

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

IGOR GABRIEL DOS SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À OXIDAÇÃO DO AÇO 1045
LAMINADO A QUENTE TRATADO POR NITRETAÇÃO POR PLASMA E
REVESTIMENTO DE CROMO DURO

Joinville

2025

IGOR GABRIEL DOS SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À OXIDAÇÃO DO AÇO 1045
LAMINADO A QUENTE TRATADO POR NITRETAÇÃO POR PLASMA E
REVESTIMENTO DE CROMO DURO

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Viviane Lilian Soethe Parucker

Joinville

2025

IGOR GABRIEL DOS SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À OXIDAÇÃO DO AÇO 1045
LAMINADO A QUENTE TRATADO POR NITRETAÇÃO POR PLASMA E
REVESTIMENTO DE CROMO DURO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 28 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Viviane Lilian Soethe Parucker

Data: 26/02/2026 15:31:44-0300

CPF: ***.198.779.**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dra. Viviane Lilian Soethe Parucker
Orientadora/Presidente

Dr. Moisés Luiz Parucker
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Rafael Gallina Delatorre
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo apresentar uma análise comparativa da resistência à oxidação do aço SAE 1045 laminado a quente submetido a dois diferentes tratamentos superficiais: eletrodeposição de cromo duro e nitretação por plasma, ambos processos que visam o ganho de resistência à fadiga e à corrosão do material base. O objetivo principal foi avaliar a viabilidade de substituição do revestimento de cromo duro – processo amplamente utilizado na indústria, porém associado a riscos ambientais e ocupacionais – pela nitretação por plasma, considerando especificamente o desempenho frente à corrosão. As amostras revestidas com cromo duro receberam uma camada eletrodepositada com espessura média de 25 μm . 4 processos de nitretação com parâmetros diferentes foram realizados, com temperaturas de tratamento entre 500-520°C e tempo entre 8-16 horas. Camadas de óxido formadas, após o processo de nitretação, através de oxidação por plasma e oxidação ao ar também foram analisadas. Corpos de prova tratados foram submetidos a ensaios de corrosão em câmara de névoa salina, conforme metodologia padronizada. A quantificação da degradação superficial foi realizada por meio de análise de imagens no software Fiji, utilizando limiarização por cor para distinguir as regiões oxidadas das não afetadas e determinar o percentual total de área corroída. Esses percentuais também foram empregados para a classificação das amostras segundo a norma ISO 10289. Os resultados mostraram que, para os parâmetros de tratamento avaliados, o revestimento de cromo duro apresentou desempenho superior, atingindo 13% de área corroída após 312 horas de ensaio em névoa salina. Em contraste, a amostra nitretada com melhor comportamento frente à corrosão apresentou 65,1% da superfície degradada no mesmo intervalo de tempo. Assim, nas condições analisadas, a nitretação por plasma não apresentou resistência à oxidação equivalente à do cromo duro, não permitindo sua substituição direta exclusivamente sob o critério de resistência à corrosão.

Palavras-chave: nitretação; cromo; resistência à corrosão; névoa salina; limiarização por cor.

ABSTRACT

This work aimed to present a comparative analysis of the oxidation resistance of hot-rolled SAE 1045 steel subjected to two different surface treatments: hard chrome electroplating and plasma nitriding, both processes intended to improve the fatigue and corrosion resistance of the base material. The main objective was to evaluate the feasibility of replacing hard chrome coating – a process widely used in industry but associated with environmental and occupational risk – with plasma nitriding, considering specifically its corrosion performance. The samples coated with hard chrome received an electroplated layer with an average thickness of 25 μm . Four plasma nitriding processes with different parameters were carried out, with treatment temperatures between 500 and 520°C and durations ranging from 8 to 16 hours. Oxide layers formed after the nitriding process, through plasma oxidation and air oxidation were also analyzed. Treated specimens were subjected to corrosion tests in a salt spray chamber, following standardized methodology. Surface degradation was quantified through image analysis in the Fiji software, using color thresholding to distinguish oxidized from unaffected regions and determine the total percentage of corroded area. These percentages were also used to classify the samples according to ISO 10289. The results showed that, for treatment parameters evaluated, the hard chrome coating exhibited superior performance, reaching 13% corroded area after 312 hours of salt spray exposure. In contrast, the plasma nitride sample with the best corrosion behavior showed 65.1% surface degradation over the same period. Thus, under the conditions analyzed, plasma nitriding did not demonstrate oxidation resistance equivalent to that of hard chrome, preventing its direct substitution based solely on corrosion resistance criteria.

Keywords: nitriding; chrome; corrosion resistance; salt spray; color thresholding.

Dedico este trabalho à minha família.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do processo de eletrodeposição de cromo	10
Figura 2 - Desenho esquemático do sistema de implantação e difusão de íons de nitrogênio em uma superfície metálica durante o processo de nitretação a plasma	15
Figura 3 – Efeito luminescente característico de um processo de nitretação por plasma	16
Figura 4 - Diagrama de equilíbrio de fases Fe-O	19
Figura 5 – Fluxograma evidenciando as etapas do estudo realizado	22
Figura 6 - Corpos de prova	23
Figura 7 - Representação esquemática do processo de nitretação por plasma com pós oxidação por plasma	26
Figura 8 - Ilustração dos cortes realizados nas amostras	27
Figura 9 - Imagem ilustrativa do perfil zig-zag utilizado para avaliação de microdureza e camada nitretada	29
Figura 10 - Da esquerda para a direita, indentação com 0,5kgf e 0,3kfg respectivamente	29
Figura 11 – Camada eletrodepositada de cromo duro	35
Figura 12 - Microdureza transversal de todas as amostras nitretadas	36
Figura 13 - Camada total formada pelo processo de nitretação por plasma	37
Figura 14 - Comparação entre espessura de camada branca e microdureza superficial nas amostras nitretadas	38
Figura 15 - Porosidade na camada branca da amostra 2	39
Figura 16 - Camadas formadas pelo processo de nitretação em visualização no microscópio eletrônico de varredura com ampliação de 2000x	40
Figura 17 - MEV da camada de cromo duro eletrodepositada, evidenciando as trincas inerentes ao processo	41
Figura 18 - Localização dos pontos analisados por EDS na amostra 4	42
Figura 19 - Espectro de EDS da camada pós oxidada a plasma - amostra 4	42
Figura 20 - Espectro de EDS da camada branca presente na amostra 0	43
Figura 21 - Composição química das camadas, obtidas por técnica de EDS	44
Figura 22 - Imagens das amostras após imersão em névoa salina	45
Figura 23 - Área da superfície corroída selecionada através do espectro RGB	47

Figura 24 - Classificação de corrosão em acordo com a ISO 10289	49
Figura 25 - Percentual de área oxidada de acordo com o período de exposição.....	49
Figura 26 - Comparação do percentual de área oxidada entre amostra sem tratamento e amostra nitretada com processo de pós oxidação a plasma.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da superfície corroída em função da Norma ISO 10289 ...	31
Tabela 2 – Valores de Ra obtidos para as 3 amostras sem tratamento analisadas..	34
Tabela 3 – Dados de microdureza e espessura de camada das amostras aqui analisadas	36
Tabela 4 – Percentual em peso e átomos dos componentes encontrados por meio do EDS na camada oxidada a plasma	42
Tabela 5 – Percentual em peso e átomos dos componentes encontrados por meio do EDS na camada branca da amostra 0	43
Tabela 6 – Percentual de área oxidada de acordo com o período de exposição	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DIN – Deutsches Institut für Normung

EDS – Energy Dispersive Spectroscopy

IARC - International Agency for Research on Cancer

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

SAE – Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	5
1.1. OBJETIVOS	6
1.1.1. Objetivo Geral.....	6
1.1.2. Objetivos Específicos	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. CORROSÃO	8
2.2. ELETRODEPOSIÇÃO DE CROMO DURO.....	9
2.3. NITRETAÇÃO	13
2.3.1. Oxidação	18
<u>2.3.1.1 Oxidação a plasma.....</u>	<u>20</u>
3. METODOLOGIA	21
3.1. CORPOS DE PROVA	22
3.2. REVESTIMENTO DE CROMO DURO	23
3.3. NITRETAÇÃO POR PLASMA	24
3.3.1. Processo “2” (A2).....	25
3.3.3. Processo “3” (A3).....	25
3.3.4. Processo “4” (A4).....	25
3.3.5. Processo “5” (A5).....	26
3.4. METALOGRAFIA	26
3.4.1. Preparação.....	27
3.4.2. Análises.....	28
<u>3.4.2.1. Microdureza.....</u>	<u>28</u>
<u>3.4.2.2. Microscopia eletrônica de varredura</u>	<u>30</u>
<u>3.4.2.3. Tratamento de imagem para caracterização de corrosão</u>	<u>30</u>
<u>3.4.2.4. Perfilometria</u>	<u>32</u>
3.5. TESTE EM NÉVOA SALINA	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. PERFILOMETRIA	34
4.2. PERFIL DE MICRODUREZA	34
4.3. Microscopia eletrônica de varredura	38
4.4. Espectroscopia de energia dispersiva de raios x (EDS).....	41

4.5. PERCENTUAL DE ÓXIDO – TRATAMENTO DE IMAGEM.....	44
5. CONCLUSÃO	52
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Os aços carbono apresentam ampla aplicação na indústria devido ao seu baixo custo e boa resposta a tratamentos térmicos, podendo ser classificados conforme seu teor de carbono, sendo o aço SAE 1045, contendo 0,45% de carbono em massa em sua composição química, um representante típico dos aços médio carbono (VALE, 2011). Esse material destaca-se por oferecer um balanço adequado entre resistência mecânica, ductilidade e usinabilidade, o que o torna amplamente empregado em componentes submetidos a esforços moderados, tais como eixos, pinos, engrenagens, cilindros hidráulicos e diversos elementos de máquinas (BIGUETTI et al., 2019). Além disso, sua capacidade de ter propriedades aprimoradas por tratamentos térmicos, aliada à boa disponibilidade comercial, contribui para sua utilização em diferentes setores industriais (ARCELORMITTAL, 2017).

A vida útil de componentes metálicos utilizados na indústria metalmeccânica, por vezes, depende diretamente da condição de sua superfície. O desgaste superficial e a corrosão do material utilizado são fatores de grande importância na decisão sobre qual material utilizar e até mesmo a necessidade, ou não, de algum tratamento superficial para melhorar suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.

Dentre os diversos processos utilizados na indústria metalúrgica para tratamentos superficiais pode-se citar o processo de eletrodeposição de cromo duro, que se caracteriza por criar camadas de cromo suficientemente espessas sobre o substrato, a ponto de promover uma superfície final com elevada dureza, resistência ao desgaste e à corrosão (MATOS, 2016). Tal processo consiste em um banho eletrolítico dos componentes em uma solução que contenha íons de cromo hexavalente, Cr^{6+} (SOLTANIEH et al., 2012).

Apesar de seu uso comum, o cromo hexavalente é considerado pela agência internacional de pesquisa em câncer (IARC) como uma substância cancerígena pertencente ao grupo 1. Grupo este destinado aos agentes que possuem claras evidências quanto a sua capacidade de causar câncer em seres humanos (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 2016).

A exposição a este elemento, tanto em sua forma gasosa quanto em sua forma líquida, está presente ao operador no processo de eletrodeposição de cromo. Seja dérmico ou por inalação, o contato com o cromo hexavalente deve ser evitado.

De maneira distinta, mas também conferindo melhorias simultâneas nas propriedades mecânicas e na resistência à corrosão, a nitretação por plasma, também conhecida como nitretação iônica, é um processo que não produz gases tóxicos, bem como não gera resíduos danosos aos seres humanos e/ou ao meio ambiente. É um tratamento termoquímico em metais capaz de elevar a dureza superficial do metal base, bem como criar uma camada capaz de melhorar sua proteção quanto à oxidação e ao desgaste (RIOFANO, 1997).

Tendo em vista os benefícios de ambos os tratamentos, no presente trabalho avaliou-se a resistência à corrosão, através de ensaios em névoa salina, do aço SAE 1045 nitretado e com camadas espessas de cromo duro, aferindo a viabilidade de troca do tratamento contendo cromo hexavalente, visando evitar a exposição a este agente cancerígeno em componentes que necessitam elevada resistência à oxidação (NAEEM et al. 2022).

1.1. OBJETIVOS

Para aferir a viabilidade da nitretação como substituição ao revestimento de cromo duro como agente de redução de processos de oxidação em aços 1045, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a resistência à corrosão de amostras de aço carbono SAE 1045 nitretados por plasma e com revestimento realizado por eletrodeposição de cromo.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a microestrutura das camadas formadas pela nitretação por plasma e com revestimento de cromo duro, identificando a composição, espessura e morfologia das camadas composta e de difusão;
- Examinar a corrosão acelerada em teste de névoa salina em amostras nitretadas por plasma e com revestimento de cromo duro;

- Comparar de forma quantitativa a oxidação entre amostras nitretadas por plasma e com revestimento de cromo duro obtidos por processos de eletrodeposição;
- Avaliar a possibilidade de substituição do revestimento de cromo duro pela nitretação a plasma em aços baixa liga com ênfase na proteção contra corrosão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados e revisados conceitos necessários ao entendimento dos processos de nitretação por plasma e eletrodeposição de cromo, bem como fundamentação para realização do ensaio em névoa salina.

2.1. CORROSÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO, 2019), estima-se que danos causados pela corrosão, considerando-se todos os setores produtivos do Brasil, sejam em torno de 3,5% a 4% do produto interno bruto (PIB) anual. Tal impacto financeiro é elevado, representando bilhões de reais ao longo de cada ciclo econômico e evidencia que os processos de corrosão vão muito além de simples degradação superficial: implicam em substituição de componentes metálicos, serviços de manutenção, falhas estruturais, perdas operacionais e riscos à segurança (ABRACO, 2019).

Diante disso, o emprego de tratamentos de superfície e práticas de proteção anticorrosiva torna-se não apenas aconselhável, mas essencial para reduzir consideravelmente custos. Estima-se que parte significativa das perdas, até 30% dos custos totais segundo avaliações da própria ABRACO, poderia ser evitada com a adoção adequada de métodos de mitigação desde a fase de projeto até a manutenção.

O termo corrosão, em metais, está atrelado a deterioração de um material devido a ações químicas e/ou eletrolíticas do meio em que o material se encontra, podendo ou não estar associada a esforços mecânicos. Tal deterioração provocada por essa interação trás efeitos indesejados ao aço, causando perda de massa, variações químicas ou até mesmo modificações estruturais, podendo tornar o componente inadequado para seu uso (GENTIL, 1996).

A corrosão é um processo espontâneo e inevitável, cuja intensidade depende das condições ambientais em que o elemento está exposto e da composição química do aço. Na ausência de mecanismos de proteção, como revestimentos orgânicos ou tratamentos térmicos que formam barreiras protetoras, a degradação progressiva do

metal levaria, com o tempo, à completa perda de suas propriedades mecânicas originais (GENTIL, 1996).

Todos os metais estão sujeitos ao ataque corrosivo se o meio for suficientemente agressivo. O quantitativo desse ataque pode ser relacionado ao potencial eletroquímico do componente, sendo esse a sua tendência a sofrer reações de oxirredução e, em especial, sua tendência de perder elétrons e se oxidar, formando assim íons metálicos (MIAO et al., 2019). Aços carbono baixa liga estão entre os metais com maior potencial de oxidação, o que pode vir a se traduzir como um dos metais com maior facilidade de sofrer corrosão e, portanto, a utilização de uma interface protetora é de extrema utilidade para prolongamento da vida útil de produtos confeccionados com esse material.

Nesse contexto, a nitretação por plasma tem se destacado como uma técnica eficiente para retardar a corrosão em aços carbono. O processo promove a formação de uma camada composta, constituída principalmente por nitretos de ferro das fases ϵ -Fe₂₋₃N (fase épsilon) e γ' -Fe₄N (fase gama linha), que atuam como uma barreira física ao transporte de íons agressivos e como superfície quimicamente mais estável que o ferro α -Fe. Essa barreira reduz a taxa de reações anódicas iniciais e limita a difusão de espécies oxidantes em direção ao substrato (SUN, 2012; BELL, 2005).

Além disso, estudos recentes têm demonstrado que a nitretação por plasma, quando associada à pós oxidação, que cria uma camada de óxido, com a formação predominante da fase magnetita (Fe₃O₄) proporciona melhorias ainda mais expressivas na resistência à corrosão, devido à sua característica densa capaz de selar porosidades superficiais da camada nitretada (ROVANI et al., 2011; NAEEM et al., 2022). Para o aço 1045 especificamente, Noronha et al. (2024) demonstra que tratamentos que combinam nitretação e oxidação por plasma resultam em redução significativa da taxa de corrosão do material base.

