

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

KEILA DA SILVA SANT'ANNA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MORFOLÓGICAS DO AÇO NAVAL A36  
JATEADO POR PLASMA TÉRMICO COM DIFERENTES GASES

Joinville

2024

KEILA DA SILVA SANT'ANNA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MORFOLÓGICAS DO AÇO NAVAL A36  
JATEADO POR PLASMA TÉRMICO COM DIFERENTES GASES

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

Orientadora: Dra. Viviane Lilian Parucker Soethe.

KEILA DA SILVA SANT'ANNA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MORFOLÓGICAS DO AÇO NAVAL A36  
JATEADO POR PLASMA TÉRMICO COM DIFERENTES GASES

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

Joinville (SC), 13 de dezembro de 2024.

**Banca Examinadora:**

---

Dra. Viviane Lilian Parucker  
Orientadora/Presidente

---

Dr. Moisés Luiz Parucker  
Membro  
Universidade do Estado de Santa Catarina

---

Dr. Rafael Galina Delatorre  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Sant'Anna, Keila da Silva  
ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MORFOLÓGICAS DO AÇO  
NAVAL A36 JATEADO POR PLASMA TÉRMICO COM DIFERENTES GASES /  
Keila da Silva Sant'Anna ; orientadora, Viviane Lilian  
Soethe Parucker, 2024.  
70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,  
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Tratamento de superfície. 3. Aço  
naval ASTM A36. 4. Plasma térmico. I. Parucker, Viviane  
Lilian Soethe . II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

Dedico este trabalho à minha orientadora, Dra Viviane Lilian Soethe Parucker , que muito mais que uma orientadora e professora, foi e é uma amiga

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Wanderleia Melo da Silva, meu mais profundo agradecimento pela oportunidade e pelo incentivo constantes para que eu lutasse pelos meus sonhos, mesmo quando a realidade muitas vezes, tornava difícil sonhar. Sou grata por ela sempre acreditar no meu potencial, por atender todos os meus telefonemas e por me acolher de portas e braços abertos ao longo desses anos. Mamãe, obrigada por tudo até aqui. Espero ter honrado toda a confiança e oportunidade que me deu.

Ao meu pai, Claudemir Sant'Anna Lopes, meu agradecimento remonta a um período em que cursar Engenharia Naval parecia inimaginável: minha infância! Obrigada, papai, por todas as maquetes, pelas feiras de ciências, pelas lições de matemática e por toda a paciência e cuidado.

Agradeço também à minha avó, Geraldina Miguel Caetano, à minha tia e madrinha Vanusa Caetano e aos meus amigos e amigas: Amanda Hansen, Marina Cecyn, Brenda Panni, Lais Moreira, Larissa Vala, Arthur Brandão, André Teizen, Brenda Schulz, Ana Paula G., Ariel Avi, Sidimar Tedesco e Lais Maria, por terem contribuído de forma inestimável para que eu chegasse até aqui.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de um ensino superior de excelência e às instituições que viabilizaram a realização desta pesquisa. À professora Viviane Lilian Soethe Parucker, sou imensamente grata pelos anos de ensino, parceria e confiança. Ao professor Moisés Parucker, obrigada pelo suporte e orientações. Que honra é poder dividir o conhecimento com vocês.

Agradeço as empresas e laboratórios parceiros, que viabilizaram essa pesquisa experimental; Estaleiro Naviship, Weld Vision Equipamentos de Solda e Corte, Laboratory of Surface Treatments (LST-CTJ), Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (UDESC), Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) e Whirlpool Corporation. Aos colaboradores à execução desse trabalho, Luiza Grola e Ricardo Scheffer, meu muito obrigada!

Vitória R. R. Gaia, à você, agradeço por ser inspiração de vida. Obrigada por dividir comigo o conhecimento, sua família, seu tempo e a oportunidade de pesquisarmos juntas.

Com essa pesquisa encerro um ciclo importante na minha trajetória. É o passo final para o início de um novo capítulo. Me sinto aliviada, realizada, vitoriosa e agradecida a mim mesma por não ter desistido e postergado esse desfecho.

## RESUMO

Na indústria naval, o tratamento superficial do aço antes da pintura desempenha um papel crucial para retardar a corrosão e aumentar a durabilidade do material. Um preparo inadequado pode resultar no deslocamento do revestimento, expondo o aço às condições adversas do ambiente marinho. Isso acarreta custos elevados com manutenções prematuras, falhas estruturais e redução no desempenho de embarcações e estruturas offshore. O método mais comum para esse preparo é o jateamento abrasivo com granalha de aço, amplamente utilizado para tratar superfícies metálicas. Contudo, a busca por alternativas ao método convencional pode trazer avanços importantes para a construção naval. Neste contexto, este estudo avaliou as propriedades mecânicas e morfológicas do aço naval ASTM A36 submetido a um tratamento alternativo por jateamento com plasma térmico, utilizando os gases argônio, nitrogênio e ar comprimido. Os parâmetros do processo foram definidos empiricamente: corrente de 35 A, pressão do gás a 0,3 MPa, distância de três milímetros entre a tocha e a amostra, e velocidade de aplicação de aproximadamente 25 mm/s. Foram realizadas análises no aço ASTM A36 considerando a porcentagem de carbono estimada, alterações nas fases constituintes, mudanças na microdureza e rugosidade após o tratamento, além da influência dessas modificações na adesão da tinta e na resistência à oxidação em ambientes agressivos. Os resultados indicaram que, com ajustes adequados nos parâmetros do processo de jateamento por plasma térmico, o método apresenta potencial como alternativa eficiente para o preparo de superfícies metálicas. As análises de rugosidade revelaram valores médios ( $R_a$ ) de aproximadamente 3  $\mu\text{m}$  para amostras tratadas com plasma ionizado por argônio e 17,5  $\mu\text{m}$  para aquelas tratadas com nitrogênio. Nas amostras jateadas com ar comprimido, a  $R_a$  ultrapassou o limite de medição do rugosímetro (40  $\mu\text{m}$ ), impossibilitando uma quantificação precisa. Em testes de adesão após exposição à névoa salina, as amostras tratadas com ar comprimido apresentaram desempenho inferior em comparação às tratadas com os outros gases. Além disso, as superfícies submetidas ao jateamento exibiram mudanças nas fases de ferrita e perlita



fina, com regiões onde as fases constituintes não puderam ser identificadas devido às altas temperaturas geradas no processo.

