

Avaliação estrutural, morfológica e química de grafeno comercial por diferentes técnicas analíticas

Structural, morphological, and chemical evaluation of commercial graphene using different analytical techniques

Evaluación estructural, morfológica y química de grafeno comercial mediante diferentes técnicas analíticas

Recebido: 19/12/2025 | Revisado: 09/01/2026 | Aceitado: 10/01/2026 | Publicado: 11/01/2026

Ramon Mendonça Teles

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8099-3493>
Universidade Feevale, Brasil
E-mail: 0151420@feevale.br

Daiana Cristina Metz Arnold

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0048-3028>
Universidade Feevale, Brasil
E-mail: daim@feevale.br

Carlos Leonardo Pandolfo Carone

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4084-4502>
Universidade Feevale, Brasil
E-mail: carloscarone@feevale.br

Resumo

O grafeno é um nanomaterial bidimensional constituído por uma única camada de átomos de carbono organizados em rede hexagonal, cujas propriedades foram descritas teoricamente por Wallace em 1946. Atualmente, destaca-se por sua elevada resistência mecânica, alta condutividade elétrica e térmica e grande área superficial específica, características que o tornam promissor para diversas aplicações tecnológicas. Entretanto, a obtenção e caracterização do grafeno ainda representam desafios, uma vez que defeitos estruturais, impurezas e variações no método de síntese podem comprometer suas propriedades. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar um grafeno comercial por meio de técnicas estruturais, morfológicas e químicas. Foram empregadas espectroscopia no infravermelho (FT-IR), difração de raios X (DRX), espectroscopia Raman, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de transmissão (MET). Os resultados indicaram a predominância de uma estrutura bem organizada, com presença residual de grupos oxigenados, empilhamento parcial das folhas e número de camadas moderado. A análise Raman evidenciou baixa densidade de defeitos e boa organização da rede de carbono, enquanto as micrografias revelaram folhas finas, lamelares e parcialmente sobrepostas. Dessa forma, a caracterização adequada do grafeno é conveniente e necessária para entendimento de suas propriedades e, assim, direcionar de forma eficiente sua aplicação em diferentes sistemas e tecnologias.

Palavras-chave: Nanomaterial; Grafeno; Caracterização; Estrutura.

Abstract

Graphene is a two-dimensional nanomaterial consisting of a single layer of carbon atoms arranged in a hexagonal lattice, whose properties were theoretically described by Wallace in 1946. Currently, it stands out for its high mechanical strength, high electrical and thermal conductivity, and large specific surface area, characteristics that make it promising for various technological applications. However, the production and characterization of graphene still represent challenges, since structural defects, impurities, and variations in the synthesis method may compromise its properties. In this context, this study aimed to characterize a commercial graphene using structural, morphological, and chemical techniques. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), and transmission electron microscopy (TEM) were employed. The results indicated the predominance of a well-organized structure, with residual presence of oxygen-containing groups, partial stacking of the sheets, and a moderate number of layers. Raman analysis evidenced a low density of defects and good organization of the carbon network, while the micrographs revealed thin, lamellar, and partially overlapped sheets. Thus, proper characterization of graphene is convenient and necessary to understand its properties and, consequently, to efficiently direct its application in different systems and technologies.

Keywords: Nanomaterial; Graphene; Characterization; Structure.

Resumen

El grafeno es un nanomaterial bidimensional constituido por una sola capa de átomos de carbono organizados en una red hexagonal, cuyas propiedades fueron descritas teóricamente por Wallace en 1946. Actualmente, se destaca por su elevada resistencia mecánica, alta conductividad eléctrica y térmica y gran área superficial específica, características que lo convierten en prometedor para diversas aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, la obtención y caracterización del grafeno aún representan desafíos, ya que los defectos estructurales, las impurezas y las variaciones en el método de síntesis pueden comprometer sus propiedades. En este contexto, este estudio tuvo como objetivo caracterizar un grafeno comercial mediante técnicas estructurales, morfológicas y químicas. Se emplearon espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), difracción de rayos X (DRX), espectroscopía Raman, microscopía electrónica de barrido (MEB) y de transmisión (MET). Los resultados indicaron la predominancia de una estructura bien organizada, con presencia residual de grupos oxigenados, apilamiento parcial de las láminas y un número moderado de capas. El análisis Raman evidenció una baja densidad de defectos y una buena organización de la red de carbono, mientras que las micrografías revelaron láminas finas, lamelares y parcialmente superpuestas. De este modo, la adecuada caracterización del grafeno resulta conveniente y necesaria para la comprensión de sus propiedades y, en consecuencia, para orientar de manera eficiente su aplicación en diferentes sistemas y tecnologías.

Palabras clave: Nanomaterial; Grafeno; Caracterización; Estructura.