2.2. ELETRODEPOSIÇÃO DE CROMO DURO

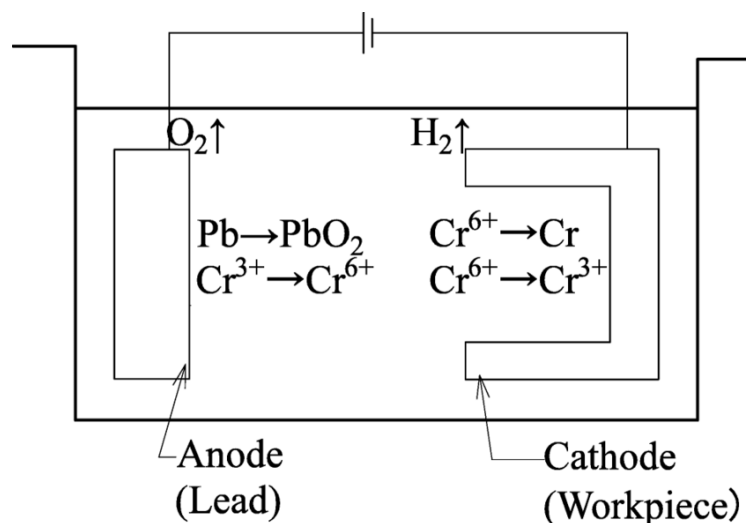
De acordo com Mandich et al. (2010), a eletrodeposição de cromo pode ser dividida em duas categorias, sendo elas decorativa ou o chamado “cromo duro”, de uso industrial e com elevado ganho de propriedades mecânicas e resistência à corrosão do componente sob tratamento. Para fins decorativos, geralmente são

depositadas camadas de cromo inferiores à $0,8\mu\text{m}$, com um efeito superficial liso e brilhante, sendo esteticamente atraente para muitas aplicações, além de proporcionar um aumento moderado da resistência à corrosão superficial (MANDICH et al., 2010)

Já o termo cromo duro refere-se à utilização de camadas eletrodepositadas com espessuras superiores a $0,8\mu\text{m}$, fornecendo propriedades funcionais mais robustas. A maior espessura do revestimento permite explorar de forma mais efetiva as propriedades intrínsecas do cromo metálico, como elevada resistência ao desgaste, maior dureza superficial, proteção contra oxidação, redução de rugosidade e aumento da resistência à fadiga do material (MANDICH et al., 2010). Esse revestimento com aplicabilidade industrial conta ainda com mecanismos mais agressivos e controlados (densidade de corrente e controle térmico, por exemplo) (ALMOTAIRI et al., 2019).

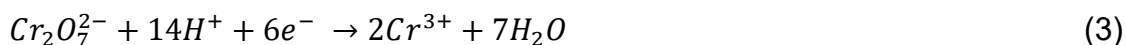
O processo mais utilizado na indústria para obtenção de camadas de cromo duro emprega soluções eletrolíticas geralmente compostas por ácido crômico (H_2CrO_4) como principal agente, acompanhada de um catalisador, comumente o ácido sulfúrico (H_2SO_4), para facilitar a reação. A peça a receber revestimento é imersa na solução e se comporta como o cátodo da reação, enquanto um componente (comumente em formato de placa ou cilindro) constituído de chumbo metálico ou ligas de chumbo se comporta como o ânodo. A Figura 1 representa um modelo esquemático de um do processo utilizado para eletrodeposição de cromo (Ishizuka et al., 2020).

Figura 1 – Representação esquemática do processo de eletrodeposição de cromo



Fonte: Ishizuka et al. (2020, p.1769).

As equações (1), (2) e (3), apresentadas por Watanabe (1999, p. 150) apud Ishizuka, (2020, p.1769) elucidam a reação eletrolítica, na qual os íons metálicos reduzidos de cromo são depositados na superfície da peça de interesse.



As equações que descrevem o processo de eletrodeposição evidenciam que o mesmo ocorre em forte competição com a reação paralela de desprendimento de hidrogênio. De acordo com Dini (1993), a elevada sobretensão necessária para a redução dos íons de cromo favorece a evolução de hidrogênio no cátodo, resultando em significativa incorporação e liberação desse hidrogênio dentro do depósito.

Esse fenômeno é um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento de tensões internas no revestimento, que, durante o crescimento do filme, contribuem diretamente para a formação da microestrutura característica do cromo duro. Assim, essas discordâncias do revestimento não são apenas uma consequência do processo eletroquímico, mas também uma resposta às tensões induzidas pelo hidrogênio durante a deposição (DINI, 1993).

No que tange à proteção contra oxidação do substrato, a camada de cromo eletrodepositada possui dois mecanismos principais capazes de barrar a formação indesejada de óxido de ferro:

- A camada contínua e homogênea atua como uma barreira física, impedindo o contato direto de oxigênio e eletrolíticos com o aço base;
- A superfície de cromo tende a formar filmes de óxido estáveis (como por exemplo Cr_2O_3) que atuam passivamente e reduzem a difusão de espécies corrosivas.

Entretanto, intrínseco ao processo de eletrodeposição, microfissuras e poros podem ser encontrados ao longo da camada adicionada, o que pode permitir corrosão localizada do componente tratado. Os parâmetros utilizados de solução, temperatura e corrente interferem diretamente na formação dessas discordâncias e podem ser minimizadas ou maximizadas a depender do controle do processo (JONES, 1989).

Para aplicações industriais como hastes e cilindros hidráulicos, o cromo duro é tradicionalmente aplicado em espessuras significativamente superiores às

encontradas em revestimentos decorativos. Segundo Dini (1993) e Safranek (1986), revestimentos utilizados em componentes submetidos a solicitações mecânicas severas variam tipicamente entre 20 μm e 500 μm , dependendo da função do componente, do regime de desgaste e das exigências de resistência à corrosão. Em hastes hidráulicas, espessuras entre 25 μm e 100 μm são frequentemente utilizadas para reduzir atrito e desgaste por abrasão, enquanto componentes sujeitos à esforços mais intensos podem receber camadas acima de 200 μm , assegurando maior durabilidade em ambientes agressivos, especialmente quando associados a meios contaminados ou exposição constante a intempéries.

A eficiência da camada de cromo está diretamente relacionada ao preparo da superfície do substrato. Matos (2016) relata que diversos defeitos na camada eletrodepositada podem estar atrelados ao preparo deficiente do substrato na qual, para uma adesão satisfatória e uma camada contínua e homogênea, a superfície a receber a cromagem deve ser uniforme e não apresentar defeitos mecânicos como riscos e trincas.

Matos (2016) demonstrou ainda que quanto menor a rugosidade de superfície, melhor a adesão da camada eletrodepositada, garantindo assim uma melhor resistência à corrosão em ensaios de névoa salina. Amostras de aço SAE 1045 com revestimento de cromo duro e superfície polida (rugosidade R_a de 0,014 μm) alcançaram 192 horas antes de apresentaram corrosão quando expostos à atmosfera corrosiva. Valor esse superior às 48 horas alcançadas por amostras com superfície lixadas com lixa de granulometria 600 e rugosidade R_a de 0,123 μm .

Valores de rugosidade R_a inferiores a 1,0 μm na superfície da camisa (corpo) de cilindros hidráulicos é comumente atingida através de um processo de brunimento no componente, usualmente fabricado em aço SAE 1045. Tal rugosidade se faz necessária para uma boa adesão da camada de cromo duro a ser eletrodepositada na superfície da camisa (CASTRO, 2012; LINSINGEN, 2008).

Tais literaturas demonstram a necessidade de um controle adequado da superfície antes do processo de eletrodeposição para que se atinja um tratamento de superfície capaz de entregar os ganhos de resistência esperados. O presente trabalho optou pela realização de um polimento superficial de todas as amostras aqui tratadas para garantir, não só corpos de prova com superfícies condizentes às encontradas nos componentes utilizados na indústria, mas também assegurar características homogêneas e padronizadas entre todas as amostras.

2.3. NITRETAÇÃO

O termo nitretação refere-se a um processo termoquímico de endurecimento superficial que consiste no favorecimento a ligações de átomos de nitrogênio com os elementos de liga e átomos de ferro presentes no material base, provocando assim distorções no reticulado cristalino e consequente endurecimento da superfície (FERREIRA, 2001), podendo ser dividida em nitretação gasosa, líquida e por plasma, sendo essa a técnica estudada no presente trabalho.

A nitretação por plasma é um processo que permite o endurecimento superficial de materiais provocando mínimas distorções dimensionais ao componente em tratamento e não gera resíduos, sendo amplamente empregada na indústria metalmeccânica (PARANAIBA, 2017). Tais características são vantajosas frente as técnicas de deposição de cromo na superfície dos materiais e abrem espaço para um estudo de comparação entre ambos os tratamentos.

No processo de nitretação por plasma, a depender dos resultados esperados, diferentes parâmetros podem ser utilizados com variações nos equipamentos que o compõe. Tais equipamentos podem ser divididos em subcategorias como:

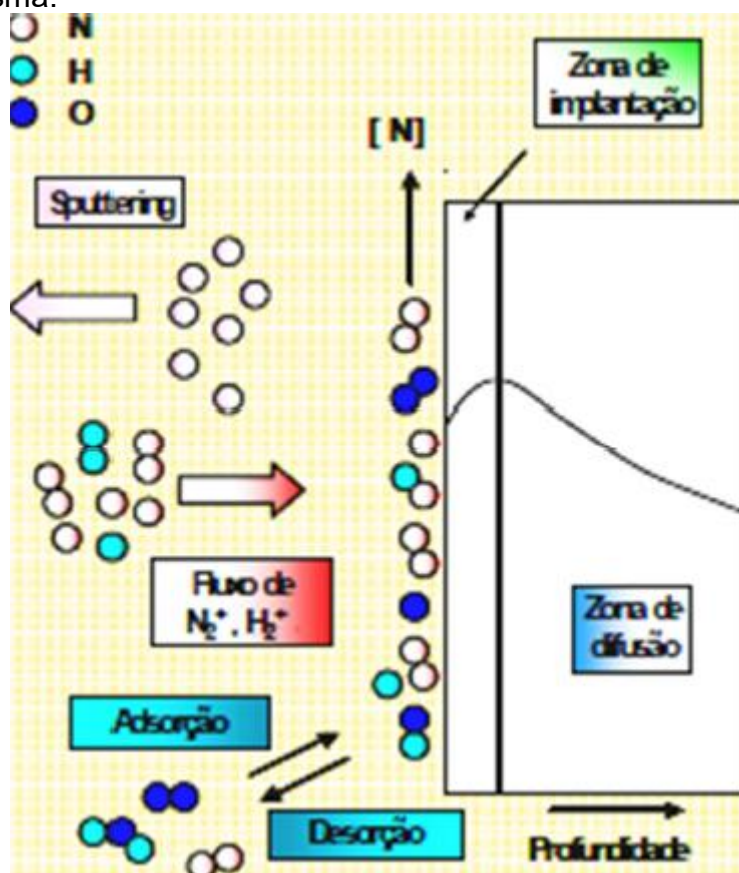
- Forno de parede quente x Forno de parede fria: A nitretação iônica comumente ocorre com temperaturas entre 350~550°C a depender, dentre outros aspectos, do material a ser tratado. Para tal, em fornos de parede fria, o plasma é o único responsável pela elevação de temperatura. Componentes de grande volume, fontes de tensão com baixa diferença de potencial relativa ou tempo total de tratamento são fatores que podem trazer a necessidade de um aquecimento externo, além daquele provocado pelo plasma. Nesses casos, resistências podem ser incorporadas à parede da câmara (forno de parede quente) auxiliando no aquecimento.
- Tensão pulsada x Tensão contínua: a utilização de tensão contínua acarreta na formação de um plasma uniforme e estável no decorrer de todo o processo, além de exigir controle de processo menos complexos se comparados com o processo de tensão pulsada. Todavia, possui limitações quanto ao formato dos componentes, visto que peças com pontas salientes ou furos com diâmetro muito inferior ao seu comprimento, por exemplo, podem acarretar na formação de arcos elétricos, capazes de elevar a temperatura além do desejado nessas regiões e assim criando, dentre

outros problemas, não uniformidade na camada nitretada (MATTOX, 2010). Já a utilização de tensão pulsada, que consiste na oscilação da diferença de potencial gerada em intervalos previamente determinados, proporciona um maior controle sobre o plasma e assim evita a formação de arcos elétricos.

O sistema de nitretação consiste de um eletrodo, um contra-eletrodo e uma atmosfera gasosa que atua como o meio condutor de eletricidade entre eles. Uma fonte de tensão induz um campo elétrico entre o cátodo (formado pelas peças a serem nitretadas) e o ânodo (câmara). Sob tais condições, a mistura gasosa, usualmente composta por hidrogênio e nitrogênio, torna-se parcialmente ionizada, originando o plasma (ALVES JUNIOR, 2001).

A formação do plasma ocorre quando a diferença de potencial aplicada é suficientemente grande a ponto de acelerar elétrons livres presentes no gás. Esses elétrons, ao colidirem com moléculas neutras de nitrogênio e hidrogênio, promovem reações de ionização e dissociação, produzindo íons positivos, átomos excitados e novos elétrons (ALVES JUNIOR, 2001). Esses impactos estabelecem uma reação em cadeia que mantém o estado ionizado da mistura gasosa. A Figura 2 ilustra os fenômenos físicos e químicos que ocorrem no processo de nitretação, desde o plasma até a difusão do nitrogênio no aço.

Figura 2 - Desenho esquemático do sistema de implantação e difusão de íons de nitrogênio em uma superfície metálica durante o processo de nitretação por plasma.



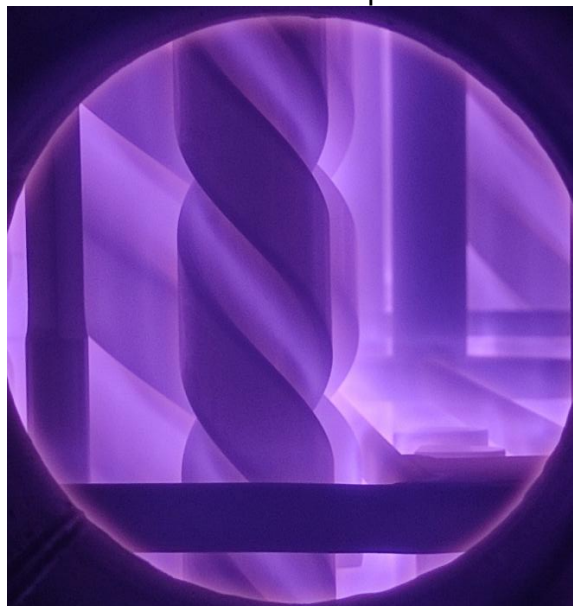
Fonte: FIGUEROA, 2004.

O hidrogênio exerce papel fundamental tanto na manutenção do plasma quanto na preparação superficial do material. Ele atua como agente redutor, removendo óxidos da superfície do aço e também aumentando a concentração de elétrons livres, o que estabiliza a descarga elétrica e contribui para a uniformidade do plasma.

Durante o processo, uma bomba de vácuo reduz a pressão interna da câmara, aumentando o caminho livre médio das partículas carregadas. Com isso, os íons positivos do plasma são acelerados em direção à superfície catódica com alta energia, promovendo um bombardeamento iônico da mesma, responsável não só por elevar a temperatura, mas também por promover a difusão dos átomos de nitrogênio na superfície do material a ser tratado (SPRINGER; ROLINSKI, 2023).

A colisão dos íons de nitrogênio (N^+) com a superfície do substrato, carregada negativamente, bem como o retorno dos átomos a seus estados fundamentais são, dentre outras, causas do efeito luminescente característico da nitretação iônica e pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Efeito luminescente característico de um processo de nitretação por plasma



Fonte: Autor (2025).

Um efeito inerente ao processo de nitretação são as colisões dos íons com a superfície, que são acelerados pelo campo elétrico gerado entre os eletrodos. Efeito esse que recebe o nome de sputtering e possui um papel crucial não só na nitretação em si, como também em um processo de preparação e limpeza da superfície a ser tratada.

Este bombardeamento de íons é capaz de quebrar ligações atômicas superficiais do substrato, bem como ejetar partículas de impureza (óxidos indesejados, contaminantes) que possam estar presentes. Portanto, uma fase de limpeza pode ser adicionada anteriormente à fase de nitretação com a utilização, por exemplo, do gás argônio que, por possuir uma elevada massa molecular, quando acelerado carrega consigo energia suficiente para realizar uma limpeza profunda do substrato, eliminando possíveis contaminantes que se não eliminados podem acarretar em descontinuidades e contaminação da camada nitretada (CHAPMAN, 1980).

Os íons de nitrogênio acelerados em direção da superfície do componente tratado podem colidir com o cátodo e retornar ao plasma ou ainda criar ligações instáveis com íons na superfície do material, do tipo FeN e que podem posteriormente ser recombinados para formação de nitretos mais estáveis. Dessas recombinações,

um excesso de nitrogênio se aglomera na superfície do componente e que difunde para dentro da peça (ALVES, 2001).

O efeito da nitretação iônica pode ser dividido pela formação de duas camadas distintas: uma camada chamada de composta, ou camada branca, e a outra denominada camada de difusão. A camada de difusão, que recebe o nome justamente por ser derivada do processo de difusão do nitrogênio em direção ao interior do cátodo, é formada principalmente por átomos de nitrogênio intersticiais à rede cristalina, dificultando o movimento das discordâncias e causando distorção da mesma. O resultado é um aumento substancial de dureza. Uma quantidade reduzida de precipitados de nitrogênio também é esperada nessa região (ALVES, 2001).

Já a camada branca surge devido à saturação de átomos de nitrogênio ofertados acima da capacidade da superfície de adsorvê-los, o que acarreta na formação de nitretos que se unem à superfície do material, formando a camada composta. As fases γ' -Fe₄N, de estrutura cúbica de face centrada, e ϵ -Fe₂₋₃N, de estrutura hexagonal, são as fases que comumente constituem essa camada (CAIXETA, 2017).

