

**TINTA ADITIVADA COM GRAFENO PARA EVITAR CORROSÃO E DESGASTE
EM AMBIENTES AGRESSIVOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa - Pró-reitoria de Pesquisa e
Pós-Graduação

Danillo Amancio Marques De Souza

Dunieskys Roberto González Larrudé

Escola de Engenharia

10410521@mackenzista.com.br
dunieskys.larrude@mackenzie.br

RESUMO

A degradação de componentes metálicos por corrosão e desgaste é um dos principais fatores de redução da eficiência e aumento dos custos de manutenção em usinas hidrelétricas. A presença de elevada umidade, variações de fluxo, partículas abrasivas e ambientes quimicamente agressivos favorece a deterioração prematura de superfícies metálicas, comprometendo a confiabilidade e a vida útil de equipamentos. Nesse contexto, o desenvolvimento de revestimentos protetores mais resistentes é essencial para minimizar intervenções corretivas e ampliar intervalos de manutenção. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de uma tinta epóxi aditivada com grafeno, buscando aprimorar as propriedades de barreira contra corrosão e abrasão. A metodologia envolve a formulação de amostras com diferentes teores de grafeno, aplicação sobre substratos metálicos e realização de ensaios de exposição acelerada e abrasão controlada, seguidos de análises superficiais. Resultados preliminares indicam tendência de melhoria no desempenho, sugerindo potencial de aplicação industrial. Conclui-se que a proposta apresenta viabilidade e merece aprofundamento em estudos futuros.

Palavras-chave: grafeno; revestimento protetor; corrosão; desgaste; usinas hidrelétricas

ABSTRACT

The degradation of metallic components due to corrosion and wear is one of the main factors contributing to efficiency loss and increased maintenance costs in hydroelectric power plants. The presence of high humidity, flow variations, abrasive particles, and chemically aggressive environments promotes the premature deterioration of metallic surfaces, compromising the reliability and service life of equipment. In this context, the development of more resistant protective coatings is essential to minimize corrective interventions and extend maintenance intervals. This study aims to evaluate the performance of a graphene-enhanced epoxy coating, seeking to improve barrier properties against corrosion and abrasion. The methodology involves the formulation of samples with different graphene contents, application onto metallic substrates, and execution of accelerated exposure and controlled abrasion tests, followed by surface analyses. Preliminary results indicate a trend toward improved performance, suggesting potential for industrial application. It is concluded that the proposal is feasible and deserves further investigation in future studies.

Keywords: graphene; protective coating; corrosion; wear; hydroelectric power plants

1. INTRODUÇÃO

A operação de usinas hidrelétricas depende da integridade de inúmeros componentes metálicos que, quando expostos às condições severas do ambiente, sofrem degradação progressiva. A presença constante de elevada umidade, variações no fluxo da água, partículas abrasivas em suspensão e a ação de agentes químicos agressivos criam um cenário que acelera processos de corrosão e desgaste. Esses fenômenos resultam em custos elevados de manutenção, maior frequência de paradas operacionais e redução da vida útil dos equipamentos. Além do impacto econômico, tais falhas podem comprometer a confiabilidade do sistema e a segurança das operações (Silva et al., 2023; Moraes; Ferreira, 2022).

Entre as soluções tradicionalmente empregadas para minimizar esses danos estão os revestimentos poliméricos, como os de base epóxi e poliuretano. Apesar de oferecerem boa resistência inicial, estudos recentes têm evidenciado que sua durabilidade pode ser comprometida quando submetidos a ambientes hidrelétricos severos, especialmente em situações em que corrosão e abrasão atuam de maneira combinada (Garcia; Santos, 2023).

Nesse contexto, materiais nanoestruturados vêm ganhando destaque como alternativa para o aprimoramento de revestimentos protetores. O grafeno, em especial, tem despertado grande interesse devido às suas propriedades singulares, como alta resistência mecânica, excelente impermeabilidade e elevada estabilidade química. Essas características o tornam um candidato promissor para reforçar matrizes poliméricas e ampliar sua eficiência em ambientes agressivos (Zhang et al., 2021; Alves et al., 2021). Pesquisas recentes demonstram que a incorporação de grafeno e de seus derivados em tintas epóxi pode aumentar a densidade da barreira formada, melhorando a proteção contra a penetração de agentes corrosivos (Machado, 2022; Petrobras, 2022).

Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar uma formulação de tinta epóxi aditivada com grafeno, aplicada sobre substratos metálicos, de forma a verificar seu potencial para ampliar a resistência à corrosão e ao desgaste em condições típicas de operação de usinas hidrelétricas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CORROSÃO

A degradação de metais em ambientes hidrelétricos é consequência da ação simultânea de processos corrosivos e mecânicos. A elevada umidade, aliada à presença de íons agressivos, acelera as reações eletroquímicas que caracterizam a corrosão. Paralelamente, partículas sólidas transportadas pela água e as variações de fluxo intensificam mecanismos de desgaste superficial. Esses fatores, em conjunto, reduzem significativamente a durabilidade dos equipamentos e aumentam os custos com manutenção (Silva et al., 2023; Moraes; Ferreira, 2022).

Embora diversas medidas sejam adotadas para mitigar esses efeitos — como o uso de inibidores químicos ou a seleção de ligas metálicas mais resistentes — os revestimentos protetores continuam sendo a estratégia mais difundida na prática industrial. Os sistemas à base de resinas epóxi e poliuretano são amplamente empregados devido à sua boa aderência ao substrato e resistência química. No entanto, pesquisas apontam que, em ambientes de elevada agressividade, esses revestimentos podem falhar prematuramente em razão da ação simultânea da abrasão e da corrosão (Garcia; Santos, 2023).

O desgaste mecânico associado à corrosão, fenômeno conhecido como tribocorrosão, ocorre quando o ataque eletroquímico é potencializado pela remoção contínua de camadas protetoras devido à ação abrasiva. Essa interação sinérgica, comum em usinas hidrelétricas, compromete a eficácia dos revestimentos, exigindo soluções mais robustas e multifuncionais. Pesquisas recentes reforçam que a durabilidade de um revestimento não deve ser avaliada apenas sob condições de corrosão isolada, mas também considerando o efeito combinado da abrasão (Zhang et al., 2021; Alves et al., 2021; Machado, 2022).

2.2 GRAFENO

Com o avanço da nanotecnologia, cresce o interesse pelo uso de materiais nanoestruturados em formulações protetoras. O grafeno e seus derivados, como o óxido de grafeno (GO) e o óxido de grafeno reduzido (rGO), têm se mostrado especialmente promissores nesse campo. Devido à sua elevada resistência mecânica, impermeabilidade e estabilidade química, o grafeno funciona como um aditivo capaz de reforçar a barreira física do revestimento, criando caminhos difusionais mais longos para moléculas de água e íons

corrosivas. Quando bem disperso em matrizes poliméricas, o material melhora a integridade do filme e retarda o processo de degradação (Zhang et al., 2021; Garcia; Santos, 2023).

Estudos recentes mostram que a incorporação controlada de rGO em tintas epóxi pode ampliar tanto a resistência à corrosão quanto ao desgaste, desde que se assegure a compatibilidade entre a matriz polimérica e o nanomaterial (Machado, 2022; Vale, 2022). Além disso, investigações mais recentes exploram combinações híbridas, nas quais o grafeno é associado a pigmentos inibidores ou cargas cerâmicas, demonstrando ganhos significativos na durabilidade dos revestimentos. Essas evidências confirmam o papel do grafeno como aditivo estratégico para o desenvolvimento de soluções anticorrosivas de alto desempenho em ambientes agressivos, como os encontrados em usinas hidrelétricas (Petrobras, 2022).

3. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental e aplicada, realizada em ambiente laboratorial, com foco no desenvolvimento e avaliação preliminar de uma formulação de tinta epóxi aditivada com óxido de grafeno reduzido (rGO). A natureza experimental justifica-se pela necessidade de síntese e manipulação direta do nanomaterial, assim como pela preparação de amostras em escala de bancada, enquanto o caráter aplicado está associado à busca de soluções práticas para um problema real de engenharia: a corrosão e o desgaste de componentes metálicos em ambientes hidrelétricos.