**Palavras-chave:** aço naval; ASTM A36; plasma térmico.

## ABSTRACT

In the naval industry, surface treatment of steel prior to painting plays a crucial role in delaying corrosion and increasing the material's durability. Inadequate preparation can result in coating detachment, exposing the steel to the adverse conditions of the marine environment. This leads to high costs due to premature maintenance, structural failures, and reduced performance of vessels and offshore structures. The most common method for this preparation is abrasive blasting with steel shot, widely used for treating metallic surfaces. However, the search for alternatives to the conventional method may bring significant advancements to shipbuilding. In this context, this study evaluated the mechanical and morphological properties of ASTM A36 naval steel subjected to an alternative treatment using thermal plasma blasting with argon, nitrogen, and compressed air. The process parameters were empirically defined: current of 35 A, gas pressure of 0.3 MPa, a distance of three millimeters between the torch and the sample, and an approximate application speed of 25 mm/s. Analyses were conducted on ASTM A36 steel, considering the estimated carbon percentage, changes in constituent phases, modifications in microhardness and roughness after treatment, as well as the influence of these changes on paint adhesion and oxidation resistance in aggressive environments. The results indicated that, with proper adjustments to the thermal plasma blasting process parameters, the method shows potential as an efficient alternative for preparing metallic surfaces. Roughness analyses revealed average roughness values ( $R_a$ ) of approximately 3  $\mu\text{m}$  for samples treated with argon-ionized plasma and 17.5  $\mu\text{m}$  for those treated with nitrogen. For samples blasted with compressed air, the  $R_a$  exceeded the measurement limit of the roughness meter (40  $\mu\text{m}$ ), making precise quantification impossible. In adhesion tests after salt spray exposure, the samples treated with compressed air showed inferior performance compared to those treated with other gases. Furthermore, the surfaces subjected to blasting exhibited changes in the ferrite and fine pearlite phases, with regions where constituent phases could not be identified due to the high temperatures generated during the process.

**Keywords:** naval steel; ASTM A36; thermal plasma.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Diagrama de Fases Fe-C.....	22
Figura 2 – Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga Fe-C hipoeutetóide .....	23
Figura 3 – Esquema diminuição da espessura na laminação do aço .....	25
Figura 4 – Representação do bandeamento em um aço de baixo carbono.....	27
Figura 5 – Esquema de aderência mecânica de um revestimento ao substrato de aço .....	30
Figura 6 – Ilustração do processo de desagregação da carepa de laminação .....	31
Figura 7 – Ilustração do processo de desagregação da carepa de laminação .....	31
Figura 8 – Equipamento completo de jateamento abrasivo .....	33
Figura 9 – Representação dos quatro estados da matéria em função da temperatura e entalpia específica.....	35
Figura 10 – Transição dos estados da matéria com aumento de energia .....	35
Figura 11 – Amostras preparadas para serem jateadas por plasma.....	41
Figura 12 – Equipamento utilizado no jateamento: máquina de corte e tocha a plasma Flash.....	42
Figura 13 – Equipamento utilizado para perfil de microdureza HV .....	43
Figura 14 – Ilustração da impressão deixada pelo penetrador de ensaio HV .....	44
Figura 15 – Amostras após o jateamento por plasma térmico com diferentes gases	48
Figura 16 – Amostra jateada por ar comprimido: evidências de microfusão no material .....	49
Figura 17 – MO aumento de 400x do aço A36 sem tratamento evidenciando as fases presentes ferrita e perlita .....	51
Figura 18 – MEV aumento de 1000x: Lamelas de perlita e matriz ferrítica no aço A36 sem tratamentos superficiais.....	52
Figura 19 – MO do aço de referência aumento de 100x, constituído por ferrita proeutetóide e perlita, com bandeamento no sentido de laminação .....	53
Figura 20 – Seção transversal do aço estrutural com superfície oxidada e regiões de decarbonetação causada por altas temperaturas, aumento de 400x .....	55
Figura 21 – Análise da micrografia da sessão transversal das amostras antes e após o jateamento por plasma, aumento de 400x.....	56

Figura 22 – lagem das amostras pintadas após teste de adesão, utilizando o método B da norma NBR 11003.....	57
Figura 23 – Testes de adesão por fita filamentosa, amostras jateadas por processo convencional e por plasma, antes e após imersão em névoa salina .....	58
Figura 24 – Perfil de microdureza das amostras após os processos de jateamento por plasma e aço não jateado.....	60
Figura 25 – Perfil de microdureza da média das amostras jateadas por plasma térmico, jateado por abrasivo e referência não jateada.....	60
Figura 26 – Marcação do penetrador HV em diferentes fases .....	61
Figura 27 – MEV da superfície do aço A36 jateada por processo convencional sem preparação metalográfica, (a) aumento 500x e (b) aumento de 1000x.....	62
Figura 28 – MEV das amostras jateadas por plasma térmico com diferentes gases evidenciando as regiões transversal e o núcleo das amostras.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – ASTM A36 requisitos químicos.....	24
Tabela 2 – Características mecânicas do aço ASTM A36 .....	<del>25</del> 24
Tabela 4 – Parâmetros utilizados no jateamento por plasma com diferentes gases .....	<del>42</del> 43
Tabela 5 – Valores de Ra das amostras jateadas por diferentes métodos.....	49
Tabela 6 – Perfil de microdureza (HV) e valor de referência do substrato A36.....	<del>59</del> 60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Amperes

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

$Al_2O_3$  – Óxido de Alumínio

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

C – Carbono

CCT – Centro de Ciência e Tecnologia

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

$Cl_2$  – Iodo

DRX – Difração de Raios X

Fe – Ferro

$F_2$  – Flúor

HV – Vickers Hardness (Dureza Vickers)

$H_2$  – Hidrogênio

LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão

kgf – Quilograma-força

kV – quilovolt

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mn – Manganês

mm – Milímetros

mm/s – Milímetros por segundo

MO – Microscopia Óptica

MPa – Mega Pascal

NaCl – Cloreto de sódio

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

Nm – newton-metro

$N_2$  – Nitrogênio

P – Fósforo

$O_2$  – Oxigênio

s – Segundos

S – Enxofre

Si – Silício

UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1. OBJETIVOS .....	19
1.1.1. Objetivo Geral .....	19
1.1.2. Objetivos Específicos .....	19
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>20</b>
2.1. AÇO .....	20
2.1.1 Caracterização do aço .....	20
2.1.7 Aço ASTM A36 .....	23
2.1.4 Processo de conformação a quente .....	25
2.1.5 Formação de fases bandeadas .....	26
2.2 PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO: REVESTIMENTO DO AÇO NAVAL .....	27
2.2.1 Corrosão .....	28
2.2.2 Pintura na construção naval .....	29
2.2.3 Limpeza e preparo da superfície do aço .....	29
2.2.4 Carepa de laminação .....	30
2.3 LIMPEZA E PREPARO DE SUPERFÍCIES .....	32
2.3.1 Métodos tradicionais: Jateamento com abrasivo .....	32
2.3.2 Métodos Alternativos: Plasma .....	33
2.4 O PLASMA .....	34
2.5.1 Plasma térmico .....	36
2.5.2 Geração do plasma térmico .....	37
2.5.3 Gases de ionização .....	38
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>40</b>
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL .....	41
3.2.1 Metalografia .....	41
3.3 TRATAMENTO COM JATEAMENTO POR PLASMA TÉRMICO .....	42
3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA .....	43
3.5 MICROSCOPIA ÓPTICA .....	45
3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	45
3.7 ENSAIO DE NÉVOA SALINA .....	45
3.8 TESTE DE ADESÃO .....	46