A composição dessas camadas confere um ganho de resistência tanto ao desgaste quanto à corrosão. Características como tempo de processamento, temperatura, questões ambientais e de saúde tornam a nitretação por plasma um tratamento competitivo e com diversas vantagens frente a outros processos.

De acordo com Alves (2001), uma camada composta predominantemente pela fase ϵ apresenta desempenho superior em termos de resistência à corrosão e ao desgaste quando comparada a uma camada constituída majoritariamente pela fase γ' . Esse comportamento está associado à maior estabilidade química e à estrutura cristalina mais compacta da fase ϵ , que atua como uma barreira mais eficiente à difusão de espécies corrosivas, além de conferir elevada dureza superficial ao material.

Essas características tornam a formação de camadas ricas em fase ϵ particularmente atrativas para componentes que requerem elevada resistência ao desgaste, bem como alta dureza superficial, desde que não estejam submetidos a solicitações cíclicas significativas. Entretanto, a presença predominante dessa fase pode ser indesejável em aplicações que envolvem esforços de fadiga, uma vez que a elevada fragilidade da camada composta rica em ϵ favorece a nucleação e a propagação de trincas superficiais.

Além disso, conforme discutido por Liedtke (2005), camadas compostas essencialmente pela fase ϵ apresentam limitações quanto à aderência de revestimentos depositados posteriormente por técnicas físicas, como a deposição física de vapor (*physical vapor deposition* – PVD). Tal comportamento é atribuído à elevada porosidade, à presença de tensões residuais compressivas elevadas e à reduzida capacidade de ancoragem mecânica da fase ϵ , fatores que comprometem a adesão e a integridade do revestimento aplicado.

Rastkar et al. (2011) demonstraram ganhos elevados de resistência ao desgaste do aço AISI 1045 nitretados a plasma, encontrando resultados variados conforme diferenciação de parâmetros de processo, atingindo uma redução da taxa de desgaste de até 20 vezes em relação ao aço sem tratamento, utilizando parâmetros de 550°C para temperatura, 4 horas de processo e mistura $N_2:H_2$ em uma taxa de 3:1.

2.3.1. Oxidação

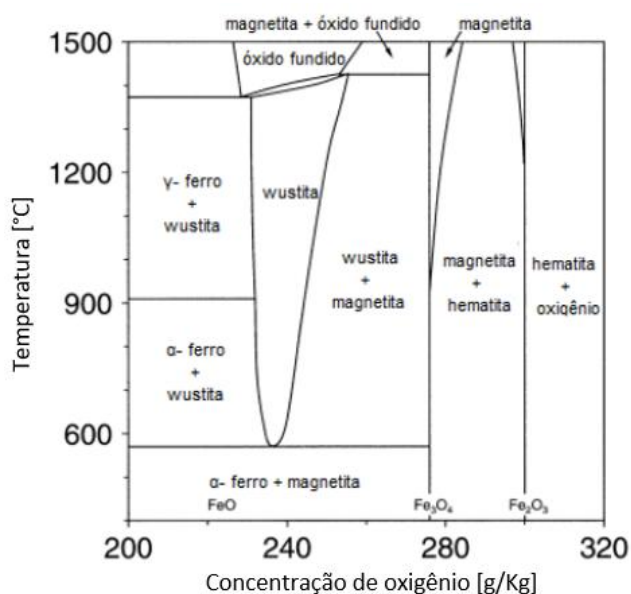
A formação de produtos de corrosão sobre superfícies ferrosas nem sempre implica em degradação acelerada do material. Em determinadas condições, camadas de óxidos podem atuar como barreiras protetoras, reduzindo a cinética das reações eletroquímicas responsáveis pela corrosão. Nesse contexto, Ratnani et al. (2023) discutem o conceito de “*metal protects metal*”, no qual certos óxidos de ferro exercem papel relevante na proteção do substrato metálico.

O desenvolvimento de óxidos na superfície do aço é um efeito termoquímico resultante da interação entre o material metálico e espécies oxidantes presentes no ambiente, como oxigênio molecular, vapor d’água ou dióxido de carbono. Esse processo ocorre de forma espontânea quando as condições termodinâmicas favorecem a reação entre o ferro e o oxigênio, conduzindo a formação de óxidos estáveis, com diminuição da energia livre do sistema (YOUNG, 2016).

O processo de oxidação do aço inicia-se com a adsorção de oxigênio na superfície metálica, seguida pela dissociação das moléculas e difusão dos íons envolvidos. À medida que o óxido se forma, uma interface entre o substrato, a camada de óxido e a atmosfera é estabelecida e o crescimento da camada irá depender de fatores como temperatura, composição do gás, tempo de exposição e pressão (PEREZ, 2004).

Em função das condições de oxidação, a exposição de um substrato metálico a temperaturas elevadas em atmosfera oxidante resulta na formação de uma camada de óxidos na superfície. Essa camada pode ser constituída por uma única fase ou por múltiplas fases coexistentes, conforme as condições termodinâmicas do sistema (BIROSCA, 2006). A Figura 4 apresenta o diagrama de fases Fe-O, no qual são descritas as regiões de estabilidade das diferentes fases de óxidos de ferro em função da temperatura e da concentração de oxigênio à qual o substrato é submetido.

Figura 4 - Diagrama de equilíbrio de fases Fe-O



Fonte: Adaptado de CORNELL; SCHWETMANN, 2003.

Para aços carbono de baixa liga, a oxidação em temperaturas moderadas a elevadas leva à formação de óxidos de ferro organizados em fases distintas sendo as mais comuns a wüstita (FeO), formada em temperaturas acima de 570°C , a magnetita (Fe_3O_4) e a Hematita (Fe_2O_3). A continuidade e aderência dessas camadas determinam se o óxido atuará como uma barreira protetora ou como um agente facilitador da degradação do material (PEREZ, 2004).

A magnetita é um óxido misto de ferro, contendo íons Fe^{2+} e Fe^{3+} em sua estrutura cristalina do tipo espinélio inverso. Tal característica confere elevada estabilidade termodinâmica, boa aderência ao substrato metálico e menor porosidade se comparado a outros óxidos. Essas propriedades favorecem a formação de uma camada compacta, capaz de atuar como barreira físico-química à difusão de espécies agressivas, retardando o avanço da corrosão (RATNANI et al., 2023).

A hematita caracteriza-se pela presença exclusiva de íons Fe^{3+} , apresentando estrutura cristalina romboédrica e elevada estabilidade química. Ratnani et al. (2023) destacam que, embora seja comumente associada a produtos de corrosão mais porosos quando formada de maneira descontrolada, a hematita se desenvolve como uma camada contínua, densa e bem aderida, podendo exercer efeito protetor sobre o substrato metálico. Sua baixa solubilidade em meios aquosos contribui para a manutenção da integridade da camada ao longo do tempo, reduzindo a taxa de dissolução do óxido.

O efeito protetor das fases mencionadas depende fortemente de características como espessura, morfologia, continuidade e aderência das camadas formadas. Camadas compactas e contínuas tendem a retardar a corrosão do substrato metálico, enquanto óxidos porosos, fissurados ou com baixa adesão podem comprometer esse efeito protetor. O controle dos parâmetros para formação de tais camadas é de suma importância para extrair o máximo de suas características desejáveis.

Com isso, observa-se uma oportunidade de melhoria no material a associação de uma camada de óxidos protetora com a realização posterior de nitretação por plasma. No ambiente industrial, a abertura da câmara de nitretação, com os componentes tratados ainda em elevada temperatura e subsequente exposição das peças ao oxigênio presente no ar, oportunamente pode ser utilizada para a formação de mais uma barreira protetiva.

2.3.1.1 Oxidação a plasma

O processo de oxidação por plasma é amplamente utilizado como etapa complementar aos tratamentos termoquímicos assistidos por plasma, como a nitretação, devido à sua capacidade de melhorar significativamente o desempenho tribológico e a resistência à corrosão de aços carbono e baixa liga. A formação da camada branca pelo processo de nitretação por plasma, composta por fases $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ e $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, pode ser suscetível à corrosão se apresentar elevada porosidade. Assim, a aplicação de uma etapa subsequente à nitretação, de oxidação por plasma, pode ser empregada para promover a formação controlada de óxidos protetivos, resultando em uma superfície mais estável e menos reativa (LEE et al., 2002).

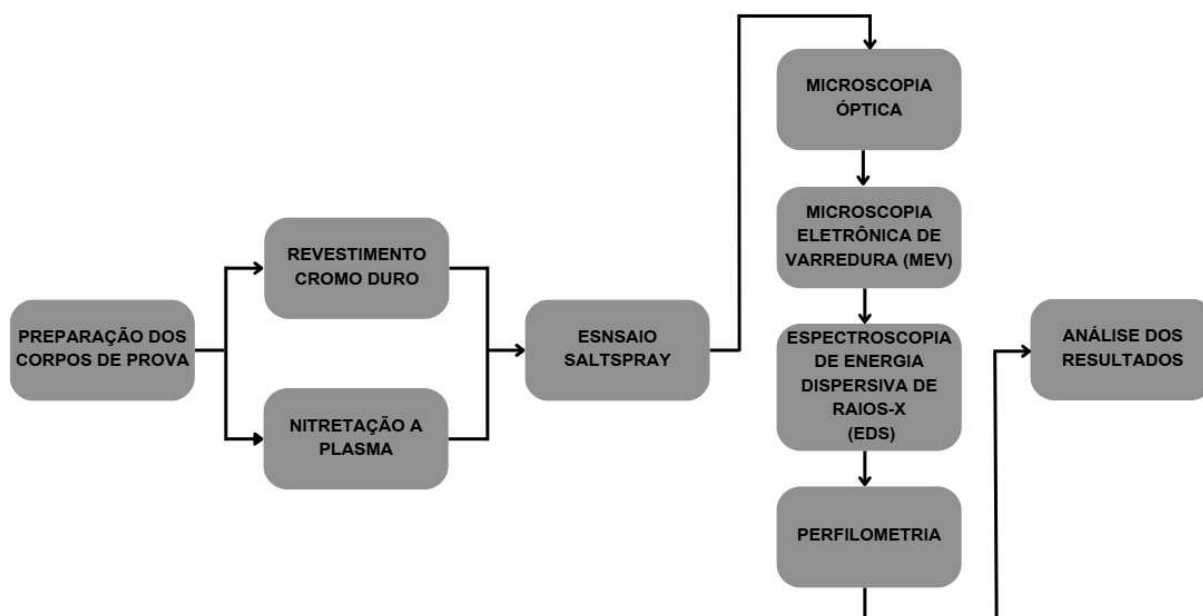
Através do controle de processo, com parâmetros bem definidos como temperatura, pressão e tempo, é possível estabelecer uma camada homogênea e bem definida, favorecendo a formação da magnetita, por exemplo, que apresenta melhor desempenho contra corrosão e desgaste do substrato (MAHBOUBI, 2005; MUÑOZ-CASTRO et al., 2015; TOMIELLO, 2012).

A utilização do processo de oxidação por plasma de forma complementar à nitretação possui diversas indicações na literatura como sendo benéfica à resistência tanto ao desgaste quanto à corrosão do material base. Mahboubi et al. (2005) destaca que um tratamento duplex de nitretação durante 5 horas a uma temperatura de 550°C e posterior oxidação por plasma por um período de 1 hora e temperatura de 500°C favorece uma elevação na resistência à corrosão de até 6 vezes maior do que nos aços apenas nitretados e uma resistência 15 vezes maior que no material sem tratamento.

3. METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo elucidar a metodologia adotada para averiguação da resistência à corrosão de amostras de aço SAE 1045 nitretadas por plasma e eletrodeposição de cromo duro. O estudo é embasado na análise de parâmetros aferidos anterior e posteriormente aos tratamentos superficiais, controlando-se parâmetros de processo e comparando os efeitos da oxidação após o ensaio em névoa salina. A Figura 5 apresenta o fluxograma referente as etapas aqui realizadas.

Figura 5 – Fluxograma evidenciando as etapas do estudo realizado



Fonte: Autor (2025).

3.1. CORPOS DE PROVA

Para produção das amostras, optou-se pela seleção de um tarugo de aço SAE 1045 da siderúrgica ArcelorMittal, com diâmetro nominal de 50,8mm e comprimento total de 350mm. A composição química do aço utilizado, retirada do catálogo da empresa fabricante pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço utilizado, conforme fabricante

AÇO	%(wt) C	%(wt) Mn	%(wt) P	%(wt) S	%(wt) Si	%Al	%Cr	%Ni	%Mo
SAE 1045	0,43–0,50	0,3–0,6	Máx 0,040	Máx 0,050	0,15– 0,35	–	–	–	–

Fonte: Arcelormittal (2017).

Através de um processo de torneamento, a barra foi seccionada para obtenção de 15 amostras cilíndricas, cada uma com 18mm de espessura. O diâmetro também foi ajustado para 50mm, visando a remoção da carepa superficial proveniente do processo de laminação.

Sendo a rugosidade um dos parâmetros a serem analisados quanto a sua influência tanto no processo de tratamento superficial, quanto na sua interferência à corrosão, uma das faces das amostras foi selecionada para permanecer com o

acabamento proveniente do processo de torneamento, enquanto a outra face passou por um processo de lixamento por lixa d'água com granulometrias até 1200, seguido de posterior polimento com pasta diamantada de 1 μm , visando assim a obtenção de superfícies regulares e padronizadas para posterior análise.

Ao todo, foram feitos 5 processos diferentes: 4 nitreções por plasma, alterando-se parâmetros de temperatura, tempo, atmosfera gasosa e método de oxidação, sendo 3 amostras destinadas a cada processo e uma eletrodeposição de cromo, também com 3 amostras, de forma a garantir reprodutibilidade dos processos e também possibilitar a realização de ensaios destrutivos nas amostras para ensaios metalográficos, poupando amostras com dimensional anteriormente estipulado para serem testadas no ensaio e névoa salina. Uma imagem dos corpos de prova, sem tratamento, está representada na Figura 6.

Figura 6 - Corpos de prova



Fonte: Autor (2025).

3.2. REVESTIMENTO DE CROMO DURO

O revestimento de cromo foi realizado por uma empresa especializada nesse tipo de película protetora. As amostras inicialmente passaram por um processo de limpeza, com um desengraxe alcalino visando a remoção de impurezas como óleo e graxa e subsequente decapagem ácida para remoção de eventuais óxidos presentes

na superfície das peças. Este processo é fundamental para garantir a repetibilidade e homogeneidade inicial de todas as amostras aqui tratadas.

O banho foi realizado através da imersão das amostras em uma solução de ácido crômico e tendo ácido sulfúrico como catalisador da reação, sendo que os parâmetros visavam a obtenção de uma camada de 25 μm de espessura. Essa concentração e espessura foi escolhida devido sua utilização comum na indústria, principalmente no tratamento de superfície de cilindros hidráulicos.

As amostras que receberam a camada eletrodepositada de cromo duro foram identificadas como “amostra 1” (A1) e o tratamento correspondente foi denominado “processo 1”.

3.3. NITRETAÇÃO POR PLASMA

As amostras foram nitretadas na empresa *Niit Nitretação a Plasma*. a nitretação dos corpos de prova foi realizada utilizando-se uma fonte de tensão alternada e com os parâmetros de temperatura, gas de trabalho, tempo de tratamento e pressão, como identificados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de tratamento utilizados no processo de nitretação por plasma

PROCESSO	2	3	4	5
TEMPO [h]	8	8	8	16
TEMPERATURA [°C]	520	520	520	500
%N ₂	75	75	75	75
%H ₂	25	25	25	25
TENSÃO [V]	540	540	540	540
T _{on} [μs]	180	180	180	180
RESFRIAMENTO	A vácuo	Ao ar	Ao ar	Ao ar
OXIDAÇÃO	-	Ao ar	A plasma	Ao ar
TEMPO DE OXIDAÇÃO [h]	-	-	2	-

Fonte: Autor (2025).

Nota geral: “Oxidação ao ar” refere-se ao processo de formação de uma camada de óxido na superfície do material quando exposto ao ar em uma temperatura elevada

Os parâmetros foram escolhidos devido ao seu comum uso na indústria e por terem sido amplamente discutidos na literatura (ALVES JUNIOR, 2001; FONTANA, 1991; QUEIROZ, 2014). Manter os mesmos padrões de temperatura, concentração gasosa e tempo de processo e alterando a forma de resfriamento dos componentes e por consequência a camada de óxido formada na superfície após o tratamento, possibilitará uma análise dos efeitos, não só da camada nitretada, mas também da

camada oxidada e seus efeitos no retardamento da corrosão. Cada amostra passou por um tipo de resfriamento, e os mesmos serão explicados a seguir.

3.3.1. Processo “2” (A2)

O processo de nitretação utilizado neste trabalho, como visto anteriormente, foi realizado de forma a elevar a temperatura do material em estudo até 520°C, o que pode propiciar a formação de uma camada de óxido na superfície, a depender da forma de resfriamento utilizada. Buscando entender melhor os benefícios da camada nitretada para retardamento da formação de corrosão superficial, as amostras foram resfriadas a vácuo, impedindo assim a presença de qualquer tipo de gás não controlado na câmara de tratamento, inibindo a formação de uma camada de óxido não intencional.

3.3.3. Processo “3” (A3)

Após o processo de nitretação, o reator foi aberto, com os componentes ainda na temperatura a qual haviam sido submetidas durante o tratamento. A exposição ao ar, cria uma camada de óxido na superfície das peças, todavia de forma não controlada. Tal camada possui um certo componente de imprevisibilidade, já que pode variar de acordo com o fluxo de ar no local e a temperatura do ambiente, por exemplo.