Inicialmente, foi conduzida a síntese do rGO, obtido a partir do grafite em pó por meio de um método modificado de Hummers, adaptado de acordo com protocolos recentes da literatura, com vistas a garantir maior segurança operacional e eficiência de oxidação. Essa etapa teve como finalidade a geração de um material com elevada área superficial e presença controlada de grupos funcionais, características que favorecem sua dispersão na matriz polimérica e potencializam o efeito de barreira contra agentes corrosivos.

Na sequência, foi realizada a formulação da tinta epóxi aditivada com rGO, utilizando resina epóxi como matriz principal, endurecedor apropriado para promover a reticulação da rede polimérica, pigmento e aditivos de processo (anti bolha e de brilho), além de sílica pirogênica como agente tixotrópico para melhorar a estabilidade da dispersão. O rGO foi incorporado em concentrações previamente definidas em massa, de modo a garantir homogeneidade e evitar aglomerações, utilizando-se técnicas combinadas de agitação mecânica e ultrassom.

Posteriormente, a tinta formulada foi aplicada sobre substratos metálicos (chapas de aço carbono SAE 1020), previamente preparados por jateamento abrasivo, a fim de assegurar aderência mecânica adequada. O processo de aplicação foi conduzido por espalhamento controlado, obtendo-se filmes com espessura uniforme próxima de 100 μm . As amostras foram deixadas em cura ao ar por sete dias em condições ambientais controladas ($25 \pm 2^\circ\text{C}$ e $60 \pm 5\%$ de umidade relativa).

3.1 OBTENÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO REDUZIDO (rGO)

O óxido de grafeno (GO) foi obtido a partir de grafite em pó utilizando o método modificado de Hummers, amplamente descrito na literatura como uma rota eficiente e relativamente segura para oxidação controlada do grafite. A escolha dessa técnica se deve ao seu baixo custo, à alta reprodutibilidade e à capacidade de gerar grande quantidade de grupos oxigenados na superfície do grafeno, o que melhora sua dispersibilidade em solventes e matrizes poliméricas. Inicialmente, 2 g de grafite em pó foram adicionados a 120 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) em um balão de fundo redondo de 500 mL, sob agitação por 15 minutos, etapa responsável por promover a intercalação iônica e a expansão das lamelas de grafite. Em seguida, 7 g de permanganato de potássio (KMnO_4) foram adicionados em pequenas frações, sob agitação constante e controle de temperatura, já que a reação é fortemente exotérmica. O KMnO_4 atua como principal agente oxidante, introduzindo grupos oxigenados, como hidroxilas, epóxidos e carboxilas, na estrutura do carbono. A mistura permaneceu sob agitação por 24 horas à temperatura ambiente para garantir oxidação homogênea.

Para interromper a reação, foram adicionados lentamente 400 mL de água deionizada e 20 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30%, mantendo-se o sistema em banho de gelo para evitar superaquecimento. O H_2O_2 tem a função de reduzir o excesso de KMnO_4 e subprodutos de manganês, convertendo-os em formas solúveis que podem ser removidas na etapa de purificação. Após decantação de 24 horas, o material foi filtrado e lavado sequencialmente com 400 mL de HCl a 10%, 400 mL de água deionizada e 400 mL de etanol, seguido de lavagens adicionais até o pH atingir valores entre 6 e 7, garantindo a neutralidade da suspensão e a eliminação de contaminantes. O produto obtido foi então submetido a um banho de ultrassom por 10 minutos (power: 100, frequency: 37), promovendo a esfoliação das lamelas oxidadas e resultando na formação de folhas individuais de óxido de grafeno (GO) altamente dispersáveis em meio líquido.

Na etapa seguinte, o GO foi submetido a um processo de redução em autoclave a 1,25 bar e 120 °C durante 90 minutos, obtendo-se o óxido de grafeno reduzido (rGO). Essa etapa tem como finalidade restaurar parcialmente a rede de carbono conjugada, removendo grupos oxigenados em excesso e conferindo ao material propriedades elétricas e mecânicas superiores às do GO, além de melhorar sua compatibilidade com matrizes poliméricas, como a resina epóxi. Após a redução, parte do material foi armazenada em suspensão aquosa estabilizada e outra parte foi submetida à liofilização para obtenção do pó seco. Essa divisão de formas de armazenamento garante flexibilidade na incorporação do aditivo em diferentes formulações de tinta.

