5%, 0,7% e 1%) em relação ao mesmo peso do alumínio

fundido. Como base de cálculo, adotou-se 135 gramas de alumínio, correspondentes a segmentos de 35 mm de comprimento. As amostras fabricadas de Al-Graf foram nomeadas de: Al-Graf-0.1%, Al-Graf-0.2%, Al-Graf-0.5%, Al-Graf-0.7% e Al-Graf-1%,

Todo o processo de pesagem e mistura foi realizado com uma balança de precisão Shimadzu e um pilão de cerâmica, conforme ilustrado nas Figuras 3.6 a) e 3.6 b). A mistura foi efetuada manualmente com o pilão por um período aproximado de 30 minutos.

Figura 3.6 - (a) Balança de precisão e (b) pilão.



Fonte: elaboração própria.

Fase 2 – Prensagem e mistura (Cavaco + Graf)

Após o preparo da mistura, procedeu-se à fabricação das pastilhas utilizando uma prensa hidráulica modelo BOVENAU-P15000 (Figura 3.7(a)). Para isso, empregou-se um molde constituído por um tubo mecânico, que serviu como matriz para acomodação da mistura de cavaco-grafeno, e um pedaço de ferro redondo maciço, responsável pela compactação do material (Figura 3.7(b)). A prensagem foi realizada com pressão de 5 toneladas durante 5 minutos, resultando em pastilhas cilíndricas com dimensões padronizadas de 20 mm de diâmetro por 5 mm de altura (Figura 3.7(c)).

Esta etapa permitiu a obtenção de corpos de prova uniformes, adequados para os ensaios subsequentes, garantindo a reprodutibilidade do processo de fabricação. A configuração do molde e os parâmetros de prensagem foram cuidadosamente controlados para assegurar a qualidade das amostras produzidas.

Figura 3.7 - (a) Prensa hidráulica; (b) molde usado para o embutimento da mistura; (c) pastilhas de cavaco com material 2D.



Fonte: elaboração própria.

Fase 3 – Fundição do Al e misturar com as pastilhas

Na fase 3 da etapa 2, prepara-se um banho de alumínio para misturar com as pastilhas previamente preparadas. Funde-se aproximadamente 135 g de alumínio em um cadinho (conforme Figura 3.8 a), para cada porcentagem de grafeno. Para a fusão do alumínio, utiliza-se um forno mufla, ilustrado na Figura 3.8 b), mantendo-se a temperatura a 800°C por 40 minutos.

Figura 3.8 - (a) Cadinho para fundição; (b) Forno mufla.



Fonte: elaboração própria

Após a fusão inicial, o alumínio líquido é retirado do forno e misturado às pastilhas de cavaco com o material 2D. Em seguida, a composição retorna ao forno para uma segunda fusão, realizadas nas mesmas condições de temperatura e tempo.

Concluída a fusão, o novo compósito é vazado nos moldes especificamente confeccionados para receber o metal líquido. Esses moldes são fabricados a partir de uma chapa retangular (100 mm × 200 mm) com espessura de 3,75 mm, à qual são soldados tubos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e altura de 20 mm. A Figura 3.9 a) ilustra o molde utilizado para as amostras do ensaio de compressão.

Para os moldes das amostras de impacto, empregou-se uma chapa retangular (100 mm × 200 mm) com espessura de 3,75 mm, soldada em formato de canais, utilizando ferro chato com 15 mm de largura, 3 mm de espessura e 60 mm de comprimento.

As amostras dos compósitos após resfriamento são retiradas dos moldes para serem usinada e ficarem nas dimensões de 16 mm (altura e diâmetro) para amostras do ensaio de compressão e no caso do ensaio de charpy as dimensões estabelecidas pela norma ISO 148-1:2016. Na Figura 3.9 b) pode-se observar os corpos de prova (para compressão) depois de retirados dos moldes, os quais ficam circulares com diâmetro de 20 mm e tamanho de 20 mm (antes da usinagem).

Figura 3.9 - Molde usado para fazer os corpos de prova fundidos; (b) Corpos de provas retirados do molde.



Fonte: elaboração própria.

Fase 4 – Caracterização e ensaios mecânicos

Na quarta fase da etapa 2, após o preparo das amostras do compósito, estas foram submetidas às respectivas caracterizações e ensaios mecânicos. As amostras

de Al-Graf foram caracterizadas por espectroscopia Raman e microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de verificar a presença do grafeno na matriz de alumínio. Essa análise foi realizada por meio da medição dos espectros característicos do grafeno nas ligas, após o processo de fundição.

Concluídas as caracterizações, procedeu-se à realização dos ensaios mecânicos, incluindo:

- Ensaio de tração
- Ensaio de compressão
- Ensaio de dureza
- Ensaio de impacto
- Ensaio de desgaste

3.2.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração constitui um dos métodos mais empregados para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais. Este ensaio consiste na aplicação de uma força de tração uniaxial em um corpo de prova até a ocorrência de fratura. Através deste procedimento, obtêm-se parâmetros fundamentais como:

- Tensão máxima
- Deformação específica
- Limite de resistência à tração
- Limite de escoamento
- Alongamento percentual

Estes parâmetros fornecem informações essenciais sobre o comportamento do material sob carregamento mecânico.

Para a execução dos ensaios, adotaram-se as normas técnicas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), organização reconhecida por sua excelência técnica há décadas. A norma específica que regulamenta o ensaio de tração em metais é a ABNT NBR ISO 6892-1, a qual estabelece todos os requisitos para:

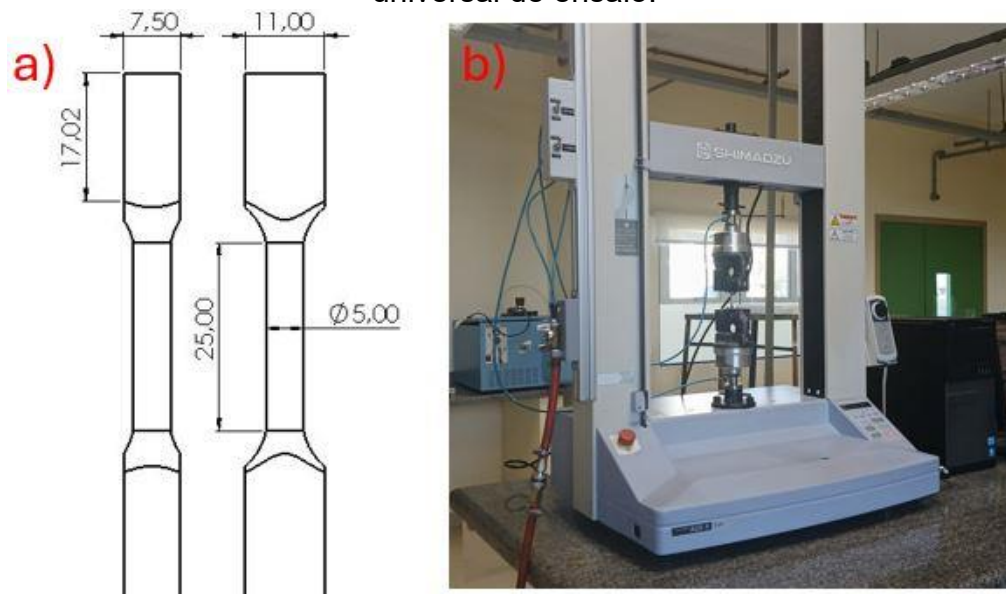
1. Preparação dos corpos de prova
2. Especificações das máquinas de ensaio
3. Controle da velocidade de ensaio (taxa de deformação ou taxa de tensão)
4. Condições de temperatura

Conforme prescrito na norma, o comprimento útil (L_0) para corpos de prova

cilíndricos mantém relação proporcional com o diâmetro, sendo definido como $L_0=5d_0$ ou $L_0=10d_0$, conforme ilustrado na Figura 3.10 a). No presente estudo, adotaram-se as dimensões $L_0=25\text{ mm}$ e $d_0=5\text{ mm}$.

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal SHIMADZU modelo AGS-X, instalada no Laboratório de Metalografia da Universidade Federal do Pampa, conforme demonstrado na Figura 3.10 b).

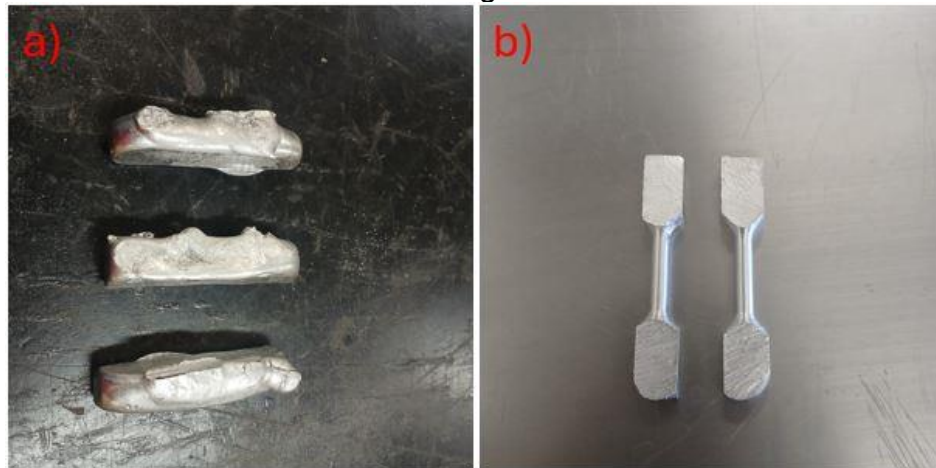
Figura 3.10 - (a) Medidas do corpo de prova usado para ensaio de tração; (b) máquina universal de ensaio.



Fonte: elaboração própria.

Para confecção das amostras para o ensaio foi preparado um molde, conforme figura 3.11 a), onde é vazado o alumínio/compósito na forma líquida. Após o resfriamento do alumínio/compósito, o mesmo é retirado do molde para ser usinado e chegar as medidas escolhidas para realização do ensaio de tração. Na figura 3.11 b) pode ser observado o corpo de prova antes e após usinagem.

Figura 3.11 - (a) Corpos de prova antes da usinagem; (b) Corpos de prova após usinagem.



Fonte: elaboração própria.

3.2.4 Ensaio de compressão

Assim como o ensaio de tração, o ensaio de compressão serve para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais. Este ensaio tem como objetivo usar uma carga uniaxial para comprimir o material e avaliar como o material comporta-se quando comprimido. Isso é importante para materiais utilizados em aplicações estruturais, como pilares, colunas e componentes mecânicos que estão sujeitos a esforços compressivos.

Para realização do ensaio de compressão foi utilizada a mesma máquina que usada para realização do ensaio de tração citado anteriormente. Para definir as medidas dos corpos de prova foi usado a norma ASTM E9. A norma estabelece que a relação entre altura e diâmetro tem que estar entre 1 e 2 ($\text{altura/diâmetro} > 2$) para evitar flambagem e não pode ser muito baixa ($\text{altura/diâmetro} < 1$) porque os resultados podem ser influenciados pelo atrito nas placas da máquina. Logo respeitando a norma ASTM E9 foi usado uma relação 1:1 para os corpos de prova da compressão, onde a altura é 16 mm e o diâmetro 16 mm.

3.2.5 Ensaio de microdureza

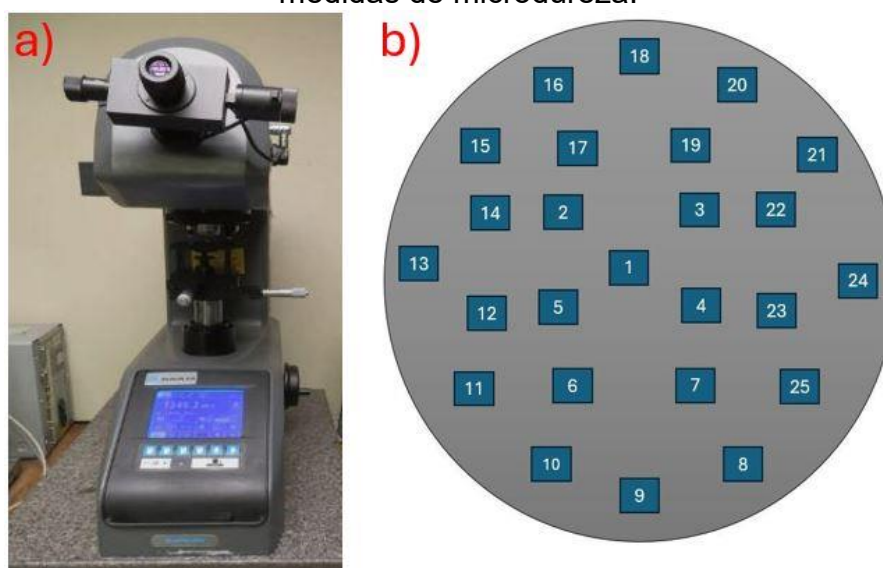
O ensaio de microdureza é uma técnica utilizada para avaliar a resistência de materiais à deformação plástica. Esse ensaio é baseado na aplicação de uma carga muito pequena (geralmente entre 10 gf e 1000 gf) sobre a superfície do material por meio de um penetrador de geometria definida, este penetrador deixa uma impressão

no material, esta impressão é medida e correlacionada com a dureza. O penetrador mais utilizado para este ensaio é o piramidal de diamante, utilizado nos métodos Vickers e Knoop.

O ensaio de microdureza foi realizado apenas em escala Vickers, e a carga de utilizada no ensaio foi de 0,1 kgf. As amostras foram lixadas usando lixas d'água desde 220 até 800. O microdurômetro usado foi da marca Buehler modelo MicroMet 6010, conforme mostrado na Figura 3.12 a).

Foram realizadas 25 medições de microdureza para cada amostra, sendo um total de 5 amostras para cada porcentagem. Essa quantidade de medidas foi escolhida para garantir maior precisão nos resultados e abranger todos os quadrantes das amostras. Na Figura 3.12 b), pode-se observar o sistema utilizada para definir os pontos de medições.

Figura 3.12 – a) Microdurômetro e b) imagem ilustrativa dos pontos onde foram feitas medidas de microdureza.



Fonte: elaboração própria.

3.2.6 Ensaio de Impacto modificado

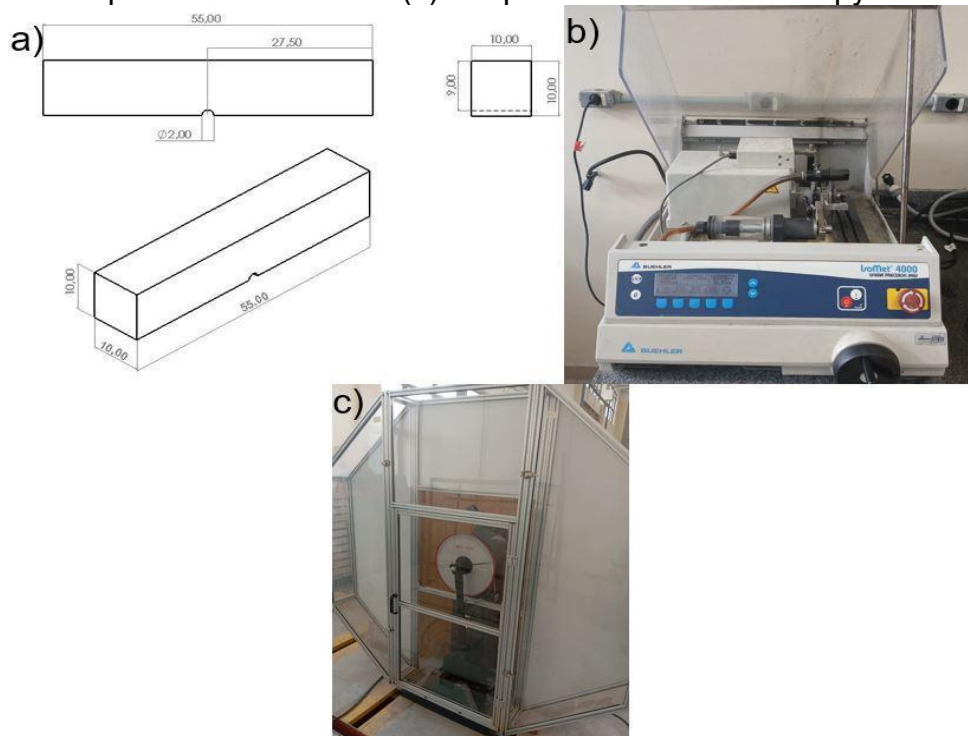
O ensaio de charpy é um método amplamente utilizado para avaliar a tenacidade ao impacto de materiais, especialmente metais e polímeros. Este ensaio tem como objetivo medir a energia absorvida por um corpo de prova submetido a um impacto repentino. Através deste ensaio pode-se determinar a tenacidade e a resistência ao impacto do material.