3.3.4. Processo “4” (A4)

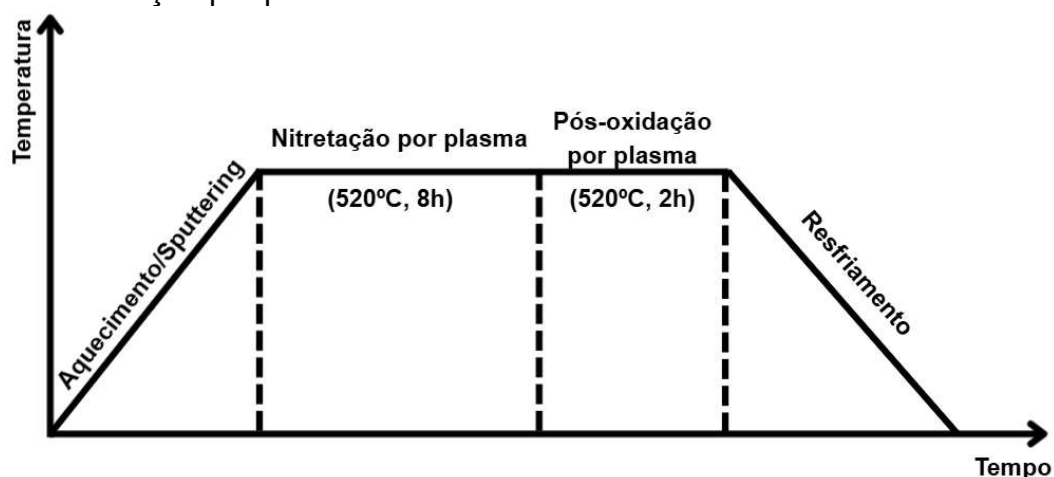
O método aqui denominado por “Processo 4”, utilizou um mecanismo de oxidação a plasma após o processo de nitretação, visando criar uma camada de óxido homogênea e de forma controlada, visto que o reator possui artifícios capazes de promover uma imersão uniforme de oxigênio, gás esse aqui utilizado para o processo de oxidação, nos componentes de interesse, mantendo temperatura e pressão do ambiente controlados.

O objetivo deste processo é favorecer maior repetibilidade de processo na formação da camada de óxido, encontrando a melhor relação entre tempo de

resfriamento, temperatura, volume e tipos de gases para se obter uma melhor resistência à oxidação.

A oxidação durou 2 horas, com oxigênio sendo introduzido na câmara e a temperatura permanecendo, durante todo o processo inalterada, com valor de 520°C, sendo que na Figura 7 é possível verificar uma representação ilustrativa do processo.

Figura 7 - Representação esquemática do processo de nitretação por plasma com pós oxidação por plasma



Fonte: Autor (2025).

3.3.5. Processo “5” (A5)

Visando analisar melhor o parâmetro tempo e sua influência nos processos de corrosão, esse processo foi realizado com os mesmos parâmetros dos processos anteriores, salvo a temperatura, reduzida em 20° e o tempo de processamento, de 16h.

3.4. METALOGRAFIA

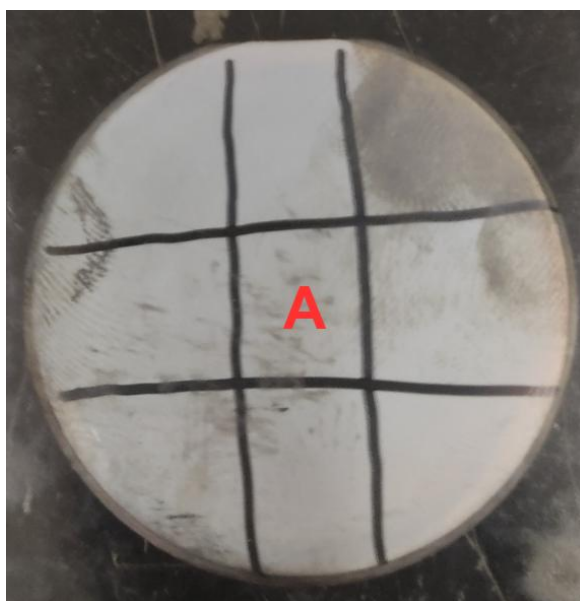
O processo de metalografia está associado ao preparo, observação e análise de amostras metálicas, com o intuito de entender suas propriedades internas, fases, discordâncias e relacionar estes dados com as propriedades do material. Todos os procedimentos de preparo das amostras, descritos a seguir, foram realizados no laboratório de qualidade da empresa *Niit Nitretação a Plasma*, que disponibilizou sua infraestrutura e equipamentos para execução das etapas necessárias.

3.4.1. Preparação

Todas as amostras foram obtidas a partir de um mesmo tarugo de aço SAE 1045 e passaram pelos mesmos processos de preparo. Inicialmente, realizou-se o corte das amostras cilíndricas com o objetivo de possibilitar a análise metalográfica da camada nitretada e camada de óxido. Considerando-se a geometria do componente e possíveis efeitos de borda e cátodo oco relacionados ao processo de nitretação e exacerbados nas extremidades geométricas do componente (KOVÁCS, 2019), as amostras foram cortadas seguindo o perfil da Figura 8 na qual a região (A), referente ao centro da superfície de interesse, foi selecionada para análise.

As amostras foram cortadas com o auxílio de uma máquina de corte de amostras metalográficas, da marca Jnkason e modelo SQ-80 e fluxo de fluido de corte constante, visando evitar o superaquecimento das mesmas.

Figura 8 - Ilustração das regiões indicadas para corte nas amostras.



Fonte: Autor (2025).

Após o corte, procedeu-se o embutimento das amostras, empregando o método de embutimento a quente em uma embutidora da marca Maxipress, com pressão de 150 kgf/cm³. Para garantir melhor preservação das bordas de interesse durante as etapas subsequentes, uma combinação de baquelites foi utilizada sendo baquelite marrom utilizado na porção de interesse, visto seu melhor desempenho na

preservação da borda devido a aditivos em sua composição química e para complemento foi utilizado baquelite preto, ambos não condutores.

As amostras embutidas foram então submetidas à etapa de lixamento para uniformização da superfície, iniciando-se em lixa d'água de granulação 180, instalada em uma politriz metalográfica e operando sob fluxo contínuo de água para dissipação térmica. Em conformidade com a norma ASTM E3 (2017), o lixamento prosseguiu de forma sequencial utilizando lixas de granulações 220, 320, 400, 600 e 1220, garantindo a remoção gradual das deformações e riscos provenientes das etapas anteriores.

Subsequente ao processo de lixamento, as amostras foram polidas com pasta diamantada de 1µm até que apresentassem uma superfície homogênea e com aspecto espelhado, livre de riscos visíveis sob inspeção óptica.

Por fim, para revelação da microestrutura superficial das amostras, todas foram submetidas a um ataque químico em uma solução composta de 4% de ácido nítrico dissolvido em etanol, revelando por exemplo, os contornos de grão e possibilitando a análise em microscópio.

3.4.2. Análises

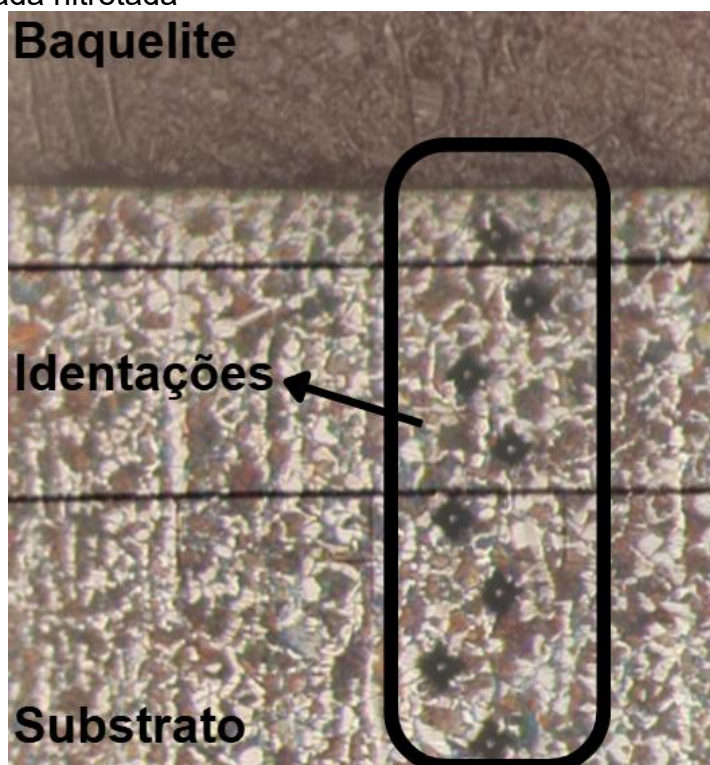
Buscando uma análise mais assertiva dos efeitos tanto da camada eletrodepositada, quanto da nitretação e das camadas de óxido formadas, uma combinação de métodos de análise foram utilizados, sendo descritos na sequência.

3.4.2.1. Microdureza

Para avaliar o perfil de microdureza e espessura das camadas provenientes dos tratamentos térmicos, foi utilizado um microdurometro da marca Mitutoyo e modelo MVK-G1, disponibilizado para uso pelo laboratório de qualidade da empresa *Niit*, que permite a medição de dureza na escala Vickers, com cargas que podem variar entre 100g e 1000g para indentação. O equipamento possibilita também a visualização e medição das camadas formadas, com ampliações de até 400x.

Em acordo com a norma DIN 50190-3, a aferição das durezas foi realizada em um perfil zig-zag, na qual foram tomados 12 pontos, espaçados 50µm entre centros das indentações, como apresentado na Figura 9.

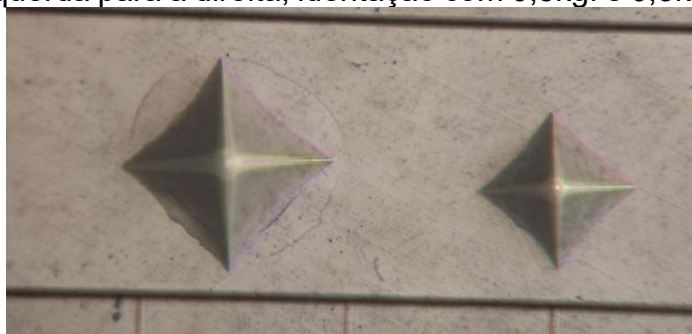
Figura 9 - Imagem ilustrativa do perfil zig-zag utilizado para avaliação de microdureza e camada nitretada



Fonte: Autor (2025).

A carga utilizada para indentação foi de 0,3kgf, visto que, inicialmente utilizando uma carga de 0,5kgf ocorreu a ruptura da camada em alguns pontos, como pode ser observada na Figura 10, invalidando assim a medição neste local. Reduzindo a carga para 300g, esse problema foi minimizado e, para padronização, todas as indentações foram realizadas com essa última carga.

Figura 10 - Da esquerda para a direita, indentação com 0,5kgf e 0,3kgf respectivamente



Fonte: Autor (2025).

3.4.2.2. Microscopia eletrônica de varredura

Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas nas amostras, com ampliação de até 100.000x. O microscópio utilizado foi o de modelo JCM 7000, do fabricante Jeol, do *laboratório de microscopia eletrônica de varredura* da UDESC, campus Joinville.

Acoplado ao equipamento, está um sistema de espectroscopia de dispersão de energia (EDS), que possibilitou também uma análise da composição química de determinados pontos de interesse.

3.4.2.3. Tratamento de imagem para caracterização de corrosão

Uma imagem digital pode ser tratada como sendo uma matriz de pequenos elementos chamados pixels. Cada pixel representa a menor unidade espacial da imagem e contém informações sobre cor e intensidade em sua região específica.

Existem diversos espectros de cores, tais como CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, key), HSV (Hue, Saturation, Value) e HSL (Hue, Saturation, Value) e, entre os modelos mais empregados, encontra-se o RGB (Red, Green, Blue) (SHARMA; BALA, 2017, apud OLIVEIRA, 2024). Esse modelo é caracterizado por cada canal possuir um valor que varia entre 0 e 255, sendo o canal com valor 0 a ausência total da cor e o canal com o valor 255 o que possui intensidade máxima da cor. Todas as combinações possíveis de cor, a partir dessas três, podem ser representadas através de um vetor constituído de 3 valores, ou seja, um pixel sendo analisado pelo espectro RGB e representado pelo vetor (255,0,0), corresponde ao vermelho puro, pois contém intensidade máxima no canal R e ausência total nos canais G e B.

Assim, uma imagem colorida no padrão RGB pode ser interpretada como a sobreposição de três matrizes numéricas, cada uma correspondente à intensidade de um dos canais de cor. A análise dessas matrizes permite que softwares de processamento de imagens, como o FIJI (RESCHKE, 2022), identifiquem, segmentem e manipulem regiões específicas com base em seus valores de intensidade e composição cromática.

A caracterização visual de regiões corroídas por meio do espectro RGB é suportada pela literatura quanto às fases e colorações típicas dos produtos de corrosão do aço carbono em decorrência de seu ambiente de exposição. O resultado

da oxidação do ferro não se resume a apenas um composto, mas sim uma mistura heterogênea de óxidos, cuja composição varia de acordo com aspectos tais quais umidade ou presença de cloretos na atmosfera em que o componente é exposto.

Antunes et al. (2003) apresenta fases de óxido comumente encontradas após exposição prolongada de aços carbono na atmosfera urbana ou industrial. Tais fases incluem lepidocrocita (γ -FeOOH), que apresenta uma coloração com tons entre alaranjado e castanho-avermelhado e goethita (α -FeOOH), que tende a produzir tons amarelo-pardo a marrom. Outras fases são descritas por Kim et al. (2017), bem como suas respectivas colorações.

Dessa forma, é possível a segmentação objetiva das áreas degradadas através de canais RGB tendo em vista a coloração específica e esperada das áreas afetadas, justificando assim a aplicação de tal método para determinação da área corroída.

Aliado a esta técnica, uma comparação comparativa pode ser feita utilizando a ISO 10289:2018. Essa norma é utilizada especialmente para avaliar o percentual de área corroída em revestimentos metálicos depositados sobre um substrato, o que não se aplica diretamente ao processo de nitretação, que é um tratamento termoquímico, principalmente, de difusão. Porém, mesmo que de forma limitada, permite realizar uma análise padronizada para quantificar a área superficial corroída. A tabela 3 apresenta uma classificação, de 0 a 10, de acordo com o percentual de corrosão apresentado pela superfície da amostra.

Tabela 1 – Classificação da superfície corroída em função da Norma ISO 10289

Área afetada A (%)	Avaliação R _p
Não afetada	10
$0 < A \leq 0,1$	9
$0,1 < A \leq 0,25$	8
$0,25 < A \leq 0,5$	7
$0,5 < A \leq 1,0$	6
$1,0 < A \leq 2,5$	5
$2,5 < A \leq 5,0$	4
$5,0 < A \leq 10$	3
$10 < A \leq 25$	2
$25 < A \leq 50$	1
$50 < A$	0

Fonte: Adaptado de ISO 10289 (2018).

Nota geral: R_p (protection rating) está atrelada a capacidade do revestimento de proteger o metal de base da corrosão.

3.4.2.4. Perfilometria

A rugosidade inicial da superfície é um parâmetro determinante para a formação e o desenvolvimento da camada nitretada, uma vez que a topografia do substrato influencia diretamente os mecanismos de ativação, adsorção e difusão atômica durante o processo. De acordo com Singh et al. (2006), superfícies com maior rugosidade apresentam maior área exposta e maior quantidade de micro cavidades e relevos, os quais podem atuar como regiões preferenciais para a nucleação dos nitretos durante a nitretação.

Esses autores demonstram que variações na rugosidade inicial alteram não apenas a espessura da camada branca, mas também a uniformidade da camada, sua morfologia e as propriedades mecânicas resultantes, impactante diretamente na resistência ao desgaste e oxidação do material.

Diante desse cenário, tornou-se necessário no presente trabalho realizar uma análise de rugosidade inicial das amostras, posteriormente ao processo de polimento e anteriormente aos tratamentos térmicos, com o objetivo de assegurar que todas as amostras partissem de uma condição superficial semelhante, minimizando diferenças de topografia que poderiam influenciar significativamente a resposta ao processo. Essa padronização foi fundamental para que os efeitos observados após a nitretação pudessem ser atribuídos exclusivamente às variáveis do tratamento, e não a variações iniciais da superfície.

O equipamento utilizado para aferição da rugosidade da superfície foi da marca Bruker e modelo DektakXT Stylus, presente no Laboratório de Física Experimental da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), campus Joinville. O perfil de análise escolhido foi o de picos e vales, com comprimento de aferição de $2000\mu\text{m}$, duração de 20 segundos e resolução de $0.333\mu\text{m/pt}$.

3.5. TESTE EM NÉVOA SALINA

O ensaio em névoa salina é amplamente empregado na indústria e em laboratórios como método padronizado para avaliação acelerada da resistência à corrosão. Por meio da exposição contínua das amostras a um ambiente altamente agressivo e controlado, esse ensaio permite obter, em poucos dias, informações que demandariam meses ou anos de exposição em condições reais (GAD, 2023).