1. Introdução

Em 1946, Philip Russel Wallace foi o primeiro a realizar uma descrição teórica do que atualmente é conhecido como grafeno. Por meio da aplicação da teoria das bandas ao estudo da grafite, Wallace analisou o comportamento eletrônico de uma única camada de átomos de carbono dispostos em uma rede bidimensional hexagonal, semelhante a um favo de mel. Esses átomos apresentam hibridização sp^2 , o que confere à estrutura elevada estabilidade e propriedades eletrônicas específicas (Urade et al., 2023).

Embora o grafeno só tenha sido isolado experimentalmente em 2004, as contribuições teóricas de Wallace anteciparam características fundamentais desse material, como alta mobilidade eletrônica, resistência mecânica e condutividade térmica. Seu trabalho constitui um marco na física do estado sólido, servindo de base para a compreensão do comportamento quântico dos elétrons no grafeno e para o desenvolvimento de diversas aplicações tecnológicas nas últimas décadas (Yu et al., 2020; May et al., 2021; Zhou et al., 2022; Figueiredo et al., 2022; Zancanaro & Poletto, 2022; Pereira et al., 2023).

O grafeno serve como bloco de construção para outros alótropos de carbono, os quais são formados por empilhamento e enrolamento através de forças de interações fracas. A capacidade única do carbono de formar múltiplas ligações covalentes consigo mesmo e outros elementos da tabela periódica resulta em uma vasta variedade de compostos (Chen, 2020; Yildiz et al., 2019).

Atualmente considerado como o material mais fino do mundo, apresenta uma estrutura planar com a espessura de apenas um átomo de carbono. Essencialmente, pode ser visualizado como uma única camada de grafite. Sua composição é caracterizada por ligações covalentes do tipo sp^2 - sp^2 , conferindo-lhe excelente condutividade elétrica e notável resistência mecânica (Yu et al., 2020).

Apresenta resistência mecânica superior à do aço, com um módulo de Young aproximado de 1 TPa e boa flexibilidade. Com uma área superficial elevada, com valores de 2600 m^2/g , sua condutividade elétrica equivale à do cobre, atingindo até 6000 S/cm, estes dados considerando o grafeno perfeito, sem defeitos estruturais a monocamada. Além disso, possui condutividade térmica superior à de todos os outros materiais conhecidos, alcançando 5000 W/m.K. Com base em suas propriedades, o grafeno é considerado material revolucionário e promissor (Vieira, 2016; Zhou et al., 2022).

O grande desafio atual é a obtenção do grafeno em sua forma mais pura, que garante suas propriedades notáveis, no entanto, os métodos de síntese ainda estão sendo estudados, pois métodos que não são eficientes acabam extraindo óxido de grafeno ou moléculas similares, muitas vezes com a presença de outros elementos em sua composição. Um dos métodos mais

utilizados para obtenção de Grafeno e que melhor relaciona produção e qualidade é a Deposição Química à Vapor (CVD), que deposita as partículas de carbono em um substrato metálico através da decomposição de gases em alta temperatura (Mbayachi et al., 2021).

Outro aspecto importante é que a caracterização do grafeno, que ainda enfrenta desafios devido à sua estrutura complexa e às propriedades variáveis que podem surgir durante a síntese. A sensibilidade a defeitos e impurezas torna difícil realizar uma análise precisa de suas características, e a interpretação dos resultados exige um entendimento aprofundado das interações atômicas. Esses fatores complicam a análise e caracterização do material, tornando necessário o uso de técnicas complexas e avançadas (Olabi, 2021).

O grafeno pode ser caracterizado por diversas técnicas que revelam suas propriedades estruturais, morfológicas e químicas. A análise de FT-IR (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier) analisa quais grupos estão presentes na estrutura do material que está em sendo analisado. A espectroscopia Raman identifica o número de camadas e defeitos na estrutura. A difração de raios X (DRX) avalia a cristalinidade e o grau de ordenação, enquanto a microscopia eletrônica de transmissão (MET) permite visualizar diretamente a estrutura atômica. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) analisa a morfologia superficial (Mbayachi et al., 2021).

A combinação de diferentes técnicas de caracterização permite uma análise mais abrangente das propriedades do grafeno, proporcionando dados complementares sobre sua estrutura que podem fortalecer a discussão acerca dos impactos e potenciais de sua aplicação. Este estudo teve como objetivo caracterizar um grafeno comercial por meio de técnicas estruturais, morfológicas e químicas.

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa experimental, laboratorial de natureza quali-quantitativa (Pereira et al., 2018).

O grafeno empregado na pesquisa é um pó de grafeno obtido através do método de esfoliação top-down. Este grafeno de uso geral é amplamente aplicado em compósitos, tintas, baterias, revestimentos e tintas condutivas buscando-se melhoria de desempenho quanto a propriedades mecânicas, térmicas e elétricas.