Para realização do ensaio de charpy foi seguida a norma ISO 148-1:2016, onde define o tamanho do corpo de prova sendo, 10 mm x 10 mm x 55 mm, com um entalhe

em V ou U.

Devido à falta de equipamentos que mantenha um padrão de entalhe em todas as peças, foi feito entalhe nas peças usando uma máquina de corte da BUEHLER modelo Isomet 4000, de alta precisão, conforme mostrado na Figura 3.13 (b). O disco usado na máquina possui uma largura de 2 mm e o entalhe foi feito com 1 mm de profundidade, na Figura 3.13 (a) pode ser visto o desenho de como fica o entalhe na peça para o ensaio de charpy. O ensaio de charpy foi realizado utilizando a máquina da marca BUEHLER modelo Isomet 4000 de posse da Universidade Federal do Pampa, como pode ser visto na Figura 3.13 (c).

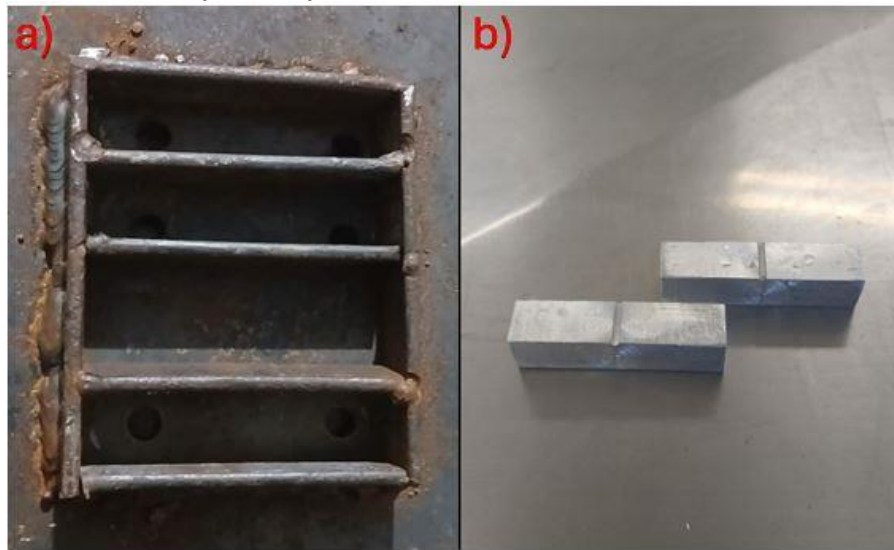
Figura 3.13 – (a) Medidas do corpo de prova para ensaio de charpy; (b) máquina usada para fazer entalhe e (c) máquina de ensaio de charpy.



Fonte: elaboração própria.

Após fundir o alumínio com o material 2D, a mistura é colocada em moldes para confecção dos corpos de prova do ensaio de charpy, na figura 3.14 (a) é mostrado os moldes utilizados. Após colocar o alumínio fundido nos moldes e retirar os corpos de prova para serem usinadas e ficaram com as dimensões corretas (10 mm x 10 mm x 55 mm), conforme mostrado na figura 3.14 (b).

Figura 3.14 – (a) Molde usado para fazer corpos de prova do ensaio de charpy; (b) corpos de provas usinados e com entalhe.



Fonte: elaboração própria.

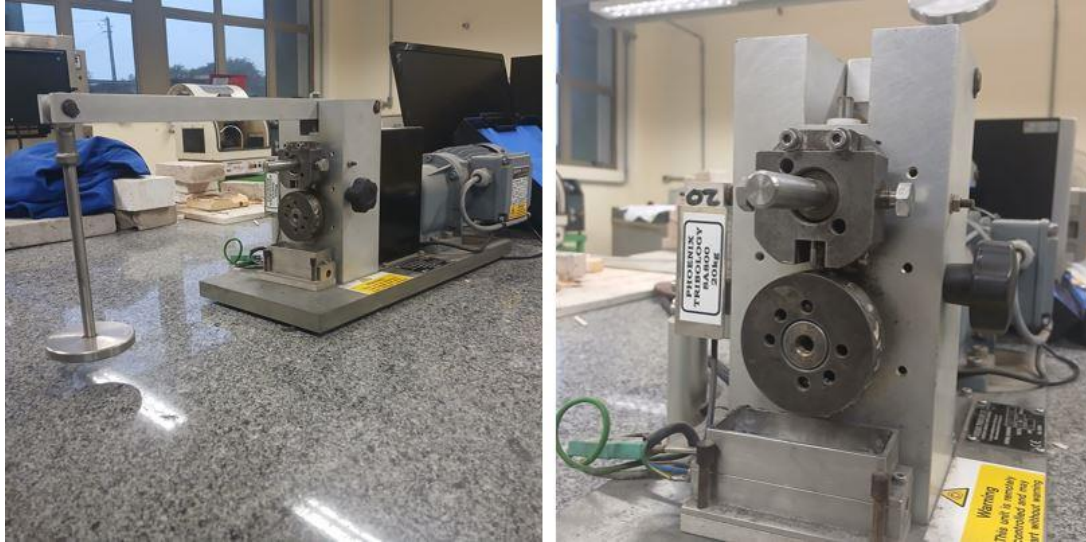
3.2.7 Ensaio de desgaste

O ensaio de desgaste tem como objetivo avaliar a resistência de materiais à perda de massa ou degradação superficial quando submetidos a condições de atrito, abrasão ou erosão. Para realização deste ensaio foi utilizado o equipamento da marca PHOENIX TRIBOLOGY, modelo TE 53 SLIM, que se encontra no Laboratório de Tribologia da Universidade Federal do Pampa. Na Figura 3.15 pode ser visto o equipamento usado para o ensaio de desgaste.

Os parâmetros utilizados no ensaio foram os seguintes: disco de diâmetro 60 mm com a face de contato coberta com lixa de granulometria 280, carga de 500 g, velocidade de 50 RPM e número de ciclos de 50, 100 e 150.

Cada amostra é limpa e pesada em balança analítica antes e após cada ensaio, a balança tem uma resolução de 0,0001 g.

Figura 3.15 - Equipamento usado no ensaio de desgaste.



Fonte: Elaboração própria.

3.3 Análise de Variância (ANOVA) com um único fator e Teste de significância

A análise de variância, também conhecida como ANOVA, serve para testar e comparar hipóteses a respeito da importância de cada parâmetro existente no modelo proposto, assim como na análise dos resíduos provenientes dessa análise.

Dentro da ANOVA o teste mais conhecido para que verifique a significância do modelo é o teste F (Fisher). Este teste é usado para determinar se existem diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos (tratamentos). O teste tem como objetivo verificar a variabilidade entre grupos (efeito do tratamento) com a variabilidade dentro dos grupos (erro aleatório).

$$F_0 = \frac{MQ_{Tratamentos}}{MQ_E} \quad (1)$$

Onde:

$MQ_{Tratamentos}$ - Média quadrática dos tratamentos;

MQ_E – é a média quadrática erro.

O teste F considera duas hipóteses que devem ser testadas, são elas: Hipótese nula (H_0) – Não há diferença significativa entre as médias dos grupos (tratamentos); Hipótese alternativa (H_1) – Pelo menos uma média é diferente das demais. No caso da hipótese nula, F_0 (F calculado) possui uma distribuição F com $(n - 1)$ graus de liberdade no numerador e $a(n - 1)$ graus de liberdade no denominador. Logo, o teste

rejeita a hipótese nula se F_0 exceder $F_{\alpha,(a-1),a(n-1)}$, onde α é o nível de significância adotado (por exemplo, em nosso caso será: $\alpha=0,05$ (5%)) e $F_{\alpha,(a-1),a(n-1)}$ é o correspondente abscissa da distribuição F. Também conhecido como F tabelado.

A Tabela 2.7 é mostrado como os dados experimentais podem ser organizados para o uso de ANOVA com um fator e várias observações (medidas). Digamos y_{ij} representa a j-ésima observação sujeita ao i-ésimo tratamento, isso considerando um número igual de observações para os tratamentos.

Tabela 3.3 – Montagem dos dados para uso da ANOVA com um único fator.

Tratamentos	Observações				Totais	Médias
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
a	y_{a1}	y_{a1}	...	y_{an}	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
					$y_{..}$	$\bar{y}_{1..}$

Fonte: adaptado de Montgomery, D. C.; Runger, G. C.

Na tabela 2.8 podemos observar as fórmulas usadas para os cálculos da ANOVA com um fator:

Tabela 3.4 – Fórmulas de cálculos para ANOVA de um fator.

Fonte de variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática
Tratamentos	$SQ_{tratamentos} = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$a - 1$	$MQ_{Tratamentos} = \frac{SQ_{Tratamentos}}{(a - 1)}$
Erro	$SQ_E = SQ_T - SQ_{tratamentos}$	$a(n - 1)$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{a(n - 1)}$
Total	$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	$an - 1$	

Fonte: adaptado de Montgomery, D. C.; Runger, G. C.

a - número de tratamentos; n - número de observações; N - número de total de observações; $y_{i.}$ - total das observações sujeitas ao i -ésimo tratamento; y_{ij} - variável aleatória denotando a ij -ésima;
 $y_{..}$ - soma total das observações sujeitas ao i -ésimo tratamento e j -ésima observação.

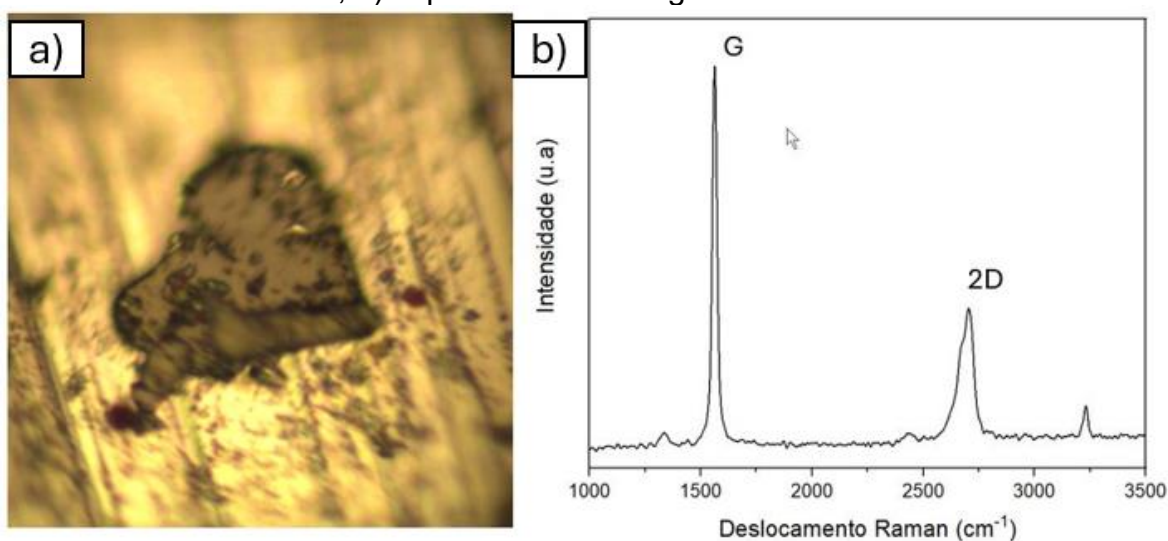
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são analisados e discutidos os resultados obtidos. Serão apresentadas as caracterizações das matérias primas. Em seguida são apresentados os resultados de ensaios mecânicos dos novos compósitos com diferentes porcentagens de grafeno na composição.

4.1 Caracterização das matérias primas

Na Figura 4.1 é mostrado a imagem óptica de um grafeno de várias camadas que foi utilizado na mistura com o cavaco de alumínio. Já na Fig. 4.1 (b) observa-se o espectro Raman do grafeno usado, onde nota-se as presenças das bandas G e 2D, características do grafeno.

Figura 4.1 – a) Imagem do grafeno usando microscópio óptico após ser misturado com cavaco de alumínio, b) espectro raman do grafeno misturado com cavaco.



Fonte: Elaboração própria.

O alumínio utilizado no presente trabalho foi analisado usando a técnica de fluorescência de raios-X (FRX). Com esta técnica foi possível verificar os principais elementos do Al, conforme mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição da barra de Alumínio.

Material	Elemento químico	Porcentual em massa
Alumínio	Al	96,724
Silício	Si	2,334
Ferro	Fe	0,399
Cobre	Cu	0,105

Fonte: Elaboração própria.