O método empregado apresenta diversas vantagens, entre as quais se destacam a segurança, devido às condições controladas de temperatura e pressão, a eficiência, que permite a obtenção de GO altamente oxigenado e de fácil dispersão, e a flexibilidade, uma vez que o grau de redução pode ser ajustado conforme a aplicação. Além disso, o rGO obtido apresenta maior compatibilidade com polímeros, favorecendo a dispersão uniforme e a formação de barreiras eficazes contra a penetração de espécies corrosivas.

3.2 FORMULAÇÃO DA TINTA EPÓXI ADITIVADA

A formulação da tinta epóxi aditivada foi desenvolvida a partir da combinação de resina epóxi e endurecedor, responsáveis pela formação da matriz polimérica e pela reticulação que confere resistência e estabilidade ao filme. Como aditivo funcional, foi incorporado óxido de grafeno reduzido (rGO), com a finalidade de melhorar as propriedades de barreira contra corrosão e desgaste. A sílica pirogênica foi utilizada para ajustar a reologia e evitar a sedimentação de partículas, enquanto o solvente atuou no controle da viscosidade, facilitando a aplicação e o nivelamento da tinta. O pigmento cinza garantiu opacidade e uniformidade visual, ao passo que aditivos auxiliares, como anti-bolha e de brilho, foram incluídos para assegurar a integridade superficial, prevenir falhas durante a aplicação e aprimorar o acabamento final. A ordem de incorporação dos componentes foi cuidadosamente planejada, de modo a garantir boa dispersão do rGO e a formação de um revestimento contínuo, homogêneo e aderente ao substrato metálico.

Nesta tinta epóxi aditivada para 15 g totais, a resina epóxi (40%, 6,0 g) atua como ligante formador de filme: é a matriz contínua que aglutina os sólidos, promove a aderência ao substrato e confere resistência mecânica e química após a cura.

O endurecedor (20%, 3,0 g) é o agente de reticulação que reage com os grupos epóxi e transforma a mistura líquida em uma rede tridimensional sólida, definindo pot-life, dureza, coesão do filme e estabilidade dimensional. O rGO, óxido de grafeno reduzido (0,25%, 0,0375 g), é o aditivo de desempenho anticorrosivo e de reforço físico: suas lamelas criam caminhos de difusão mais longos (“barreira tortuosa”), reduzindo a permeação de água e íons, além de contribuir para módulo e resistência à abrasão do revestimento.

A sílica pirogênica (19,425%, 2,9138 g) é o modificador reológico e anti-sedimentação: ela estabelece tixotropia para evitar escorrimento em superfícies verticais, melhora a estabilidade de armazenamento mantendo pigmentos e o próprio rGO uniformemente suspensos e ajuda no corpo do filme durante a aplicação e a secagem. O solvente acetato de etila (19,425%, 2,9138 g) é o veículo de aplicação que ajusta a viscosidade para mistura, dispersão e aplicação, facilita o molhamento das partículas sólidas e promove nivelamento; ao evaporar, permite que a rede polimérica se forme sem defeitos de superfície.

O pigmento cinza (1%, 0,145 g) define cor e opacidade, contribuindo para cobertura visual e para a distribuição homogênea de sólidos que auxilia a uniformidade do filme. O aditivo anti-bolha (~0,5%) é o agente de controle de ar incorporado: ele evita e rompe microespumas geradas na mistura e na aplicação, reduzindo poros, crateras e microcanais que poderiam comprometer aparência e proteção.

O aditivo para brilho (~0,5%) otimiza a tensão superficial da tinta ainda úmida, melhora o espalhamento e a coalescência do filme, reduz marcas de aplicação e eleva o gloss final, resultando em superfície mais lisa e uniforme. A homogeneização em ordem controlada e com agitação mecânica cumpre exatamente o papel de cada um desses componentes: primeiro garante que solvente e resina forneçam o meio adequado para molhamento, depois que o rGO e o pigmento sejam devidamente dispersos para exercer sua função de barreira e cobertura, em seguida que a sílica estabeleça a reologia correta para estabilidade e aplicação, e por fim que os aditivos cuidem da integridade de superfície; o endurecedor entra apenas ao final, iniciando a cura para que todas essas funções se consolida em um filme contínuo, aderente, nivelado e com desempenho anticorrosivo.