<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
4.1 JATEAMENTO POR PLASMA TÉRMICO .....	48
4.2 ANÁLISE METALGRÁFICA DO AÇO .....	50
<b>4.2.1 Análise metalográfica das amostras jateadas por plasma térmico .....</b>	<b>54</b>
4.3 TESTE DE ADESÃO .....	56
4.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS .....	59
4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	61
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	65
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A corrosão é uma das principais ameaças à integridade estrutural de embarcações, causando enfraquecimento e descontinuidades em áreas críticas. No contexto naval, a corrosão resulta predominantemente da exposição do aço e de componentes metálicos à atmosfera marinha ou ao contato direto com a água (Garbatov *et al.*, 2013). Os aços inoxidáveis, caracterizados por elementos de liga que conferem alta resistência à corrosão são raramente utilizados em estruturas navais devido aos elevados custos iniciais e de fabricação, sendo geralmente empregados apenas na construção de tanques de carga para materiais altamente corrosivos (Molland, 2008).

O ambiente alcalino, que intensifica a troca de elétrons nos substratos expostos, associado à deposição de partículas e aos esforços mecânicos, pode desencadear processos de corrosão eletroquímica, consumindo uma quantidade significativa de material da estrutura (Garbatov *et al.*, 2013). Por isso, é fundamental adotar métodos de proteção eficazes que vão além do revestimento final e incluem também um tratamento de superfície adequado.

O tratamento mais comum para preparo de superfícies antes da aplicação de revestimentos é o jateamento abrasivo com granelhas de aço (Lamb, 2003). No entanto, há estudos acerca de métodos alternativos que possibilitariam melhorias não só na adesão no revestimento, mas também no retardo a corrosão. Um desses métodos é o uso de plasma térmico para tratar a superfície do aço naval A36 exposto ao ambiente marinho. Kruger (2023), sugere parâmetros para tratamento de superfície utilizando plasma térmico, utilizando uma tocha de plasma manual e de arco não transferido, a corrente de trabalho em 65 A e a utilização de ar comprimido como gás de ionização.

Apesar da eficiência demonstrada por processos utilizando plasma térmico (Singh *et al.*, 2018), sua aplicação em estaleiros para tratamentos de superfície ainda é limitada, com poucas pesquisas que homologuem a viabilidade prática. Estudos mostram resultados promissores, como o uso do *Plasma Spray Coating* (PSC) em revestimentos inorgânicos (Singh *et al.*, 2014). Observações incluindo ensaios de névoa salina, revelam que o processo impede o deslocamento do revestimento no aço A36 (Kruger, 2023). Contudo, análises aprofundadas sobre os efeitos morfológicos e ganho desse método são necessárias para consolidar sua aplicação.

Este trabalho amplia a pesquisa de Kruger (2023) o desempenho do aço

navalA36 tratado com plasma térmico, utilizando gases ionizantes como argônio, nitrogênio e ar comprimido. A pesquisa foi estruturada em quatro etapas: análise inicial das características microestruturais sem tratamento, avaliação após jateamento com plasma térmico, análise dos resultados pós-tratamento e estudo do comportamento do material em ambiente salino. Os resultados de Kruger (2023) indicam que o uso de plasma térmico pode proporcionar melhorias significativas na resistência à corrosão, sendo uma alternativa eficiente ao jateamento abrasivo tradicional.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar as alterações morfológicas e mecânicas após aplicação de jateamento por plasma térmico com três diferentes gases em amostras de aço naval A36.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir os parâmetros utilizados para o jateamento por plasma, alternando os gases de ionização;
- Avaliar alterações morfológicas para diferentes gases;
- Avaliar a microdureza em regiões próximas ao jateamento e as regiões sem incidência direta;
- Comparar a eficiência entre os diferentes jateamentos no retardo dos processos de corrosão.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a caracterização das propriedades mecânicas dos aços é necessário o entendimento teórico sobre as principais classes e propriedades do aço A36, matéria-prima elementar na construção de embarcações mercantes, assim como as principais causas que levam ao seu desgaste e formas para aumentar seu tempo de vida útil. Nessa seção, para compreender esse processo, são descritos os conceitos e resultados de trabalhos científicos identificados nas bases de dados CAPES Periódicos, ScienceDirect, SciELO (Scientific Electronic Library Online), IEEE Xplore, Web of Science e Repositórios Institucionais, no período de outubro de 2023 a dezembro 2024, envolvendo o aço A36 e a correlação com processos de tratamento de superfície e revestimento, além das características gerais desse material.

### 2.1. AÇO

Os metais possuem propriedades características que os tornam facilmente identificáveis como magnetismo, opacidade, alta condutividade elétrica e térmica, além de ductilidade. As ligas metálicas por sua vez, são compostas pela combinação de dois ou mais elementos químicos, sendo que pelo menos um deles é metálico, resultando em fases que mantêm predominantemente propriedades metálicas. Exemplos comuns incluem o latão (cobre e zinco), o aço-carbono (ferro e carbono) e o bronze (cobre e estanho) (Pannoni, 2005).

O aço destaca-se como uma das ligas metálicas mais utilizadas devido às suas excelentes propriedades mecânicas, à ampla disponibilidade de matérias-primas e ao custo competitivo. Sua versatilidade permite a adaptação de características específicas para diferentes aplicações. No setor naval e offshore, o aço-carbono é amplamente empregado por oferecer uma boa relação entre custo e desempenho mecânico. Entretanto, sua resistência limitada à corrosão representa uma restrição importante, evidenciando a necessidade de pesquisas que visem ao desenvolvimento de métodos mais eficientes para retardar esse processo degradante (Materiais Metálicos, 2003).

#### 2.1.1 Caracterização do aço

O aço é uma liga metálica complexa, composta principalmente por ferro (Fe) e carbono (C), com a adição de outros elementos durante sua fabricação para aprimorar suas propriedades mecânicas e químicas. A quantidade de carbono, geralmente

inferior a 1,0%, é fundamental para definir as características mecânicas da liga, impactando diretamente na dureza, resistência e ductilidade do material (Chiaverini, 1996).