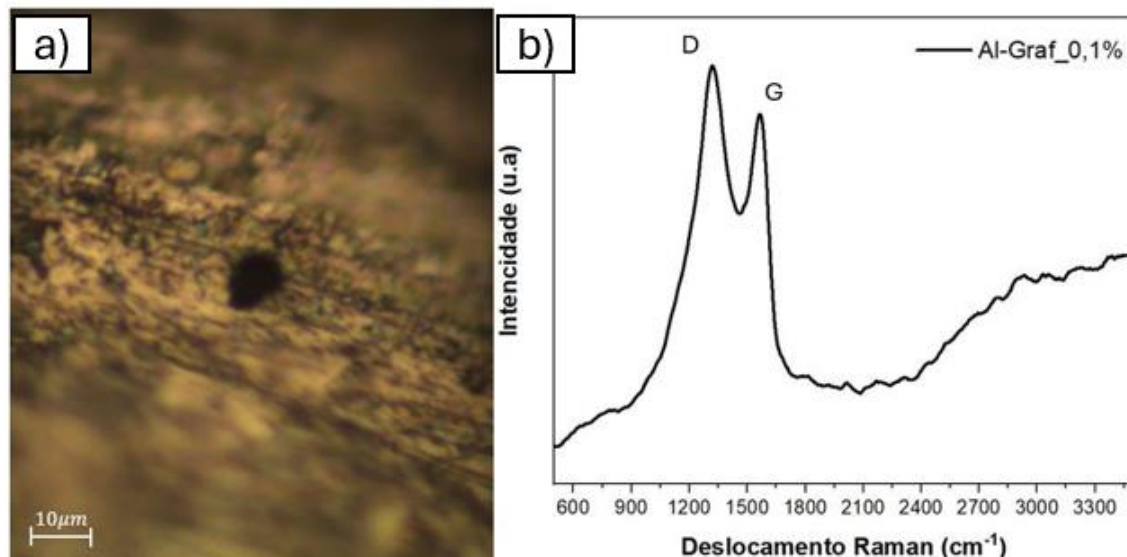
4.2 Espectroscopia Raman do Al-Graf

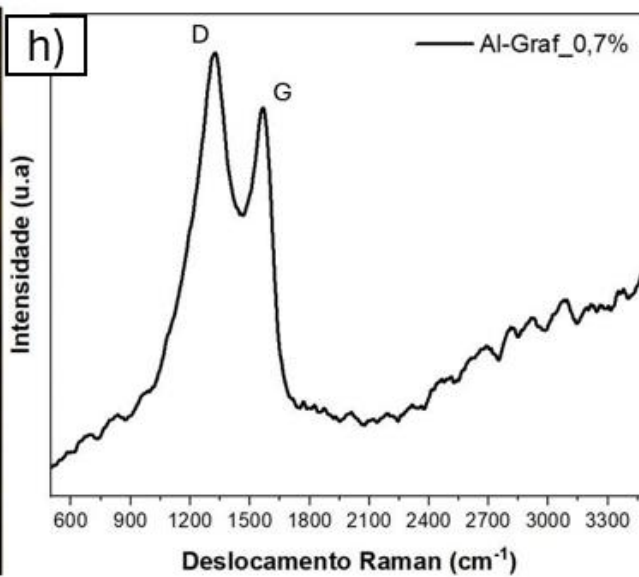
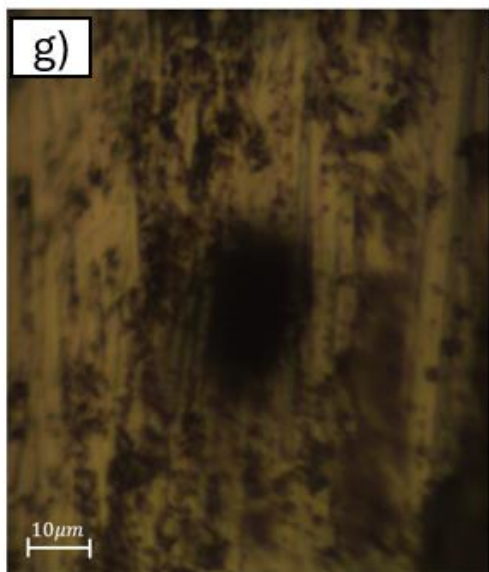
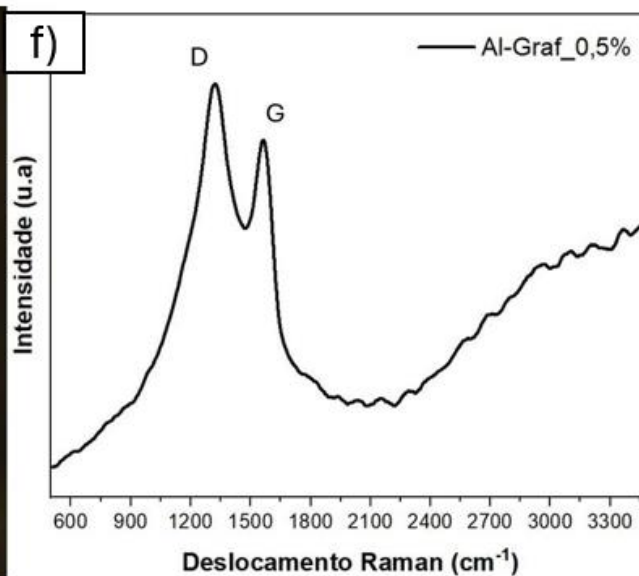
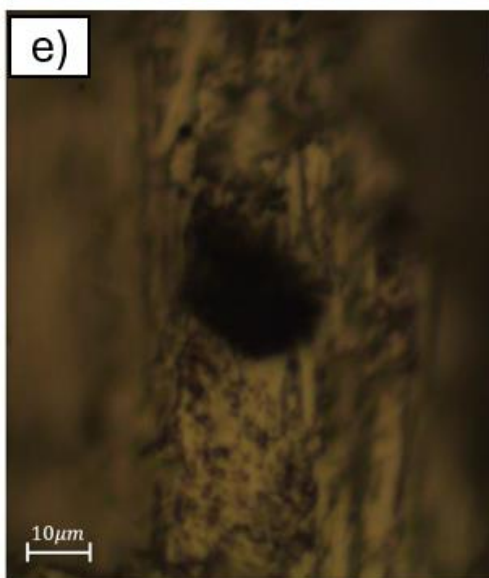
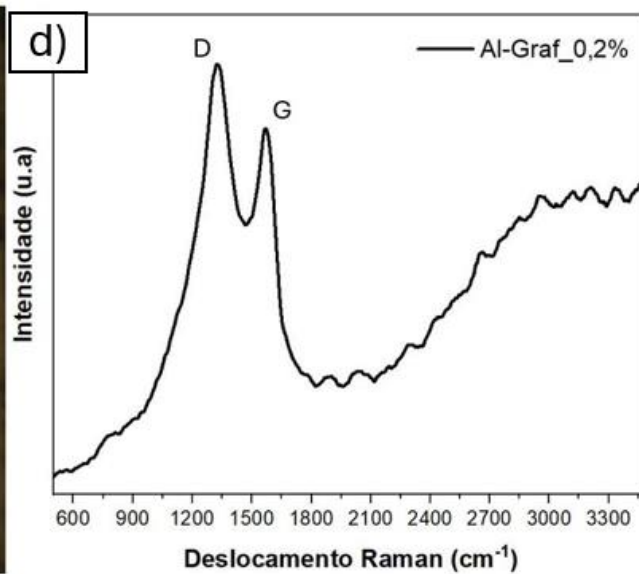
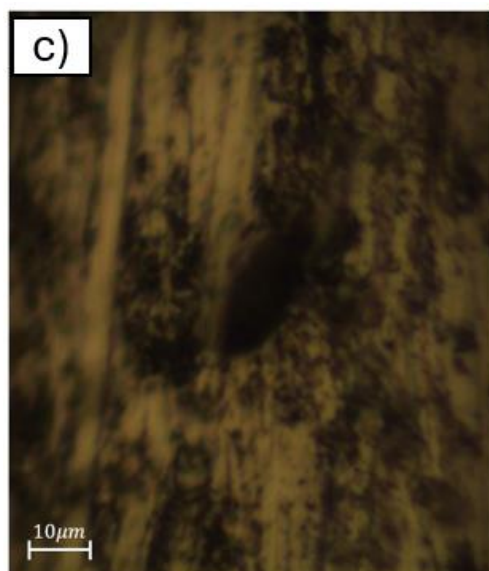
Os espectros Raman das amostras após a fundição apresentam duas bandas características: a banda D, localizada entre aproximadamente 1315 cm^{-1} e 1325 cm^{-1} , que está associada a desordens estruturais e defeitos; e a banda G, situada entre cerca de 1550 cm^{-1} e 1570 cm^{-1} , referente ao grafite e correspondente às ligações entre átomos de carbono na configuração planar com hibridização sp^2 .

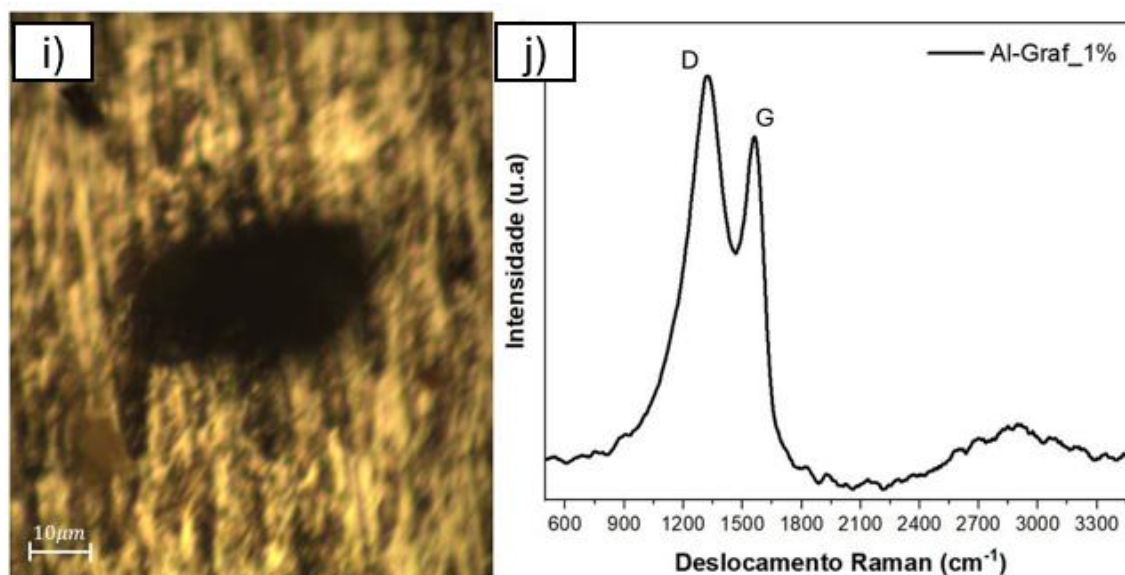
Nas Figuras 4.2(a) a (j) podem ser observadas as imagens e os espectros Raman do material 2D presente nos compósitos. Nota-se, porém, que os espectros exibem apenas as bandas D e G, sem a presença da banda 2D, que é característica do grafeno — como ilustrado anteriormente na Figura 4.1(b).

Essa ausência pode ser atribuída ao estresse mecânico gerado durante o processo de maceração com pilão, que pode romper ligações atômicas e desorganizar a estrutura do grafeno, levando ao desaparecimento da banda 2D.

Figura 4.2 – Imagens ópticas e espectros Raman do grafeno após fundição, sendo: a)- b) 0,1%, c)-d) 0,2%, e)-f) 0,5%, g)-h) 0,7% e i)-j) 1,0% de grafeno.







Fonte: Elaboração própria.

No trabalho de Bartolucci et al., (2011) relata-se a presença de Al_4C_3 . Os autores atribuíram a formação deste carboneto às altas temperaturas de processamento e à sua nucleação preferencial em defeitos da estrutura grafítica ou no carbono amorfo, onde os planos prismáticos apresentam alta energia superficial. Essa analogia sugere que, devido às elevadas temperaturas às quais os compósitos são submetidos, pode ocorrer a formação de carbonetos nas amostras, uma vez que o Al_4C_3 se nucleia preferencialmente em defeitos da estrutura.

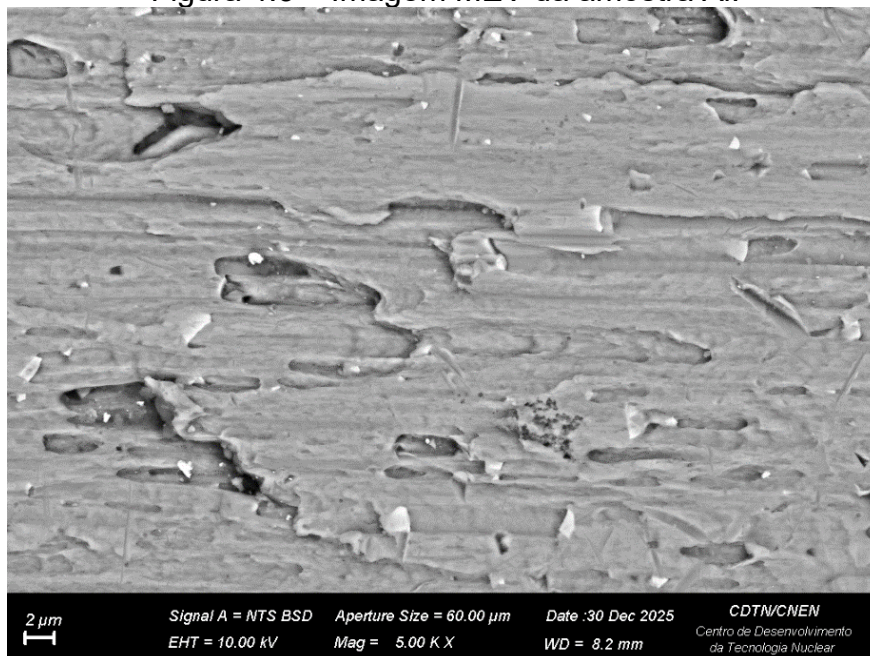
Sayed (2019) e Awotunde et al. (2019) descrevem que a criação de defeitos na estrutura do grafeno durante o processamento ocorre em todos os métodos e técnicas de produção de compósitos, conforme relatado em artigos que estudam compósitos de Al/Gr. No estudo de Bastwros et al. (2014), os autores reportam o aumento na quantidade de defeitos e desordem na estrutura do grafeno após mistura por moagem de bolas, decorrente das forças físicas aplicadas durante o processo. Já Yang, Shuai et al., (2024) descrevem que o pico da banda D mais intenso indica a presença de numerosos grupos funcionais contendo oxigênio na superfície do grafeno. Portanto, pode-se inferir que o método utilizando pilão também proporciona o aumento de defeitos e desordem na estrutura devido às forças físicas aplicadas durante o processo de mistura.

4.3 Análise dos compósitos por MEV

Nas Figuras 4.3 a 4.8 são apresentadas as imagens obtidas por MEV.

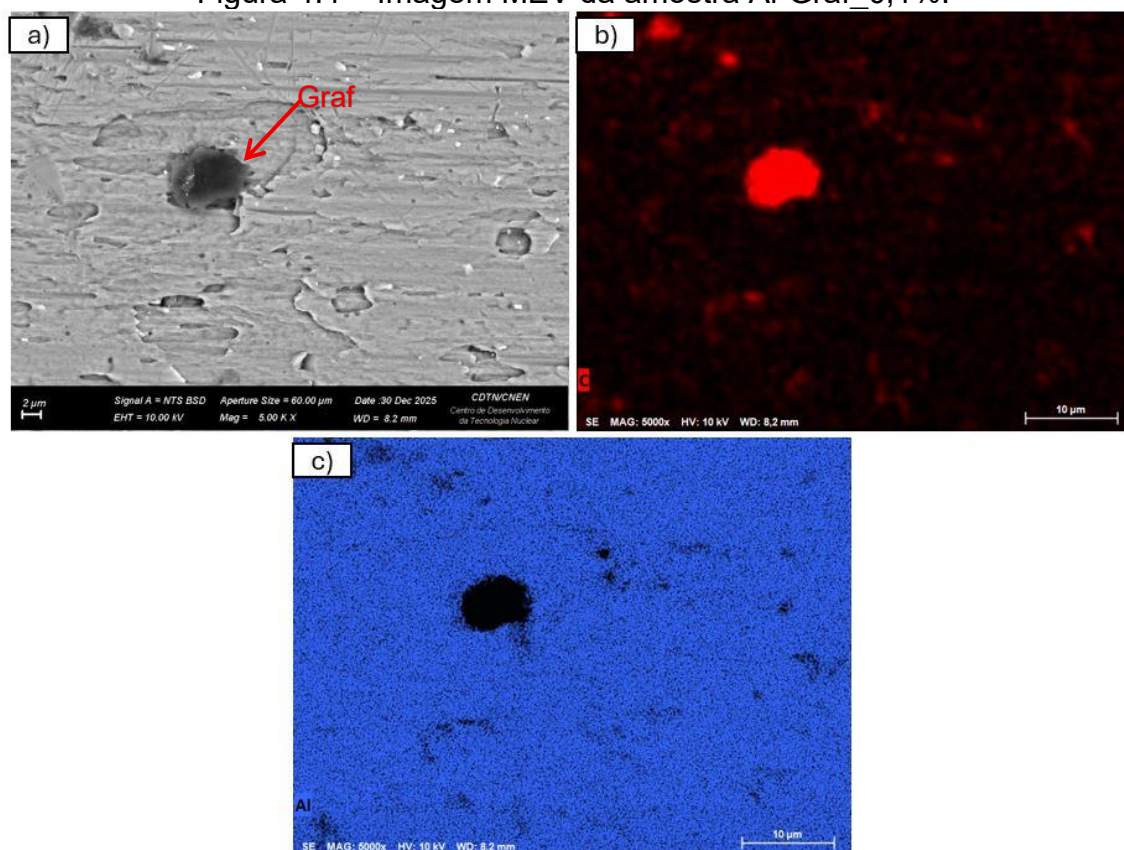
Observou-se grafeno em todas as amostras (Figuras 4.4 a 4.8) com diferentes porcentagens em peso. Foram feitas 3 imagens em cada amostra, sendo a imagem com cor vermelha para identificar carbono e a com cor azul para identificar alumínio.

