

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E DA SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A ADERÊNCIA E ESTABILIDADE DE FILMES DE CNTs EM AÇO SAE 1020 VIA
DEPOSIÇÃO ELETROFORÉTICA

Por

Emanuel Silva de Oliveira
Karolyne Rodrigues Abreu Moreno

Campos dos Goytacazes – RJ
Novembro/2025

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E DA SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A ADERÊNCIA E ESTABILIDADE DE FILMES DE CNTs EM AÇO SAE 1020 VIA
DEPOSIÇÃO ELETROFORÉTICA

Por

Emanuel Silva de Oliveira
Karolyne Rodrigues Abreu Moreno

Projeto Final de Curso apresentado em cumprimento às exigências para a obtenção do grau no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica nos Institutos Superiores de Ensino do CENSA.

Orientadora: Layzza Tardin da Silva Soffner, Dsc.
Coorientadora: Geanni Barbosa da Silveira e Silva Pessanha, Dsc.

Campos dos Goytacazes – RJ
Novembro/2025

Oliveira, Emanuel Silva de

A Aderência e Estabilidade de Filmes de CNTs em aço Sae
1020 via deposição eletroforética/ Emanuel Silva de Oliveira;
Karolyne Rodrigues Abreu Moreno - Campos dos Goytacazes (RJ),
2025.

39 f.: il.

Orientador: Prof. Layzza Tardin da Silva Soffner
Doutora em Engenharia e Ciências dos Materiais - Universidade
Estadual do Norte Fluminense, 2021.

1. Engenharia Mecânica. 2. SAE 1020.
3. Nanomateriais. I.Título. II. Moreno, Karolyne Rodrigues Abreu.

CDD 620.5

Bibliotecária responsável Glauce Virgínia M. Régis CRB7 - 5799.
Biblioteca Dom Bosco.

A ADERÊNCIA E ESTABILIDADE DE FILMES DE CNTs EM AÇO SAE 1020
VIA DEPOSIÇÃO ELETROFORÉTICA

Por

Emanuel Silva de Oliveira
Karolyne Rodrigues Abreu Moreno

Projeto Final de Curso apresentado em cumprimento às exigências para a obtenção do grau no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica nos Institutos Superiores de Ensino do CENSA.

Aprovado em 26 de Novembro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Layzza Tardin da Silva Soffner
Layzza Tardin da Silva Soffner, Dsc. – ISECENSA

Giovanni Barbosa da Silveira e Silva
Giovanni Barbosa da Silveira e Silva, Dsc. – ISECENSA

Daniel Willemam Trindade, Dsc. – UENF

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho, primeiramente, a Deus, por nos conceder força, sabedoria e saúde durante toda essa jornada acadêmica.

Aos nossos pais, que sempre acreditaram em nosso potencial e nos apoiaram incondicionalmente, mesmo nos momentos mais difíceis. Sem o amor, o incentivo e os ensinamentos de vocês, nada disso teria sido possível.

Aos nossos professores, que compartilharam conhecimento e nos desafiaram a ir além. Em especial, agradecemos a orientadora, pela paciência, apoio e orientação precisa durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

E, claro, um ao outro, por termos caminhado lado a lado durante essa trajetória, enfrentando os desafios com parceria, respeito e dedicação mútua.

Este Projeto Final de Curso é fruto de esforço compartilhado, e cada conquista representa mais do que um diploma.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso marca o encerramento de uma etapa fundamental em nossas vidas, e seria impossível chegar até aqui sem o apoio de muitas pessoas que, de diferentes formas, contribuíram para nossa trajetória.

Agradecemos, antes de tudo, a Deus, por iluminar nossos caminhos, renovar nossas forças nos momentos de cansaço e nos guiar com sabedoria.

Aos nossos familiares, em especial aos nossos pais, por todo amor, apoio e incentivo constante. Vocês foram a base que sustentou nossos sonhos e o combustível para continuarmos mesmo quando os desafios pareciam grandes demais.

Aos professores e colegas do curso, que fizeram parte da nossa caminhada acadêmica e contribuíram com conhecimento, trocas valiosas e momentos que levaremos para sempre.

As nossas orientadoras, que com paciência, dedicação e olhar crítico, nos guiaram com firmeza e clareza, contribuindo significativamente para a construção deste trabalho. Sua orientação foi essencial para transformar ideias em resultados concretos.

Aos profissionais e instituições que colaboraram direta ou indiretamente para a execução deste projeto, nossos sinceros agradecimentos.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CNT: Nanotubo de Carbono

MWCNTs: Nanotubos de Carbono Multicamadas

SWCNTs: Nanotubos de Carbono de Camada Simples

DWCNTs: Nanotubos de Carbono de Parede Dupla

EPD: Deposição Eletroforética

DRX: Difração de Raios X

KI: Iodeto de Potássio

SAE: Society of Automotive Engineers

CVD: Chemical Vapor Deposition

OG: Óxido de Grafeno

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Formação do nanotubo de carbono. | 15 |
| Figura 2: SWCNT (a); MWCNT (b). | 16 |
| Figura 3: Processo EPD: a) sobre o cátodo e b) sobre o ânodo. | 18 |
| Figura 4: Valor do aço SAE 1020 em 2025. | 19 |
| Figura 5: Ensaio da técnica de DRX. | 20 |
| Figura 6: Pó de CNT e Iodeto de potássio. | 23 |
| Figura 7: Corpos de prova. | 24 |
| Figura 8: Dispersão do CNT. | 25 |
| Figura 9: Montagem da EPD. | 26 |
| Figura 10: Posição dos cabos. | 26 |
| Figura 11: Microscópio FORTEL. | 27 |
| Figura 12: DRX do CNT. | 28 |
| Figura 13: CNT funcionalizado em água deionizada. | 29 |
| Figura 14: CNT não funcionalizado em água deionizada. | 29 |
| Figura 15: CNT funcionalizado em acetona. | 30 |
| Figura 16: CNT não funcionalizado em acetona. | 30 |
| Figura 17: Corpo de prova com a deposição do CNT. | 31 |
| Figura 18: Corpo de prova com corrosão. | 32 |
| Figura 19: Corpo de prova com óleo. | 32 |
| Figura 20: Filme de CNT. | 33 |
| Figura 21: Ensaio de aderência. | 34 |

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dispersão do CNT.