Os componentes foram homogeneizados em ordem controlada para garantir dispersão adequada do rGO, utilizando agitação mecânica para prevenir aglomeração.

3.3 ENSAIO RAMAN

A espectroscopia Raman é uma técnica de caracterização baseada no espalhamento inelástico da luz, conhecido como efeito Raman. Quando um feixe de luz monocromática, geralmente proveniente de um laser, incide sobre a superfície de um material, a maior parte dos fótons é espalhada elasticamente, mantendo a mesma energia e comprimento de onda. Contudo, uma pequena fração interage com os modos vibracionais das ligações químicas, resultando em uma variação de energia. Essa diferença, chamada de deslocamento Raman e expressa em cm^{-1} , funciona como uma espécie de “impressão digital” do material analisado.

No caso do grafeno e de seus derivados, como o óxido de grafeno (GO) e o óxido de grafeno reduzido (rGO), a espectroscopia Raman é amplamente utilizada para identificar características estruturais e o grau de desordem do material. As principais bandas observadas são a banda D, em torno de 1350 cm^{-1} , associada a defeitos e grupos oxigenados; a banda G, próxima de 1580 cm^{-1} , relacionada às vibrações dos átomos de carbono em hibridização sp^2 ; e a banda 2D, situada em torno de 2700 cm^{-1} , que fornece informações sobre o empilhamento das camadas de grafeno.

Um parâmetro frequentemente analisado é a razão entre as intensidades das bandas D e G (ID/IG). No GO, essa razão tende a ser elevada devido ao grande número de defeitos introduzidos pelo processo de oxidação. Após a redução química ou térmica, o valor de ID/IG se altera, indicando a remoção parcial de grupos oxigenados e a restauração da rede sp^2 , típica do rGO. Além disso, a forma e a intensidade da banda 2D permitem estimar o número de camadas presentes, diferenciando entre materiais de monocamada, poucas camadas ou multicamadas.

A grande vantagem da espectroscopia Raman está em seu caráter não destrutivo, rápido e altamente informativo. A técnica possibilita avaliar simultaneamente a qualidade estrutural, a presença de defeitos, o grau de redução e até o número de camadas em materiais de grafeno. Por essas razões, é considerada uma ferramenta essencial em pesquisas que envolvem o desenvolvimento de revestimentos reforçados com nanomateriais, nos quais a boa dispersão e a integridade estrutural são fundamentais para garantir alto desempenho anticorrosivo e anti abrasivo.

3.4 ENSAIO COM RAIO X

A difração de raios X (DRX) é uma das principais técnicas utilizadas para caracterização estrutural de materiais cristalinos e semi-cristalinos. Baseia-se na interação de um feixe de raios X com a rede cristalina do material, fenômeno descrito pela Lei de Bragg ($n\lambda = 2d \sin\theta$), que relaciona o comprimento de onda da radiação incidente (λ), a distância interplanar da rede cristalina (d) e o ângulo de difração (θ). Quando as ondas de raios X interagem de forma construtiva com os planos atômicos do cristal, ocorre o fenômeno de difração, resultando em picos característicos no difratograma. Cada material possui um padrão único de picos, que funciona como uma espécie de “assinatura estrutural”.

Na caracterização do óxido de grafeno (GO), a DRX é fundamental para diferenciar o material em relação ao grafite de origem. O grafite apresenta um pico intenso característico em torno de $2\theta \approx 26^\circ$, correspondente ao espaçamento interplanar (d_{002}) de aproximadamente 0,34 nm. Já no GO, devido à oxidação e à introdução de grupos funcionais contendo oxigênio, ocorre um aumento do espaçamento interplanar, deslocando o pico para valores próximos de $2\theta \approx 10\text{--}12^\circ$, indicando espaçamentos na faixa de 0,7 a 0,9 nm. Esse deslocamento confirma a presença de grupos oxigenados e a expansão das camadas.