Figura 4.3 – Imagem MEV da amostra Al.



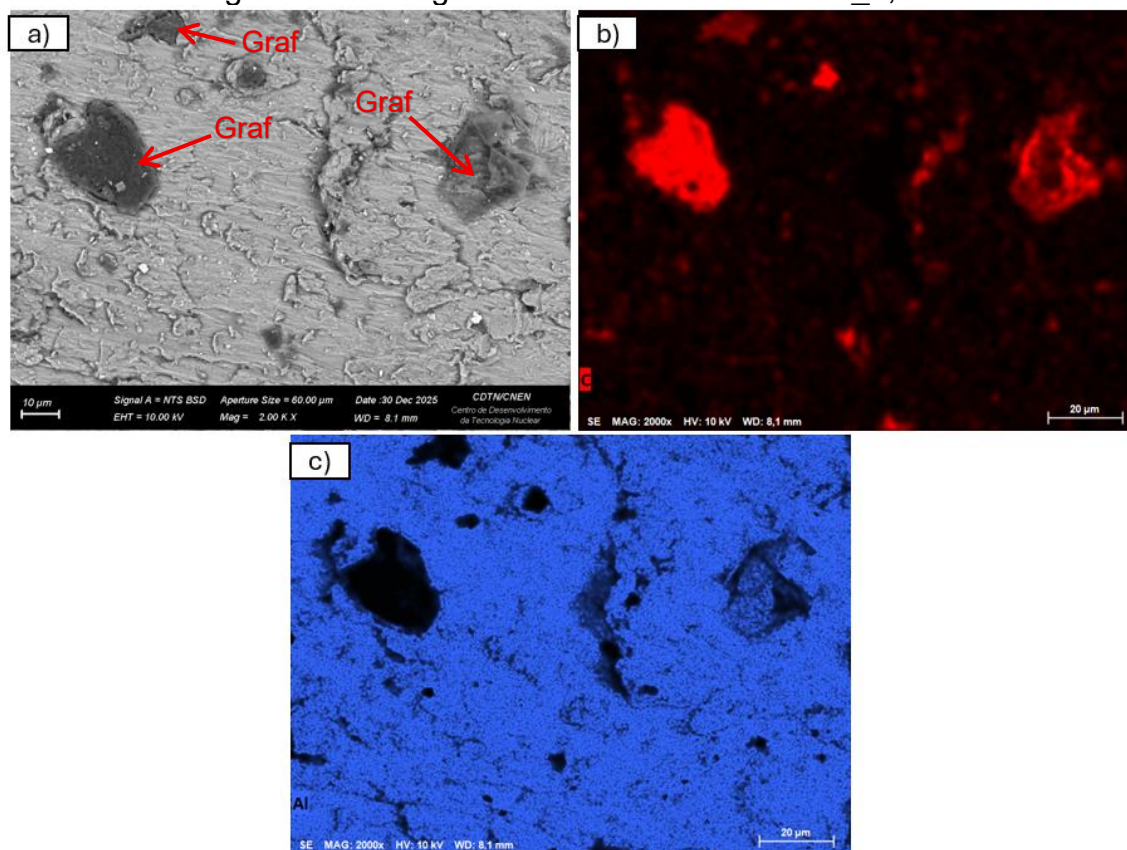
Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.4 – Imagem MEV da amostra Al-Graf_0,1%.



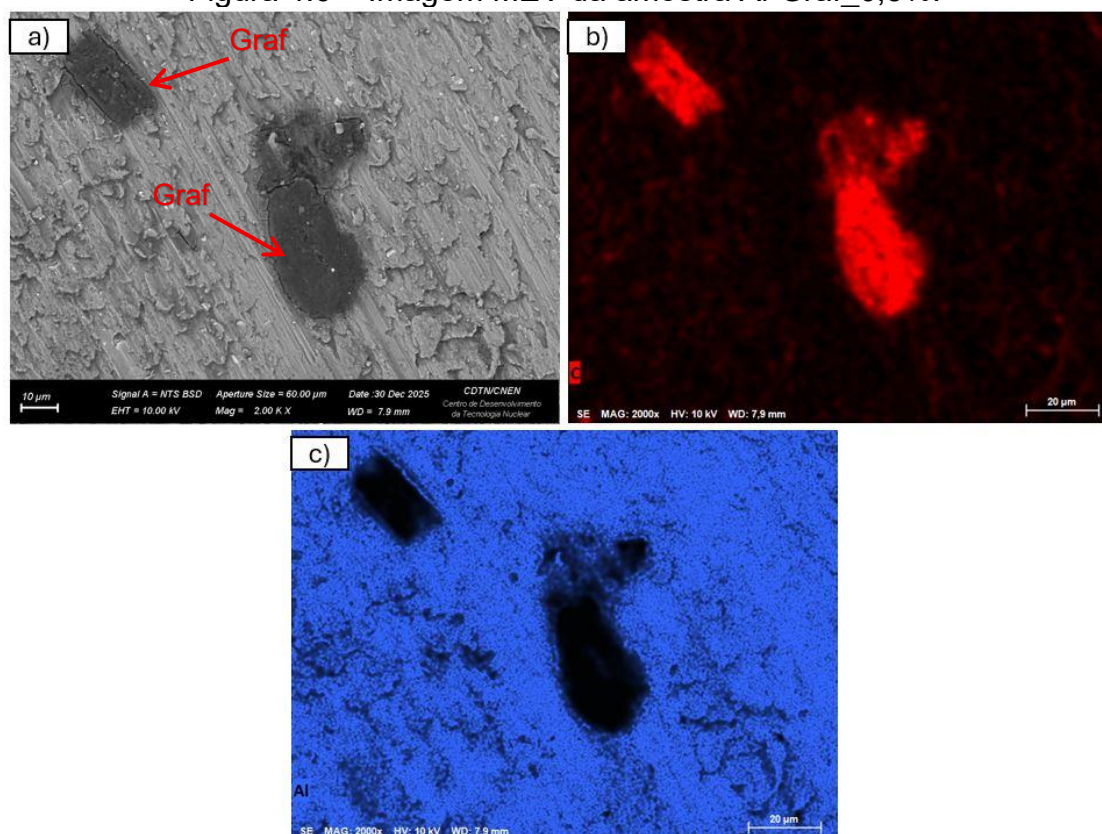
Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.5 – Imagem MEV da amostra Al-Graf_0,2%



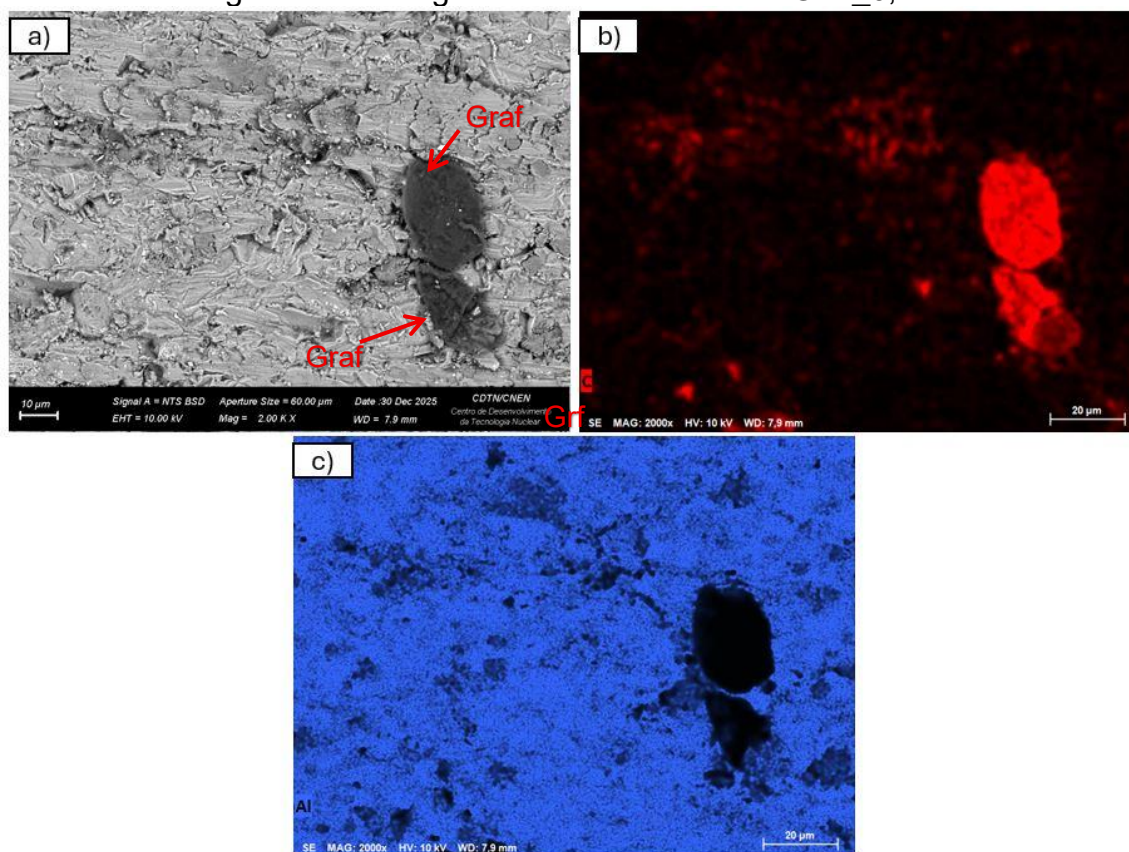
Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.6 – Imagem MEV da amostra Al-Graf_0,5%.



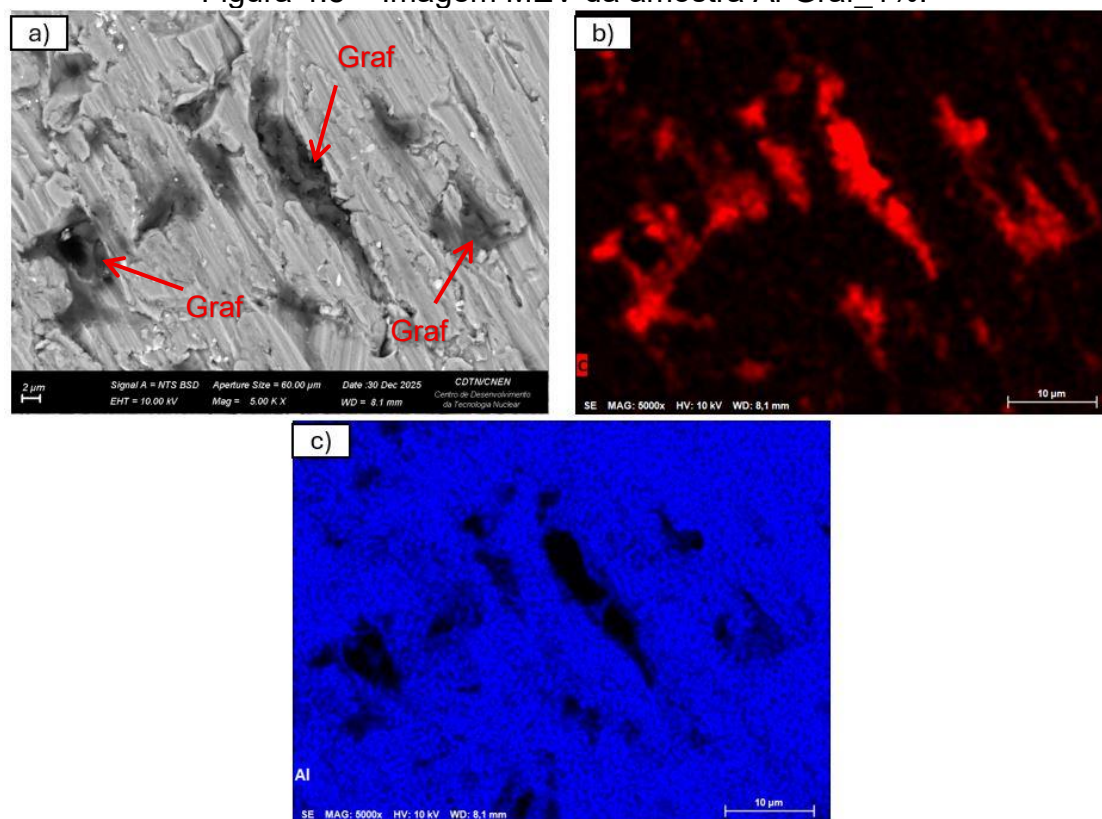
Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.7 – Imagem MEV da amostra Al-Graf_0,7%.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.8 – Imagem MEV da amostra Al-Graf_1%.

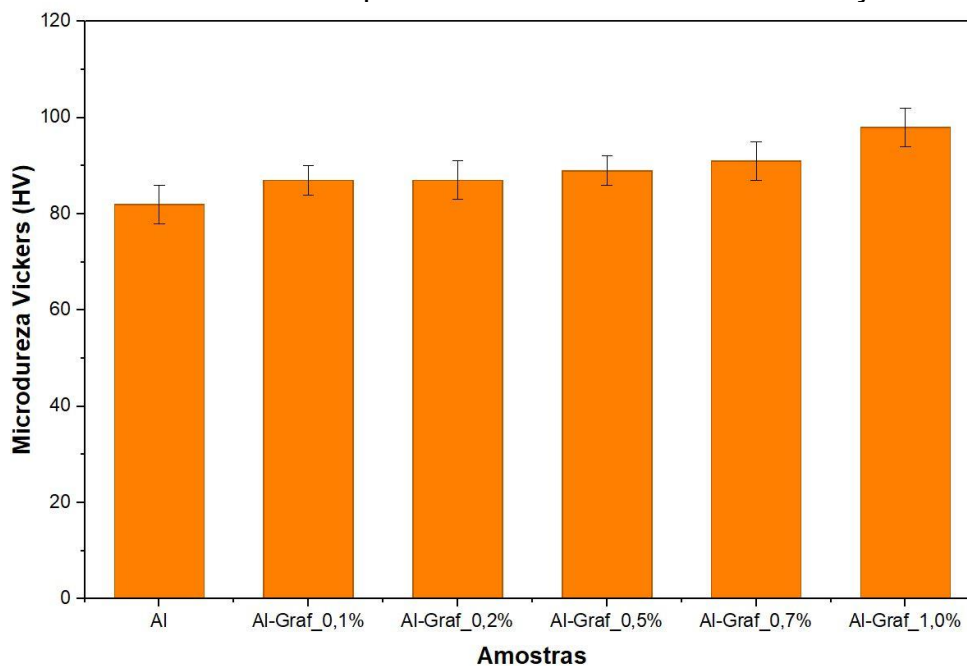


Fonte: Elaboração própria.