No presente trabalho, o ensaio das amostras com tratamento de nitretação a plasma e revestimento de cromo duro foi realizado no Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial (LCOR) da Universidade de Caxias do Sul (UCS) e foi conduzido em uma câmara fechada da marca Bass, modelo USX-6000/2009, identificada como CC, utilizando-se a norma ASTM B117-19. As condições de ensaio, para todas as amostras, foram:

- “Tempo de ensaio: 312h;”
- “Pressão constante do ejetor: 0,7kgf/cm² a 1,7kgf/cm²;”
- “Temperatura da câmara: 35°C ± 2°C;”
- “Solução de cloreto de sódio: 50g/L ± 5g/L;”
- “Faixa de pH: 6,5 a 7,2;”
- “Volume névoa coletada: 1,5 mL/h ± 0,5 mL/h;”
- “Posição da amostra: apoiada em ângulos de 15 a 30° em relação à vertical.”

Foram realizados registros fotográficos em intervalos múltiplos de 24 horas, até o período final de 312 horas. Em cada intervalo, a superfície de interesse das amostras foi fotografada, desde que apresentasse alguma alteração visível em relação ao registro anterior. Tais imagens foram necessárias para posterior análise do percentual de corrosão da superfície, em área.

Uma amostra adicional, aqui denominada “amostra 6”, passou pelo ensaio de *salt spray* no laboratório físico químico – LFQ da empresa Whirlpool, em Joinville-SC. Essa amostra não possuía tratamento superficial, sendo destinada a criar um ponto de referência de corrosão superficial do material base utilizado (AISI 1045). As condições de ensaio foram rigorosamente condizentes com as realizadas no LCOR, tanto no parâmetro normativo, quanto nos parâmetros pertinentes à atmosfera agressiva.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e as discussões pertinentes à avaliação de corrosão nas amostras nitretadas por plasma e com camada eletrodepositada de cromo.

4.1. PERFILOMETRIA

Foram realizadas 2 medições de rugosidade (R_a) por amostra. Devido às prováveis propriedades anisotrópicas da superfície, as aferições foram realizadas defasadas em 90° uma da outra. Três amostras ao todo foram analisadas, sendo elas referentes as amostras do aço base, anteriormente aos processos termoquímicos e de eletrodeposição, e todas após passarem pelo processo de lixamento e subsequente polimento.

Todos os seis valores obtidos para as amostras sem tratamento (Amostras 6) através da técnica de perfilometria estão apresentados na Tabela 4. A média aritmética dos resultados foi de 11,465nm e o desvio padrão entre esses valores foi de 1,54.

Tabela 2 – Valores de R_a obtidos para as 3 amostras sem tratamento analisadas

Amostras 6	Rugosidade R_a [nm]	Desvio Padrão [nm]
Amostra 6 (1) – 0°	10,36	3,12
Amostra 6 (1) – 90°	9,81	1,05
Amostra 6 (2) – 0°	13,98	1,44
Amostra 6 (2) – 90°	12,14	2,59
Amostra 6 (3) – 0°	10,52	2,11
Amostra 6 (3) – 90°	11,95	3,40

Fonte: Autor (2025).

4.2. PERFIL DE MICRODUREZA

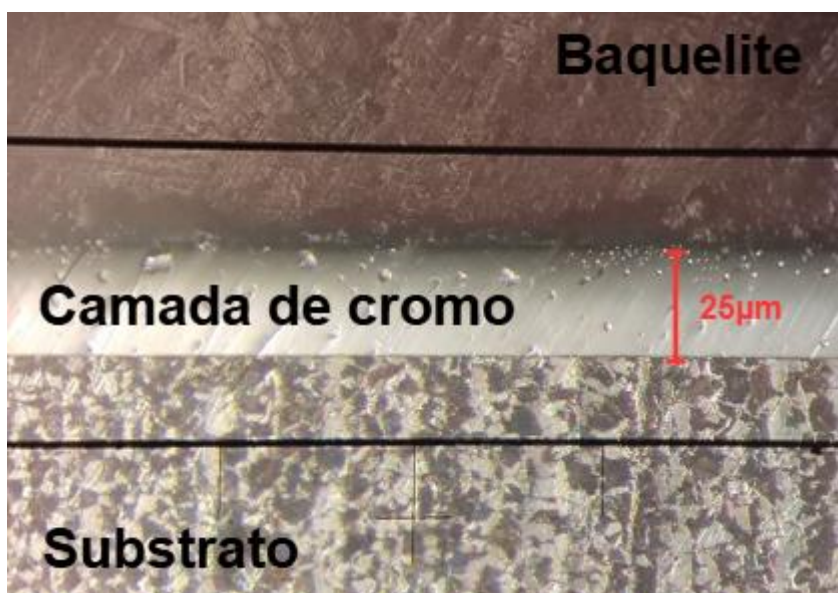
Em acordo com a norma DIN 50190-3 foram realizadas, para cada amostra, 12 medições de microdureza, com espaçamento de $50\mu\text{m}$ entre os centros das identações. A norma anteriormente citada estipula como limite da camada nitretada o ponto em que a dureza atinja um valor 50HV acima da dureza de núcleo que, por sua vez, foi estipulada através de uma média aritmética de 6 medições. Os resultados, de acordo com a metodologia descrita nos itens 3.2 e 3.3, podem ser vistos a seguir.

A utilização da técnica de oxidação a plasma, subsequente ao tratamento de nitretação iônica promoveu a formação de uma maior camada de difusão, sendo necessárias 17 medições pontuais de microdureza em direção ao núcleo da amostra para que se atingisse 50HV acima da dureza de núcleo, configurando assim o término da camada de difusão (DIN 50190-3).

Ao total foram feitas 6 medições de espessura da camada branca para a amostra “0”, espaçadas em ao menos 200 μ m. A média aritmética dos resultados obtidos foi de 11,05 μ m, com um desvio padrão amostral de 0,96 μ m. Tal desvio, de menos de 10% da espessura média das amostras corrobora com uma das características da nitretação a plasma: a capacidade de formação de uma camada homogênea, devido a distribuição majoritariamente igual à do plasma ao longo da superfície tratada.

Na figura 11 é apresentada uma imagem da camada de cromo duro obtida pelo processo de eletrodeposição. Analisando a imagem observa-se que o filme apresentado na amostra 1 exibiu distribuição homogênea ao longo de todo o corpo de prova. A espessura medida por meio de um microdurômetro HV foi de 25 μ m, valor que corresponde à espessura especificada no processo contratado.

Figura 11 – Camada eletrodepositada de cromo duro

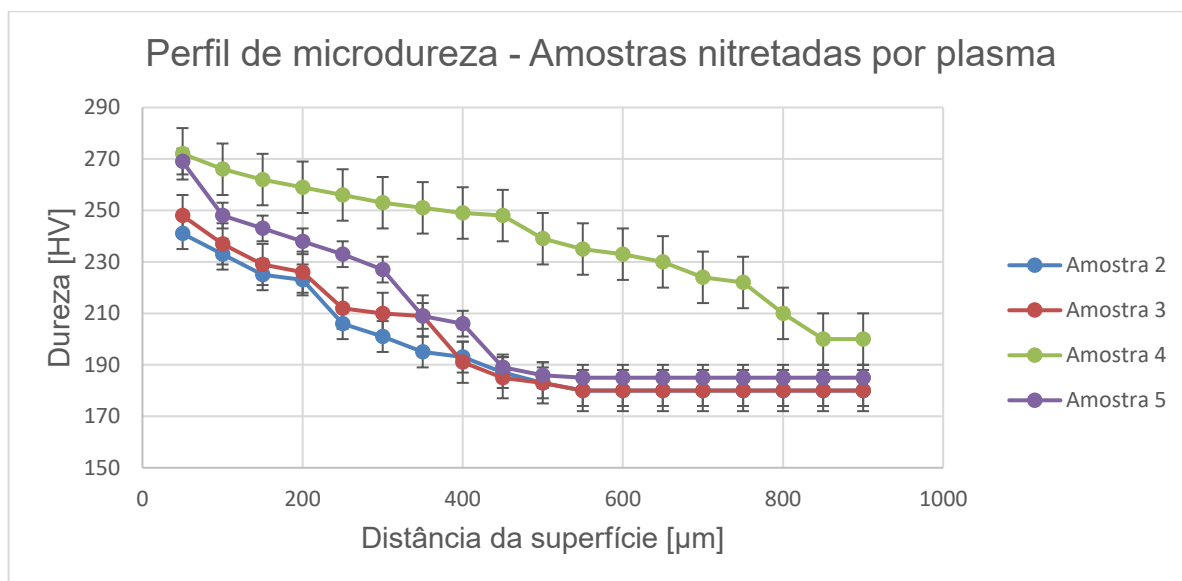


Fonte: Autor (2025).

Nota geral: Camada visualizada através de equipamento microdurômetro HV, com ampliação de 100x.

Os dados foram compilados e estão apresentados na Figura 12. Nela fica evidente o crescimento da camada de difusão com o processo de pós oxidação por plasma que, de forma direta, por ser um processo com alta temperatura, permite a continuação da difusão do nitrogênio (ROVANI et al., 2011).

Figura 12 - Microdureza transversal de todas as amostras nitretadas



Fonte: Autor (2025).

A tabela 5 apresenta um resumo dos dados obtidos por microscopia óptica para todas as amostras analisadas nesse trabalho.

Tabela 3 – Dados de microdureza e espessura de camada das amostras aqui analisadas

	A1	DP	A2	DP	A3	DP	A4	DP	A5	DP
Camada de cromo [μm]	25,0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Camada branca [μm]	-	-	7,9	0,9	9,2	0,9	11,1	1,0	7,0	0,7
Camada de difusão [μm]	-	-	550	-	550	-	850	-	500	-
Camada de óxido [μm]	-	-	0	-	<1	0,3	2	0,1	<1	0,2
Microdureza de núcleo [HV]	178	12,3	180	6,2	180,5	3,9	202	2,4	184,5	1,0
Microdureza de superfície [HV]	848,5	26,1	372	4,4	403	14,2	421,5	11,4	327	6,5

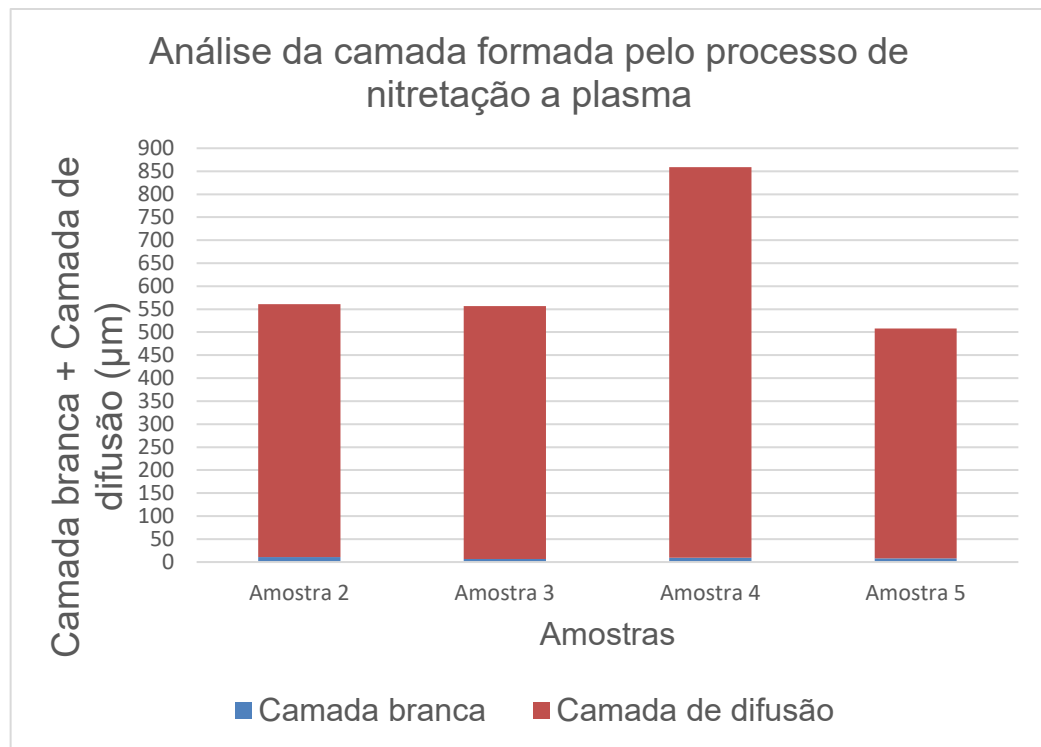
Fonte: Autor (2025).

Nota geral: "DP" se refere ao desvio padrão amostral.

É possível observar na Figura 13 que o processo com menor formação de camada composta foi o de número 5, cuja temperatura foi menor que os demais.

Temperaturas mais elevadas durante o processo de nitretação favorecem significativamente o crescimento da espessura da camada nitretada devido a uma maior cinética de difusão do nitrogênio, bem como um aumento de espessura da camada branca (LANDGRAF et al., 2022).

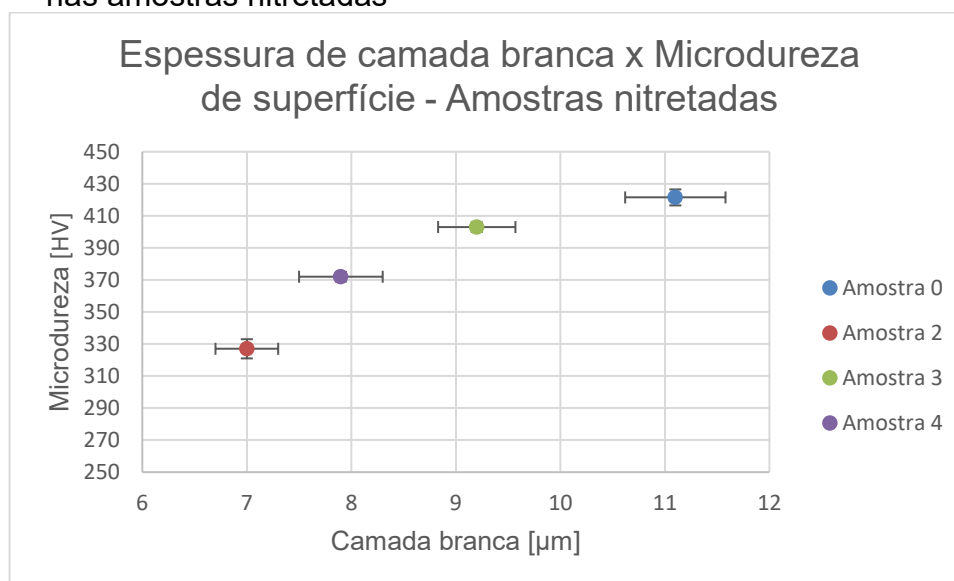
Figura 13 - Camada total formada pelo processo de nitretação por plasma



Fonte: Autor (2025).

Através dos dados da tabela 5, a Figura 14 foi criada para comparar e verificar possíveis correlações entre a espessura da camada branca e a microdureza de superfície.

Figura 14 - Comparação entre espessura de camada branca e microdureza superficial nas amostras nitretadas



Fonte: Autor (2025).

Fica evidente a relação das amostras aqui analisadas que, quanto maior a camada branca, maior a microdureza de superfície do material tratado. Esse efeito é evidenciado por Queiroz (2014) e Landgraf et al., (2022) para determinados parâmetros de temperatura e tempo de tratamento.

4.3. Microscopia eletrônica de varredura

Para obtenção de medições mais precisas das espessuras das camadas de óxido formadas, empregou-se a microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de até 2000x. A reduzida espessura dessas camadas impossibilitou sua adequada visualização e quantificação no microdurômetro, cuja ampliação máxima é de 400x.

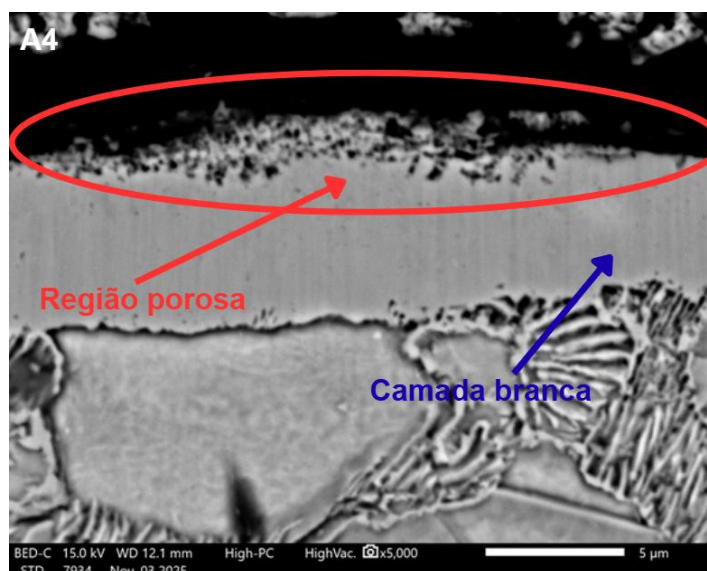
A amostra 5, com um maior tempo de nitretação, apresentou uma camada composta e de difusão com espessuras inferiores as demais, fato esperado frente a diminuição de temperatura no processo (OLIVEIRA et al., 2003; FERNANDES et al., 2020).

Com a ampliação do MEV, foi possível não só a aferição das espessuras das camadas formadas como também a percepção de uma camada porosa na interface da camada branca. Citada em diversas literaturas (ROVANI et al., 2011; EBRAHIMI et al., 2010; MUÑOZ-CASTRO et al., 2015) durante o resfriamento da camada nitretada ocorre a liberação de nitrogênio molecular (N_2) devido a decomposição

parcial das fases épsilon e gama linha, promovendo a nucleação de microbolhas que evoluem para poros interfaciais.