Foram realizadas análises para avaliar o grau de defeitos, a qualidade das camadas do grafeno, a morfologia e a estrutura do grafeno comercial. Esses parâmetros são fundamentais para assegurar a integridade do material e sua adequada aplicação, influenciando diretamente no desempenho de materiais empregados.

A análise de infravermelho foi realizada utilizando-se espectrofotômetro de infravermelho Spectrum Two, marca Perkin Elmer, com acessório de reflectância universal atenuada – UATR – e Software de controle e análise de dados Spectrum IR Versão 10.7.2.1630 Copyright 2020 Perkin Elmer Inc.

A Difração de Raios X (DRX), foi realizada em um difratômetro de raios X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 30 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. A amostra em pó foi analisada no intervalo angular de 5 a 80° 2 θ em passo de 0.02°/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e 0.1 mm no detector.

O ensaio de espectroscopia Raman foi realizado utilizando-se espectrômetro da marca HORIBA, modelo LabRAM HR300. As análises foram realizadas com um comprimento de onda de excitação de 633 nm e potência do laser de 17 mW, proveniente de um laser HeNe.

As análises de MET foram realizadas por um microscópio TECNAI G2 T20 FEI operando a 200 kV. As imagens foram obtidas no modo de alta resolução (HRTEM), e a difração de elétrons em área selecionada (SAED) foi registrada no mesmo modo. Para a preparação das amostras, foram inicialmente dispersas em álcool e submetidas a um banho de ultrassom

por 30 minutos. Em seguida, uma gota da suspensão foi depositada sobre uma grade de cobre de 300 mesh recoberta com um filme de carbono amorfo. Este procedimento é adaptado em concordância com requisitos da norma ISO 29301:2017.

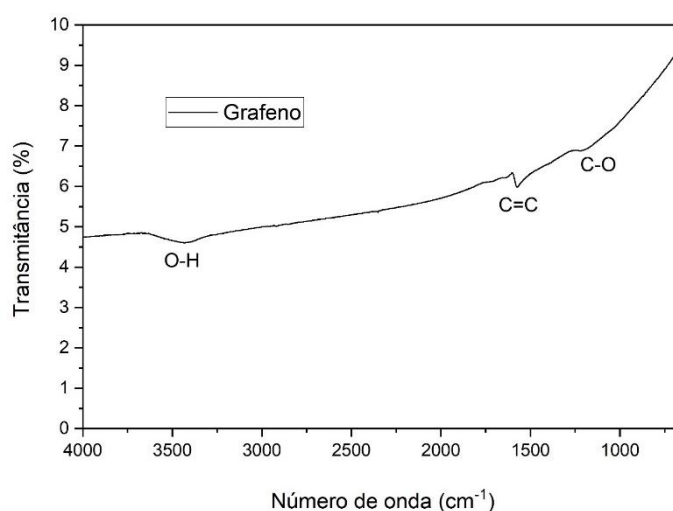
A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura do grafeno foi conduzida em Microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo JSM6510LV, com modos de detecção por elétrons secundários (SEI), com software de controle e análise de resultados SEM Control User Interface Ver 3.01, que permite a análise da microestrutura das amostras em diferentes ampliações. As micrografias foram coletadas com ampliações de 1.000 e 10.000 vezes, com tensão de aceleração de 10kV. O ensaio MEV segue as recomendações da norma ASTM E1508 (ASTM, 2015).

3. Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os resultados das caracterizações realizadas para o grafeno comercial, obtidos por diferentes técnicas analíticas. As análises tiveram como objetivo avaliar suas características estruturais, morfológicas e químicas, fornecendo informações fundamentais para a compreensão de seu comportamento e potencial.

A Figura 1 apresenta o espectro de FT-IR da amostra de grafeno, obtido com o objetivo de identificar os principais grupos funcionais presentes em sua superfície. A análise do espectro permite avaliar a composição química do material, bem como a possível presença de grupos oxigenados, frequentemente associados a defeitos estruturais ou processos de oxidação durante a síntese e o manuseio do grafeno.

Figura 1 - Espectro FT-IR da amostra de grafeno.



Fonte: Autores (2025).