4.4 Microdureza

Na Figura 4.9 pode ser observado os resultados de microdureza (HV) nas amostras Al-Graf com diferentes porcentagens de grafeno.

Figura 4.9 – Microdureza dos compósitos de matriz de alumínio reforçado com grafeno.



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.2 é exibido os valores da microdureza (HV) e o aumento percentual, em relação à amostra de Al puro (Al).

Tabela 4.2 – Microdureza (HV) e aumento percentual dos compósitos em relação ao Al puro.

Amostra	Média (HV)	Desvio padrão	Aumento percentual
Al	82	± 4	-
Al-Graf_0,1%	87	± 3	+6
Al-Graf_0,2%.	87	± 4	+6
Al-Graf_0,5%.	89	± 3	+9
Al-Graf_0,7%.	91	± 4	+11
Al-Graf_1%.	98	± 4	+19

Fonte: Elaboração própria.

Com os resultados apresentados na Figura 4.9 e Tabela 4.2, é possível notar a diferença de desempenho mecânico relacionado à microdureza entre as diferentes porcentagens de grafeno dos compósitos. O compósito Al-Graf_1% (1% de grafeno

em peso) se destaca por apresentar um aumento na microdureza de 19% com relação ao Al puro. Já Bisht, Ankita., et al. (2017) em seu estudo encontrou um aumento da dureza de 21,4% com 1% em peso de nanoplaquetas de grafeno (GNP).

Todas as amostras analisadas apresentaram desempenho superior ao do alumínio puro. Contudo, nos casos em que o aumento foi inferior a 11%, os resultados podem ser considerados insignificantes, uma vez que estão dentro da faixa de desvio padrão amostral. Isso indica que a densidade de deslocamento desses compósitos permanece próxima à do alumínio puro.

Tal comportamento pode ser explicado por uma baixa dispersão ou possível aglomeração do grafeno na matriz metálica. Dessa forma, apenas uma fração do material foi efetivamente reforçada nessas amostras, agravado pelo fato de que as porcentagens utilizadas são menores em comparação com as demais formulações.

O grafeno atua como um refinador da microestrutura granular em matrizes metálica, devido a sua natureza 2D que promove a nucleação heterogênea de grãos durante a solidificação devido ao gradiente de propriedades termofísicas na interface grafeno-metal, o grafeno também pode funcionar como barreira aos movimentos de discordâncias através do preenchimento eficiente dos poros e defeitos na estrutura metálica (Jayaseelan et al., 2022).

A Tabela 4.3 exibe os resultados de algumas observações de microdureza realizadas para cada amostra. Ressalta-se que a tabela não contempla a totalidade dos dados do ensaio; entretanto, para o cálculo das somas totais e médias, todas as observações foram consideradas. Esses valores e suas respectivas médias foram utilizados para a realização de uma análise de variância (ANOVA) com um fator. Com base nesse procedimento, obtiveram-se os valores de F calculado e F crítico, a fim de verificar se as diferentes porcentagens de grafeno exercem influência significativa na microdureza das amostras em comparação com o alumínio sem grafeno.

Tabela 4.3 – Medidas de microdureza, suas somas totais e médias.

Concentração de grafeno (%)	Observações da microdureza				Totais	Média
	1	2	...	25		
Al	78,2	82,2	...	80,5	2044,25	81,77
Al_Graf-0,1%	82,6	87,1	...	81,4	2180,3	87,21
Al_Graf-0,2%	89,5	74,3	...	94,1	2163,85	86,55
Al_Graf-0,5%	83,2	89,7	...	94,6	2220,31	88,81
Al_Graf-0,7%	90,7	89,7	...	88,5	2286,25	91,45
Al_Graf-1,0%	93,9	90	...	95	2434,25	97,37
					13329,21	88,86

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da soma quadrática dos tratamentos, total e do erro, além dos graus de liberdade e das média quadrática dos tratamentos e dos erros.

Tabela 4.4 – Análise de Variância em termos de microdureza.

Fonte de variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática
Tratamentos	3435,8	5	687,16
Erro	35225,94	144	244,62
Total	38661,74	149	

Fonte: Elaboração própria.

Como o valor do grau de liberdade do erro é 144 foi usado o valor mais próximo encontrado na tabela, sendo este valor 120. Logo, o valor do F tabelado para significância de 95% é:

$$f_{0,05;5;120} = 2,29$$

Já o valor de F calculado é:

$$F_0 = 2,81$$

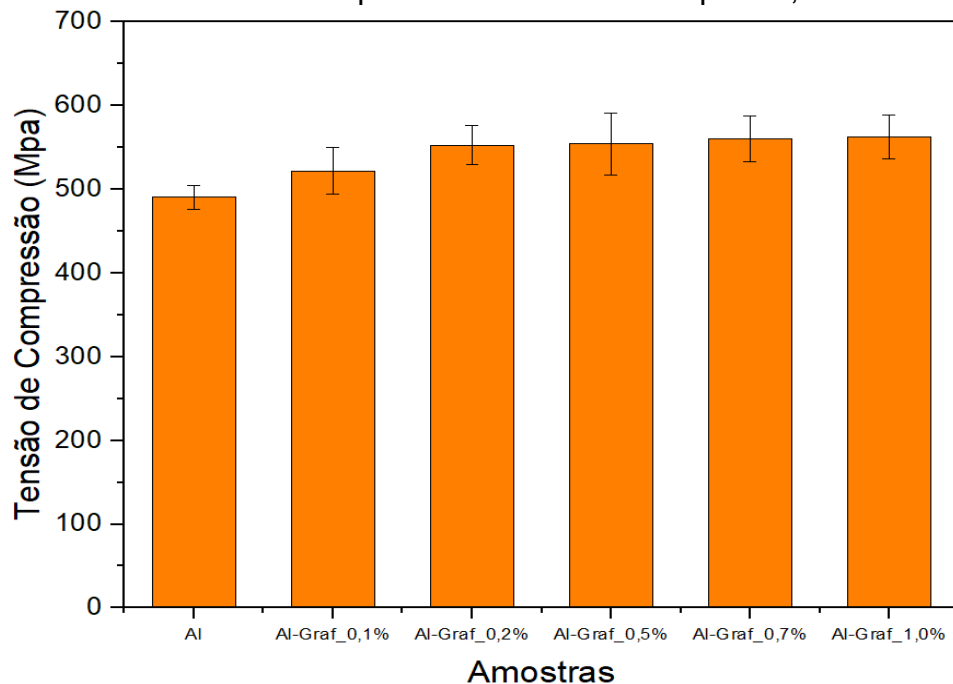
Considerando as hipóteses: Hipótese nula (H_0) – Não há diferença significativa entre as médias dos grupos; Hipótese alternativa (H_1) – Pelo menos uma média é diferente das demais. Visto que F calculado é maior que o F tabelado logo temos uma forte evidência de que H_0 é verdadeiro.

Com a rejeição do H_0 , pode-se afirmar que o grafeno exerce influência diretamente na microdureza das amostras.

4.5 Resistência à compressão

Na Figura 4.10 pode ser observado o gráfico de barras dos resultados da tensão de compressão nas amostras Al-Graf com diferentes porcentagens de grafeno.

Figura 4.10 – Tensão de compressão do Al e Al-Graf para 0,6 de deformação.



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.5 é exibido os valores da tensão de compressão atingida para o caso de 60% de deformação e o aumento percentual, em relação à amostra de Al puro (Al).

Tabela 4.5 – Tensão de compressão para 0,6 de deformação dos Al-Graf e seu aumento percentual em relação ao Al puro.

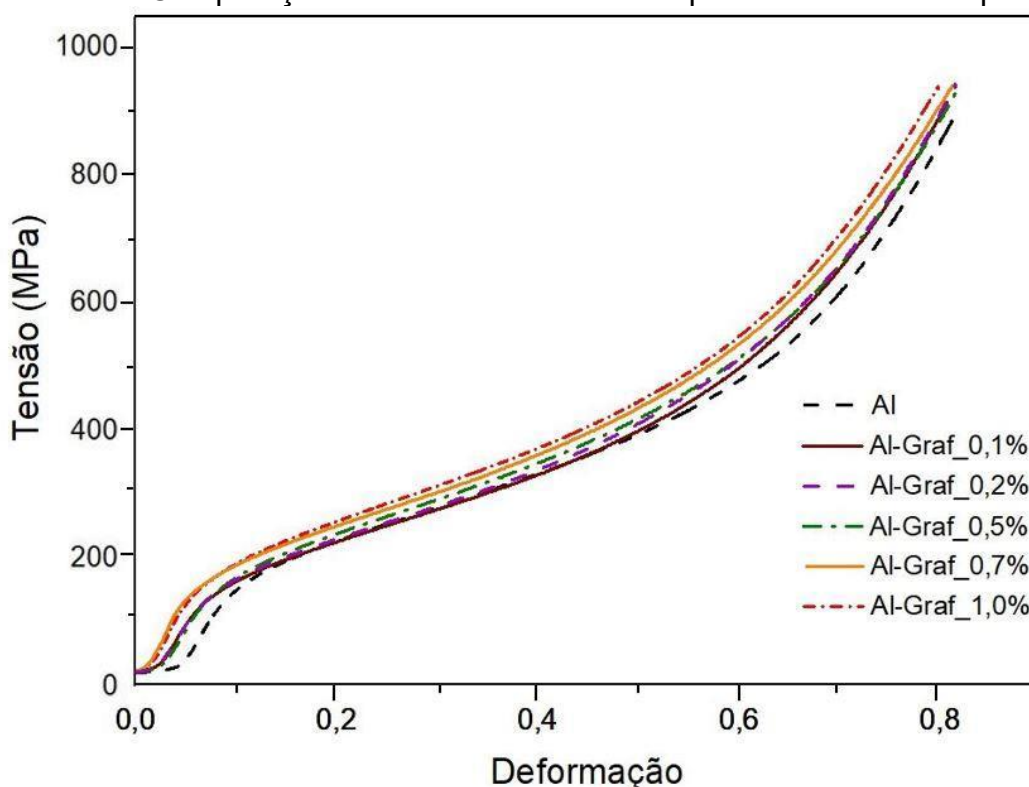
Amostra	Média (HV)	Desvio padrão	Aumento percentual
Al	490,8	±14,5	-
Al-Graf_0,1%	521,9	±28,1	+6
Al-Graf_0,2%.	553	±23,7	+12
Al-Graf_0,5%.	554,2	±37,0	+13
Al-Graf_0,7%.	560,4	±27,2	+14
Al-Graf_1%.	562,9	±26,1	+15

Fonte: Elaboração própria.

Todas as amostras analisadas apresentaram desempenho superior ao do alumínio puro. Contudo, nos casos em que o aumento foi inferior a 10%, os resultados podem ser considerados insignificantes, uma vez que estão dentro da faixa de desvio padrão amostral. Isso indica que a densidade de deslocamento desses compósitos permanece próxima à do alumínio puro. As amostras com 0,7% e 1,0% de grafeno apresentaram a maior resistência à compressão (para 0,6 de deformação). No entanto, a diferença de desempenho entre a amostra com 0,2% e a com 1,0% foi de apenas 3%, indicando uma variação pequena entre todas as composições testadas.

Os resultados do ensaio de compressão para as diferentes porcentagens de grafeno em peso, estão mostrados na Figura 4.11. Foram escolhidas as deformações de 20%, 40% e 60% para avaliação da resistência à compressão dos corpos de prova fabricados, a Tabela 4.6 resume os valores para cada porcentagens de deformação escolhido.

Figura 4.11 – Comparação entre os ensaios de compressão do Al e compósitos.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4.6 – Valores das deformações encontradas para 0,2 de deformação, 0,4 de deformação e 0,6 de deformação.

Compósito	Resistência a Compressão (MPa)		
	0,2 de Deformação	0,4 de Deformação	0,6 de Deformação
Al	222,3	341,2	490,8
Al-Graf_0,1%	221,4	339,1	521,9
Al-Graf_0,2%	222,8	347,3	553,1
Al-Graf_0,5%	231,8	349,7	554,2
Al-Graf_0,7%	235,2	355,6	560,4
Al-Graf_1,0%	237,1	359,9	562,9

Fonte: Elaboração própria.

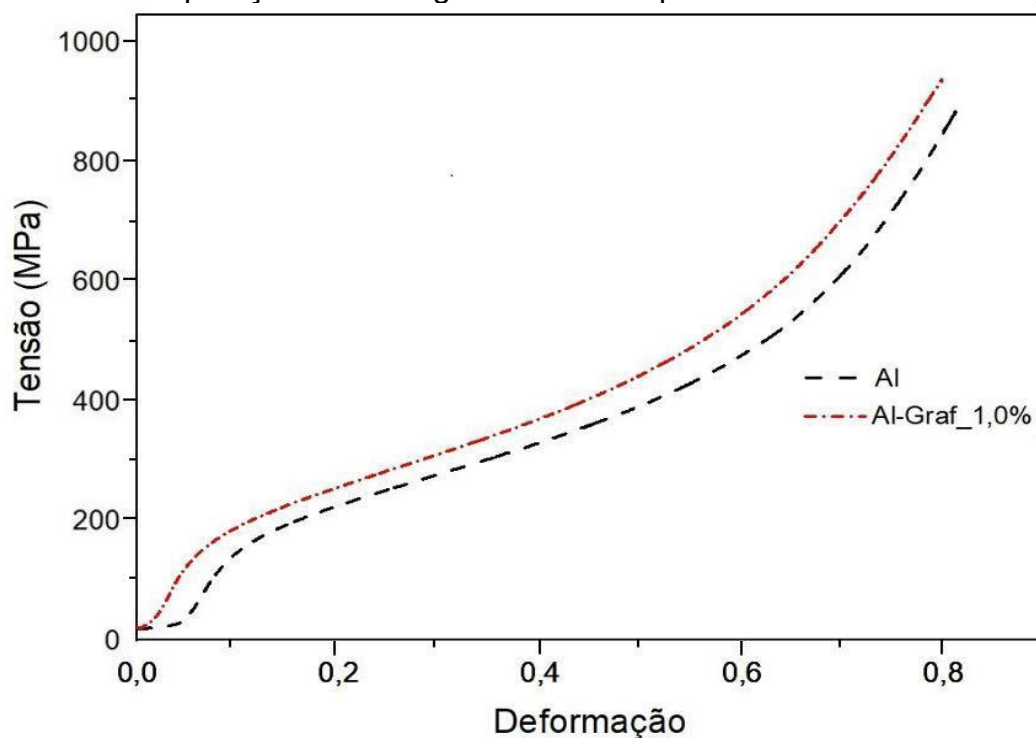
Foram testadas cinco amostras para cada concentração de grafeno. Os resultados demonstraram que a resistência à compressão dos compósitos aumentou proporcionalmente ao teor de grafeno adicionado, com destaque para a formulação com 1,0%, que apresentou um incremento significativo em relação ao alumínio puro. O mesmo comportamento foi observado no ensaio de microdureza Vickers, cujos valores também cresceram com a concentração do reforço.

Portanto, é possível afirmar que o aumento da resistência à compressão está diretamente ligado à adição de grafeno no compósito.

KHANNA, Virat et al. (2023), relataram em seu trabalho que a adição de 0,5% em peso de nanoplaquetas de grafeno, aumentou a resistência à compressão do alumínio em cerca de 70%. No entanto, o valor da resistência à compressão diminuiu à medida que a fração de nanoplaquetas aumenta acima de 0,5% em peso.

Com os dados mostrados na Tabela 4.5, observa-se que, quando comparado Al e Al-Graf_1,0% houve um aumento na resistência à compressão de 6,6% (0,2 de deformação), 5,48% (0,4 de deformação) e 14,7% (0,6 de deformação). Este efeito pode ser observado na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Comparação entre os gráficos de compressão do Al e do Al-Graf_1,0%.