Esse fenômeno é intensificado quando a camada composta apresenta alta saturação de nitrogênio ou quando o processo ocorre em temperaturas mais elevadas. Processos de pós oxidação preenchem parte desses poros na camada branca com óxidos o que, em parte, é responsável por aumentar a resistência à corrosão do substrato (FLODSTRÖM, 2012). A amostra 2, que passou pelo processo de resfriamento a vácuo e consequentemente não houve formação de óxidos em sua superfície, foi a que visualmente apresentou maior espessura média de camada porosa (Figura 15).

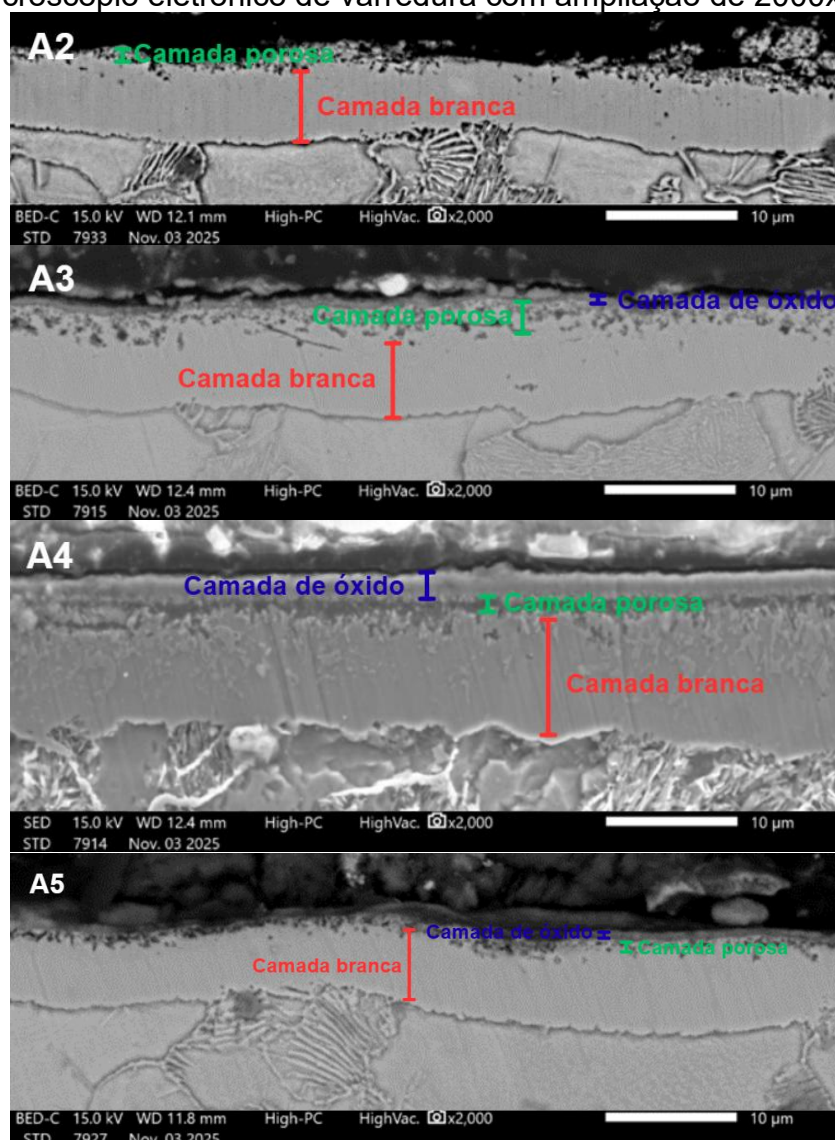
Figura 15 - Porosidade na camada branca da amostra 2



Fonte: Autor (2025).

Uma compilação das camadas provenientes da nitretação está apresentada na Figura 16, demarcando as camadas composta, de óxido e porção porosa.

Figura 16 - Camadas formadas pelo processo de nitretação em visualização no microscópio eletrônico de varredura com ampliação de 2000x



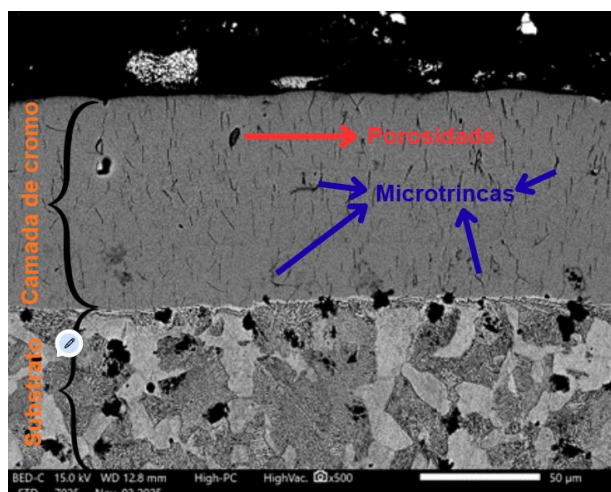
Fonte: Autor (2025).

Intrínseco ao processo, o depósito de cromo acumula tensões internas de tração que, por vezes, ultrapassa o próprio limite de resistência a tração do depósito, ocasionando microtrincas superficiais que se propagam com o tempo (Martyak et al., 1997). Aumentando a permeabilidade eletrolítica do revestimento, essas microtrincas criam caminhos para cloretos e água alcançarem o substrato, o que acelera corrosão localizada e perda de proteção (PINTO, 2012).

De acordo com Nguyen et al. (2024), que investigaram a eletrodeposição de cromo duro em aço AISI 1045, a densidade de microtrincas aumenta de forma significativa à medida que a espessura do revestimento cresce. Esse comportamento exige que a espessura do depósito seja selecionada de acordo com

a aplicação do componente, uma vez que a elevada densidade de microtrincas, como discutido anteriormente, pode atuar como um agente acelerador do processo de corrosão (NGUYEN et al., 2024). Na Figura 20, extraída do MEV com ampliação de 500x, foi possível, com maior precisão, medir a espessura da camada eletrodepositada e apresentou concordância com o valor de 25 μm anteriormente medido. É possível, também na Figura 17, visualizar as microtrincas formadas na camada de cromo da amostra 1.

Figura 17 - MEV da camada de cromo duro eletrodepositada, evidenciando as trincas inerentes ao processo

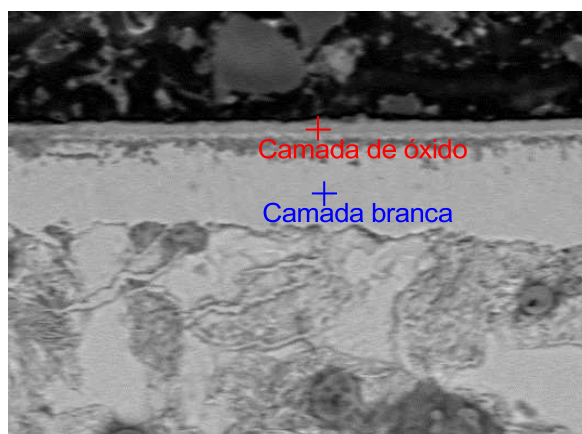


Fonte: Autor (2025).

4.4. Espectroscopia de energia dispersiva de raios x (EDS)

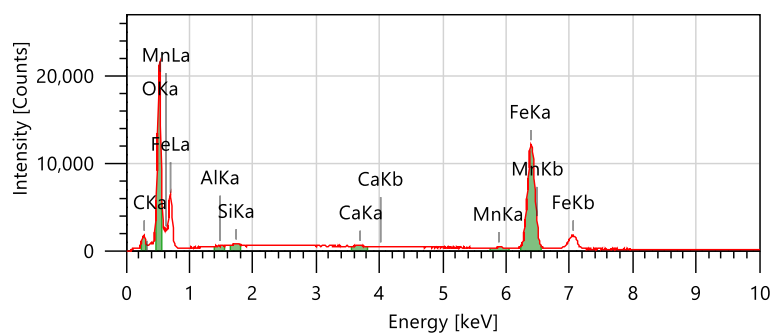
Por meio do EDS acoplado ao MEV, com aumento de 2000x, foi possível identificar a composição química do material. A figura 18 indica os pontos escolhidos para realizar o EDS e a Figura 19 indica os elementos encontrados na camada formada pelo processo de oxidação a plasma nesses pontos. A tabela 6 contém a porcentagem, em massa e em átomos, dos elementos encontrados na análise.

Figura 18 - Localização dos pontos analisados por EDS na amostra 4



Fonte: Autor (2025).

Figura 19 - Espectro de EDS da camada pós oxidada a plasma - amostra 4



Fonte: Autor (2025).

O aço 1045 baixa liga, comumente apresenta em sua composição os elementos de liga manganês, silício e alumínio (ARCELORMITTAL, 2017). O elemento Ca provavelmente é proveniente de alguma contaminação da amostra entre o processo de preparação da mesma e visualização no equipamento.

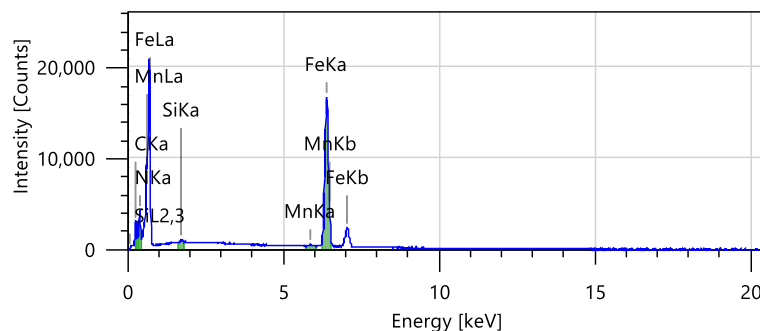
Tabela 4 – Percentual em peso e átomos dos componentes encontrados por meio do EDS na camada oxidada a plasma

Elemento	Massa [%]	Átomos [%]
C	5,14	13,68
O	22,29	44,54
Fe	71,48	40,92
Mn	0,53	0,31
Si	0,21	0,24
Ca	0,29	0,23
Al	0,07	0,08

Fonte: Autor (2025).

A figura 20 representa o espectro de EDS de um ponto na camada branca da amostra 4. Os elementos químicos encontrados nessa região estão dispostos na tabela 7. Como confirmação do processo de nitretação, um percentual de 7,72% em massa (20,36% em percentual de átomos) de nitrogênio foi encontrado nesse ponto.

Figura 20 - Espectro de EDS da camada branca apresenta na amostra 0



Fonte: Autor (2025).

Tabela 5 – Percentual em peso e átomos dos componentes encontrados por meio do EDS na camada branca da amostra 0

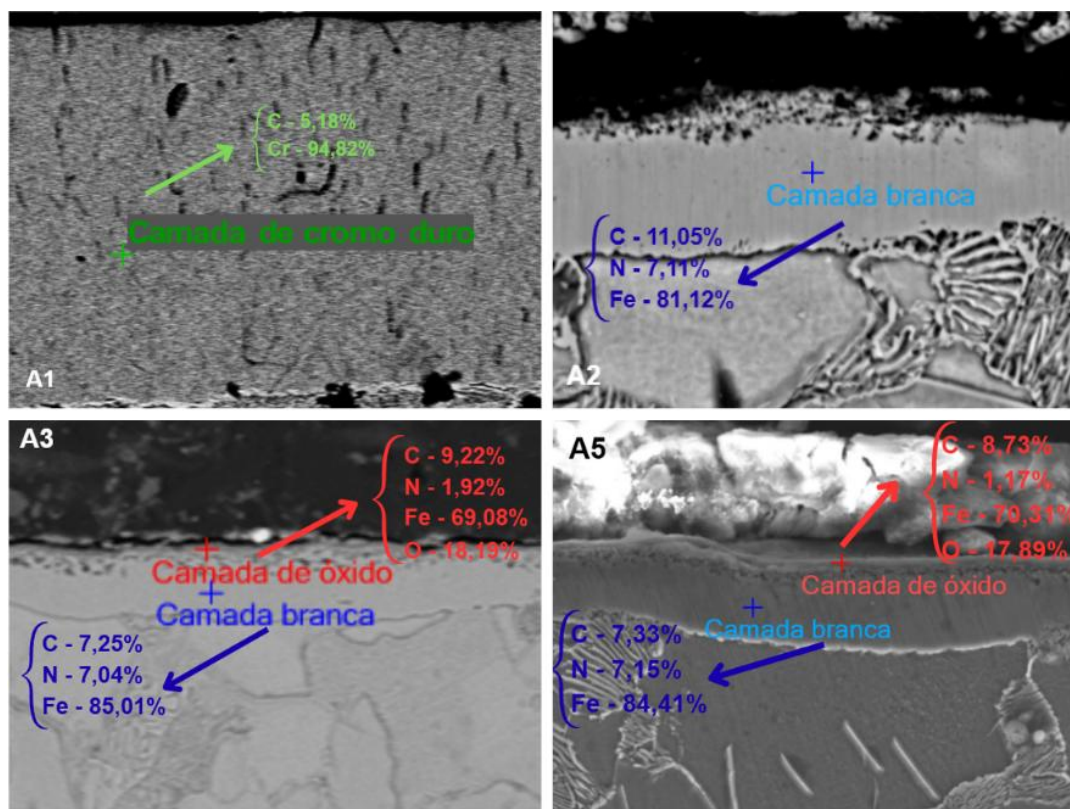
Elemento	Massa [%]	Átomos [%]
C	7,62	23,44
N	7,72	20,36
Fe	83,81	55,47
Mn	0,61	0,32
Si	0,25	0,24

Fonte: Autor (2025).

O aço 1045 baixa liga, comumente apresenta em sua composição os elementos de liga manganês, silício e alumínio. O elemento Ca provavelmente é proveniente de alguma contaminação da amostra entre o processo de preparação da mesma e visualização no equipamento.

Para os demais processos de nitretação e eletrodeposição de cromo duro, o percentual químico em peso dos elementos encontrados por EDS estão ilustrados na figura 21.

Figura 21 - Composição química das camadas, obtidas por técnica de EDS



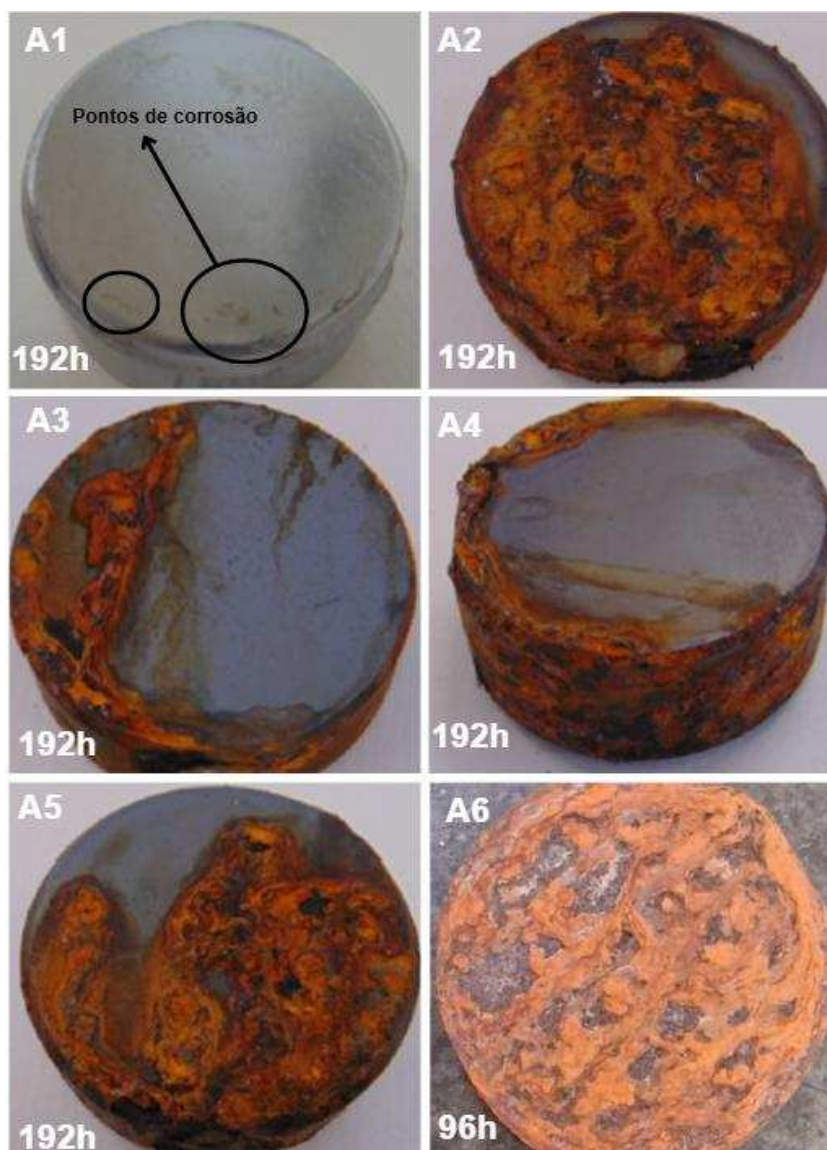
Fonte: Autor (2025).

Nota geral: valores percentuais em peso dos elementos químicos. Elementos de liga, encontrados em menor quantidade, não foram colocados na ilustração.