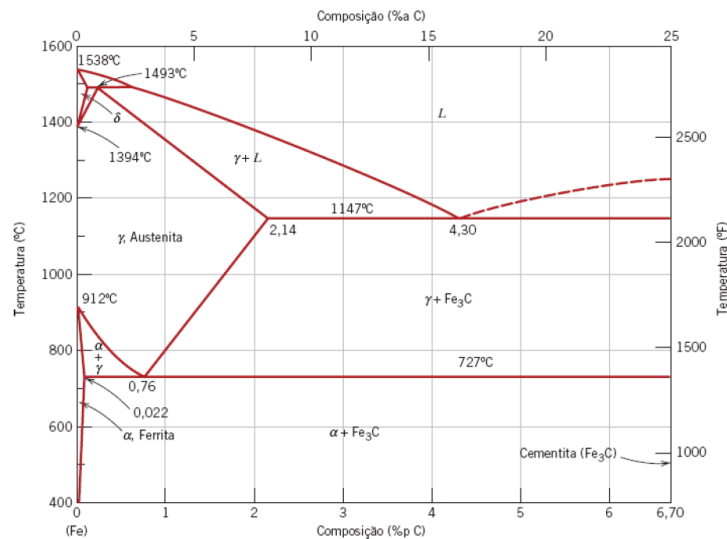
A caracterização do aço é feita com base no limite de solubilidade do carbono em uma matriz ferrítica, que é dividida em três categorias: baixo, médio e alto teor de carbono (Callister Junior; Rethwisch, 2016). A solubilidade do carbono pode ser modificada pela adição de outros elementos de liga em altas concentrações, alterando as propriedades da liga (Chiaverini, 1996).

Um elemento fundamental para compreender os aços é o diagrama Ferro-Carbono. Segundo Shackelford (2008), esse diagrama é uma ferramenta indispensável, funcionando como um mapa que prevê as transformações microestruturais de um material em diferentes temperaturas e composições, com base no equilíbrio do sistema.

No contexto dos materiais metálicos, uma fase pode ser definida como uma parte homogênea de um sistema com propriedades físicas e químicas uniformes. Para aços e demais ligas metálicas, a microestrutura é caracterizada pelo número de fases presentes, por suas proporções e pela maneira segundo a qual elas estão distribuídas ou arrançadas. A microestrutura depende dos elementos de liga presentes, suas concentrações e ainda, o tratamento térmico da liga (Callister Junior; Rethwisch, 2016).

A Figura 1 apresenta o diagrama de equilíbrio Fe-C para teores de 0 a 6,71% de carbono. No entanto, os aços comerciais não são ligas binárias puras, pois contêm elementos residuais, como fósforo, enxofre, silício e manganês, provenientes dos processos de fabricação. Apesar da presença desses elementos, seus efeitos sobre o comportamento descrito pelo diagrama ferro-carbono são mínimos quando suas concentrações estão dentro dos níveis normais (Chiaverini, 1996).

Figura 1– Diagrama de Fases Fe-C



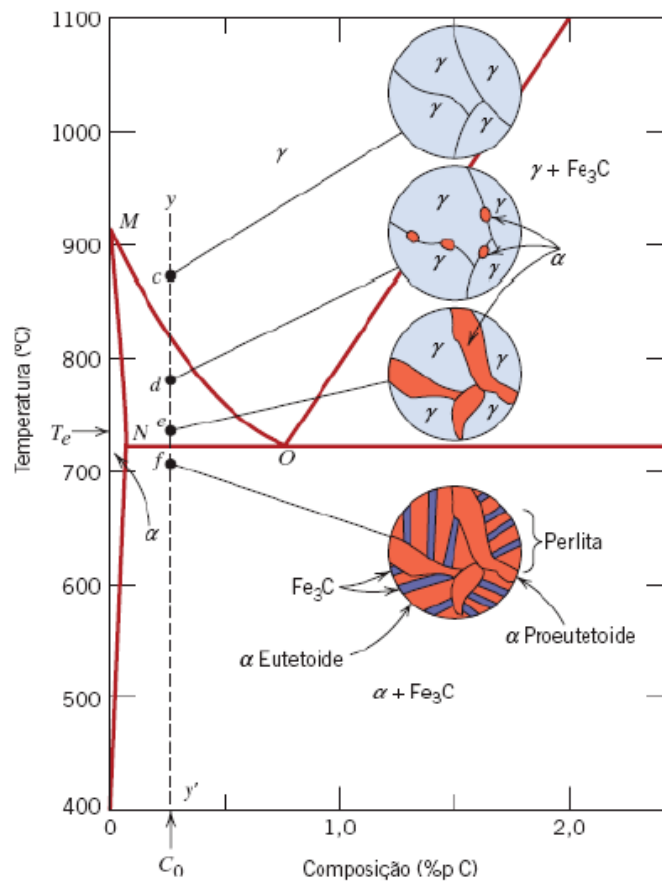
Fonte: Callister Junior; Rethwisch (2016, p. 319).

O Diagrama Ferro-Carbono (Fe-C) é também conhecido como Ferro-carbeto de ferro (Fe-Fe<sub>3</sub>C), visto que à extrema direita do gráfico tem-se o carboneto de ferro ou cementita (Fe<sub>3</sub>C). Entretanto, não se trata de um equilíbrio estável, pois mesmo em ligas relativamente puras quando mantidas em altas temperaturas, na faixa dos 700°C por longos anos, a cementita tende a se decompor em ferro e carbono (em forma de grafita) (Chiaverini, 1996).

As ligas ferrosas baseadas no diagrama Fe-C podem ser classificadas em hipo ou hipereutetóide, sendo aquelas com teores menores que 0,76%C consideradas hipoeutetóides e acima deste valor chamadas de hipereutetóides. Os aços navais são ligas com teores de carbono inferiores a 0,76%C, considerados, portanto, ligas hipoeutetóides (Callister Junior; Rethwisch, 2016).

As microestruturas para as ligas ferro-carbeto de ferro que têm composições diferentes da composição eutetóide à esquerda do eutetóide, entre 0,022 %p C e 0,76 %p C (Callister Junior; Rethwisch, 2016). O resfriamento de uma liga com essa composição está representado pelo movimento vertical para baixo ao longo da linha yy' na Figura 2.

Figura 2 – Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga Fe-C hipoeutetóide



Fonte: Callister Junior; Rethwisch (2016, p. 323).

A aproximadamente 875°C no ponto c, a microestrutura do aço consiste inteiramente em grãos da fase  $\gamma$  (austenita), como representado esquematicamente na figura. Ao ser resfriado até o ponto d, em aproximadamente 775°C na região das fases  $\alpha + \gamma$ , observa-se a coexistência dessas duas fases com partículas  $\alpha$  se formando predominantemente ao longo dos contornos originais dos grãos  $\gamma$  (Callister Junior; Rethwisch, 2016).

Essa compreensão microestrutural é essencial para o estudo de aços estruturais como o ASTM A36, um aço carbono hipoeutetóide com propriedades físicas bem definidas, adequado para aplicações que exigem dobramento e boa soldabilidade. Sua resistência é diretamente influenciada pelo teor de carbono presente na liga (Pannoni, 2005).