25

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 Objetivo geral | 13 |
| 1.1.1 Objetivos específicos | 13 |
| 1.2 Justificativa | 14 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 Nanotubos de carbono | 15 |
| 2.2 Deposição eletroforética | 17 |
| 2.3 Aço SAE 1020 | 18 |
| 2.4 Técnicas de caracterização dos revestimentos | 20 |
| 3. METODOLOGIA | 22 |
| 3.1 Materiais | 22 |
| 3.2 Equipamentos | 23 |
| 3.3 Métodos | 24 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 28 |
| 4.1 Caracterização do nanotubo de carbono | 28 |
| 4.2 Estudo da solução | 28 |
| 4.3 Resultados da deposição | 31 |
| 4.4 Caracterização pós deposição | 33 |
| 5. CONCLUSÃO | 36 |
| 5.1 Sugestão para trabalhos futuros | 36 |
| 6. REFERÊNCIAS | 37 |

**A ADERÊNCIA E ESTABILIDADE DE FILMES DE CNTs EM AÇO SAE 1020
VIA DEPOSIÇÃO ELETROFORÉTICA**

***Emanuel Silva de Oliveira^{1*}, Karolyne Rodrigues Abreu Moreno^{1*}, Geanni
Barbosa da Silveira e Silva Pessanha², Layzza Tardin da Silva Soffner³***

(1) Aluno do ISECENSA – Curso de Engenharia Mecânica; (2) Pesquisadora Colaboradora - Laboratório de Análises e Projeto de Sistemas Mecânicos – LAPSIM/ISECENSA; (3) Pesquisadora Orientadora - Laboratório de Análises e Projeto de Sistemas Mecânicos - LAPSIM /ISECENSA – Curso de Engenharia Mecânica - Institutos Superiores de Ensino do CENSA – ISECENSA, Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

RESUMO

Os nanotubos de carbono (CNTs) têm sido amplamente estudados devido às suas propriedades mecânicas, estruturais e elétricas, o que os torna candidatos promissores para a formação de revestimentos protetores em metais suscetíveis à corrosão. Entre as técnicas disponíveis, a deposição eletroforética (EPD) destaca-se por sua simplicidade e capacidade de produzir filmes uniformes a partir de suspensões estáveis. Neste trabalho, investigou-se a formação, aderência e estabilidade de filmes de CNTs depositados sobre aço Society of Automotive Engineers (SAE) 1020 por meio da EPD, considerando diferentes condições superficiais do substrato e distintas formulações de suspensão. Foram preparadas soluções contendo CNT funcionalizado e não funcionalizado dispersos em água deionizada ou acetona, com adição de iodeto de potássio (KI) para otimizar a condutividade. Os resultados demonstraram que a suspensão composta por acetona e CNT não funcionalizado apresentou melhor estabilidade e homogeneidade. Verificou-se também que a condição superficial do aço exerce influência direta na qualidade da deposição, superfícies limpas permitiram a formação de filmes contínuos e aderentes, enquanto presença de óleo ou corrosão comprometeu totalmente o revestimento. Conclui-se que a EPD é uma técnica eficiente para obtenção de películas de CNT em aço 1020, desde que haja controle adequado da suspensão e preparação rigorosa do substrato.

Palavras-chave: SAE 1020; Nanotubos de Carbono; Deposição eletroforética; Nanomateriais.

ADHESION AND STABILITY OF CNT FILMS ON AISI 1020 STEEL VIA ELECTROPHORETIC DEPOSITION

Emanuel Silva de Oliveira^{1*}, Karolyne Rodrigues Abreu Moreno^{1*}, Geanni Barbosa da Silveira e Silva Pessanha², Layzza Tardin da Silva Soffner³

(1) Aluno do ISECENSA – Curso de Engenharia Mecânica; (2) Pesquisadora Colaboradora - Laboratório de Análises e Projeto de Sistemas Mecânicos – LAPSIM/ISECENSA; (3) Pesquisadora Orientadora - Laboratório de Análises e Projeto de Sistemas Mecânicos - LAPSIM /ISECENSA – Curso de Engenharia Mecânica - Institutos Superiores de Ensino do CENSA – ISECENSA, Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

ABSTRACT

Carbon nanotubes (CNTs) have attracted significant attention due to their remarkable mechanical, structural, and electrical properties, making them promising candidates for protective coatings on metals susceptible to corrosion. Among the available techniques, electrophoretic deposition (EPD) stands out for its simplicity and ability to produce uniform films from stable suspensions. This study investigated the formation, adhesion, and stability of CNT films deposited onto SAE 1020 steel via EPD, considering different surface conditions of the substrate and various suspension formulations. Suspensions were prepared using functionalized and non-functionalized CNTs dispersed in deionized water or acetone, with potassium iodide (KI) added to enhance conductivity. The results showed that the solution containing acetone and non-functionalized CNTs provided superior stability and dispersion. It was also observed that the surface condition of the steel directly affects deposition quality: clean surfaces enabled continuous and adherent films, while oil contamination or corrosion prevented proper coating formation. Therefore, EPD proved to be an effective method for producing CNT films on SAE 1020 steel, provided that suspension parameters and surface preparation are properly controlled.

Keywords: SAE 1020; Carbon Nanotubes; Electrophoretic Deposition; Nanomaterials.

1. INTRODUÇÃO

Entre os diversos materiais estudados nas últimas décadas, os nanotubos de carbono (CNTs) têm se destacado por sua versatilidade e pelas notáveis propriedades eletrônicas, despertando crescente interesse em diferentes áreas de pesquisa e aplicação tecnológica. Dependendo dos índices de Hamada (n,m), que é um par de números inteiros usado para descrever a forma estrutural e a direção de enrolamento do CNT, podem apresentar comportamento de semicondutores de *gap* nulo ou metálica, quando $n-m$ (componentes de vetor), forem múltiplos de 3 (Herbst; Macêdo; Rocco, 2004).

Os CNTs podem ser classificados em nanotubos de carbono de camada simples (SWCNTs), nanotubo de carbono multicamadas (MWCNTs) ou nanotubo de carbono de parede dupla (DWCNTs), cada qual com propriedades específicas. Nanotubos funcionalizados se destacam por propriedades mecânicas e eletrônicas superiores, sendo aplicáveis em sensores, compósitos e revestimentos. Diante dessas características, torna-se essencial empregar um método eficiente de deposição desses nanomateriais, destacando-se entre eles a técnica de deposição eletroforética (Syduzzaman *et al.*, 2025).

O sistema de deposição eletroforética (EPD) é constituído fundamentalmente por uma fonte de alimentação, um ânodo, um cátodo e uma suspensão estável. Essa técnica é amplamente empregada na mitigação da corrosão. A EPD corresponde ao processo eletroquímico no qual partículas carregadas, dispersas em suspensão, migram e se depositam sobre um substrato de carga oposta mediante a aplicação de um campo elétrico (ScienceDirect, 2022).

A EPD é valorizada por sua simplicidade, baixo custo e tempos de depósitos relativamente curtos. Essa técnica envolve a aplicação de diferentes potenciais entre eletrodos, sendo usada para fabricar revestimentos em diversos materiais, como polímeros, cerâmicas e nanomateriais (Zica, 2013).

O processo consiste na migração de partículas carregadas em um meio líquido sob a influência de um campo elétrico, permitindo uma deposição controlada sobre um substrato. Além disso, ela dispensa o uso de ligantes e permite a aplicação em larga escala, sendo uma alternativa promissora para o uso industrial de nanomateriais condutores (Zica, 2013).

Para avaliar a qualidade dos revestimentos aplicados, é essencial caracterizar sua morfologia, aderência e resistência à corrosão. Técnicas complementares são empregadas com esse fim, proporcionando uma visão detalhada das propriedades do filme protetor (Gobbo, 2009).