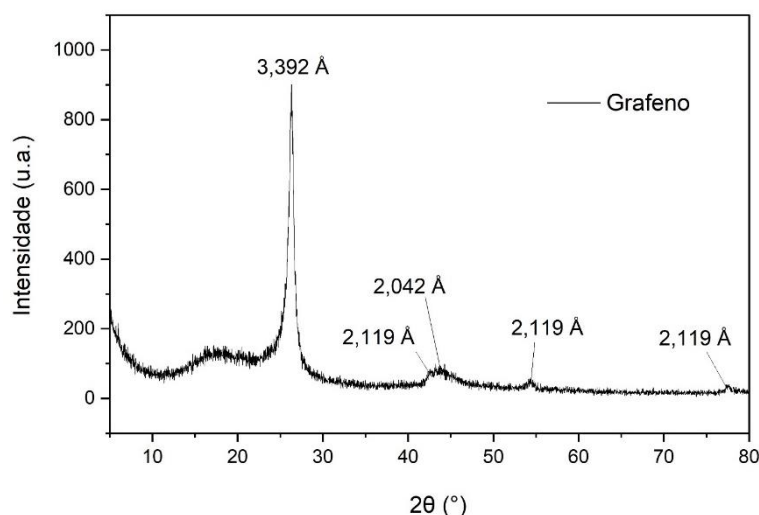
A banda larga em torno de 3400 cm^{-1} é atribuída ao estiramento O-H, relacionado a hidroxilas superficiais ou moléculas de água adsorvidas, enquanto a banda observada na região de 1580–1620 cm^{-1} corresponde às vibrações C=C da rede aromática sp^2 do grafeno. Esse comportamento é típico de grafenos comerciais e grafenos parcialmente oxidados, conforme relatado em estudos recentes de caracterização por FT-IR e Raman (Díez-Pascual, 2022; Kumar et al., 2023).

A presença de bandas na faixa de 1050–1150 cm^{-1} , atribuídas às vibrações C-O, indica a existência de grupos epóxi, alcoxi ou fenólicos na superfície do grafeno. Esses grupos são geralmente associados a defeitos estruturais ou à oxidação superficial decorrente dos métodos de síntese e processamento. Trabalhos atuais destacam que mesmo grafenos comerciais de alta pureza apresentam funcionalidades residuais detectáveis por FT-IR, o que reforça a importância dessa técnica na avaliação química do material (Zhang et al., 2024; Liu et al., 2023).

Revisões recentes sobre nanocompósitos poliméricos reforçam que grafenos com certo grau de funcionalização superficial apresentam desempenho superior em propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, especialmente em elastômeros e polímeros de engenharia (Díez-Pascual, 2022; Kumar et al., 2023; Zhang et al., 2024).

A Figura 2 apresenta o DRX da amostra de grafeno, realizada com o objetivo de investigar sua estrutura cristalina e o grau de ordenamento das camadas.

Figura 2 – Análise DRX da amostra de grafeno.



Fonte: Autores (2025).

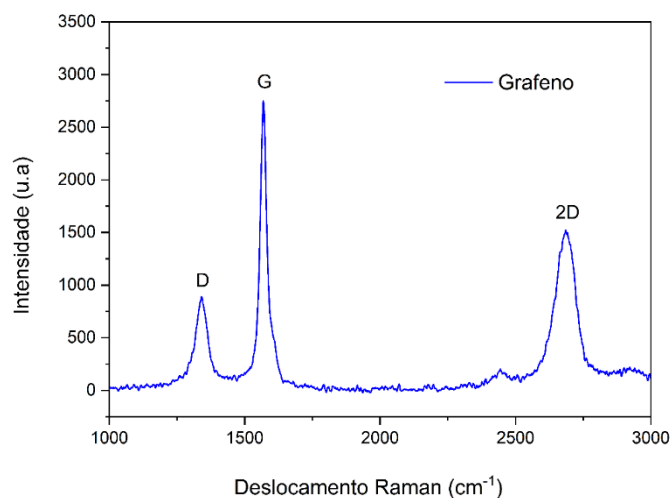
O difratograma de raios X da amostra de grafeno apresenta um pico intenso em torno de $2\theta = 26^\circ$, atribuído ao plano (002), com espaçamento interplanar próximo de 3,4 Å, valor típico de grafeno multicamadas e grafenos comerciais. Esse pico indica a presença de empilhamento parcial das folhas, característica amplamente reportada em estudos estruturais de grafeno obtido por diferentes rotas de síntese (Husain et al., 2025; Hutapea et al., 2025).

Picos de menor intensidade em ângulos mais elevados estão associados a planos secundários da estrutura hexagonal do carbono sp^2 , confirmando a cristalinidade do material. O alargamento do pico (002) e a baixa intensidade dos demais refletem desordem estrutural e tamanho reduzido de cristalito ao longo do eixo c, comportamento típico de grafeno e grafeno reduzido analisados por DRX (Skakunova et al., 2023; Husain et al., 2025).

Esses resultados estão em concordância com a literatura recente, que destaca o DRX como uma técnica essencial para avaliar o grau de empilhamento, a organização estrutural e as diferenças entre grafite, grafeno e seus derivados. Assim, o perfil de DRX obtido confirma a natureza grafênica da amostra analisada (Hutapea et al., 2025).

A Figura 3 apresenta o resultado da análise de Espectroscopia Raman, evidenciando os principais picos característicos e as informações estruturais do material, como defeitos, empilhamento e número de camadas.