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados de cinco observações realizadas para cada amostra no ensaio de compressão no ponto de 0,6 de deformação. Essa tabela organiza os dados e suas respectivas médias, que foram utilizadas para realizar uma análise de ANOVA. Com base nessa análise, obtiveram-se os valores de F calculado e F crítico (tabelado), a fim de determinar se as diferentes porcentagens de grafeno exercem influência significativa na tensão de compressão, quando comparadas ao Al puro.

Tabela 4.7 – Medidas da tensão de compressão para 0,6 de deformação, suas somas totais e médias.

Concentração de grafeno (%)	Observações da tensão					Totais	Média
	1	2	3	4	5		
Al	495,1	469,3	502,7	483,4	503,5	2454	490,8
Al_Graf-0,1%	477,2	525,8	537,9	517,4	551,2	2609,5	521,9
Al_Graf-0,2%	570,5	511,7	555,4	562,2	565,7	2765,5	553,1
Al_Graf-0,5%	591,2	525,6	518,7	538,9	596,6	2771	554,2
Al_Graf-0,7%	587,1	522,6	578,0	541,5	572,8	2802	560,4
Al_Graf-1,0%	601,7	539,7	564,2	537,9	571,0	2814,5	562,9
						16216,5	3243,3

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados da soma quadrática dos tratamentos, total e do erro, além dos graus de liberdade e das média quadrática dos tratamentos e dos erros.

Tabela 4.8 – ANOVA, para os dados da tensão de compressão, com um único fator.

Fonte de variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática
Tratamentos	20301,275	5	4060,255
Erro	17427,53	24	726,147
Total	37728,8	29	

Fonte: Elaboração própria.

Utilizando a tabela do teste F (Fisher) com um nível significância de 5% foi observado um valor F (tabelado) de:

$$f_{0,05;5;24} = 2,62$$

Já o valor de F calculado é:

$$F_0 = 5,59$$

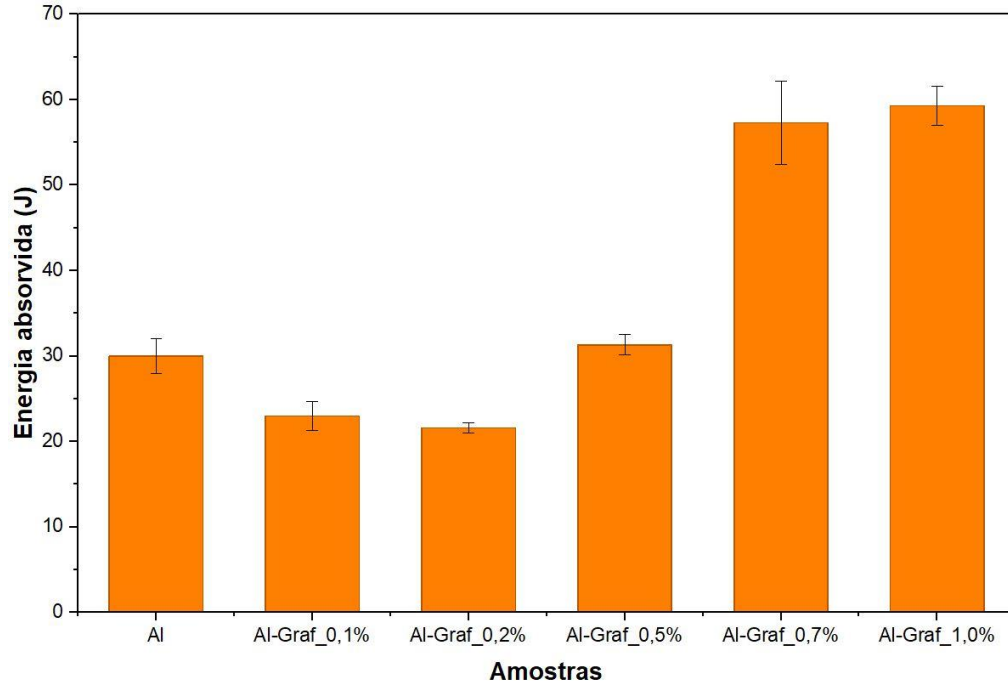
Considerando as hipóteses: Hipótese nula (H_0) – A porcentagem de grafeno não afeta na microdureza dos compósitos de Al-Graf. Dito de outra forma, não há diferença significativa entre as médias dos grupos; Hipótese alternativa (H_1) – A porcentagem de grafeno afeta na microdureza dos compósitos de Al-Graf. Dito de outra forma, pelo menos uma média diferente das demais.

Logo que F calculado é maior que o F tabelado, podemos rejeitar H_0 e considerar H_1 , confirmando que o grafeno tem influência direta na tensão de compressão dos compósitos.

4.6 Energia absorvida

Os resultados de energia absorvida obtidos através do ensaio de charpy modificado estão apresentados na Tabela 4.9. Na Figura 4.13 os resultados estão apresentados na forma gráfica.

Figura 4.13 – Resultado da energia absorvida pelo Al e os compósitos.



Fonte: Elaboração própria.

As amostras com com 1,0% de grafeno (Al-Graf_1,0%) apresentaram os maiores valores de energia absorvida, com valores em torno de 59,3 J. Esse valor corresponde a um aumento de 98% em relação à energia absorvida pelo Al sem grafeno na composição. Outro aspecto observável é que o desvio padrão teve um valor maior para amostras com 0,7% grafeno quando comparado com outras porcentagens.

Tabela 4.9 – Tabela mostrando média da energia absorvida e seu aumento percentual em relação ao Al.

Amostra	Média energia absorvida (J)	Desvio padrão	Aumento em relação ao Al (%)
Al	30	2	-
Al-Graf_0,1%	23	1,6	-23%
Al-Graf_0,2%	21,5	0,5	-28%
Al-Graf_0,5%	31,5	2,2	+5%
Al-Graf_0,7%	57,5	6,7	+92%
Al-Graf_1,0%	59,3	2,9	+98%

Fonte: Elaboração própria.

A análise dos resultados nos revela que a adição de 0,7% e 1,0% de grafeno fez com que tivesse um aumento significativo da energia absorvida das amostras. É

relatado nos trabalhos de Gao et. al., (2016), Zhang et. al., (2016) e Li et. al., (2015) que o grafeno tem a tendências de localizar-se nos contornos de grãos das partículas de alumínio, isso pode ser capaz de limitar a transferência de carga efetiva entre matriz e reforço ao longo material. Logo pode-se afirmar que a energia absorvida nas amostras com 0,7% e 1,0% de grafeno, aumentou devido ao grafeno adicionado na matriz de alumínio, já que este material atua como um obstáculo interno que impedem o movimento das discordâncias (defeitos na estrutura cristalina).

A Tabela 4.10 contém os dados de quatro réplicas do ensaio de Charpy para cada amostra e suas respectivas médias. Esses valores fundamentaram uma análise de ANOVA com um único fator, cujo resultado – pela comparação entre o F calculado e o F tabelado – determinou a significância da influência do grafeno na energia de impacto absorvida em comparação com o alumínio puro.

Tabela 4.10 – Medidas da energia absorvida obtida no ensaio de charpy, somas totais e médias.

Concentração de grafeno (%)	Observações da energia absorvida				Totais	Média
	1	2	3	4		
Al	32	28	28	32	120	30
Al_Graf-0,1%	25	22	21	24	92	23
Al_Graf-0,2%	22	21	22	21	86	21,5
Al_Graf-0,5%	32	28	32	34	126	31,5
Al_Graf-0,7%	50	68	58	54	230	57,5
Al_Graf-1,0%	58	55	62	62	237	59,3
					891	222,8

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados da soma quadrática dos tratamentos, total e do erro, além dos graus de liberdade e das média quadrática dos tratamentos e dos erros.

Tabela 4.11 – Análise de Variância em termos de energia absorvida.

Fonte de variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática
Tratamentos	5722,875	5	1144,575
Erro	259,75	18	14,43
Total	5982,625	19	

Fonte: Elaboração própria.

Utilizando os dados da Tabela 4.10 para o teste F com um nível de significância de 5% foi achado o valor de:

$$f_{0,05;5;18} = 2,77$$

Já o valor de F calculado é:

$$F_0 = 79,32$$

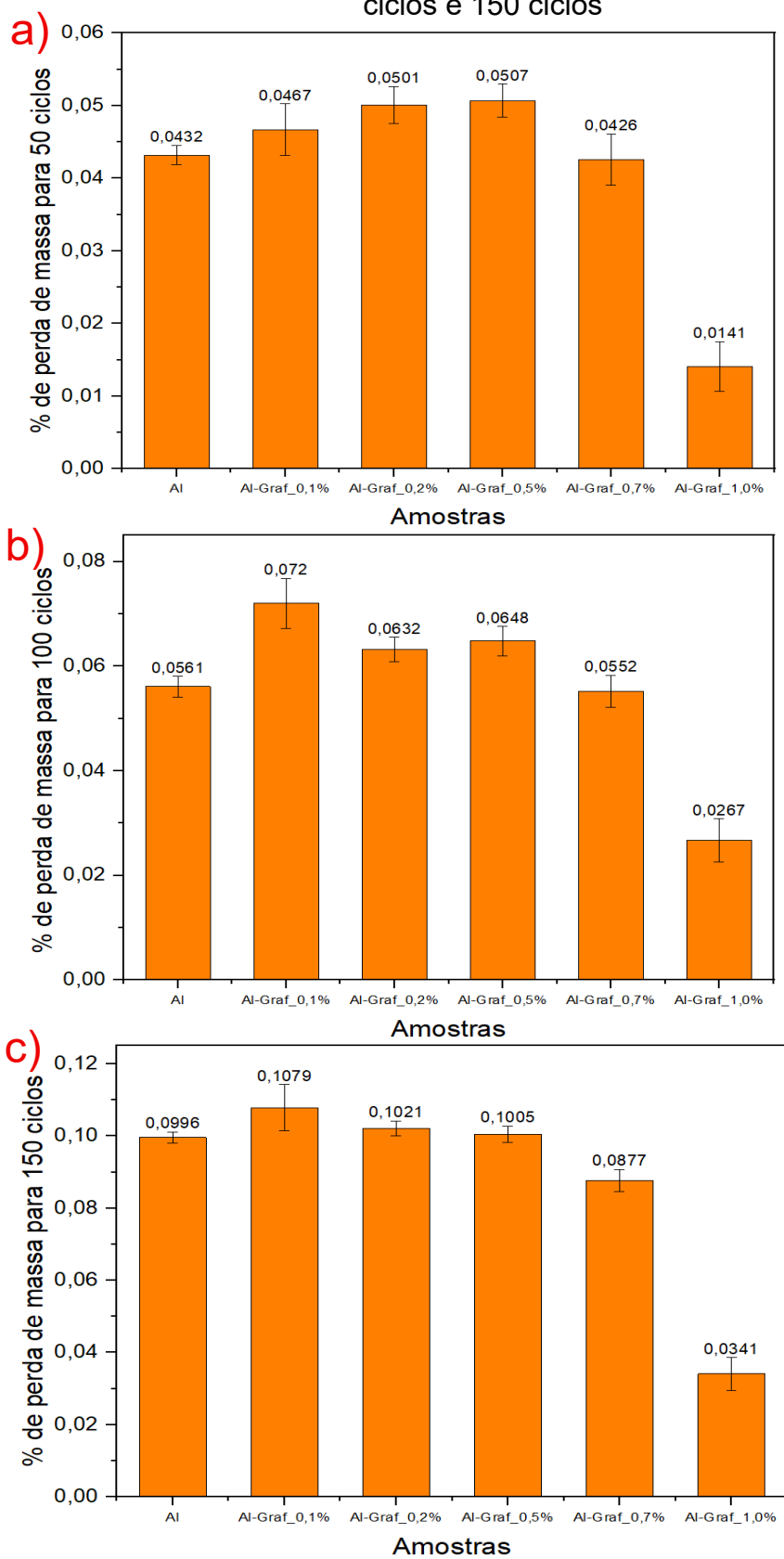
Considerando as hipóteses: Hipótese nula (H_0) – A porcentagem de grafeno não afeta a energia absorvida dos compósitos de Al-Graf. Dito de outra forma, não há diferença significativa entre médias dos grupos ou tratamentos; (H_1) – A porcentagem de grafeno, sim afeta a energia absorvida dos compósitos de Al-Graf. Dito de outra forma, pelo menos uma média é diferente das demais.

Ao constatar que o valor de F calculado é maior que o F tabelado, rejeita-se H_0 , ou seja, o grafeno influencia diretamente na energia absorvida pelas amostras com diferentes porcentagens do material 2D.

4.7 Desgaste abrasivo

Os resultados do ensaio de desgaste abrasivo para 50, 100 e 150 ciclos são apresentados na Figura 4.14. Para realização do ensaio foi utilizado uma lixa com granulometria 280, onde está granulometria encaixa-se no grupo de lixa média, oferecendo equilíbrio entre taxa de remoção e acabamento superficial.

Figura 4.14 – Resultados do ensaio de desgaste abrasivo para a) 50 ciclos, b) 100 ciclos e 150 ciclos



Fonte: Elaboração própria.

Através da análise dos resultados, pode-se constatar que, para ciclos de 50,

100 e 150, a amostra Al-Graf_1,0% tiveram a menor perda de massa quando comparada ao Al.

No ensaio realizado com 150 ciclos, as amostras Al-Graf_1,0% apresentaram um acréscimo de ~65,8% na resistência ao desgaste em comparação ao Al. Comprovando que a adição de 1,0% de grafeno no alumínio tornou o compósito mais resistente ao desgaste, já para as amostras Al-Graf_0,7% tiveram um acréscimo de ~11,9% na resistência ao desgaste. As amostras com porcentagens 0,1%, 0,2% e 0,5% não apresentaram mudanças significativas quando comparado ao Al.

A análise de ANOVA com um único fator foi conduzida a partir dos dados do desgaste abrasivo, os quais, incluindo quatro observações por amostra e suas médias, estão compilados na Tabela 4.12. O número de ciclos escolhidos para realização da ANOVA foi de 150 ciclos, com os dados do ensaio calculamos as somas quadráticas, graus de liberdade e as médias quadrática, com estes valores é possível calcular F calculado e F tabelado, e assim saber se o grafeno teve influência na resistência ao desgaste.

Tabela 4.12 – Apresentação dos resultados do ensaio de desgaste abrasivo para 150 ciclos, suas somas totais e médias.

Concentração de grafeno (%)	Observações 150 ciclos				Totais	Média
	1	2	3	4		
Al	0,0974	0,1010	0,1004	0,0996	0,3984	0,0996
Al_Graf-0,1%	0,1095	0,1142	0,0991	0,1088	0,4316	0,1079
Al_Graf-0,2%	0,1006	0,1047	0,1002	0,1029	0,4084	0,1021
Al_Graf-0,5%	0,1038	0,0995	0,0987	0,1000	0,402	0,1005
Al_Graf-0,7%	0,0842	0,0912	0,0891	0,0863	0,3508	0,0877
Al_Graf-1,0%	0,0311	0,0332	0,0407	0,0314	0,1364	0,0341
					2,1276	0,5319

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 4.13 resume os componentes da análise da ANOVA, exibindo a soma dos quadrados dos tratamentos, do erro e total, bem como seus respectivos graus de liberdade e médias quadráticas. A partir desses valores, calcula-se o F calculado, parâmetro essencial para a comparação com o F crítico (tabelado) e a determinação da significância estatística.