A difração de Raios X (DRX) é uma técnica não destrutiva amplamente estabelecida para a análise de materiais carbonosos, possibilitando a medição reproduzível de seus parâmetros estruturais. Além disso, é largamente empregada para identificar fases cristalinas, permitindo uma avaliação rápida e eficiente das estruturas depositadas, sendo, portanto, uma ferramenta essencial no controle de diversos processos industriais (Machado *et al.*, 2011).

Com base nos temas previamente discutidos, definiu-se que o objeto de estudo será centrado no aço SAE 1020 e nas técnicas de revestimento protetor empregadas nesse material.

1.1 Objetivo geral

Obter uma película de nanotubo de carbono via deposição eletroforética em superfície de aço SAE 1020 para que seja depositada como revestimento protetor.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analisar a eficiência da mistura utilizada na dispersão dos CNTs;
- Verificar a aderência da película no aço SAE 1020;
- Investigar o comportamento da deposição eletroforética sob diferentes condições superficiais do aço SAE 1020.

1.2 Justificativa

A relevância desta pesquisa justifica-se pela necessidade de desenvolver películas protetoras capazes de contribuir para o avanço tecnológico e para o aumento da vida útil dos materiais. Ao considerar a aderência e a homogeneidade da película como fatores determinantes no desempenho do revestimento, estabelecem-se parâmetros que orientam sua replicação e otimização.

Diante da necessidade de desenvolver revestimentos inovadores capazes de elevar a resistência à corrosão de materiais metálicos, propõe-se contribuir para a redução dos custos operacionais e para o aprimoramento da eficiência dos processos industriais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono (CNTs) são estruturas derivadas do grafite, cuja composição se baseia em folhas de átomos de carbono organizadas em uma rede bidimensional, conhecidas como grafeno. Os CNTs são formados quando essas folhas de grafeno são enroladas de forma cilíndrica e com isso ganhando suas propriedades mecânicas (altíssima resistência mecânica e elevado módulo de elasticidade), estruturais e eletrônicas (alta condutividade térmica) (Franco, 2009).

Os nanotubos podem ser classificados estruturalmente em duas categorias: Nanotubos de carbono de camada simples (SWCNT) (Figura 1), formados por uma única camada de grafeno, e nanotubos de carbono multicamadas (MWCNT) e são considerados estruturas unidimensionais (Figura 2), compostos por várias camadas concêntricas de grafeno enroladas. Com diâmetros na escala dos nanômetros e comprimentos que podem atingir micrômetros (Franco, 2009).

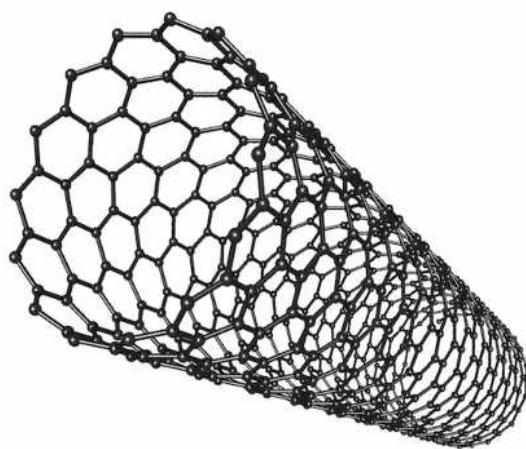


Figura 1: Formação do nanotubo de carbono.
Fonte: KINTEK Solution, 2023.

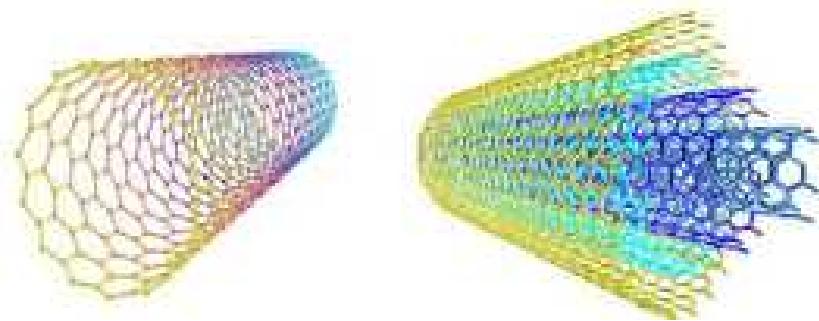


Figura 2: SWCNT (a); MWCNT (b).
Fonte: Rodrigues, 2015.

A descoberta dos nanotubos de carbono abriu espaço para a integração de diversas áreas do conhecimento, promovendo uma abordagem interdisciplinar e multidisciplinar. Isso é especialmente evidente na análise das propriedades eletrônicas e mecânicas de nanotubos funcionalizados, ou seja, CNTs cujas superfícies foram quimicamente modificadas (Souza Filho; Fagan, 2007).

Essas modificações tornam os nanotubos capazes de interagir de forma mais eficaz com moléculas orgânicas e biológicas, permitindo o desenvolvimento de sensores altamente seletivos, capazes de detectar pequenas quantidades de substâncias-alvo com grande precisão, diferente dos não funcionalizados (Souza Filho; Fagan, 2007).

Considerando o potencial dos nanotubos funcionalizados e a crescente demanda por soluções tecnológicas baseadas em materiais avançados, o Brasil tem ampliado seus esforços de pesquisa nessa área. Um exemplo significativo é o projeto iniciado em 2004, pelo Grupo de Materiais Condutores do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que visa à implantação de técnicas nacionais de produção, purificação e funcionalização de CNTs (Herbst; Macêdo; Rocco, 2004).

A proposta é alinhar o país às tendências globais, promovendo o desenvolvimento de nanotubos adaptados a aplicações específicas, como sensores, compósitos e dispositivos eletroquímicos, incluindo pilhas a combustível. O uso de sólidos ácidos como suportes catalíticos na síntese desses nanotubos é um dos focos iniciais do projeto, o que evidencia o compromisso com

a inovação e a independência tecnológica nacional no campo da nanotecnologia (Herbst; Macêdo; Rocco, 2004).

2.2 Deposição eletroforética

Com o avanço das tecnologias de processamento de materiais, muitas técnicas de aplicação de revestimentos têm ganhado destaque, como a Deposição Eletroforética (EPD), que se apresenta como uma alternativa promissora em relação a técnicas mais tradicionais, como o CVD (Chemical Vapor Deposition), que produzem subprodutos tóxicos e o *dip coating*, que apresenta instabilidade de aderência e uniformidade (Jian *et al.*, 2017; Kintek Solution, 2024; Ossila, 2025).

A EPD é uma técnica de processamento simples, custo relativamente baixo e aplicável a diversas situações. O processo de EPD consiste na dispersão ou suspensão de partículas coloidais carregadas em um meio líquido, as quais são atraídas e depositadas sobre um substrato condutor eletricamente, com carga oposta, quando submetidas a um campo elétrico (Jian *et al.*, 2017).