### 2.1.7 Aço ASTM A36

O aço empregado na construção naval é geralmente comercializado em chapas espessas laminadas a quente projetadas para oferecer alta resistência à corrosão e à abrasão, características indispensáveis para suportar as condições severas do

ambiente marinho. Desenvolvidos especificamente para aplicações estruturais, esses aços apresentam desempenho superior aos aços comerciais comuns (Storch *et al.*, 1995). Segundo Lamb (2004), as propriedades finais desses materiais dependem tanto da composição química quanto dos tratamentos térmicos, que ajustam sua microestrutura para atender às demandas do setor marítimo.

Classificado como um aço de baixo carbono com teor inferior a 0,3% em peso, esse material destaca-se pela excelente soldabilidade, mas apresenta maior suscetibilidade à corrosão, especialmente quando não protegido por revestimentos adequados (Pannoni, 2005). Além disso, o baixo teor de carbono limita a influência dos tratamentos térmicos, reduzindo mudanças significativas nas propriedades do aço (Chiaverini, 1996).

A sigla ASTM que significa *American Society for Testing and Materials*, refere-se a uma organização norte-americana responsável por estabelecer normas técnicas aplicáveis a materiais, produtos, sistemas e serviços. No Brasil, função semelhante é desempenhada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o que resulta na equivalência de algumas normas brasileiras às normas internacionais ASTM. Nesse contexto, a norma ASTM A36 corresponde à norma brasileira NBR 7007. A composição desse material é descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – ASTM A36 requisitos químicos

COMPOSIÇÃO QUÍMICA [%]						
Fe	C máx	Mn	Si máx	S máx	P máx	Cu <sup>1</sup>
98.0	0.29	0.60 – 1.20	0.40	0.050	0.040	0.20

Fonte: Adaptado ATSM A36 (2014, p. 3).

O valor do aço como metal estrutural é atribuído a propriedades mecânicas como resistência e ductilidade, tenacidade à fratura, resistência à fadiga e à corrosão. Essas características são determinadas pela composição e pelos processos de produção, impactando diretamente os requisitos de soldagem e manuseio do material (Storch *et al.*, 1995). Na tabela 2 apresenta algumas das principais características do aço ASTM A36.

<sup>1</sup> Quando há inclusão intencional de cobre na composição do aço.



Tabela 2 – Características mecânicas do aço ASTM A36

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Limite de Escoamento	250 MPa
Limite de Ruptura	400 – 550 Mpa
Alongamento	23%

Fonte: Adaptado ATSM A36 (2014, p. 3).

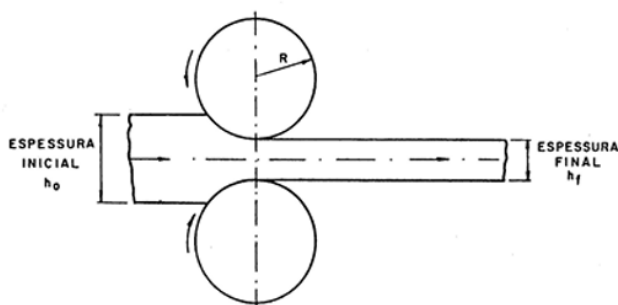
### 2.1.4 Processo de conformação a quente

A temperatura do aço é uma variável fundamental para classificar os processos de conformação, considerando as características do produto. Em metalurgia, a distinção entre deformação a frio e a quente não se baseia em uma temperatura fixa, mas no comportamento do material durante o processo. Deformação a frio ocorre quando a energia de deformação é armazenada no material, sem recuperação ou recristalização significativas. Em contrapartida, a deformação a quente promove alterações microestruturais que facilitam a recuperação e recristalização, dissipando a energia acumulada durante a deformação, o que melhora as propriedades do material (Colpeart, 2008).

A laminação é um processo de conformação mecânica no qual o material é comprimido ao passar entre cilindros rotativos em sentidos opostos, reduzindo sua seção transversal e aumentando seu comprimento. Para alcançar a espessura desejada, o material é submetido a múltiplos passes com ajustes progressivos na distância entre os cilindros.

O processo é amplamente aplicado devido à sua eficiência em modificar dimensões e propriedades do material, adaptando-o a diversas finalidades industriais (Bresciani Filho, 1991). A Figura 3 ilustra esse processo de forma esquemática.

Figura 3 – Esquema diminuição da espessura na laminação do aço



Fonte: Bresciani Filho *et al.* (1991, p. 17).

Na laminação a quente, a temperatura é mantida acima da recristalização, reduzindo a resistência à deformação plástica e permitindo a recuperação microestrutural. Esse método é fundamental em operações de desbaste inicial, que demandam grandes reduções de seção sem encruamento (Mourão *et al.*, 2007). Além disso, o controle térmico nesse processo influencia diretamente na formação de fases bandeadas, destacando-se como um fenômeno relevante na análise microestrutural.

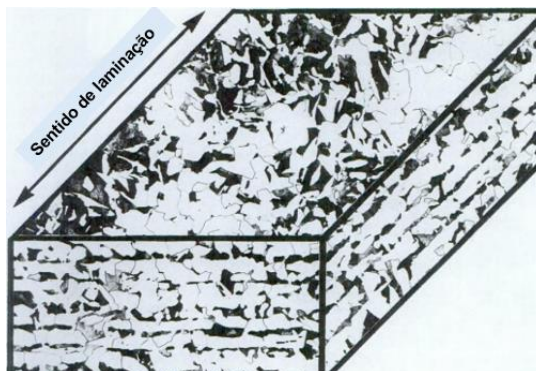
O trabalho a quente promove alterações significativas no tamanho de grão e na microestrutura devido à recristalização, justificada pela temperatura de trabalho. Entre os padrões estruturais formados, as microestruturas bandeadas têm recebido atenção especial, sendo amplamente estudadas pela sua relevância nos processos de conformação e suas implicações na qualidade do material (Colpeart, 2008).

### **2.1.5 Formação de fases bandeadas**

As microestruturas bandeadas, típicas do trabalho a quente, são amplamente estudadas devido à formação alternada de bandas de perlita e ferrita proeutetóide ou outros constituintes, variando significativamente no teor de carbono (Samuels, 1999). Esse comportamento é intrigante, pois, embora o carbono apresente alta difusividade, tratamentos como normalização ou recozimento não eliminam o bandejamento. Resfriamentos rápidos a partir do campo austenítico, entretanto, podem reduzir ou eliminar esse padrão estrutural (Colpeart, 2008).

O bandejamento (Figura 4) resulta da segregação de elementos substitucionais durante a solidificação, cuja baixa difusividade mantém regiões com composições químicas distintas no aço. Durante a austenitização, essa segregação persiste influenciando a transformação da austenita. Áreas com menor concentração de elementos estabilizadores de austenita ou ricas em estabilizadores de ferrita, transformam-se primeiro em ferrita, rejeitando carbono para regiões austeníticas adjacentes (Samuels, 1999). Essas, ao transformarem-se, apresentam constituintes diferenciados, como perlita, especialmente em aços estruturais de baixo e médio carbono resfriados ao ar após laminação a quente (Colpeart, 2008).