4.5. PERCENTUAL DE ÓXIDO – TRATAMENTO DE IMAGEM

A figura 22 apresenta as imagens das 5 amostras com tratamento após 192 horas na câmara de *salt spray* e a amostra do aço base (A6) após 96h de ensaio. A marca de 192h é de importância devido ser o período na qual o corpo de prova com camada de cromo eletrodepositada apresentou os primeiros indícios de corrosão sobre sua superfície. Na imagem é possível perceber nas amostras nitretadas (A2, A3, A4 e A5) bem como na amostra A6 (sem tratamento de superfície), uma corrosão com coloração intensa em tons de laranja-avermelhado, marrom e regiões mais escuras.

Figura 22 - Imagens das amostras após imersão em névoa salina



Fonte: Autor (2025).

Em contra partida, a amostra A1 apresentou pequenos pontos com tonalidades mais brandas de laranja espalhados pela superfície, atestando o caráter altamente protetor da camada de Cr devido à sua passividade estável e criação de uma barreira física contra a corrosão do substrato. Isso corrobora a superioridade da camada de cromo, com $25\mu\text{m}$ de espessura, na proteção contra a corrosão frente aos parâmetros de nitretação e oxidação descritos no item 3.3.

A amostra 2, que passou pelo processo de resfriamento a vácuo para que não houvesse camada de óxidos sobre a camada composta e, dentre os processos de nitretação, a que formou menor espessura de camada branca, fator esse diretamente relacionado a menor temperatura de tratamento, foi a que apresentou pior resultado

no teste de névoa salina. Com tal informação, uma suposição pode ser levantada sobre a relação entre as espessuras de camada branca e de óxidos na superfície para prevenção e/ou retardamento do processo de corrosão do aço base.

Constituída predominantemente pelas fases épsilon (ϵ -Fe₂₋₃N) e/ou gama linha (γ' -Fe₄N) (Fernandes et al., 2020) a camada branca pode possuir um efeito positivo na resistência a corrosão do material, principalmente devido a esta última fase, por apresentar uma estrutura cúbica de face centrada ordenada, com boa estabilidade e compacidade. Todavia, devido a possíveis diferenças de potencial resultante da mistura de fases na camada, microfissuras ou porosidades presentes, essa camada pode aumentar a suscetibilidade de corrosão do material base (Doche, 2002).

A amostra 4, com camada de óxido homogênea formada pela oxidação por plasma e espessura de aproximadamente 2 μ m apresentou resultados superiores nos ensaios em *salt spray* frente as demais amostras nitretadas. Tal resultado pode estar relacionado ao tipo de fase formadora da camada de óxido. A literatura (Hong et al., 2000; Queiroz, 2014; Rovani et al., 2011) demonstra que a fase desejada para ganhos de resistência à corrosão é a magnetita pura (Fe₃O₄), por possuir características compactas e homogêneas, dificultando a difusão de íons corrosivos. Possui também boa compatibilidade estrutural com os nitretos comumente formados na camada composta (ϵ -Fe₂₋₃N / γ' -Fe₄N) o que favorece a aderência da camada branca com a camada de óxido, evitando falhas no revestimento, como delaminação e trincas.

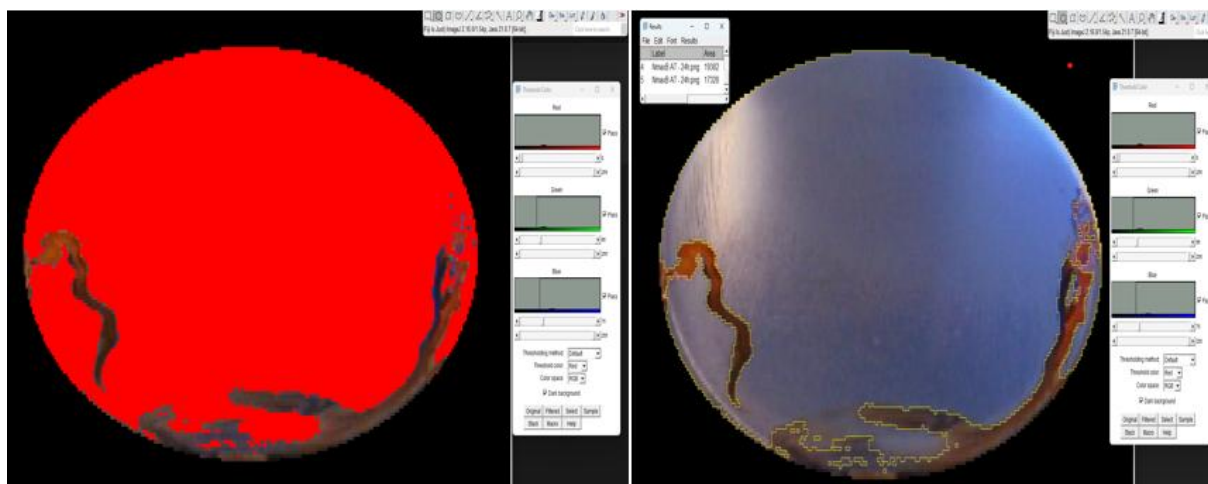
Dentre as formas possíveis de se analisar quantitativamente os resultados obtidos através de um ensaio em névoa salina, está a obtenção de um percentual da superfície que apresenta corrosão após um tempo determinado de teste.

Os ensaios foram realizados com pausas para registro em intervalos múltiplos de 24h e, a cada novo múltiplo, um novo registro foi realizado em caso de alteração significativa da superfície oxidada. Com esses registros, uma análise visual foi capaz de fornecer dados qualitativos sobre origem da oxidação.

A figura 23 ilustra o registro da amostra 3 após 24 horas de ensaio em névoa salina sendo possível identificar, na imagem à esquerda, a limiarização por cor vermelha utilizada para demarcar, através do espectro de cor RGB, as tonalidades que enquadravam a superfície não corroída. Já à direita, é possível identificar a demarcação por pixels dessa região. O software utilizado, de nome FIJI, permite a seleção da superfície desejada e é capaz de favorecer a obtenção de um valor referente a quantidade de pixels presente na mesma. Realizando a seleção da

amostra total, é possível identificar a quantidade total de pixels presentes na imagem e com ambos os valores, chegar a um número quantitativo de um percentual de área oxidada.

Figura 23 - Área da superfície corroída selecionada através do espectro RGB



Fonte: Autor (2025).

O programa de tratamento de imagem permite, dentro do range RGB de cores, selecionar manualmente a intensidade das cores primárias (0-255). Mesmo existindo uma padronização para realização dos registros das amostras após determinado intervalo de tempo, a própria coloração das amostras, intensidade de luz no ambiente e quantidade de oxidação, faz com que as cores presentes entre as amostras tenha grande divergência, o que não possibilita a utilização da mesma intensidade das cores primárias para obtenção da área não oxidada. Isso insere um percentual de erro do operador do software, já que a escolha de tais intensidades e consequente obtenção da região de interesse está inteiramente atrelada a percepção do usuário.

A Tabela 8 reúne os dados encontrados após seleção manual e individual das regiões corroídas nas amostras. Um sexto corpo de prova foi incluído, sendo esse sem tratamento algum, representando os efeitos do teste em névoa salina em uma amostra do aço base. Tal adição foi de suma importância para comparação dos ganhos de resistência a oxidação que os tratamentos aqui analisados trouxeram para o material.

Tabela 6 – Percentual de área oxidada de acordo com o período de exposição

	PERÍODO [h]				
	24	96	192	264	312
AÇO SEM TRATAMENTO	46,8%	91,8%	100%	100%	100%
AMOSTRA 1	-	-	1,9%	-	13%
AMOSTRA 2	57,7%	78,9%	81,5%	-	91,4%
AMOSTRA 3	10,6%	23,4%	38,5%	61,7%	71,6%
AMOSTRA 4	9,4%	16,2%	34,4%	-	65,1%
AMOSTRA 5	17,8%	60,3%	78,6%	-	83,1%

Fonte: Autor (2025).

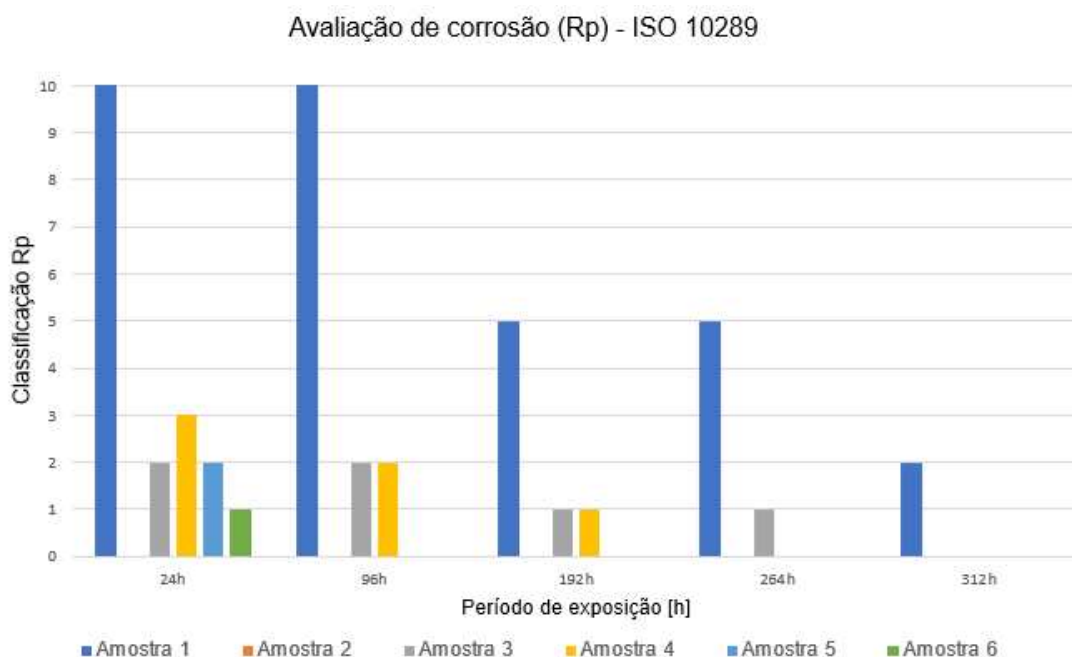
Nota geral: Os períodos sem valor percentual foram indicados pelo laboratório responsável pelo teste como não apresentando mudanças significativas de área oxidada em comparação com o período de visualização anterior.

As amostras nitretadas com melhor resultado no teste de salt spray foram as amostras 3 e 4. Ambas possuindo os mesmos parâmetros para a nitretação mas com métodos de pós oxidação diferentes: a amostra 4, passando pelo processo de pós oxidação a plasma, resultou em uma camada homogênea e constante de óxido com 2 μ m de espessura. Já a amostra 3 oxidou ao ar durante o processo de resfriamento, já que a câmara foi aberta com as amostras ainda em uma temperatura de 520°C, expondo as peças quentes ao oxigênio presente no ar. Esse processo resultou em uma camada não homogênea, com espessuras médias de 1 μ m. Tal diferença resultou em uma leve vantagem do processo com pós oxidação a plasma no ensaio em névoa salina.

A Figura 24 apresenta o resultado da classificação das amostras de acordo com os critérios da ISO 10289, avaliando em um intervalo de 0 a 10, o percentual de área superficial da amostra que apresenta corrosão. A classificação R_p 10 indica a máxima capacidade do revestimento em proteger o substrato contra corrosão.

Pelo gráfico é possível ver que apenas o revestimento de cromo duro conseguiu atingir nota 10, apresentando corrosão em sua superfície apenas no registro após 192h de imersão em névoa salina. A amostra 4, que passou pelo processo de oxidação por plasma, dentre as amostras nitretadas foi a que conseguiu manter uma maior nota ao longo dos períodos analisados, mantendo mais do que 50% de sua superfície livre de corrosão em 264h de exposição à névoa salina.

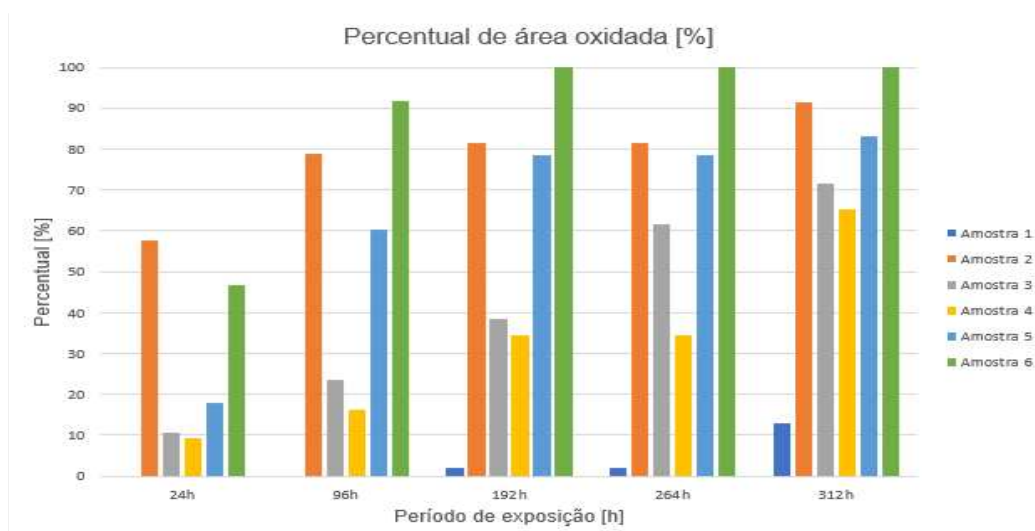
Figura 24 - Classificação de corrosão em acordo com a ISO 10289



Fonte: Autor (2025).

Para uma melhor análise visual e comparativa dos resultados do teste de *salt spray*, é apresentado na Figura 25 os resultados percentuais de área oxidada de todas as amostras ao longo do período de exposição. A única amostra que apresentou 100% de sua superfície com corrosão durante todo o período analisado foi a amostra de aço sem tratamento (amostra 6), tendo sua superfície corroída por completa após 192h de ensaio.

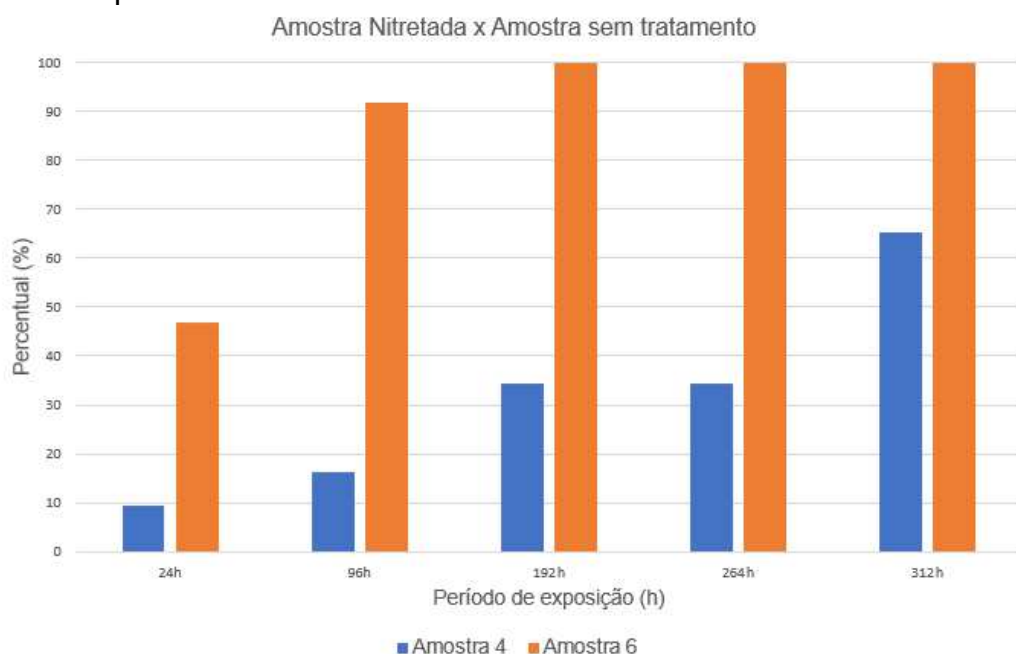
Figura 25 - Percentual de área oxidada de acordo com o período de exposição



Fonte: Autor (2025).

Através do ensaio em névoa salina, se tornou evidente a superioridade da camada eletrodepositada de cromo na prevenção contra corrosão do substrato frente aos tratamentos de nitretação utilizados. Todavia, não é nada negligenciável os ganhos de proteção trazidos pelas camadas nitretadas. A Figura 26 traz uma comparação entre o percentual de área oxidada da amostra 6 e a amostra 4, que passou pelo processo de pós oxidação a plasma e apresentou os melhores resultados se comparado com os outros processos de nitretação por plasma.

Figura 26 - Comparação do percentual de área oxidada entre amostra sem tratamento e amostra nitretada com processo de pós oxidação a plasma.



Fonte: Autor (2025).

Ni et al. (2024) demonstrou através de ensaio de polarização potenciodinâmica que, pós oxidar no plasma por 2 horas e 400°C amostras nitretadas, aumenta consideravelmente a resistência à corrosão do aço 42CrMo4, reduzindo seu potencial de corrosão (E_{corr}) de -658,72mV em amostra apenas nitretada para um E_{corr} de -429,23mV em uma amostra que passaram pelo processo de pós oxidação.