Para realizar o processo de EPD são utilizados 2 eletrodos, um de trabalho e um contra-eletrodo, inserido paralelamente em uma suspensão de partículas armazenadas em um reservatório (Figura 3), e uma fonte de tensão de diferente potencial entre os eletrodos no recipiente (Franco, 2009). Esse processo ocorre em 2 etapas:

- Na primeira etapa, o campo elétrico gerado pela tensão aplicada entre os eletrodos impulsiona as partículas em suspensão a se deslocarem em direção ao eletrodo de carga oposta, caracterizando o fenômeno da eletroforese.
- Na segunda etapa, as partículas são retidas no eletrodo, onde se acumulam e formam um depósito por meio da aglutinação.

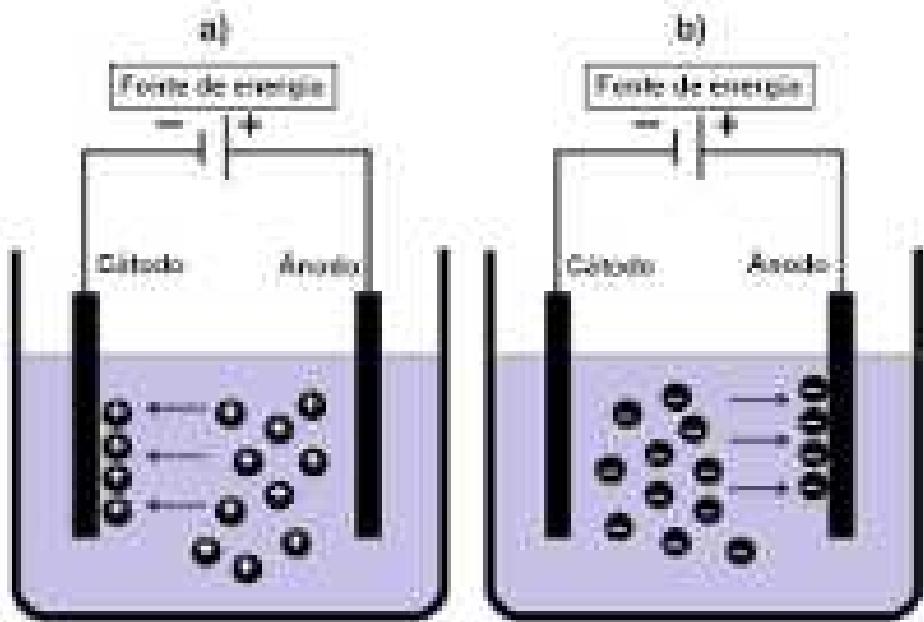


Figura 3: Processo EPD: a) sobre o cátodo e b) sobre o ânodo.
Fonte: Oliveira et al., 2020.

A EPD se destaca como uma alternativa mais viável, devido à simplicidade de seus métodos, ao baixo custo e à facilidade de aplicação em larga escala na produção de dispositivos baseados em nanotubos de carbono (Franco, 2009).

2.3 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 é um material de fácil conformação mecânica, pois apresenta características de alta ductilidade, plasticidade e soldabilidade. Por esses motivos é muito conhecido e utilizado na indústria, na fabricação de peças e ferramentas, tendo em vista o seu baixo custo (Figura 4). Devido a sua baixa concentração de carbono, aproximadamente 0,2% C, é o mais utilizado na indústria (Araújo, 2010; Silva Júnior, 2017).



Figura 4: Valor do aço SAE 1020 em 2025.

Fonte: Painel constru, 2025.

Os aços de alta resistência e baixa liga (High Strength Low Alloy) destacam-se por apresentarem elevada resistência mecânica, boa ductilidade e soldabilidade superior em relação aos aços processados por laminação convencional. Essas características os tornam especialmente relevantes em aplicações que exigem desempenho estrutural aliado à confiabilidade (Santos *et al.*, 2015).

Um dos principais desafios de utilizar o aço carbono é sua baixa resistência à corrosão, gerando prejuízos econômicos e comprometendo a segurança de estruturas metálicas. Os aços, amplamente utilizados em diversos setores industriais e petrolíferos, são particularmente suscetíveis a esse processo. A deterioração ocorre na interface entre o metal e o ambiente, sendo influenciada por fatores como pH, umidade relativa do ar e concentração de substâncias corrosivas (Waters; Tatum; Hugh, 2014).

Para reduzir os efeitos da corrosão, uma das soluções adotadas é a aplicação de revestimentos protetores, capazes de formar barreiras físicas entre o metal e o meio externo. Essas barreiras reduzem significativamente a taxa de deterioração, aumentando a vida útil dos materiais, diminuindo perdas e os custos com manutenção (Chang *et al.*, 2014).

2.4 Técnicas de caracterização dos revestimentos

Para compreender melhor as características e propriedades químicas, como composição, recorre-se à Difração de Raios X (DRX) e ao microscópio óptico. Tais análises demonstram a importância do uso de barreiras protetoras, que atuam na preservação da estrutura cristalina e na minimização de defeitos associados ao envelhecimento e à exposição ao meio (Githinji, 2016).

A difração de raios X mostrada na Figura 5, é uma técnica de caracterização não destrutiva de materiais, empregada para determinar as propriedades estruturais e físicas de diferentes compostos. Seu princípio baseia-se na análise dos padrões de difração gerados quando os raios X interagem de forma construtiva com a amostra (Xavier, 2023).

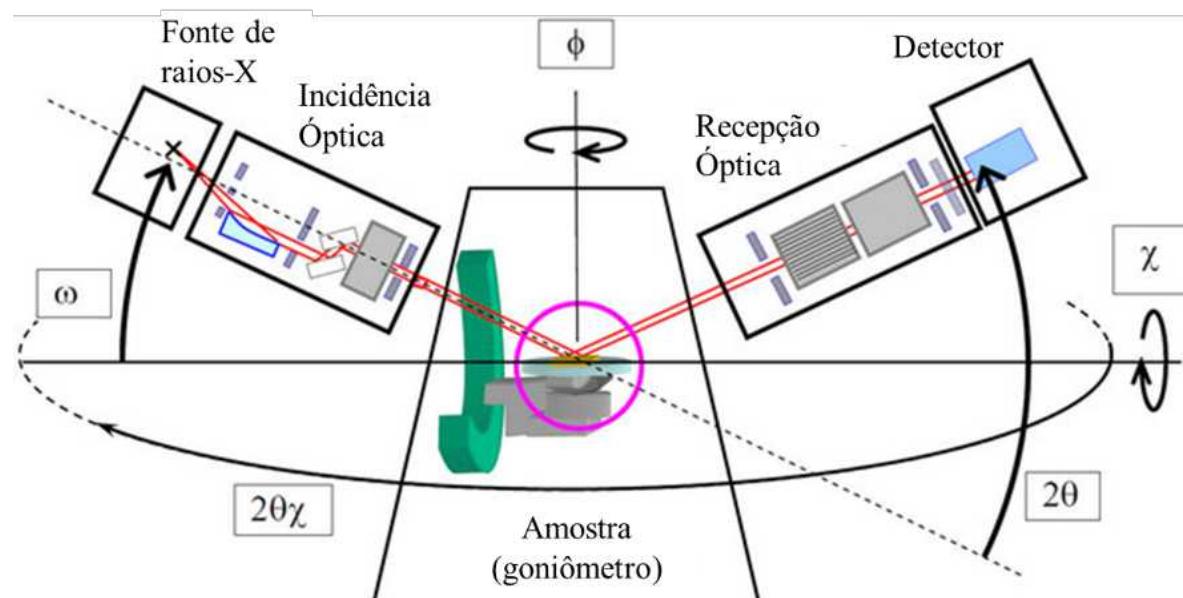


Figura 5: Ensaio da técnica de DRX.
Fonte: Central Multusuário DF, 2025.