Figura 4 – Representação do bandeamento em um aço de baixo carbono



Fonte: Adaptado de Samuels (1999, p. 113).

Com resfriamento rápido, o tempo insuficiente para segregação reduz o bandeamento visível, limitando-se a diferenças na resposta ao ataque químico e temperabilidade. A segregação é atribuída a elementos substitucionais, com destaque para o fósforo, historicamente considerado o principal causador do bandeamento em ligas ferrosas. Em três dimensões, as camadas do bandeamento acompanham o sentido de laminação, conforme observado em micrografias de chapas de aço de baixo carbono (Samuels, 1999).

## 2.2 PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO: REVESTIMENTO DO AÇO NAVAL

A prevenção contra a corrosão está diretamente relacionada à seleção criteriosa de materiais, conforme destacado por Shackelford (2008). Em ambientes aquosos suscetíveis à corrosão, diversas técnicas são utilizadas para reduzir a degradação dos materiais. Entre essas, a aplicação de revestimentos sobre as superfícies é amplamente reconhecida como uma estratégia eficaz. Esses revestimentos criam uma barreira protetora contra o meio corrosivo e de acordo com Gentil (2007), podem ser classificados em três tipos: metálicos, não metálicos inorgânicos e não metálicos orgânicos, sendo os últimos os mais utilizados no setor naval devido à sua versatilidade e eficiência.

No ambiente marítimo, os revestimentos não metálicos orgânicos como tintas e vernizes, destacam-se pela proteção confiável que oferecem às superfícies metálicas. Essas tintas, compostas por pigmentos dispersos em um líquido denominado veículo formam um filme seco e aderente após a aplicação, garantindo a proteção contra agentes corrosivos (Molland, 2008). Além disso, a proteção catódica é frequentemente empregada como solução complementar, especialmente em estruturas metálicas submersas. Essa técnica corrige falhas nos revestimentos e amplia a eficiência no controle da corrosão, mantendo as superfícies livres de danos mesmo em condições

de alta agressividade, além de reduzir os custos operacionais (Gentil, 2007).

A integração entre revestimentos e proteção catódica constitui uma abordagem robusta e econômica para a prevenção da corrosão em estruturas metálicas. Essa combinação é especialmente relevante no setor naval, onde o ambiente extremo exige soluções eficazes e duradouras. A escolha adequada dos métodos e materiais, aliada a processos bem planejados, é indispensável para prolongar a vida útil das estruturas e minimizar os custos de manutenção decorrentes da corrosão (Storch *et al.*, 1995).

### **2.2.1 Corrosão**

A exposição de materiais a diferentes ambientes, cargas e interações pode comprometer sua funcionalidade devido à degradação de suas propriedades físicas. Em polímeros, por exemplo, a oxidação por ozônio resulta na perda de elasticidade, um tipo de corrosão, enquanto na madeira, a exposição a soluções ácidas e sais reduz a resistência estrutural pela hidrólise da celulose (Gentil, 2007).

Rivie (2008) sugere que o termo corrosão deve ser restrito aos materiais metálicos, enquanto materiais não metálicos sofrem o processo de degradação. Os materiais cerâmicos, compostos por elementos metálicos e não metálicos, apresentam alta imunidade à corrosão na maioria dos ambientes, principalmente em temperatura ambiente, com degradação ocorrendo geralmente por dissolução química, como a lixiviação em cimentos (Callister Junior; Rethwisch, 2016).

Nos materiais metálicos, a corrosão envolve reações de oxidação e redução, onde o metal perde elétrons (oxidação) e o agente oxidante presente em uma solução condutora de íons ou ambiente favorável à passagem de corrente elétrica (eletrólito), ganha esses elétrons (redução) (Callister Junior; Rethwisch, 2016). Este processo eletroquímico é caracterizado pela transferência de elétrons entre espécies químicas diferentes, resultando na formação de íons metálicos. Embora a corrosão seja frequentemente associada à destruição de materiais, a formação de uma camada de óxido nem sempre é prejudicial. Em alguns casos, essa camada pode atuar como uma proteção, criando uma barreira que impede o contato direto do metal com o ambiente, preservando a integridade do material (Masfeld *et al.*, 1982).

A prevenção da corrosão em materiais metálicos é uma preocupação fundamental, especialmente em indústrias que dependem de estruturas metálicas expostas a ambientes agressivos. No mercado brasileiro, por exemplo, a produção de tintas industriais foi de 1,28 bilhão de litros em 2018, dos quais 10% (aproximadamente 166 milhões de litros) foram tintas à base de solvente voltadas para aplicações industriais, incluindo a proteção contra corrosão (Abrafati, 2020 apud Menegotto, 2020).

Tintas e revestimentos orgânicos desempenham um papel crucial nesse contexto, sendo soluções eficientes e econômicas para aumentar a durabilidade de estruturas metálicas e equipamentos industriais, prevenindo a degradação devido à corrosão (Menegotto, 2020).

### **2.2.2 Pintura na construção naval**

A preparação e o revestimento de superfícies são etapas essenciais para garantir a proteção contra a corrosão, envolvendo a preparação da superfície, aplicação de primer e revestimento final (Storch *et al.*, 1995). Esses processos asseguram que o material fique isolado de agentes corrosivos, promovendo sua durabilidade e integridade.

A eficácia dos revestimentos industriais depende diretamente da preparação adequada da superfície, que inclui práticas como limpeza abrasiva, medição do perfil e avaliação da adesão. Essas etapas são cruciais para garantir que o revestimento funcione como uma barreira eficaz contra corrosão, aumentando a vida útil dos materiais protegidos (Croll, 2020).

A adesão do revestimento à superfície metálica é um fator determinante na proteção anticorrosiva. O teste de adesão, que avalia a resistência do revestimento ao metal, indica a integridade do processo. Superfícies com perfil rugoso favorecem uma melhor adesão, potencializando a eficácia da proteção. Portanto, adotar práticas que promovam essa adesão é fundamental para garantir maior durabilidade e reduzir custos de manutenção em estruturas metálicas expostas a ambientes agressivos (Croll, 2020).

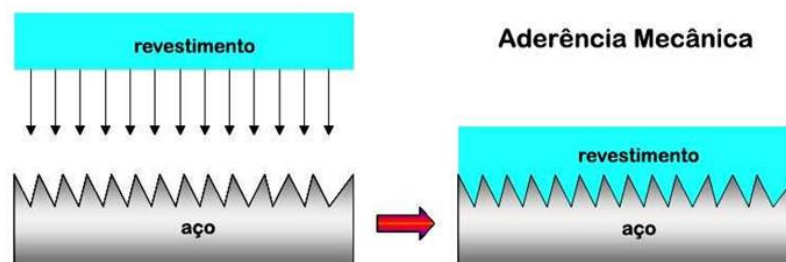
Segundo Storch *et al.* (1995), os métodos mais comuns para garantir uma preparação adequada da superfície incluem limpeza por jateamento, decapagem, limpeza com chama e preparação manual.