Tabela 4.13 – Análise de Variância do desgaste abrasivo para 150 ciclos.

Fonte de variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática
Tratamentos	0,01515358	5	0,0030307
Erro	0,0002574	18	0,0000143
Total	0,015411	19	

Fonte: Elaboração própria.

Utilizando a tabela do teste F para significância de 95% foi achado o valor de:

$$f_{0,05;5;18} = 2,77$$

Já o valor de F calculado é:

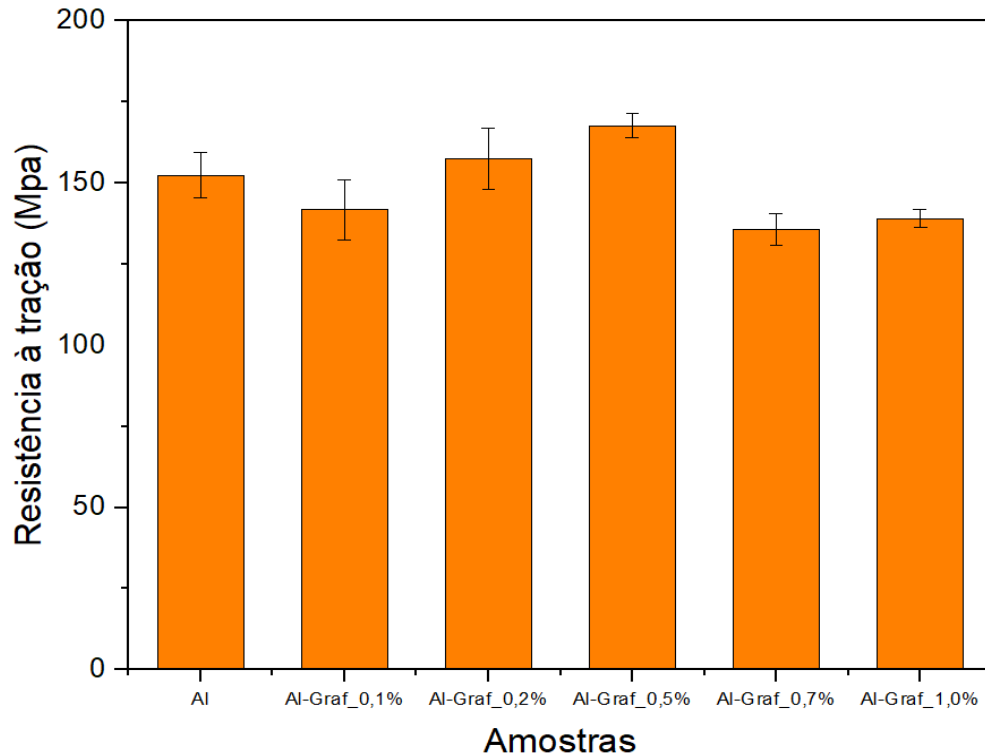
$$F_0 = 211,9$$

Considerando as hipóteses: Hipótese nula (H_0) – A porcentagem de grafeno não afeta o desgaste abrasivo dos compósitos de Al-Graf. Dito de outra forma, não há diferença significativa entre as médias dos grupos (tratamentos); Hipótese alternativa (H_1) – A porcentagem de grafeno sim afeta o desgaste abrasivo dos compósitos de Al-Graf. Pelo menos uma média é diferente das demais. Logo que F calculado é maior que o F tabelado, logo temos uma forte evidência de que H_0 é falsa, ou seja, a porcentagem de grafeno sim afeta o desgaste abrasivo, tal como mostrado 4.14 e Tabela 4.12.

4.8 Ensaio de tração

Na Figura 4.15 pode ser observado os resultados das resistências à tração (Mpa) do Al e das amostras Al-Graf com diferentes porcentagens de grafeno.

Figura 4.15 – Resultados da resistência à tração do Al e dos compósitos.



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.14 é exibido os valores da média das resistências à tração (Mpa) e o aumento percentual, em relação à amostra de Al puro (Al).

Tabela 4.14 – Resistência à tração (Mpa) e aumento percentual dos compósitos em relação ao Al puro.

Amostra	Média (HV)	Desvio padrão	Aumento percentual
Al	152,4	± 7	-
Al-Graf_0,1%	141,8	± 9	-7
Al-Graf_0,2%.	157,6	± 9	+3
Al-Graf_0,5%.	167,7	± 4	+10
Al-Graf_0,7%.	135,8	± 5	-11
Al-Graf_1%.	139,1	± 3	-9

Fonte: Elaboração própria.

Para o caso do ensaio de tração apenas as amostras com 0,2% e 0,5% de grafeno na composição apresentaram desempenho superior ao do alumínio puro. Contudo, nos casos em que o aumento foi inferior a 10%, os resultados podem ser considerados insignificantes, uma vez que estão dentro da faixa de desvio padrão amostral. Enquanto as amostras com 0,2% e 0,5% de grafeno obtiveram a maior

resistência à tração, embora o incremento proporcionado pela amostra com 0,2% tenha sido insignificante, as com 0,1%, 0,7% e 1,0% apresentaram queda de desempenho em relação ao alumínio não reforçado. Tal redução provavelmente decorre da presença de aglomerados, que funcionam como concentradores de tensão.

Na Figura 4.16 a) mostram-se os resultados do ensaio de tração para Al puro e Al-Graf. Observa-se que as porcentagens de 0,2% e 0,5% de grafeno proporcionaram um aumento na resistência à tração e no alongamento. Por outro lado, as amostras com 0,7% e 1,0% de grafeno apresentaram uma redução nos valores de resistência à tração e alongamento. Este efeito pode ser atribuído à aglomeração do grafeno, uma vez que o processo de mistura foi realizado manualmente, e em porcentagens mais elevadas a probabilidade de ocorrência desse fenômeno é maior. No caso das amostras com 0,1% os valores deram próximo ao do alumínio puro, mostrando que está porcentagem não tem grandes efeito no alumínio.

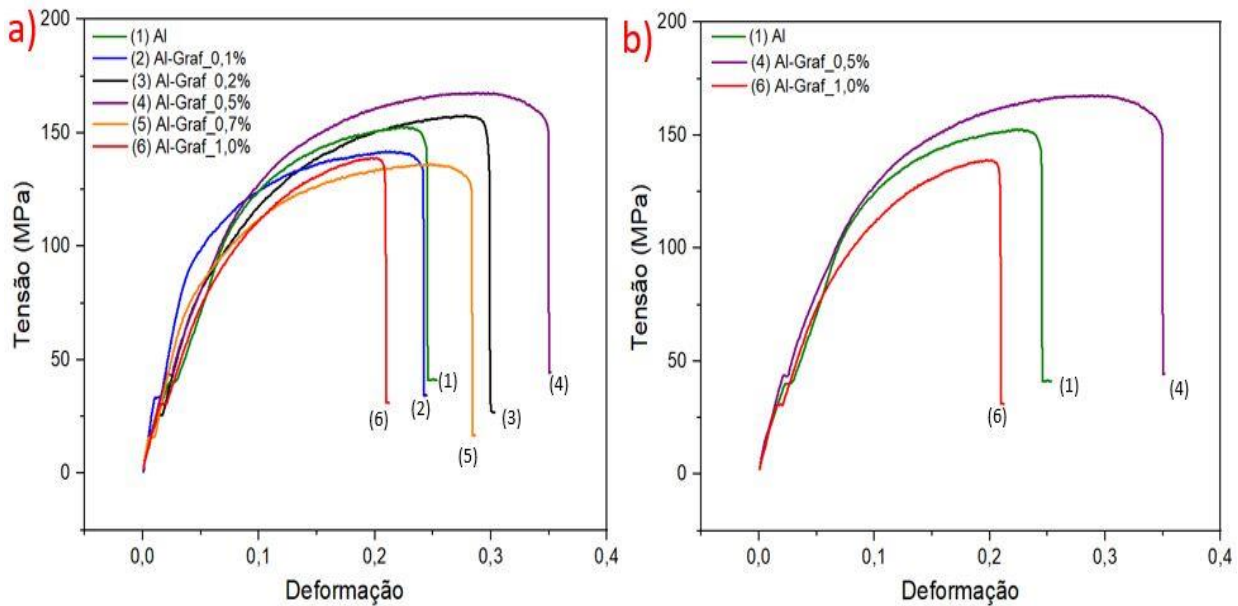
Yang, Shuai et al. (2024) relataram que o aumento inicial da resistência à tração do compósito é atribuído ao eficiente mecanismo de transferência de carga proporcionado pelo grafeno. No entanto, quando o teor de grafeno excede um limite crítico, ele tende a se acumular nos contornos de grão, onde atua como um concentrador de tensões e uma fonte potencial para a propagação de trincas. Como resultado, o material torna-se mais propenso a fraturar ao longo desses contornos durante o ensaio de tração, o que leva a uma diminuição na resistência mecânica final.

Shin e Bae (2015) utilizaram a técnica de metalurgia do pó para produção de compósitos, e relataram um aumento de aproximadamente 50% na resistência à tração com a adição de 0,3% de grafeno na liga Al 2024, enquanto o alongamento diminuiu de ~18% para ~10%. Isso demonstra que baixas porcentagens produzem resultados mais favoráveis devido à melhor dispersão do grafeno. Li et al. (2015), por sua vez, utilizaram o processo de moagem e extrusão a quente, e observaram que a resistência à tração aumentou de ~210 MPa (Al puro) para ~310 MPa com 0,5% de grafeno, atingindo ~352 MPa com 1,0% de grafeno. A ductilidade diminuiu de 12% para 5% e, posteriormente, para 3% nas amostras com 1,0% de grafeno.

Na Figura 4.14 b) é feita a comparação de três gráfico do ensaio de tração, sendo Al puro (cor verde), 0,5% de grafeno (cor roxa) e 1,0% de grafeno (cor vermelha).

Na Figura 4.16 b), observa-se uma diferença significativa entre os gráficos, em que a amostra com 0,5% de grafeno apresenta o melhor desempenho no ensaio de tração quando comparada ao alumínio puro. Por outro lado, as amostras com 1,0% de grafeno demonstraram o pior desempenho. Isso indica que, para porcentagens superiores a 0,5% de grafeno, há uma tendência de redução na resistência à tração e no alongamento quando utilizado o método de mistura manual com pilão.

Figura 4.16 – a) Gráfico tensão versus deformação do Al e dos compósitos Al-Graf, e b) Comparação entre os gráficos do Al puro, com 0,5% de Graf e com 1,0% de Graf.



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.15 é mostrado os valores que foram obtidos usando o gráfico tensão x deformação extraído do ensaio de tração. Para achar os valores da Tabela 4.15 foi usado o programa OriginPro.

Tabela 4.15 – Algumas propriedades extraídas do gráfico tensão versus deformação.

Amostra	Resistência à tração (Mpa)	Alongamento específico (%)	Limite de escoamento (Mpa)
Al	152,4	24	118,7
Al_Graf-0,1%	141,8	23	98,8
Al_Graf-0,2%	157,8	30	103,6
Al_Graf-0,5%	167,7	35	127,9
Al_Graf-0,7%	135,8	28	93,2
Al_Graf-1%	139,1	21	88,6

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos valores obtidos da curva tensão versus deformação, analisados por meio do software OriginPro, torna-se mais evidente que as amostras com 0,2% e 0,5% de grafeno apresentaram um desempenho superior quando submetidas ao ensaio de tração uniaxial. Especificamente, as amostras com 0,2% de grafeno exibiram um aumento de 4% na resistência à tração e de 25% no alongamento, enquanto as com 0,5% de grafeno mostraram incrementos de 10% na resistência à tração e 45% no alongamento.

A Tabela 4.16 apresenta os resultados de quatro observações realizadas para cada amostra no ensaio de tração uniaxial. Na tabela está organizado os dados e suas respectivas médias, que foram utilizadas para realizar uma análise de ANOVA com um fator. Com base nessa análise, obtiveram-se os valores de F calculado e F crítico (tabelado), a fim de determinar se as diferentes porcentagens de grafeno exercem influência significativa na resistência à tração pelas amostras, quando comparadas ao alumínio sem grafeno.

Tabela 4.16 – Medidas da resistência à tração obtidas com ensaio de tração uniaxial, suas somas totais e médias.

Concentração de grafeno (%)	Observações resistência à tração					
	1	2	3	4	Totais	Média
Al	160,1	156,4	145,0	148,3	609,3	152,4
Al_Graf-0,1%	142,5	130,6	153,2	140,9	567,2	141,8
Al_Graf-0,2%	167,9	150,1	149,3	163,2	630,5	157,6
Al_Graf-0,5%	169,3	166,5	171,8	163,2	670,8	167,7
Al_Graf-0,7%	137,6	129,1	136,2	140,3	543,2	135,8
Al_Graf-1,0%	143,3	136,9	138,4	137,8	556,4	139,1
					3577,4	894,4

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 4.17 apresenta os resultados da soma quadrática dos tratamentos, total e do erro, além dos graus de liberdade e das média quadrática dos tratamentos e dos erros.

Tabela 4.17 – Análise de Variância em termos de resistência à tração.

Fonte de variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática
Tratamentos	3036,82	5	607,36
Erro	952,8	18	52,93
Total	3989,62	19	

Fonte: Elaboração própria.

Utilizando a tabela do teste F para um nível de significância de 5% foi achado o valor de:

$$f_{0,05;5;18} = 2,77$$

Já o valor de F calculado é:

$$F_0 = 11,47$$

Considerando as hipóteses: Hipótese nula (H_0) – A porcentagem de grafeno não afeta a resistência à tração dos compósitos de Al-Graf. Dito de outra forma não há diferença significativa entre as médias dos grupos (tratamentos). Hipótese alternativa (H_1) – A porcentagem de grafeno sim afeta a resistência à tração dos compósitos de Al-Graf. Dito de outra forma, pelo menos uma média é diferente das demais. Logo que F calculado é maior que o F tabelado logo temos uma forte evidência de que H_0 é rejeitado.

Com a rejeição do H_0 , aceitasse H_1 , isso implica que pelo menos uma das médias é diferente das demais, comprovando que o grafeno influencia diretamente na resistência à tração das amostras com diferentes porcentagens do material 2D.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste tópico são apresentados as conclusões, objetivos específicos e gerais que foram alcançados durante o estudo. Além disso, é feita algumas sugestões para trabalhos futuros, baseados nos resultados e método usado para fabricação dos compósitos.

5.1 Conclusões

- Usando o método de mistura abordado neste trabalho, a chance de ocorrer aglomerações é maior, já que é um processo manual.
- O método utilizando pastilhas de cavaco+grafeno prensado mostrou-se o melhor para obter uma boa fundição. Pois o método usando cavaco+grafeno sem prensagem, faz com que o cavaco e grafeno fiquem mais concentrado nas bordas do compósito fundido.
- As amostras com porcentagens 0,7% e 1,0% apresentaram melhores resultados para microdureza e energia absorvida. Mas isso muda no ensaio de tração, onde a resistência à tração diminui.
- Os resultados mostram que a resistência à tração primeiro aumenta e depois diminui com o aumento do teor de grafeno. Quando o teor de grafeno atinge 0,5% em peso, atinge o valor máximo da tensão.
- A concentração de 0,1% mostrou-se insuficiente para promover melhorias significativas, uma vez que seus resultados permaneceram muito próximos aos do alumínio puro, não apresentando ganhos satisfatórios.
- Em forma geral, o objetivo geral da pesquisa relacionado com a obtenção de um compósito utilizando cavaco e grafeno industrial foi cumprido satisfatoriamente. Muitas vezes resíduos de processos industriais são descartados, por este motivo o trabalho apresenta um princípio de ideia para reutilização de cavaco não apenas de alumínio, mas de outros resíduos metálicos oriundo de processos industriais. Desta forma buscou-se um método mais barato e viável de mistura e utilização do cavaco.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Com base nos resultados apresentados, infere-se que o método de mistura resulta ser promissor para a fabricação de ligas metálicas misturadas com grafeno, elencando-se algumas sugestões para pesquisas posteriores.