A organização e a periodicidade dos átomos no material resultam em distintos padrões de sinais, os quais são registrados pelo detector e utilizados para a elaboração de um difratograma, semelhante a uma “impressão digital” do material. Os picos presentes neste difratograma surgem quando o comprimento de onda da radiação incidente corresponde às distâncias interatômicas dos cristais que compõem o material (Xavier, 2023).

Já o microscópio óptico é um instrumento destinado à ampliação e observação de estruturas microscópicas, isto é, difícil ou totalmente invisível a olho nu. O microscópio óptico, em particular, utiliza luz visível e um conjunto de lentes de vidro para produzir a ampliação da imagem da amostra. Sua constituição envolve uma parte mecânica, responsável pelo suporte e pela estabilidade do equipamento, e uma parte óptica, encarregada da formação e ampliação da imagem. A iluminação pode ser ajustada por meio do reóstato, que controla diretamente a intensidade da fonte luminosa, ou de forma indireta, através da regulação do condensador e do diafragma (Gomes, 2005).

A intensidade luminosa aumenta quando o condensador é elevado e o diafragma é aberto, permitindo maior passagem de luz para a amostra; inversamente, diminui quando o condensador é abaixado e o diafragma é fechado. Esses ajustes são essenciais para obter uma visualização adequada, garantindo contraste, nitidez e definição compatíveis com a ampliação desejada (Gomes, 2005).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza experimental, com abordagem qualitativa, e apresenta objetivos descritivos e aplicados. A adoção da abordagem qualitativa fundamenta-se na necessidade de compreender, sob uma perspectiva interpretativa, os comportamentos, padrões e particularidades dos filmes de CNT depositados sobre o aço SAE 1020, considerando aspectos relacionados à aderência, à homogeneidade e à estabilidade obtidos por meio da técnica de deposição eletroforética.

Os experimentos foram conduzidos em ambiente laboratorial controlado, empregando procedimentos de observação sistemática, registro descritivo e análise interpretativa das características observadas. As técnicas de caracterização utilizadas forneceram suporte à avaliação qualitativa dos revestimentos, permitindo identificar tendências, variações e comportamentos intrínsecos às propriedades dos filmes analisados.

3.1 Materiais

Para a montagem da técnica EPD foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos: um bêquer de 50 mL, duas placas de vidro como suporte e quatro corpos de prova de aço SAE 1020 que serviram como substrato metálico para a deposição. O contato elétrico foi estabelecido por meio de fios de cobre, conectores de pino e conectores tipo jacaré, garantindo a fixação adequada no sistema. Utilizou-se o contra eletrodo e uma chapa de grafite, conectada a uma fonte de alimentação MINIPA MPL-3305M.

Em relação aos insumos químicos, foram utilizados nanotubos de carbono multicamadas (MWCNTs) como fase dispersa, acetona P. A. como solvente e iodeto de potássio (KI) como eletrólito, favorecendo a dispersão e a condução elétrica durante o processo de deposição.

Os nanotubos de carbono utilizados foram do tipo multicamadas (MWCNTs), conforme a Figura 6. Para a preparação da suspensão, foram

adicionados 0,050 g de MWCNTs em 50 mL de acetona, juntamente com 0,415 g de iodeto de potássio (KI), empregado como eletrólito para favorecer a deposição eletroforética.



Figura 6: Pó de CNT e Iodeto de potássio.
Fonte: Autor.

O nanotubo de carbono utilizado apresenta pureza superior a 90%, garantindo menor presença de impurezas que poderiam interferir nos resultados. Possui diâmetro médio de cerca de 20 nm e comprimento aproximado de 12 µm, fornecidos pelo fabricante.

O iodeto de potássio utilizado, da marca Vetec, apresenta pureza aproximada de 99%, assegurando a qualidade do reagente e a confiabilidade dos resultados obtidos nos experimentos.

A acetona P. A. utilizada como solvente nos testes apresenta uma pureza de 100%.

3.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados incluíram uma balança de precisão, empregada para a correta pesagem dos reagentes utilizados nas soluções. Para o processo de dispersão dos nanotubos de carbono, foi utilizado um equipamento de ultrassom, garantindo a homogeneização da suspensão antes da deposição. A fonte de alimentação MINIPA MPL-3305M foi utilizada para fornecer a tensão e corrente necessárias ao processo de deposição eletroforética. Foi utilizado o

microscópio FORTEL para observar a superfície do corpo de prova a fim de verificar a homogeneidade da película.

3.3 Métodos

O primeiro passo consistiu na confecção de 10 corpos de prova dos quais quatro corpos serviram como análises finais, produzidos em formato retangular com dimensões de 60 mm × 20 mm × 3 mm, conforme mostra a Figura 7. Para o corte inicial das amostras, utilizou-se uma serra de mão. Em seguida, foram preparados por meio de lixamento progressivo com lixas de granulação de G 200 a G 1200, com o objetivo de remover impurezas, uniformizar e padronizar a superfície metálica antes da aplicação do revestimento criando um perfil de ancoragem leve a moderado (R_a entre 0,2 e 1,0 μm).



Figura 7: Corpos de prova.
Fonte: Autor.

Após o lixamento, uma das amostras foi limpa com álcool para remoção de poeira, partículas soltas e traços orgânicos, sendo posteriormente deixada para secagem ao ar, enquanto outra foi submetido ao tempo para que ocorresse a corrosão da superfície e outras duas foram submersas em óleo fino e com baixa viscosidade.

Para encontrar a melhor solução foram realizados diferentes testes, Tabela 1, variando o tipo de solvente e o estado de funcionalização do material. Em todos os ensaios, a massa de CNT utilizada foi mantida constante em 0,050 g e o iodeto foi mantido em 0,415 g. O principal objetivo dessa etapa foi identificar o sistema que proporcionasse a melhor homogeneidade da suspensão, condição essencial para a eficiência do processo de deposição eletroforética.

| Teste | Iodeto de potassio (g) | CNT (g) | Solvente (ml) | Tempo |
|-------|------------------------|------------------------------|-------------------------|--------|
| 1 | KI (0,415 g) | Funcionalizado (0,050 g) | Água deionizada (50 ml) | 15 min |
| 2 | KI (0,415 g) | Não funcionalizado (0,050 g) | Água deionizada (50 ml) | 15 min |
| 3 | KI (0,415 g) | Funcionalizado (0,050 g) | Acetona (50 ml) | 15 min |
| 4 | KI (0,415 g) | Não funcionalizado (0,050 g) | Acetona (50 ml) | 15 min |

Tabela 1: Testes de solução.
Fonte: Autor.