Sohi et al. (2010), analisando amostras de aço AISI 4140 obteve resultados igualmente positivos ao adicionar uma etapa de pós oxidação por plasma, em uma temperatura de 450°C por 1h, encontrando uma redução do potencial de corrosão de -655,6 mV em amostras sem tratamento, para -366,1mV nas amostras com pós

oxidação. A espessura da camada de óxido encontrada por Sohi et al. (2010) foi de 2,3 μ m, sendo da mesma ordem de grandeza da camada obtida no presente trabalho.

Esses resultados estão em plena concordância com os obtidos nos ensaios de névoa salina realizados neste trabalho, reforçando de maneira consistente os benefícios proporcionados pela inclusão de um processo de pós oxidação associada à nitretação por plasma.

5. CONCLUSÃO

O tratamento de cromo duro, nas condições previamente descritas e espessura de camada comumente utilizada na indústria de 25 μ m para, por exemplo, cilindros hidráulicos constituiu, nesse trabalho, em uma proteção superior contra corrosão frente aos critérios de nitretação aqui utilizados. Foi o tratamento que apresentou melhor nota de avaliação pela ISO 10289, apresentando menor área superficial com corrosão após as 312 horas de ensaio em névoa salina. Todavia, a nitretação por plasma, juntamente com processos controlados para formação de camadas de óxido após o tratamento, se mostrou promissora para a prevenção de corrosão do material base.

As camadas de óxido formadas após a nitretação se mostraram necessárias para um ganho ainda maior de resistência à corrosão, visto que a amostra de número 1, que passou por um processo de resfriamento a vácuo e consequente não obteve a formação de uma camada de óxidos na superfície do material, foi a que apresentou pior resultado no ensaio em névoa salina, tendo 91,4% de sua superfície com presença de corrosão após 312h de processo. Em contrapartida, a amostra 4, que passou pelo processo de pós-oxidação a plasma e apresentou uma camada de óxido de 2 μ m, maior entre as camadas de óxidos obtidas no presente trabalho, foi a amostra que apresentou menor área superficial corroída ao longo do teste em *salt spray*, com 65,1% de corrosão superficial após o mesmo período de análise.

A oxidação por plasma, nas características e processos em que foi realizada, apresentou ter leve vantagem no ensaio de *salt spray* frente aos demais processos de nitretação. A camada de óxido, com 2 μ m de espessura, formada de forma controlada pela introdução do gás oxigênio em um ambiente ionizado e com parâmetros controlados se mostrou eficiente para formação de uma camada homogênea e de espessura superior a camada de óxido formada nos demais tratamentos iônicos aqui analisados, o que pode ser traduzido como uma barreira mecânica uniforme que atua diretamente na proteção contra corrosão do substrato.

Os ganhos de resistência à corrosão atrelados ao processo de nitretação não são negligenciáveis. A amostra de aço SAE 1045 sem tratamento apresentou 100% de sua superfície corroída após 192 horas de ensaio em névoa salina enquanto a amostra nitretada com melhor desempenho (A4) apresentou apenas 34,4% de sua superfície com corrosão para o mesmo período de análise.

De acordo com os resultados obtidos com o presente trabalho, pode-se inferir que, com os parâmetros estudados, não se justificaria trocar o processo de eletrodeposição de cromo duro pelo processo de nitretação por plasma.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para completar o presente trabalho e preencher lacunas aqui deixadas, sugere-se:

- Um maior número de amostras para corroborar os resultados obtidos, visto que apenas 3 amostras de cada tratamento foram produzidas sendo uma destinada ao ensaio em névoa salina e outra destinada ao embutimento para análise de microscopia óptica e eletrônica de varredura.
- Análise GIDRX: para conferir as fases formadas tanto na camada composta quanto na camada de óxidos. Tais fases são bem descritas na literatura, nas quais variações podem ocorrer a depender dos parâmetros utilizados de nitretação e oxidação.
- Alteração de parâmetros visando aumentar espessura das camadas branca e de óxido: a camada de cromo, em espessura, correspondeu em ao menos duas vezes a das camadas geradas pelo processo de nitretação (descontando a camada de difusão). Os processos aqui realizados que formaram as maiores espessuras de camada branca + óxido (processos 1 e 3) foram os que obtiveram melhores resultados no ensaio de *salt spray*.
- Comparação entre aços baixa-liga e aços ligados, mantendo os mesmos parâmetros de processo. A nitretação possui ganhos elevados quanto maior a quantidade de elementos de liga no aço base, permitindo a formação de uma maior quantidade de nitretos com características mecânicas e de resistência a corrosão mais interessantes do que os nitretos de ferro formados em aços baixa-liga.
- Ensaio de microabrasão e fadiga: tanto a nitretação quanto a eletrodeposição de cromo duro visam um ganho mecânico e de resistência à corrosão. Para uma análise mais completa visando verificar viabilidade de substituição entre os tratamentos, se faz necessária uma análise de desgaste das camadas adicionadas.

REFERÊNCIAS

- ALMOTAIRI, A. Thermal damage of conventional hard chromium coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 372, p. 154–165, 2019.
- ALVES JUNIOR, Clodomiro. **Nitretação a plasma: fundamentos e aplicações**. Natal: EDUFRN, 2001.
- ARCELORMITTAL. **Aços para construção mecânica, 2017**.
- ASTM E3. **Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/standards/e3.html>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- BIGUETTI, Wilson José; BERTELLI, Felipe; FREITAS, Emmanuelle Sá. Estudo da resistência à corrosão do aço SAE 1045 na presença de solução de cloreto. **Anais do Encontro Nacional de Pós-Graduação – ENGP**, v. 5, n. 1, p. 123-134, jul. 2024.
- BIROSCA, Soran. **The microstructural development of oxide scales on low carbon steels**. 2006. Tese (Doutorado em Filosofia - PhD) – Institute of Polymer Technology and Materials Engineering, Loughborough University, Loughborough 2006.
- CAIXETA, Alexandre de Azevedo. **Efeito da nitretação a plasma e deposição de recobrimento de nitreto de cromo na transição de regimes de desgaste por deslizamento de aços ultrabaixo carbono estabilizados ao titânio**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- CASTRO, Richard de Medeiros. **Avaliação das propriedades de superfície e do comportamento ao desgaste abrasivo de hastes de cilindros hidráulicos revestidas pelos processos HVOF e cromo duro eletrodepositado**. 2012. Dissertação (Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- CHAPMAN, B. **Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching**. Nova Iorque: Wiley, 1980.
- CORNELL, R.M.; SCHWERTMANN, U. The iron oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses. 2a ed. Weinheim: Wiley-VHC, 2003.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 50190-3: **Hardness testing of metallic materials – Hardness test on metallic coatings – Part 3: Case hardening depth – Determination of the effective depth of hardening**. Berlin: DIN, 1979
- DINI, J. W. **Electrodeposition: The Materials Science of Coatings and Substrates**. Park Ridge: Noyes Publications, 1993.
- DOCHE, M. L.; MEYNIE, V.; MAZILLE, H.; DERAMAIX, C.; JACQUOT, P. Improvement of the corrosion resistance of low-pressure nitrided and post-oxidized

steels by a polymer impregnation final treatment. **Surface and Coatings Technology**, v. 154, n. 2–3, p. 113-123, 2002.

EBRAHIMI, M. et al. Effect of plasma nitriding temperature on the corrosion resistance of AISI 4140 steel. **Surface & Coatings Technology**, v. 205, p. 2261-2268, 2010.

FERNANDES, F. A. P.; HECK, S. C.; PICONE, C. A.; CASTELETTI, L. C. **On the wear and corrosion of plasma nitrided AISI H13**. **Surface & Coatings Technology**, v. 381, p. 1-12, 2020.

FERREIRA, G. E. F. **Avaliação da resistência à Fadiga térmica do aço AISI H13 nitretado pelos processos gasoso e por plasma**. 2001. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

FIGUEROA, C. A. **Propriedades microscópicas e macroscópicas de superfície em ligas ferrosas implantadas com nitrogênio**. 2004. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin. Campinas. 2004.

FLODSTRÖM, I. **Nitrocarburizing and high temperature nitriding of steels for bearing applications**. Trabalho de conclusão (Mestrado) - Göteborg: Chalmers University of Technology, Department of Materials and Manufacturing Technology, 2012.

FONTANA, Luis César. Nitretação iônica em aços baixo carbono. 1991. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991

FREISLEBEM, Márcia. **Química de superfície e atrito em nanoescala do aço-carbono AISI 1045 nitretado e pós-oxidado a plasma**. 2014. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais) — Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

GAD, Shedrack Musa; ZHOU, Xiaorong; LYON, Stuart B.; EMAD, Seydgholamreza. Inhibition mechanism of anticorrosion pigments leached from organic coatings: Comparison between salt spray and immersion testing. **Progress in Organic Coatings**, v. 174, 2023.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1996

HONG, J. M.; CHO, Y. R.; KIM, D. J.; BAEK, J. M.; LEE, K. H. Plasma post-oxidation process for nitrocarburized layer. **Surface and Coatings Technology**, v. 131, n. 1–3, p. 547-551, 2000.

ISHIZUKA, N.; YAMADA, T.; IZUI, K. et al. Topology optimization for unifying deposit thickness in electroplating process. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 62, p. 1767-1785, 2020. DOI: 10.1007/s00158-020-02574-8.

JONES, A. R. D. Microcracks in hard chromium electrodeposits. **Plating and Surface Finishing**, v. 76, p. 62–66, 1989.

KOVÁCS, D., Quintana, I. & Dobránszky, J. Effects of Different Variants of Plasma Nitriding on the Properties of the Nitrided Layer. **Journal of Materials Engineering and Performance** **28**, 5485–5493 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04292-9>

LANDGRAF, P.; BERGELT, T.; RYMER, L.-M.; KIPP, C.; GRUND, T.; BRÄUER, G.; LAMPKE, T. Evolution of microstructure and hardness of the nitrided zone during plasma nitriding of high-alloy tool steel. **Metals**, v. 12, n. 5, p. 866, 2022. DOI: 10.3390/met12050866.

LEE, Kou Hyun; NAM, Ki Suk; SHIN, Pyung Woo; LEE, Deuk Yong; SONG, Yo-Seung. Effect of post-oxidizing time on corrosion properties of plasma nitrocarburized AISI 1020 steel. **Materials Letters**, v. 57, n. 13–14, p. 2060-2065, 2003.

LIEDTKE, Dieter; BAUDIS, Ulrich; BOßLET, Joachim; HUCHEL, Uwe; LERCHE, Wolfgang; SPIES, Heinz-Joachim; KLÜMPER-WESTKAMP, Heinrich. **Tratamento térmico de materiais ferrosos: nitretação e nitrocarbonetação**. 7. ed. rev. Tübingen: Expert Verlag, 2005. ISBN 8169-2416-6.

LINSINGEN, I. V. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Ed. UFSC, 3ªed., Florianópolis, SC, 2008. 399p.

MAHBOUBI, F.; FATTAH, M. Duplex treatment of plasma nitriding and plasma oxidation of plain carbon steel. **Vacuum**, Amsterdam, v. 79, n. 1–2, p. 1–6, 2005.

MANDICH, Nenad V.; SNYDER, Donald L. Electrodeposition of chromium. In: SCHLESINGER, Michael; PAUNOVIC, Milan. **Modern electroplating**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2010. Cap. 7, p. 279-310.

MATOS, Tamires de. **A influência da preparação da superfície na cromagem de barras do aço SAE 1045**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química Industrial) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MATTOX, D. M. **Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing**. 2. ed. Norwich, N.Y.: William Andrew, 2010.

MIAO, Bin; ZHAO, Xiaobing; SONG, Lu; WEI, Kunxia; HU, Jing. Raising the corrosion resistance of plasma-nitrided Steel 45 (AISI 1045) by preliminary sandblasting. **Metal Science and Heat Treatment**, v. 60, 2019. DOI: 10.1007/s11041-019-00360-y.

MUÑOZ-CASTRO, A. E.; DE LA PIEDAD-BENÉITEZ, A.; VALENCIA-ALVARADO, R.; LÓPEZ-CALLEJAS, R.; MERCADO-CABRERA, A.; PEÑA-EGUILUZ, R.; RODRÍGUEZ-MENDEZ, B. G. The corrosion enhancement due to plasma post-oxidation subsequent to plasma nitriding of a steel AISI 4140. **Acta Physica Polonica A**, v. 128, n. 5, p. 824-827, 2015

NAEEM, M.; DÍAZ-GUILLÉN, J.C.; KHALID, A.; GUZMÁN-FLORES, I.; MUÑOZ-ARROYO. Improved wear resistance of AISI-1045 steel by hybrid treatment of plasma nitriding and post-oxidation. **Tribology International**, v.175, n.107869, 2022.

NGUYEN, Vinh Phoi; DANG, Huu Trong; NGUYEN, Nhut Phi Long; LE, Chi Cuong; DANG, Thien Ngon. Study on microcracks' density and residual stress of the hard chrome electroplating layer in the AISI 1045 steel. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 64, n. 4, p. 1–8, 05 set. 2024. DOI: 10.1080/00084433.2024.2398914.

NI, J.; MA, H.; WEI, W.; AN, X.; YU, M.; HU, J. Novel effect of post-oxidation on the comprehensive performance of plasma nitriding layer. **Coatings**, v. 14, n. 1, p. 86, 2024.

NORONHA, Leandro Câmara; DE CASTRO, V. Velho; LUDWIG, G. A.; SCHROEDER, R. M.; Malfatti, C. de F. Plasma electrolytic nitrocarburizing of SAE 1045: electro-chemical slurry erosion wear analysis. **Materials Research**, v. 27, 2024. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2023-0283.

OLIVEIRA, A. M. de; MUÑOZ RIOFANO, R. M.; CASTELETTI, L. C.; TREMILIOSI, G. F.; BENTO, C. A. S. **Effect of the Temperature of Plasma Nitriding in AISI 316L Austenitic Stainless Steel**. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 22, n. 2, p. 63-66, 2003.

OILIVEIRA, Vasconcelos Romão de. **Análise de imagem no controle de qualidade de sementes de soja**. 2024. 127f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

PARANAIBA, R. S. **Avaliação da nitretação a plasma como alternativa ao revestimento de cromo duro em cilindros de laminação a frio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

PINTO, D. L. M. F.; FIGUEIREDO, I. S.; BUENO, A. H. S. Avaliação da incidência de trincas e sua influência na resistência à corrosão de aços revestidos com diferentes espessuras de cromo. **INTERCORR**, 2012, p. 157.

QUEIROZ, Mayara Kelly Nunes. **Nitretação e pós-oxidação a plasma pulsado de aços baixa liga** (Projeto de Graduação – Engenharia de Materiais). Rio de Janeiro: Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

RASTKAR, A. R.; KIANI, A.; ALVAND, F.; SHOKRI, B.; AMIRZADEH, M. Effect of pulsed plasma nitriding on mechanical and tribological performance of Ck45 steel. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v.11, n. 6, p. 5365-5373, 2011.

RESCHKE, M. et al. A digital pathology tool for quantification of color features in histological and immunofluorescence images. **Bioengineering & Translational Medicine**, v. 7, n. 1, e10242, 2022.

RIOFANO, R. M. **Efeito das variáveis de nitretação por plasma na resistência à abrasão de um aço “maraging”**. 1997. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

ROVANI, A. C.; CRESPI, A. E.; SONDA, V.; CEMIN, F.; ECHEVERRIGARAY, F. G.; AMORIM, C. L. G.; BASSO, R. L. O.; BAUMVOL, I. J. R.; FIGUEROA, C. A.

Plasma post-oxidation mechanisms of nitrided ferrous alloys. **Surface and Coatings Technology**, v. 205, n. 11, p. 3422-3428, 2011.

SINGH, G. P.; ALPHONSA, J.; BARHAI, P. K.; RAYJADA, P. A.; RAOLE, P. M.; MUKHERJEE, S. Effect of surface roughness on the properties of the layer formed on AISI 304 stainless steel after plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, v. 200, n. 20-21, p. 5807-5811, 2006.

SOLTANIEH, M.; AGHAJANI, H.; MAHBOUBI, F.; NEKOUUE, K.A. Surface characterization of multiple coated H11 hot work tool steel by plasma nitriding and hard chromium electroplating processes. **Vacuum**, v.86, n.10, p.1470-1476, 2012.

SPRINGER, Alexandria; ROLINSKI, Edward. Plasma nitriding process and best applications. In: **HEAT TREATING SOCIETY CONFERENCE AND EXPOSITION**, 32., 2023, Detroit. Proceedings of the HT 2023. Detroit: ASM, 2023. p. 77-81. DOI: 10.31399/asm.cp.ht2023p0077

SUN, Y. Kinetics of low temperature plasma carburizing of austenitic stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v.168, pp.189-194, 2005

TOMIELLO, Stevan Scussel. **Tratamento termoquímico assistido a plasma para incremento da resistência à corrosão de aço-carbono**. 2012. Dissertação (Pós-graduação em Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2012.

VALE, Alan Rafael Menezes do. **Tratamento térmico**. Belém-PA: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2011.

WATANABE, T. Nano-Plating: Microstructure Control Theory of Plated Film and Data Base of Plated Film Microstructure. Elsevier, 1999.

Wiesemann, K. (2014). A Short Introduction to Plasma Physics. CAS-CERN Accelerator School: Ion Sources - Proceedings. 10.5170/CERN--2013--007.85.