### **2.2.3 Limpeza e preparo da superfície do aço**

Os processos de limpeza e preparação da superfície são fundamentais para garantir a eficiência da pintura. A preparação do aço envolve procedimentos que asseguram tanto a limpeza quanto a rugosidade necessária para um bom desempenho do revestimento (Figura 5). O preparo tem como objetivo remover contaminantes, óxidos e tintas mal aderidas, enquanto a rugosidade aumenta a área de contato, favorecendo a aderência do revestimento (Gentil, 2011).

Segundo Gnecco *et al.* (2003), a limpeza é uma etapa essencial na preparação do substrato, pois elimina contaminantes que podem comprometer o desempenho dos revestimentos, especialmente no que se refere à proteção anticorrosiva. Essa fase visa também criar condições ideais para a aderência ao substrato, independentemente do mecanismo de adesão utilizado. Existem três tipos de mecanismos de adesão do revestimento à superfície metálica: adesão química, adesão polar e adesão mecânica (Figura 5). Este último é o foco do presente estudo, dado sua relevância para a eficiência da pintura (Gnecco; Fragata, 2014).

Figura 5 – Esquema de aderência mecânica de um revestimento ao substrato de aço



Fonte: Gnecco; Fragata (2014, p. 3).

A adesão mecânica ocorre por meio da criação de rugosidade superficial no substrato, utilizando métodos mecânicos como ferramentas manuais e jateamento abrasivo. Esses métodos são amplamente reconhecidos como os mais eficazes para alcançar boa aderência, tanto mecânica quanto química. O perfil de rugosidade resultante desempenha um papel fundamental na ancoragem do revestimento, garantindo maior estabilidade e durabilidade ao processo de pintura, além de garantir a aderência mecânica, também contribui na remoção de sujidades e carepas (Gnecco *et al.*, 2003).

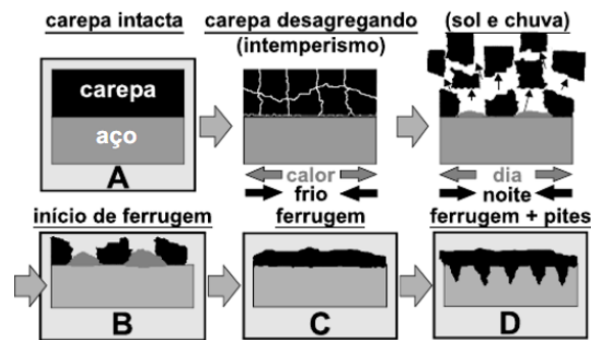
#### 2.2.4 Carepa de laminação

A carepa de laminação é um contaminante formado durante o processo de laminação a quente do aço, quando o metal é aquecido entre 450°C e 1250°C. Nessa faixa de temperatura, ocorre a reação do oxigênio com o ferro resultando na formação de óxidos de ferro. Esses óxidos se manifestam como uma camada cinza-azulada, que se forma durante o resfriamento do aço em perfis, tubos, vergalhões e chapas. Inicialmente, a carepa é impermeável, de alta dureza, superfície lisa e aderente ao metal, conforme descrito por Gnecco *et al.* (2003).

Apesar de sua resistência e aderência ao metal, a carepa apresenta falhas que comprometem a proteção anticorrosiva. A dilatação, contração e flexão do aço durante o uso causam fissuras na carepa, o que permite a penetração de umidade, favorecendo a corrosão (Figura

6). Por isso sua remoção total é essencial antes da aplicação de qualquer revestimento, como destacado por Gentil (2011). Embora a carepa pareça uma camada protetora, ela não possui a flexibilidade necessária para acompanhar os movimentos do aço, diferentemente da tinta, que evita trincas e falhas na proteção.

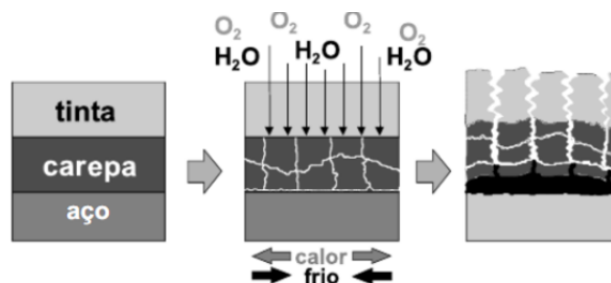
Figura 6 – Ilustração do processo de desagregação da carepa de laminação



Fonte: Genecco, *et al.* (2003, p. 8).

A tinta quando aplicada sobre a carepa (Figura 7) tende a se desprender devido à falta de aderência. Além disso, a carepa possui um coeficiente de dilatação diferente do aço, o que contribui para a formação de fissuras à medida que o metal sofre variações de temperatura. Essas fissuras comprometem a aderência da tinta, tornando a carepa inadequada como base para a aplicação de revestimentos (Genecco *et al.*, 2003).

Figura 7 – Ilustração do processo de desagregação da carepa de laminação



Fonte: Genecco *et al.* (2003, p.8).

Na indústria naval, o preparo do aço é uma etapa em que a escolha dos processos considera minuciosamente fatores como economia e tempo. Nesse contexto, os métodos tradicionais que utilizam a projeção de partículas destacam-se como as opções mais favoráveis devido à sua eficiência e custo-benefício.

## 2.3 LIMPEZA E PREPARO DE SUPERFÍCIES

Mafra (2008) classifica os processos de limpeza em métodos tradicionais, divididos em físicos, que utilizam fenômenos físicos para remover sujeiras e físico-químicos por via úmida, que envolvem interação química entre agentes de limpeza e contaminantes. Inovações como uso de plasma surgem como alternativas, atendendo às exigências industriais e normativas, e justificam uma categorização distinta devido à sua tecnologia emergente na limpeza e descontaminação de superfícies.

O Quadro 1, apresenta a classificação dos processos de limpeza com base na sua natureza.

Quadro 1 – Classificação dos processos de limpeza e tratamento superficial

<b>Processos de Limpeza e tratamento de superfícies</b>		
<b>Tradicionais</b>		<b>Alternativos</b>
<b>Físicos</b>	<b>Físico-químicos</b>	
Projeção de partículas ( <u>abrasivos</u> ) e líquidos	Aquosos	Agrossolventes
Ultra-som	Semi-aquosos	Fluidos supercríticos
Aquecimento	Não aquosos	Laser
Vácuo		<b><u>Plasma</u></b>
Eletrolítica		

Fontes: Adaptado de Mafrá (2008, p. 142).

A limpeza por jateamento é o método mais eficaz para preparar a superfície, sendo amplamente utilizado nos grandes estaleiros. Após esse processo, recomenda-se escovar a superfície e aplicar rapidamente uma camada de tinta primária, pois o metal pode enferrujar com facilidade (Molland, 2008).