A mistura obtida foi submetida a um processo de dispersão em ultrassom por 15 minutos (Figura 8), com o objetivo de promover a dispersão dos nanotubos e garantir uma suspensão homogênea, adequada para o processo de EPD.



Figura 8: Dispersão do CNT.
Fonte: Autor.

A etapa seguinte consistiu na montagem do sistema de deposição eletroforética (EPD), ilustrada na Figura 9. Para isso, duas placas de vidro foram posicionadas dentro de um béquer de 50 mL com uma distância de 30 mm entre eles, servindo como suporte para os eletrodos.



Figura 9: Montagem da EPD.
Fonte: Autor.

Na Figura 10, observa-se a chapa de grafite posicionada, atuando como ânodo (ligada ao fio vermelho, positivo), enquanto o corpo de prova de aço SAE 1020, funcionando como cátodo (ligado ao fio preto, negativo). No interior do béquer, foi adicionada a suspensão previamente preparada contendo os nanotubos de carbono. A fonte de alimentação foi configurada para 30 V durante 3 minutos, completando o circuito entre os dois eletrodos.

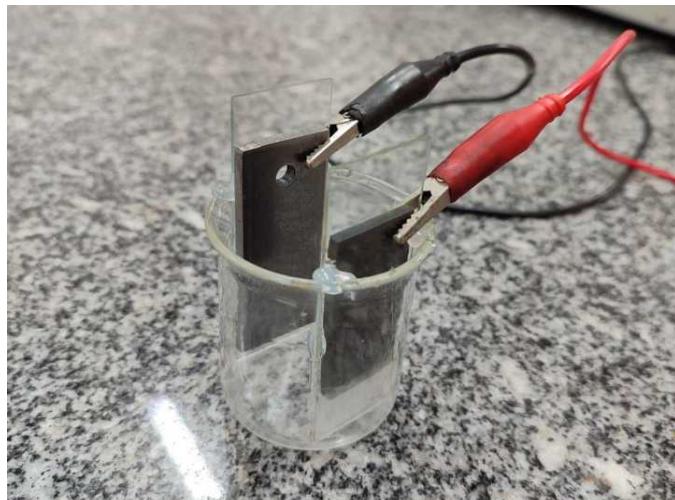


Figura 10: Posição dos cabos.
Fonte: Autor.

As deposições foram realizadas de forma sistemática, assegurando a reprodutibilidade do processo em diferentes tipos de superfícies, tanto limpas quanto contaminadas. A capacidade amostral de distintas interfaces possibilitou a obtenção de resultados variados, refletindo a influência das condições superficiais no desempenho do revestimento.

A fim de verificar a aparência da película formada, utilizou-se um microscópio Fortel, Figura 11, com aproximação de 20x para observar sua morfologia da película formada



Figura 11: Microscópio FORTEL.
Fonte: Autor.

Com o objetivo de avaliar a aderência e a fixação do filme depositado, o corpo de prova revestido foi submetido ao ensaio de adesão por fita adesiva, conforme a norma ASTM D3359. Esse método é amplamente utilizado para verificar a resistência do revestimento à remoção mecânica por tração.

A norma ASTM D3359 descreve dois procedimentos de ensaio, sendo o mais comum o Método B (cross-cut). O procedimento consiste em realizar uma série de cortes paralelos no revestimento utilizando um estilete ou cortador padronizado, seguidos da realização de outra série de cortes perpendiculares, formando uma grade (cross-hatch). Em seguida, aplica-se uma fita adesiva padronizada sobre a área seccionada, pressionando-a de modo uniforme para garantir total contato. A fita é então removida com um movimento rápido e contínuo, formando um ângulo de aproximadamente 180° em relação à superfície (ASTM International, 2017).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do nanotubo de carbono

A caracterização do pó de CNT por Difração de Raios X (DRX), apresentada na Figura 12, evidenciou picos bem definidos em torno de $2\theta = 26^\circ$, 43° , 54° e 78° , correspondentes aos planos cristalográficos (002), (100), (110) e (006), respectivamente.

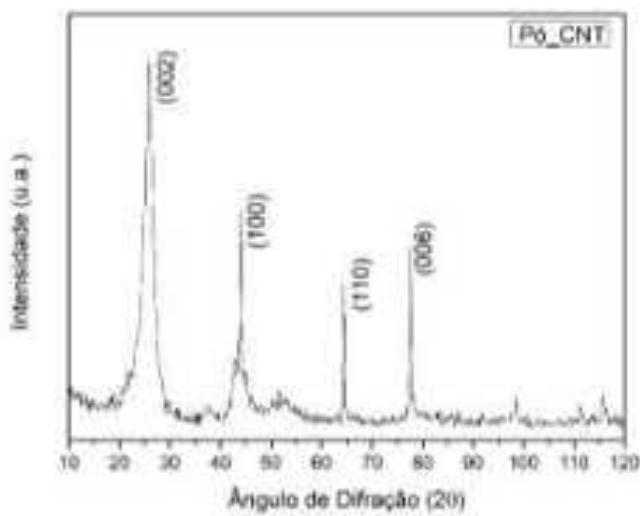


Figura 12: DRX do CNT.
Fonte: Autor.

Esses picos são característicos de materiais à base de grafite e confirmam a presença de uma estrutura cristalina hexagonal bem ordenada, típica dos nanotubos de carbono multicamadas (MWCNTs). A presença do pico intenso em 26° (plano 002) indica a predominância das camadas grafíticas empilhadas, demonstrando um elevado grau de cristalinidade do material.

4.2 Estudo da solução

No primeiro teste, Figura 13, utilizou-se CNT funcionalizado disperso em água deionizada. Observou-se que o material não apresentou uma dispersão homogênea, ocorrendo intensa aglomeração das partículas e decantação após curto período de repouso, indicando baixa compatibilidade entre o CNT funcionalizado e a água deionizada.

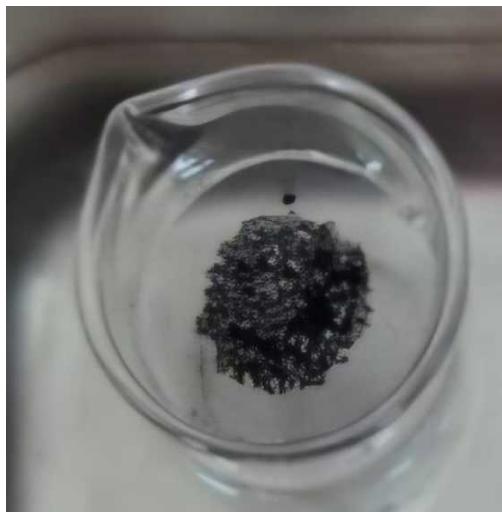


Figura 13: CNT funcionalizado em água deionizada.
Fonte: Autor.