Figura 3 - Espectro Raman da amostra de grafeno.



Fonte: Autores (2025).

A técnica é utilizada para avaliar a estrutura, a quantidade de defeitos e o número de camadas do grafeno. No espectro apresentado, observam-se três bandas características: a banda D, em torno de 1350 cm^{-1} com 880 u.a, a banda G, por volta de 1580 cm^{-1} com 2743 u.a, e a banda 2D, em torno de 2680 cm^{-1} com 1518 u.a. A banda G está associada às vibrações de átomos de carbono com hibridização sp^2 , em que o carbono está ligado a três átomos em um plano com ângulos de 120° , enquanto a banda D indica a presença de defeitos ou desordem na estrutura (Olabi, 2021). Já a banda 2D é uma segunda ordem da banda D e fornece informações sobre o número de camadas.

A razão entre as intensidades das bandas D e G (ID/IG) é útil para estimar a densidade de defeitos na estrutura do grafeno. No presente caso, com intensidade D de 880 e G de 2743, tem-se $\text{ID}/\text{IG} = 0,32$, o que indica uma baixa densidade de defeitos e uma boa organização das regiões com hibridização sp^2 , característica de grafeno de boa qualidade (Ferrari; Robertson, 2000).

De forma semelhante, Xiong et al. (2019) incorporaram óxido de grafeno reduzido (rGO) em uma matriz de fluorelastômero e, por meio da espectroscopia Raman, observaram uma razão ID/IG de 0,42, indicando grafeno com poucos defeitos. Nesse contexto, o grafeno utilizado neste estudo apresenta uma razão ID/IG ainda menor, sugerindo que possui uma qualidade superior e menor número de defeitos em comparação ao grafeno analisado pelos pesquisadores.

Já a razão entre as bandas 2D e G ($\text{I}_{2\text{D}}/\text{IG}$), calculada como $1518 / 2743 = 0,55$, sugere que o grafeno analisado apresenta múltiplas camadas, com empilhamento ordenado. Embora não seja um grafeno monofolha, a presença bem definida da banda 2D reforça a natureza gráfitica do material. Essas razões são amplamente descritas na literatura como critérios confiáveis para avaliar a pureza, o grau de oxidação e o número de camadas do grafeno (Ferrari & Robertson, 2000; Cancado et al., 2006; Cancado et al., 2011).

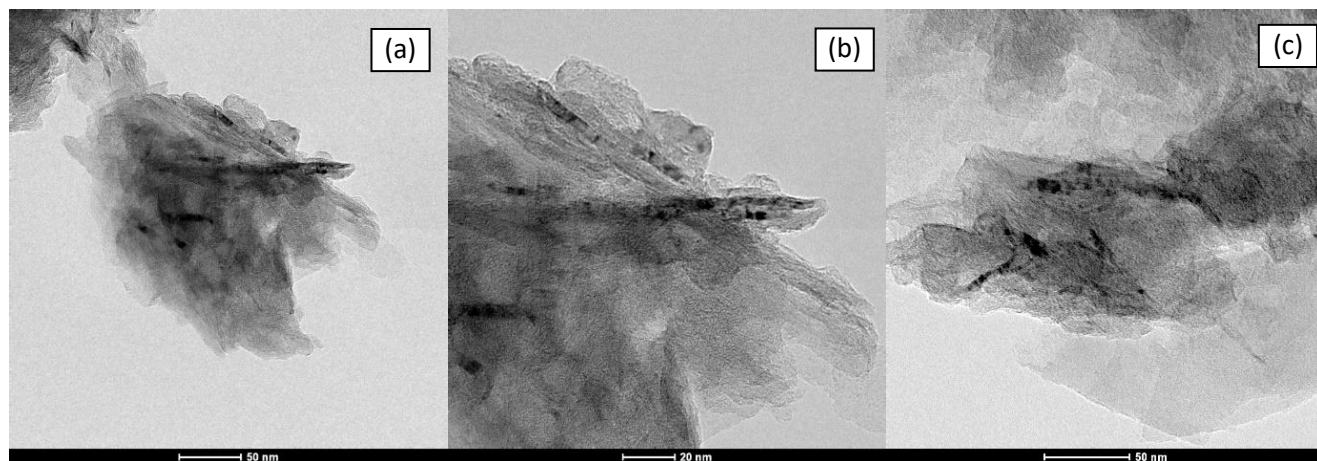
A análise do espectro mostra uma banda G intensa e bem definida, o que confirma a presença de carbono sp^2 estruturado. A presença de uma banda D também perceptível indica que existem alguns defeitos na estrutura. A banda 2D, por sua vez, é intensa e relativamente estreita, sugerindo um material com poucas camadas de grafeno, de duas a cinco, como discutido por Liu et al. (2023). A razão entre as intensidades das bandas D e G é moderada, indicando que o grafeno possui qualidade razoável, embora não completamente livre de defeitos, conforme critérios descritos por Goncharova et al. (2024).