Quando o GO é reduzido para óxido de grafeno reduzido (rGO), observa-se novamente um deslocamento do pico, agora para valores próximos a $2\theta \approx 24\text{--}26^\circ$, indicando uma diminuição do espaçamento interplanar em comparação ao GO, mas sem retornar totalmente ao valor do grafite. Esse comportamento evidencia que parte dos grupos oxigenados foi removida, mas que a estrutura cristalina original não foi completamente restaurada. Dessa forma, a DRX se mostra uma técnica essencial para monitorar o processo de oxidação e redução, além de fornecer informações sobre a organização das camadas, o grau de ordem estrutural e a pureza do material.

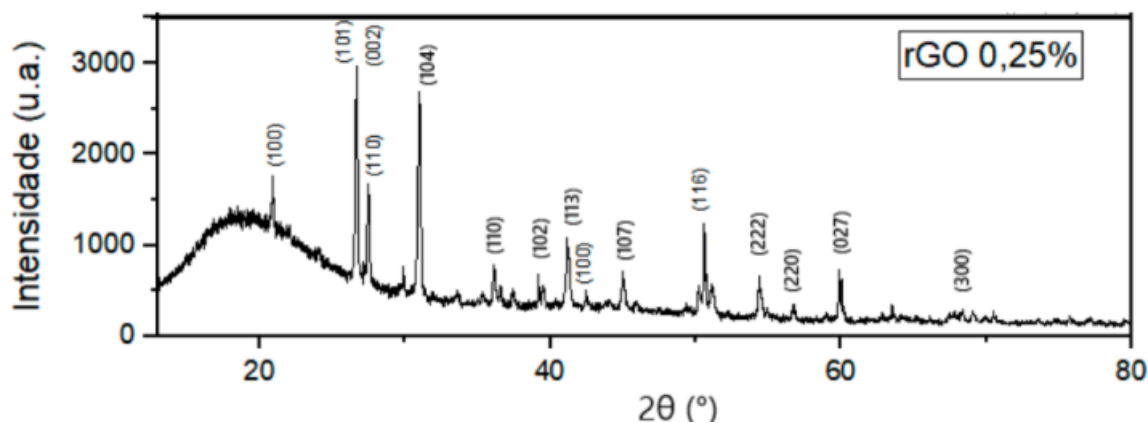
4. RESULTADO E DISCUSSÃO

O desenvolvimento da tinta epóxi aditivada com óxido de grafeno reduzido (rGO) teve como premissa principal garantir que a incorporação do nanomaterial não comprometesse as propriedades reológicas da formulação, permitindo sua aplicação convencional sobre substratos metálicos. Para isso, a concentração de rGO escolhida foi de 0,25% em massa, valor considerado adequado para proporcionar melhorias nas propriedades de barreira sem induzir problemas de aglomeração ou sedimentação. Antes de sua incorporação, o rGO foi submetido a ultrassonografia, etapa fundamental para dispersar aglomerados e assegurar uma distribuição homogênea na matriz polimérica. Essa preparação cuidadosa contribuiu para evitar defeitos como bolhas, microvazios e empolamento, garantindo a estabilidade da tinta durante a aplicação.

A aplicação do revestimento foi realizada de forma convencional, por pincelamento, sobre chapas metálicas previamente preparadas por lixamento e limpeza química. Esse procedimento aumentou a rugosidade superficial e favoreceu a ancoragem mecânica da tinta. O filme formado apresentou boa uniformidade, espessura adequada e ausência de trincas ou falhas visíveis, evidenciando que a adição de rGO não afetou a processabilidade da tinta. A boa aderência observada sugere que, além do preparo superficial, a presença de grupos oxigenados residuais no rGO pode ter favorecido interações adicionais com a matriz epóxi, contribuindo para maior coesão interna do revestimento.