Em seguida, Figura 14, o mesmo procedimento foi repetido empregando CNT não funcionalizado em água deionizada. Nesta condição, foi verificada uma melhora discreta na dispersão, com menor formação de aglomerados, mas ainda sem alcançar a uniformidade desejada.



Figura 14: CNT não funcionalizado em água deionizada.
Fonte: Autor.

Na terceira etapa, Figura 15, o solvente foi substituído por acetona, inicialmente com CNT funcionalizado. A utilização da acetona resultou em uma dispersão mais eficiente em comparação ao meio aquoso, devido à maior compatibilidade entre o solvente orgânico e as superfícies modificadas dos

nanotubos. Entretanto, ainda foram observadas regiões de aglomeração, o que comprometeu parcialmente a estabilidade da suspensão.



Figura 15: CNT funcionalizado em acetona.
Fonte: Autor.

Finalmente, foi realizado o teste com CNT não funcionalizado em acetona, Figura 16 que apresentou os melhores resultados de dispersão dentre todas as combinações avaliadas. A suspensão obtida mostrou-se visualmente mais uniforme e estável, com distribuição mais homogênea das partículas no meio líquido. Essa configuração foi, portanto, selecionada para os experimentos de deposição eletroforética que exige suspensões estáveis para que o filme seja uniforme (Franco, 2009).



Figura 16: CNT não funcionalizado em acetona.
Fonte: Autor.

Para aprimorar a condutividade elétrica da solução e facilitar o transporte de cargas durante o processo de deposição, adicionou-se 0,415 g de iodeto de potássio (KI) à suspensão fina.

4.3 Resultados da deposição

Foram realizadas as deposições em 2 corpos de prova limpos e sem a presença de sujidades (óleo e corrosão), obtendo assim a película do CNT nos corpos de prova (Figura 17).



Figura 17: Corpo de prova com a deposição do CNT.
Fonte: Autor.

Durante o processo de deposição foram utilizados 30 V de tensão e corrente contínua com duração de 3 min, tendo a leitura na fonte da amperagem de 0,8 inicial e 0,64 final, com a solução apresentando levemente a presença de bolhas e sem muita agitação.

Os testes realizados com corpos de prova que apresentavam condições inadequadas, como corrosão (Figura 18) e entranhamento de óleo nos grãos e fissuras (Figura 19), demonstraram que essas contaminações superficiais e internas comprometem a adesão e a eficácia da película protetora.

Assim, constatou-se que, quando o material já se encontra contaminado, a película não consegue aderir corretamente nem garantir a proteção esperada.



Figura 18: Corpo de prova com corrosão.
Fonte: Autor.

Nos 4 corpos de prova com a presença de corrosão houve um início de formação da película, porém ela não apresenta uniformidade e nem aderência na superfície tendo a amperagem inicial de 0,90 e final de 0,74.



Figura 19: Corpo de prova com óleo.
Fonte: Autor.

Nos 4 corpos de prova onde há a presença do óleo a película não consegue aderência no material, durante o processo de deposição o óleo presente nas microfissuras do corpo de prova se liga com os CNTs não os permitindo se juntar e formar a película.

A baixa aderência observada na película de CNT está de acordo com Franco (2009), que destaca que a EPD pode formar depósitos frágeis quando não há interação físico-química adequada entre o material e o substrato.

Durante o processo de deposição com a tensão de 30 V foi analisada a amperagem de 1,06 inicial e 0,84 final para o corpo de prova de cima e 0,68 inicial e 0,50 final para o corpo de prova de baixo.

4.4 Caracterização pós deposição

Utilizando o microscópio FORTEL com uma aproximação de 20x foi possível obter uma imagem da deposição do CNT no corpo de prova como mostrado na Figura 20.



Figura 20: Filme de CNT.
Fonte: Autor.

De acordo com a norma ASTM D3359, realizou-se o ensaio de aderência da película de CNT, conforme apresentado na Figura 21, permitindo avaliar a resistência da deposição.



Figura 21: Ensaio de aderência.
Fonte: Autor.

A aderência do filme de CNT ao substrato mostrou-se insuficiente. Durante a realização do ensaio ASTM D3359 (Método B), grande parte do revestimento se desprendeu, permanecendo adherida à fita utilizada no teste. Como consequência, áreas significativas do corpo de prova ficaram expostas, evidenciando a superfície do aço SAE 1020. Esses resultados indicam que o filme não apresentou fixação adequada ao substrato, revelando baixa resistência à remoção mecânica.

No estudo desenvolvido pela Segat (2024), o material utilizado foi óxido de grafeno (OG) disperso em meio aquoso, o que favorece elevada estabilidade da suspensão devido à presença de grupos oxigenados capazes de manter carga superficial efetiva. Além disso, a pesquisa empregou não apenas a EPD clássica, mas também uma versão modificada utilizando impulsos bipolares de alta tensão, técnica que aprimora a mobilidade eletroforética das partículas, reduz efeitos adversos como eletrólise da água e promove deposições mais densas e aderentes. Como consequência, os filmes formados sobre o substrato de cobre apresentaram boa uniformidade e, principalmente, aderência satisfatória, permitindo o avanço em aplicações funcionais.

Por outro lado, o presente trabalho empregou a deposição de nanotubos de carbono (CNTs) não funcionalizados utilizando suspensão em acetona

acrescida de KI, submetida a ultrassom. Embora a técnica de EPD também tenha produzido películas homogêneas, a ausência de grupos funcionais nos CNTs e a menor afinidade química com o aço SAE 1020 comprometeram a interação entre filme e substrato. Além disso, por ter sido utilizada apenas a configuração convencional da EPD, sem modulação por pulsos ou otimizações adicionais, diferente do estudo da Segat, o processo não foi capaz de gerar ancoragem mecânica ou química suficiente para garantir aderência ao aço, resultando em filmes facilmente destacáveis.

Assim, a comparação evidencia que, embora a EPD seja uma técnica versátil e eficaz, sua aplicabilidade depende fortemente da combinação material, substrato e das condições de deposição. Enquanto o OG apresenta natureza química favorável à ligação com superfícies metálicas e se beneficia de impulsos elétricos modulados, os CNTs não funcionalizados apresentam menor reatividade e exigem tratamentos adicionais, como funcionalização química, ativação superficial do aço ou variações na forma de aplicação do campo elétrico, para alcançar aderência satisfatória. Dessa forma, os resultados reafirmam que a escolha adequada dos parâmetros e do tipo de material é decisiva para o desempenho final de revestimentos obtidos por EPD, especialmente quando destinados à proteção de aços de baixa liga.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar a viabilidade da deposição eletroforética (EPD) na formação de películas de nanotubos de carbono (CNTs) sobre aço SAE 1020, revelando resultados extremamente relevantes para a compreensão das limitações e potencialidades da técnica. A análise das suspensões confirmou que a combinação acetona, CNT não funcionalizado e do KI, submetida ao ultrassom, foi a que apresentou melhor estabilidade e distribuição das partículas, resultando em uma película visualmente homogênea após a deposição.