Além disso, o formato e a posição da banda 2D corroboram com as observações de Li et al. (202), que relacionam uma banda 2D simétrica e mais estreita com grafeno de poucas camadas. Com base na análise deste espectro Raman, conclui-

se que o material é composto por grafeno de boa qualidade, com baixo a moderado número de defeitos e provável baixa quantidade de camadas.

A análise de MET foi empregada para caracterizar a amostra de grafeno, fornecendo informações sobre sua estrutura em escala nanométrica. A Figura 4 apresenta as imagens obtidas, nas quais é possível observar as folhas de grafeno com características típicas, como regiões translúcidas e com dobras ou sobreposições, indicativas de sua natureza lamelar e bidimensional.

Figura 4 - Análise por MET do grafeno em escalas de (a) 130.000x, (b) 255.000x e (c) 180.000x.



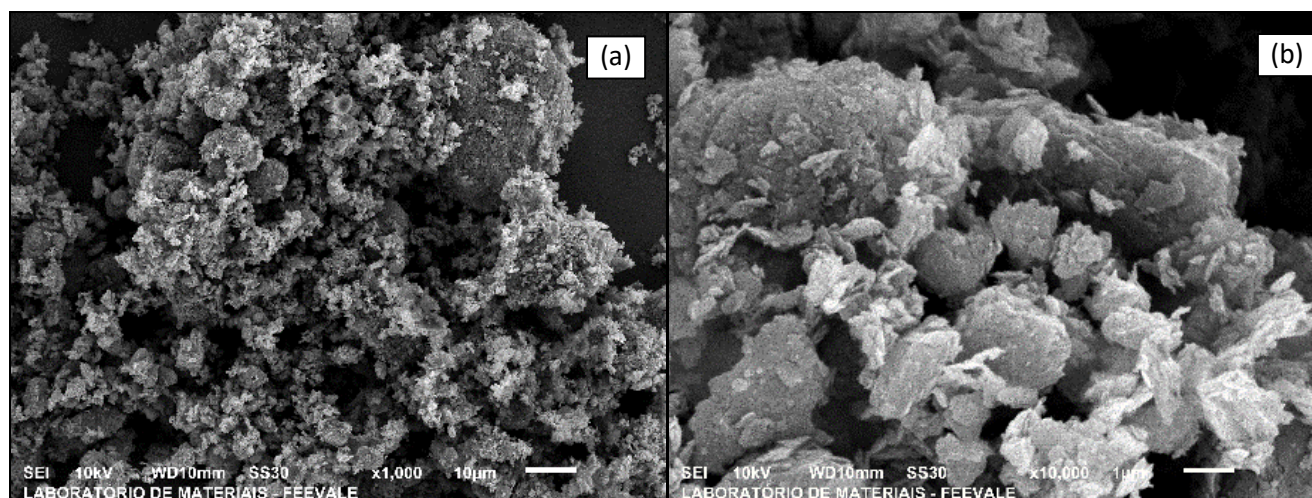
Fonte: Autores (2025).

As micrografias da Figura 4 (a) e (b) exibem folhas finas de grafeno com bom contraste e bordas bem definidas, sugerindo uma estrutura lamelar com poucas camadas ou até monocamadas. Essa morfologia indica boa qualidade e dispersão do material, conforme descrito por Ajala et al. (2022) e Zhou et al. (2021). Na Figura 4 (c) apresenta-se folhas de grafeno parcialmente sobrepostas, com áreas translúcidas indicativas de poucas camadas. A sobreposição sugere empilhamento irregular, comum em grafeno obtido por esfoliação química, como discutido por Dreyer et al. (2010), Li et al. (2008) e Mbayachi et al. (2021).

O grafeno de boa organização estrutural e bem exfoliado é caracterizado por folhas finas, geralmente com poucas camadas, bordas bem definidas e alta transparência nas micrografias eletrônicas, indicando baixa espessura e boa exfoliação. Essas características refletem uma estrutura lamelar organizada, com pouca sobreposição e mínima presença de defeitos, o que favorece propriedades mecânicas, térmicas e elétricas (Ajala et al. 2022).

As imagens de MEV do grafeno caracterizado, apresentadas na Figura 5, demonstram micrografias que possibilitam a análise visual do empilhamento das folhas de grafeno, formato das folhas e a morfologia que os empilhamentos sugerem, demonstrando o comportamento do material.

Figura 5 - Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras de grafeno para as ampliações de: (a) 1000x (b) 10000x.



Fonte: Autores (2025).