Os resultados dos ensaios de caracterização estrutural reforçaram a eficácia da incorporação do aditivo. A difração de raios X (DRX) revelou o desaparecimento do pico característico do óxido de grafeno em torno de $2\theta \approx 10^\circ$, associado ao aumento do espaçamento interplanar decorrente da oxidação, e o surgimento de um pico em torno de $2\theta \approx 24\text{--}26^\circ$, característico do rGO. Esse deslocamento confirma a redução parcial do material e a manutenção de sua estrutura lamelar, indicando que o grafeno incorporado pode atuar como barreira difusional e reforço estrutural no interior da matriz polimérica.

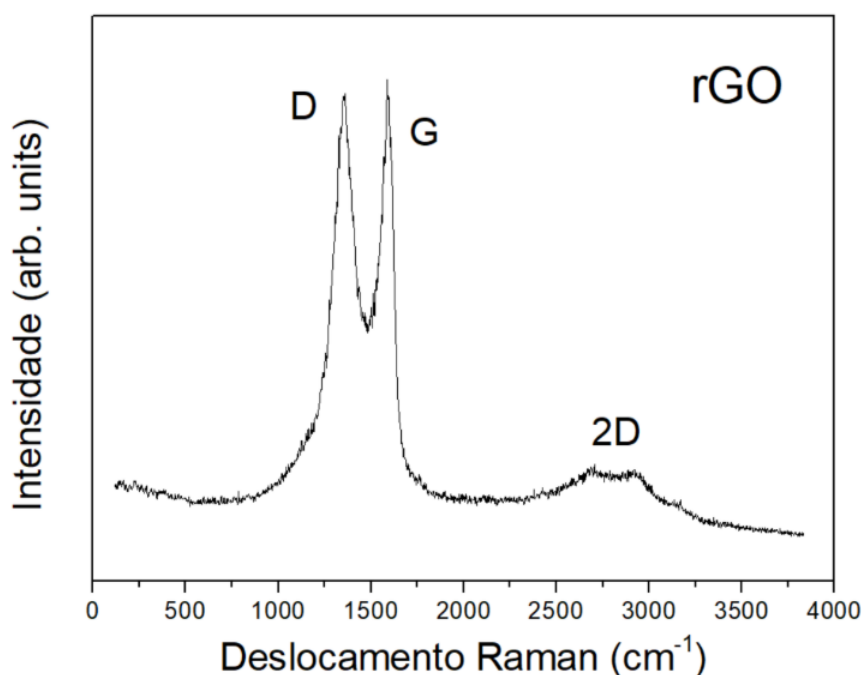
Ensaio de raio x



Fonte: autoria própria.

A espectroscopia Raman complementou esses resultados, evidenciando as bandas D ($\sim 1350\text{ cm}^{-1}$) e G ($\sim 1580\text{ cm}^{-1}$), relacionadas, respectivamente, à presença de defeitos e às vibrações da rede sp^2 . Observou-se ainda a presença da banda 2D ($\sim 2700\text{ cm}^{-1}$), associada ao empilhamento das camadas. A relação ID/IG foi maior no rGO em comparação ao GO, indicando a restauração parcial da rede sp^2 acompanhada do surgimento de novos defeitos, comportamento esperado no processo de redução. Esses resultados confirmam que o nanomaterial aditivado mantém propriedades estruturais adequadas para reforçar o desempenho da tinta epóxi.

Gráfico ensaio Raman



Fonte: autoria própria.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da tinta epóxi aditivada com óxido de grafeno reduzido demonstrou viabilidade técnica e potencial de aplicação em ambientes agressivos, como os encontrados em usinas hidrelétricas. A formulação preparada apresentou boa processabilidade, podendo ser aplicada de forma convencional sobre substratos metálicos sem comprometer suas propriedades reológicas. A aderência adequada e a ausência de defeitos visíveis nos filmes reforçam a eficiência do preparo superficial e da dispersão do rGO na matriz polimérica, fatores essenciais para a estabilidade do revestimento.

As análises estruturais realizadas confirmaram a incorporação do nanomaterial: a difração de raios X evidenciou a redução parcial do óxido de grafeno, enquanto a espectroscopia Raman confirmou a restauração da rede sp² e a presença de defeitos característicos do rGO, fundamentais para sua funcionalidade como aditivo. Esses resultados indicam que o grafeno atuou como elemento de reforço, contribuindo para o aumento da integridade estrutural do filme protetor.