- Utilizar cavaco de outros metais para misturar com o grafeno e outros materiais 2D (nitreto de boro, dissulfeto de molibdênio etc.);
- Utilizar grafeno obtidos de fontes de carbono para misturar com cavaco de Al;
- Utilizar pó de alumínio para misturar de forma manual com o grafeno;
- Comparar os resultados de compósitos com grafeno industrial e compósitos com grafeno de fontes de carbono que utilizem o método de mistura com um pilão;
- Fazer um estudo variando as porcentagens de cavaco, juntamente com a variação da porcentagem de grafeno.

REFERÊNCIAS

HECKLEY, E. M., TOTO, J. J., & VENEGAS, J. M. (2014). **Structural Changes of Hydrothermally Treated Biochar with Ball-Milling**. Retrieved from <https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/826>

LUO, R.; POPP, J.; BOCKLITZ, T. **Deep Learning for Raman Spectroscopy: A Review**. *Analytica* **2022**, 3, 287-301. <https://doi.org/10.3390/analytica3030020>

SHEARER, C. J., SLATTERY, A D., STAPLETON, A. J., SHAPTER, J. G., E GIBSON, C. T. **Accurate thickness measurement of graphene**. *Nanotechnology*, 27(12), 125704. 2016.

WALSH, B. **Alumínio na Construção Civil: Aplicações e Inovações**. *Construction and Building Materials*, v. 32, p. 40-45, 2017.

SOUZA, M. F. et al. **Reciclagem de alumínio no Brasil: aspectos econômicos e ambientais**. *Revista de Gestão Ambiental*, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 45-60, 2020.

WANG, X.; ZHU, Y.; LI, X.; et al. **Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications**. *Nano Research*, v. 3, n. 1, p. 1-32, 2010.

MAK, Kin Fai; LEE, Changgu; HONE, James; SHAN, Jie; HEINZ, Tony F. **The valley Hall effect in MoS₂ transistors**. *Science*, Washington, DC, v. 344, n. 6191, p. 1489-1492, 27 jun. 2014. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1250140>. Acesso em: 7 fev. 2025.

WANG, L.; WANG, YONGXIN.; WANG, YUNFENG.; XUE, QUNJI. **Tribological performances of non-hydrogenated amorphous carbon coupling with different coating counterparts in ambient air and water**, *Wear*, v. 300, p. 20-28, 15 mar. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164813001154>. Acesso em 14 dez. 2025.

WANG, Qing Hua et al. **Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides**. *Nature Nanotechnology*, London, v. 7, n. 11, p. 699-712, Nov. 2012. DOI: [10.1038/nnano.2012.193](https://doi.org/10.1038/nnano.2012.193). Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nnano.2012.193>. Acesso em: 15 jan. 2025.

XU, C., XU, B., GU, Y., XIONG, Z., SUN, J., ZHAO, X. S. **Graphene-based electrodes for electrochemical energy storage**. *Energy & Environmental Science*, 6, 1388-1414, 2013.

GIUSCA, C. E. et al. **Electrostatic transparency of graphene oxide sheets**. *Carbon*, [S. l.], v. 86, p. 188-196, abr. 2015. DOI: [10.1016/j.carbon.2015.01.033](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.01.033). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622315000589>. Acesso em: 10 jan. 2025.

NOVOSELOV, K. S. **Nobel Lecture: Graphene: Materials in the Flatland**. *Reviews of Modern Physics*, [S. l.], v. 83, n. 3, p. 837-849, jul. 2011. DOI: [10.1103/RevModPhys.83.837](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.837). Disponível em: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.83.837>. Acesso em: 2

dez. 2024.

LIU, H.; XU, Z. **Recent advances in MoS₂-based materials for electrocatalysis**. Journal of Materials Chemistry A, [S. l.], v. 7, n. 20, p. 12538-12555, 2019. DOI: [10.1039/C9TA02594A](https://doi.org/10.1039/C9TA02594A). Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ta/c9ta02594a>. Acesso em: 17 abr. 2025.

ABAL (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. “Aplicações do Alumínio”. São Paulo: ABAL, 2023. Disponível: <https://abal.org.br/?s=aplica%C3%A7%C3%B5es+do+alum%C3%ADnio>. Acesso em: 20 mar. 2025

GENG, L.; WU, K. **Metal matrix composites**. In: ASM Handbook, Volume 21: Composites. 2. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2017. p. 305-487. DOI: [10.31399/asm.hb.v21](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v21).

FARIA, R. T., & MOURA, R. D. (2016). **Processos de usinagem e reciclagem de metais**. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, 32(4), 550-565.

HAGHSHENAS, M. (2012). **Metal-Matrix Composites**. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.

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

PRAMANIK, S., CHERUSSERI, J., BABAN, N. S., SOWNTHARYA, L., E KAR, K. K (2016). **Metal Matrix Composites: Theory, Techniques, and Applications**. Composite Materials, 369-411.

KUMAR, H. G. P., & XAVIOR, M. A. (2014). **Graphene Reinforced Metal Matrix Composite (GRMMC): A Review**. Procedia Engineering, 97, 1033-1040.

S.E. SHIN, H.J. CHOI, J.H. SHIN, D.H. BAE, **Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites**, Carbon 82 (2015) 143–151.

S.F. BARTOLUCCI, J. PARAS, M.A. RAFIEE, J. RAFIEE, S. LEE, D. KAPOOR, N. KORATKAR, **Graphene–aluminum nanocomposites**, Mater. Sci. Eng. A. 528 (2011) 7933– 7937

J. WANG, Z. LI, G. FAN, H. PAN, Z. CHEN, D. ZHANG, **Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites**, Scripta. Mater. 66 (2012) 594-597.

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.

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 (2016) 54–60.

H. KWON, J. MONDAL, K.A. ALOGAB, V. SAMMELSELG, M. TAKAMICHI, A. KAWASAKI, M. LEPAROUX, **Graphene oxide-reinforced aluminum alloy matrix composite materials fabricated by powder metallurgy**, J. Alloy. Compd. 698 (2017) 897-813)

L.A. YOLSHINA, R.V. MURADYMOV, I.V. KORSUN, G.A. YAKOVLEV, S.V. SMIRNOV, **NOVEL aluminum-graphene and aluminum-graphite metallic composite materials: Synthesis and properties**, J. Alloy. Compd. 663 (2016) 449–459.

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.

YANG, W., ZHAO, Q., XIN, L., QIAO, J., ZOU, J., SHAO, P., WU, G. (2018). **Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure Al matrix composites prepared by pressure infiltration method**. Journal of Alloys and Compounds, 832, 748-758.

KUMAR, R., et al. (2017). **"Mechanical and tribological behavior of Al-MoS₂ composites fabricated by powder metallurgy."** *Materials & Design*, 120, 144-153.

SINGH, S., et al. (2018). **"Enhancement of mechanical properties in Al-MoS₂ nanocomposites."** *Composites Part B: Engineering*, 142, 1-10.

LI, H., et al. (2019). **"Thermal stability and wear resistance of Al-MoS₂ composites for high-temperature applications."** *Wear*, 426-427, 443-451.

HIRSCH, J. (2014). **"Recent Development in Aluminum for Automotive Applications."** *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(7), 1995-2002.

ABNT NBR ISO 6892-1: **Materiais metálicos — Ensaio de tração — Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Catálogo de Normas Técnicas**. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>.

BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. **On the experimental attainment of optimum conditions**. Journal of the Royal Statistical Society. Série B, v.13, 1951. p. 1-45.

DHARMALINGAM, S., SUBRAMANIAN, R., & KÖK, M. (2013). **Optimization of abrasive wear performance in aluminium hybrid metal matrix composites using Taguchi–grey relational analysis**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 227(7), 749-760
Ghosh, A., Su

CHEN, B., BI, Q., YANG, J., XIA, Y., & HAO, J. (2015). **"Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN, MoS₂) for automotive applications."** *Wear*, 306(1-2), 277-281.

NOVOSELOV, K. S., ET AL. (2004). **"Electric field effect in atomically thin carbon films."** *Science*, 306(5696), 666-669.

BALANDIN, A. A., et al. (2008). **"Superior thermal conductivity of single-layer graphene."** *Nano Letters*, 8(3), 902-907.

Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). "The rise of graphene." *Nature Materials*, 6(3), 183-191.

LEE, C., et al. (2008). **"Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene."** *Science*, 321(5887), 385-388.

Novoselov, K. S., et al. (2004). "Electric field effect in atomically thin carbon films." *Science*, 306(5696), 666-669.

CHEN, B., BI, Q., YANG, J., XIA, Y., & HAO, J. (2015). **"Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN, MoS₂) for automotive applications."** *Wear*, 306(1-2), 277-281.

FERRETTI, M. (2009). **Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais.** Revista CPC, São Paulo, n. 7, pp. 74-98, nov. 2008/abr. 2009

RODRIGUES A. G., GALZERANI, J.C. **Espectroscopias de infravermelho, Raman e de fotoluminescência: potencialidades e complementaridades.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 4, 4309 (2012)

SANTOS, E.S, GAMA, E.M, FRANÇA, R.S, SOUZA, A.S, MATOS, R.P (2013). **Espectrometria de Fluorescência de Raios-X na determinação de espécies químicas.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p.3413.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenharia.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

SINCLAIR, R.C, SUTER, J.L e COVENEY, P.V (2019). **Micromechanical exfoliation of graphene on the atomistic scale.** Phys.Chem.Chem.Phys. doi: 10.1039 / c8cp07796g.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E9: **Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature.** West Conshohocken, PA: ASTM, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 6892-1: **Materiais metálicos — Ensaio de tração — Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

LEE, C. et al. **Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene.** Science, v. 321, n. 5887, p. 385-388, 2008.

CASTRO NETO, A. H. et al. **The electronic properties of graphene**. Reviews of Modern Physics, v. 81, n. 1, p. 109, 2009.

LIU, C., WANG, XZ., SHEN, C. et al. **A hot-emitter transistor based on stimulated emission of heated carriers**. *Nature* **632**, 782–787 (2024).

CHENG, R., et al. (2022). **"High-frequency graphene electronic devices"**. *Nature Electronics*, 5, 281-290.

CHEN, Y., REN, R., PU, H., CHANG, J., MAO, S., CHEN, J. (2021). **"Field-Effect Transistor Biosensors with Two-Dimensional Materials for Food Safety and Environmental Monitoring"**. *ACS Nano*, 15(8), 12324-12336.

ZUOZHAO ZHAI, LIHUI ZHANG, TIANMIN DU, BIN REN, YUELONG XU, SHASHA WANG, JUNFENG MIAO, ZHENFA LIU (2022). **"A review of carbon materials for supercapacitors"**. *Materials & Design*, v. 221, n. 111017, ISSN 0264 – 1275.

PARK, DW., SCHENDEL, A., MIKAEL, S. ET AL. **Graphene-based carbon-layered electrode array technology for neural imaging and optogenetic applications**. *Nat Commun* **5**, 5258 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms6258>

Mi, B. (2014). **"Graphene oxide membranes for ionic and molecular sieving"**. *Science*, 343(6172), 740-742.

HAACK, M. S., **"Caracterização de grafeno obtido por diferentes métodos utilizando espectroscopia Raman"**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2017.

CAMPANELLI, D. A., **"Efeito da variação da temperatura em multicamadas de grafeno usando espectroscopia Raman"**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Alegrete, 2023.

ASM INTERNATIONAL. **Aluminum and Aluminum Alloys**. Materials Park, OH: ASM International, 2001.

ROBERTSON, J. **Diamond-like amorphous carbon**. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, v. 37, p. 129–281, 2002.

PERUMBILAVIL, S., THANKAMANI, PR., SANKAR, P., PHILIP, R. **White light Z-scan measurements of ultrafast optical nonlinearity in reduced graphene oxide nanosheets in the 400–700 nm region**. *Applied Physics Letters*, 107, 051104. 2015.

BISHT, ANKITA; SRIVASTAVA, MUKUL; KUMAR, R. MANOJ; LAHIRI, INDRANIL; LAHIRI, DEBRUPA. **Strengthening mechanism in graphene nanoplatelets reinforced aluminum composite fabricated through spark plasma sintering**. *Materials Science and Engineering: A*, v. 695, p. 20-28, 2017. ISSN 0921-5093. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.009>.

M. BASTWROS, G.Y. KIM, C. ZHU, K. ZHANG, S. WANG, X. TANG, X.

WANG, **Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sintering**, Compos. Part. B-Eng. 60 (2014) 111–118.

AWOTUNDE, M. A., ADEGBENJO, A. O., OBADELE, B. A., OKORO, M., SHONGWE, B. M., & OLUBAMBI, P.A. (2019). **Influence of sintering methods on the mechanical properties of aluminium nanocomposites reinforced with carbonaceous compounds: A review**. Journal of Materials Research and Technology.

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**, Materials & Design, v.94, p.54-60, 2016. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.034>. Acesso em: 25/06/2024

H. Zhang, C. Xu, W. Xiao, K. Ameyama, C. Ma, **Enhanced mechanical properties of Al5083 alloy with graphene nanoplates prepared by ball milling and hot extrusion**. Materials Science and Engineering: A, v. 658, p. 8-15, 2016. ISSN 0921-5093. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.076>. Acesso em: 04/08/2024.

Li, J. L., Xiong, Y. C., Wang, X. D., Yan, S. J., Yang, C., He, W. W., Dai, S. L. **Microstructure and tensile properties of bulk nanostructured aluminum/graphene composites prepared via cryomilling**. Materials Science and Engineering: A, v. 626, p. 400-405, 2015. ISSN 0921-5093. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.102>. Acesso em: 13/08/2024.

SHIN, S. E.; BAE, D. H. Deformation behavior of aluminum alloy matrix composites reinforced with few-layer graphene. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S. l.], v. 78, p. 42-47, 2015. ISSN 1359-835X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.001>. Acesso em: 21/01/2024.

KHANNA, Virat et al. Fabrication of efficient aluminium/graphene nanosheets (Al-GNP) composite by powder metallurgy for strength applications. **Journal of Materials Research and Technology**, [S. l.], v. 22, p. 3402-3412, 2023. ISSN 2238-7854. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.161>. Acesso em: 03/06/2024.

GONÇALVES, Rodolfo Luiz Prazeres. **Avaliação de métodos de mistura na obtenção de compósitos à base alumínio reforçados com grafeno e óxido de grafeno**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) — Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2023.

LUO, Youming; HUANG, Yaling; LIU, Jie; CHEN, Quanfang. Copper coated graphene reinforced aluminum composites with enhanced mechanical strength and conductivity. **Vacuum**, [S. l.], v. 218, p. 112610, nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112610>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X23008072>. Acesso em: 21 Nov. 2025.

KHOSHGHADAM-PIREYUOUSEFAN, mohammand; RAHMANIFARD, Roohollah;

OROVCIK, Lubomir; SVEC, Peter; KLEMM, Volker. **Application of a novel method for fabrication of graphene reinforced aluminum matrix nanocomposites: Synthesis, microstructure, and mechanical properties**. Materials Science and Engineering: A, [S. l.], v. 772, p. 138820, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138820>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509319316053>. Acesso em: 20 jan. 2026.