As imagens obtidas revelam estruturas características de grafeno com presença de rugosidade superficial, aglomerados e folhas lamelares parcialmente sobrepostas. Observa-se a formação de estruturas irregulares e dobradas, o que é compatível com grafeno de poucas camadas identificadas pela análise Raman, frequentemente sujeito à aglomeração devido à alta área superficial e à tendência de interação π - π entre folhas. Essa morfologia também pode ser consequência de defeitos estruturais, como vacâncias ou grupos oxigenados residuais, que favorecem a formação de bordas reativas e dobras (Liu et al., 2023).

Comparando as imagens, nota-se que a amostra da Figura 5 (a) apresenta aglomerados mais densos e compactos, enquanto na Figura 5 (b) há maior evidência de empilhamento, com folhas parcialmente destacadas, típicas de grafeno com número reduzido de camadas. Essa morfologia é condizente com os resultados de Raman, que apontaram um material com banda 2D moderadamente intensa e relação ID/IG moderadamente baixa, sugerindo grafeno de poucas camadas com presença de defeitos estruturais (Cancado et al., 2006). Os defeitos facilitam o colapso ou a curvatura das folhas, conforme também observado por Shen et al. (2021), ao estudarem grafeno funcionalizado com alto grau de desordem.

As imagens feitas por MEV são reforçadas pelas imagens de MET, que revelam com maior resolução a morfologia das folhas e a organização estrutural em escala nanométrica. O contraste e a transparência parcial das folhas evidenciadas no MET corroboram a presença de regiões com poucas camadas e empilhamento irregular, como já sugerido pelas bordas enrugadas e estruturas lamelares sobrepostas observadas no MEV.

Essa morfologia impacta diretamente as propriedades finais do material, como sua capacidade de dispersão em matrizes poliméricas ou desempenho em aplicações eletroquímicas. Segundo Zhang et al. (2025), a presença de defeitos e a organização em camadas finas favorecem a interação interfacial com outros materiais, embora possam comprometer parcialmente a condutividade elétrica. Dessa forma, as micrografias reforçam a interpretação estrutural sugerida pela espectroscopia Raman e contribuem para o entendimento da estrutura tridimensional do grafeno analisado.

4. Considerações Finais

As análises por espectroscopia no infravermelho e difração de raios X confirmaram que o material apresenta natureza grafênica, com predominância de ligações associadas ao carbono com hibridização do tipo sp^2 e presença residual de grupos oxigenados na superfície. Esses resultados indicam uma leve funcionalização superficial, característica comum de grafenos comerciais. O perfil de difração revelou empilhamento parcial das folhas, evidenciando uma estrutura formada por múltiplas camadas com certo grau de desordem ao longo da direção perpendicular aos planos.

A espectroscopia Raman demonstrou que o grafeno analisado possui boa qualidade estrutural, com baixa concentração de defeitos e organização satisfatória da rede de carbono. A análise das intensidades das bandas características indicou que o material é constituído por algumas camadas, embora não corresponda a uma monocamada isolada. Esse conjunto de características sugere um equilíbrio adequado entre integridade estrutural e presença controlada de defeitos, condição favorável para aplicações que demandam desempenho mecânico, elétrico e boa interação com outras matrizes.

As análises por microscopia eletrônica de transmissão e de varredura corroboraram os resultados estruturais, evidenciando folhas finas, lamelares e parcialmente sobrepostas, com presença de dobras e regiões de empilhamento irregular. Essa morfologia indica boa exfoliação do material, ainda que exista tendência à aglomeração, compatível com a presença de defeitos residuais e alta área superficial. Dessa forma, o presente estudo apresenta a caracterização avançada do grafeno comercial estudado, identificando informações importantes para que o mesmo seja aplicado em diferentes setores, buscando-se a otimização dos resultados.

Agradecimentos

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro que viabilizou a realização deste estudo. À Universidade Feevale pelo suporte institucional, infraestrutura laboratorial e ambiente acadêmico favorável ao desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- ASTM. (2015). ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1508-15. Standard guide for selection and installation of materials for testing of electrical resistivity using the four-point probe method. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Ajala, O. J. et al. (2022). A critical review on graphene oxide nanostructured material: Properties, synthesis, characterization and application in water and wastewater treatment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 18, 100673.
- Cancado, L. G. et al. (2006). General equation for the determination of the crystallite size L_a of nanographite by Raman spectroscopy. *Applied Physics Letters*. 88, 163106.
- Cancado, L. G. et al. (2011). Quantifying defects in graphene via Raman spectroscopy at different excitation energies. *Nano Letters*. 11(8), 3190–6.
- Chen, Q. et al. (2022). Effect of GO agglomeration on the mechanical properties of graphene oxide and nylon 66 composites and micromechanical analysis. *Polymer Composites*. 43(11), 8356–67.
- Díez-Pascual, A. M. (2022). Graphene-based polymer nanocomposites: recent advances. *Polymers*, Basel. 14(10), 2102. Doi: 10.3390/polym14102102.
- Dreyer, D. R. et al. (2000). The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*. 39(1), 228–40.
- Ferrari, A. C. & Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*. 61(20), 14095.
- Figueiredo, B. Q. de et al. (2022). Uso do grafeno e nióbio na prática médica: uma revisão narrativa de literatura. *Research, Society and Development*. 11(1), e255262022. Doi: 10.33448/rsd-v11i1.25526.
- Goncharova, N. N. et al. (2024). Estimation of graphene layers number and defectiveness of few-layered graphene particles by Raman spectroscopy. *Advanced Materials & Technologies*. 9(2), 84–90.
- Husain, H. et al. (2025). Sustainable synthesis and structural characterization of carbon, graphite, graphene oxide, and reduced graphene oxide derived from coconut shells. *Indonesian Journal of Chemistry*. 25(6), 1768–77. Doi: 10.22146/ijc.105467.
- Hutapea, J. A. A. et al. (2025). Comprehensive review of graphene synthesis techniques: advancements, challenges, and future directions. *Micro*. 5(3), 40. Doi: 10.3390/micro5030040.