Apesar dos avanços obtidos, a pesquisa ainda apresenta limitações, uma vez que não foram conduzidos ensaios acelerados de corrosão e desgaste capazes de comprovar, de forma quantitativa, a superioridade da formulação frente às tintas convencionais. Dessa forma, recomenda-se a continuidade do estudo com a realização de testes padronizados, como espectroscopia de impedância eletroquímica, névoa salina, abrasão Taber e aderência pull-off, de modo a validar o desempenho anticorrosivo e anti abrasivo do revestimento em condições mais próximas da realidade operacional.

Conclui-se, portanto, que a proposta de utilização de grafeno como aditivo em revestimentos epóxi apresenta resultados preliminares promissores, destacando-se como uma alternativa inovadora para aumentar a durabilidade de componentes metálicos expostos a ambientes agressivos. A continuidade da pesquisa permitirá consolidar sua aplicação prática, contribuindo para a redução de custos de manutenção e o aumento da confiabilidade de sistemas hidrelétricos.

6. REFERÊNCIAS

ALVES, C. A. et al. Desempenho de revestimentos poliméricos reforçados com grafeno em ambientes agressivos. *Revista de Materiais Avançados*, v. 15, n. 2, p. 45-58, 2021.

ALVES, C. A. et al. Diagnóstico de falhas em turbinas térmicas. *Revista de Sistemas Elétricos*, 2021.

GARCIA, C. A.; SANTOS, M. P. Aplicações recentes de nanomateriais em revestimentos anticorrosivos: um estudo de casos no setor energético. *Revista Brasileira de Engenharia Industrial*, v. 45, n. 2, p. 210-229, 2023.

MACHADO, T. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com grafeno para proteção anticorrosiva. *Revista Materiais e Energia*, v. 12, n. 1, p. 35-48, 2022.

MORAES, A. P.; FERREIRA, L. S. Revestimentos anticorrosivos em ambientes hidroenergéticos: panorama e perspectivas. *Revista Brasileira de Engenharia Industrial*, v. 44, n. 3, p. 187-203, 2022.

PETROBRAS. Uso de grafeno em tintas e revestimentos para aplicações offshore e hidroenergéticas. *Relatório Técnico Petro&I.A.*, Rio de Janeiro, 2022.

SILVA, R. F. et al. Estratégias para mitigação de corrosão em sistemas de geração hidrelétrica. *Revista Engenharia & Energia*, v. 30, n. 1, p. 50-65, 2023.

VALE S.A. Revestimentos inovadores para prolongamento da vida útil de ativos metálicos. *Relatório de Sustentabilidade*, 2022. Disponível em: <https://www.vale.com>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ZHANG, Y. et al. Graphene-based coatings for corrosion protection: Recent developments and future perspectives. *Materials Today Advances*, v. 12, p. 100-125, 2021.

ZHANG, Y. et al. Data-driven predictive maintenance for power plants. *Energy Systems*, 2021.

COLLAZO, A.; DÍAZ, B.; FIGUEROA, R.; NÓVOA, X. R.; PÉREZ, C. Corrosion resistance of a water-borne resin doped with graphene derivatives applied on galvanized steel. *Progress in Organic Coatings*, v. 195,, 2024.

DAS, S.; MAHAPATRA, A. S.; PARIDA, S. K.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Recent progress on graphene-based nanocomposites for anti-corrosion coatings: Mechanisms, challenges, and future outlook. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 125, p. 138–152, 2023.

NASCIMENTO, A. P.; SOUZA, R. S.; TEIXEIRA, A. A. Desenvolvimento de revestimentos poliméricos reforçados com nanomateriais para aplicação em ambientes marinhos e hidrelétricos. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 40, n. 1, p. 77–92, 2023.

QIU, S.; DU, C.; LI, W.; GAO, Y. Graphene and derivatives for advanced anti-corrosion coatings: Recent progress and perspectives. *Carbon*, v. 201, p. 523–544, 2023.

WANG, H.; ZHOU, S.; XU, L.; LI, F. Hybrid graphene/ceramic fillers in epoxy coatings for enhanced corrosion and wear resistance. *Surface & Coatings Technology*, v. 459, 2023.