Entretanto, apesar da elevada qualidade da suspensão e da aparente uniformidade do filme depositado, constatou-se a inexistência de aderência efetiva da película ao substrato de aço SAE 1020, inclusive nas amostras previamente limpas e isentas de quaisquer contaminantes. A ausência de vinculação entre o revestimento e o metal tornou-se evidente durante a manipulação das amostras e nas etapas de avaliação pós-depósito, revelando que, embora os parâmetros empregados tenham sido adequados para a formação do filme, mostraram-se insuficientes para garantir ancoragem mecânica ou estabelecer interação físico-química consistente com a superfície metálica.

Esse comportamento foi ainda mais crítico nas amostras contendo óleo ou corrosão, que impediram completamente qualquer vestígio de interação entre a película e o substrato. Assim, embora a EPD tenha se mostrado eficiente na formação da camada de CNTs, o processo, na configuração aplicada, não foi capaz de garantir aderência ao aço SAE 1020, o que compromete a função protetora proposta.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Recomenda-se que estudos futuros explorem modificações químicas no CNT, tratamentos de ativação do aço e diferentes tensões ou tempos de deposição, além de testes em ambientes corrosivos reais.

6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. D. Estudo da corrosão no aço carbono 1020 protegido com óleo de coco saponificado: análise físico-química do comportamento químico do tensoativo. 2010. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test — ASTM D3359*. West Conshohocken, PA, 2017.

CENTRAL MULTIUSSUÁRIO DF. *Difratometria de Raios X (DRX)*. Disponível em: <https://sites.google.com/view/central-multiusurio-df/solicita%C3%A7%C3%A3o-de-an%C3%A1lises/difratometria-de-raios-x-drx>. Acesso em: 23 set. 2025.

CHANG, K. C. et al. Efeitos sinérgicos da hidrofobicidade e das propriedades de barreira a gases na propriedade anticorrosiva de revestimentos nanocompósitos de PMMA incorporados com nanofolhas de grafeno. *Polymer Chemistry*, v. 5, p. 1049–1056, 2014.

FRANCO, J. R. *Deposição eletroforética de nanotubos de carbono*. Viçosa, 2009. Disponível em: <https://www.posfisicaaplicada.ufv.br/wp-content/uploads/2014/01/2009-Dissertacao-0-02-Juliana.pdf>. Acesso em: 7 maio 2025.

GITHINJI, D. N. Application of advanced techniques for metal identification and characterization. *Advances in Physics Theories and Applications*, v. 47, p. 73–80, 2016.

GOBBO, L. A. Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland. 2009. 273 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociência, São Paulo, 2009.

GOMES, J. F. O microscópio ótico. *Revista da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto*, v. 1, n. 1, p. 55–63, 2005. Disponível em: https://www.fc.up.pt/pessoas/jfgomes/pdf/vol_1_num_1_05_art_microscopioOtico.pdf. Acesso em: 5 dez. 2025.

HERBST, M. H.; MACÊDO, M. I. F.; ROCCO, A. M. Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. *Química Nova*, v. 27, p. 986–992, 2004.

JIAN, M. Q. et al. Challenge and opportunities of carbon nanotubes. In: *Industrial applications of carbon nanotubes*. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 433–476. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323414814000150>. Acesso em: 7 maio 2025.

KINTEK Solution. *FORNO CVD para o crescimento de nanotubos de carbono*. 2023. Disponível em:

<https://pt.kindle-tech.com/articles/cvd-furnace-for-the-growth-of-carbon-nanotubes>. Acesso em: 27 nov. 2025.

KINTEK Solution. *Vantagens e Desvantagens da Deposição Química de Vapor (CVD).* 2024. Disponível em: <https://pt.kindle-tech.com/articles/advantages-and-disadvantages-of-chemical-vapor-deposition-cvd>. Acesso em: 28 nov. 2025.

MACHADO, A. da S.; MEXIAS, A. S; VILELA, A. C. F.; OSÓRIO, E. Quantificação por DRX dos componentes carbonosos presentes no pó de balão do alto-forno. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 8, n. 4, p. 254–260, 2011. DOI: 10.4322/tmm.2011.040. Disponível em: <https://lume.ufrrgs.br/bitstream/handle/10183/217289/000819189.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 nov. 2025.

OLIVEIRA, J. A. M.; DANTAS, D. L.; DE SANTANA, R. A. C. et al. Aspectos teóricos da deposição eletroforética de revestimentos de quitosana. *Educação, Ciência e Saúde*, Cuité, PB, v. 7, n. 2, p. 19, 2020. DOI: 10.20438/ecs.v7i2.286.

OSSILA. *Dip Coating: Practical Guide to Theory and Troubleshooting*. 2025. Disponível em: https://www-ossila-com.translate.goog/pages/dip-coating?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc. Acesso em: 28 nov. 2025.

PAINEL CONSTRU. Aço 1020. Disponível em: <https://www.painelconstru.com.br/product/detail/1605>. Acesso em: 17 nov. 2025.

RODRIGUES, F. A. dos S. Incorporação de nanotubos de carbono em superfície de ligas de alumínio A6101 trefilado. 2015. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SANTOS, T. F. A. et al. Caracterização microestrutural de aços baixo carbono por microscopia de força atômica. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, v. 35, n. 1, p. 118–133, jun. 2015.

SCIENCE DIRECT. *Electrophoretic deposition*. In: Topics — Materials Science. [S.I.]: ScienceDirect, 2022.

SEGAT, B. *Deposição de óxido de grafeno em cobre via deposição eletroforética clássica e modificada com impulsos bipolares de alta tensão*. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2024.

SILVA JUNIOR, G. Estudo da influência do processo ECAP (Equal Channel Angular Pressing) nas propriedades mecânicas e características microestruturais do aço SAE 1020. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SOUZA FILHO, A. G. de; FAGAN, S. B. Funcionalização de nanotubos de carbono. *Química Nova*, v. 30, p. 1695–1703, 2007.

SYDUZZAMAN, M. et al. Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry. *Results in Materials*, v. 25, p. 100654, 2025.

WATERS, B. W.; TATUM, J. M.; HUNG, Y. C. Effect of chlorine-based sanitizers properties on corrosion of metals commonly found in food processing environment. *Journal of Food Engineering*, v. 121, p. 159–165, jan. 2014.

XAVIER, Chubraider. Instituto de Química – Câmpus de Araraquara. Disponível em: <https://www.iq.unesp.br/#!lacaque/difracao-de-raios-x/apresentacao/>. Acesso em: 23 set. 2025.

ZICA, A. S. *Electrochemical exfoliation, electrophoretic deposition and characterization of graphite oxide nanosheets*. 2013. 50 f. Dissertação (Mestrado em Física Teórica e Computacional; Preparação e Caracterização de Materiais; Sensores e Dispositivos) – Universidade Federal de Viçosa, 2013.