- ISO. (2017). ISO 29301:2017. Nanotechnologies — Quantification of graphene materials — Volumetric surface area measurement of graphene materials. Geneva: International Organization for Standardization (ISO).
- Kumar, R., Singh, R. & Kumar, S. (2023). Recent progress in graphene-based polymer nanocomposites: processing, characterization and applications. *Materials Today: Proceedings*, Amsterdam. 72, 245–52. Doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.145.
- Liu, Y., Chen, W. D. & Jiang, D. Z. (2023). Effects of graphene and carbon nanotubes on mechanical enhancement and heat generation of rubber composites. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. p. 012038.
- Liu, Y., Wang, Z. & Chen, J. (2023). Surface chemistry and interfacial interactions of graphene in polymer composites. *Polymer*, Amsterdam. 276, 125885. Doi: 10.1016/j.polymer.2023.125885.
- May, A. et al. (2021). Grafeno: uma nova tecnologia para a agricultura. *Research, Society and Development*. 10(2), e128272021. Doi: 10.33448/rsd-v10i2.12827.
- Mbayachi, V. B. et al. (2021). Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. *Results in Chemistry*. 3, 100163.
- Olabi, A. G. et al. (2021). Application of graphene in energy storage device—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 135, 110026.
- Pereira, F. L. A., Brito, T. M. F., Silva, L. L. W. V., Oliveira, M. M. V., Santos, E. M. S. & Silva, R. A. C. (2023). Os benefícios da utilização do grafeno na construção civil. *Research, Society and Development*. 12(4), e407812023. Doi: 10.33448/rsd-v12i4.40781.
- Pereira, A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. (Free ebook). Santa Maria. Editora da UFSM.
- Shen, L. et al. (2021). Highly porous nanofiber-supported monolayer graphene membranes for ultrafast organic solvent nanofiltration. *Science Advances*. 7(37), eabg6263.
- Skakunova, O. S. et al. (2023). X-ray dynamical diffraction by quasi-monolayer graphene. *Scientific Reports*. 13, 19432. Doi: 10.1038/s41598-023-43269-6.
- Urade, A. R., Lahiri, I. & Suresh, K. S. (2023). Graphene properties, synthesis and applications: a review. *JOM*. 75(3), 614–30.
- Vieira, J. E. D. & Villar, E. (2016). Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. 11(2), 54–7.
- Xiong, J. et al. (2019). Improving mechanical and electrical properties of fluoroelastomer nanocomposites by incorporation of low content of reduced graphene oxide via fast evaporation mixing. *Polymer Composites*. 40(S2), E1495–E1503.
- Yildiz, M. G. et al. (2019). CO₂ capture over amine functionalized MCM-41 and SBA-15: exploratory analysis and decision tree classification of past data. *Journal of CO₂ Utilization*. 31, 27–42.
- Yu, W. et al. (2020). Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: A review. *RSC Advances*. 10(26), 15328–45.
- Zancanaro, D. A. & Polentto, M. (2022). Pirólise assistida por micro-ondas de resíduos de poliestireno expandido utilizando carvão ativado e óxido de grafeno. *Research, Society and Development*. 11(16), e379202022. Doi: 10.33448/rsd-v11i16.37920.
- Zhang, H., Li, X. & Zhao, Y. (2024). Structure–property relationships of graphene-based polymer composites: a comprehensive review. *Journal of Materials Science*. 59, 3245–72. Doi: 10.1007/s10853-023-09241-6.
- Zhang, Z. et al. (2025). Surface energy distribution of modified carbon black and interfacial interactions of filled rubber composites. *Langmuir*.
- Zhou, M. et al. (2022). A multi-scale analysis on reinforcement origin of static and dynamic mechanics in graphene-elastomer nanocomposites. *Composites Science and Technology*. 228, 109617.