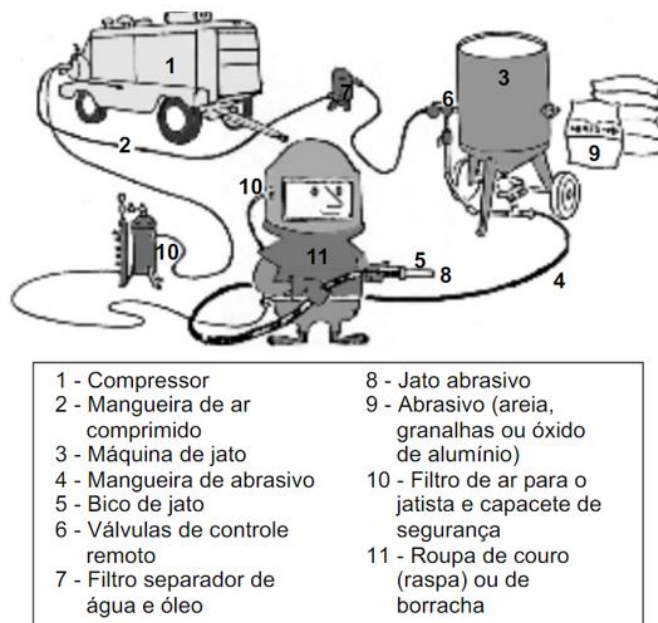
### 2.3.1 Métodos tradicionais: Jateamento com abrasivo

A principal vantagem desse método é a combinação de rapidez, custo-benefício e eficiência na qualidade da limpeza, deixando a superfície metálica livre de impurezas e criando a rugosidade ideal para a aderência de primer ou tinta.

A Figura 8 ilustra e lista os equipamentos do procedimento que envolve a projeção de abrasivos em alta velocidade contra a superfície utilizando ar comprimido ou rotores centrífugos. A escolha correta do material abrasivo é fundamental para evitar danos ao substrato tratado, assegurando um acabamento adequado (Gentil, 2007).



Figura 8 – Equipamento completo de jateamento abrasivo



Fonte: Genecco, et al (2003, p. 12).

Entre os abrasivos mais comuns destacam-se as granalhas de aço, que são fabricadas com aço de alta dureza e impulsionadas por ar comprimido com pressões de cerca de 7 kg/cm<sup>2</sup>. Esses abrasivos proporcionam uma limpeza eficiente sem comprometer a integridade do material metálico. A aplicação correta desse procedimento é essencial para garantir a qualidade da preparação da superfície e a eficácia do revestimento subsequente (Gnecco *et al.*, 2003).

De forma alternativa, a limpeza por plasma surge como uma alternativa inovadora às tecnologias tradicionais de limpeza, deposições e tratamentos, destacando-se pela sua capacidade de gerar espécies quimicamente ativas que permitem controle maior no processo e conseqüentemente, no resultado (Mafra, 2008).

### 2.3.2 Métodos Alternativos: Plasma

Conforme Mafra (2008), a limpeza por plasma utiliza o plasma para remover contaminantes orgânicos de superfícies ou substratos. Esse processo é altamente versátil, adaptando-se a diferentes configurações, regimes de trabalho e geometrias de reatores, o que o torna eficaz para diversas necessidades industriais. Além de eliminar contaminantes, a limpeza por plasma prepara a superfície, facilitando a aderência de camadas subsequentes. Essa versatilidade amplia a aplicabilidade do método em vários contextos, tornando-o uma solução eficiente para diferentes indústrias.

O processo de limpeza por plasma pode ser realizado com diversas fontes, como corrente contínua, alternada, rádio frequência, micro-ondas, sistemas de Descarga de Barra Dielétrica e jatos de plasma. A escolha da fonte de plasma deve considerar fatores como a natureza do contaminante e aspectos econômicos, sendo essencial determinar as propriedades da fonte que melhor atenderão às necessidades do processo. As fontes de plasma podem ser classificadas em baixa pressão (vácuo) e alta pressão (atmosférica) (Belkind; Gershman, 2008).

Apesar do vasto potencial da tecnologia de plasma térmico que já é amplamente aplicada em diversos setores industriais, sua adoção em larga escala ainda enfrenta desafios. O tratamento térmico por plasma está em fase de pesquisa, sendo realizado principalmente em laboratórios ou plantas piloto (Samal, 2017). A superação dessas limitações permitirá sua aplicação em maior escala, tornando-o uma tecnologia inovadora e promissora para a indústria.

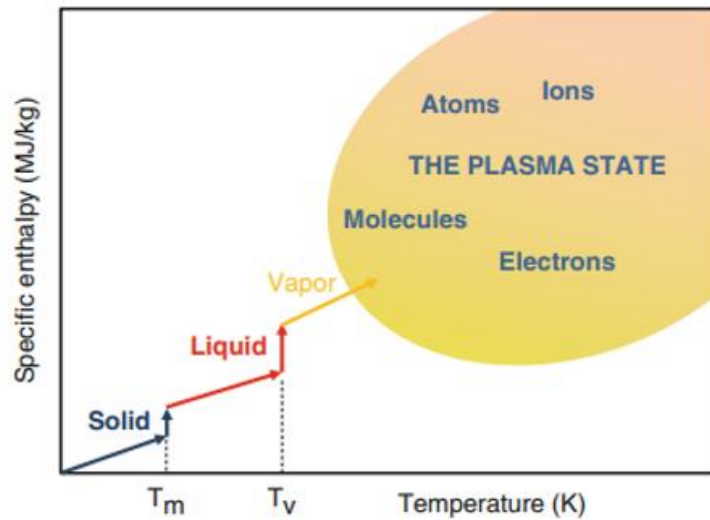
No setor naval, o jateamento por plasma se apresenta como uma alternativa eficiente aos processos abrasivos tradicionais. Kruger (2023) sugere que a técnica já consolidada em indústrias como corte e soldagem, pode ser adaptada para a preparação de superfícies no setor naval, utilizando os mesmos equipamentos com ajustes nos parâmetros de processo. Essa adaptação não só amplia o uso do plasma, mas também destaca sua relevância como solução tecnológica inovadora e eficiente.

## 2.4 O PLASMA

O plasma, considerado o quarto estado da matéria, é gerado quando um gás recebe energia suficiente para ionizar seus átomos ou moléculas, formando uma mistura de íons positivos, elétrons livres e partículas neutras (Chu; Lu, 2014). A matéria comum é composta por átomos formados por prótons, nêutrons e elétrons, e sua transição entre os estados sólido, líquido e gasoso depende da aplicação de energia específica (Figura 9).

Quando uma quantidade adicional de energia é fornecida ao gás, como por meio de uma descarga elétrica, os elétrons escapam, criando mais íons e elétrons, o que transforma o gás em plasma (Boulos, 2016).

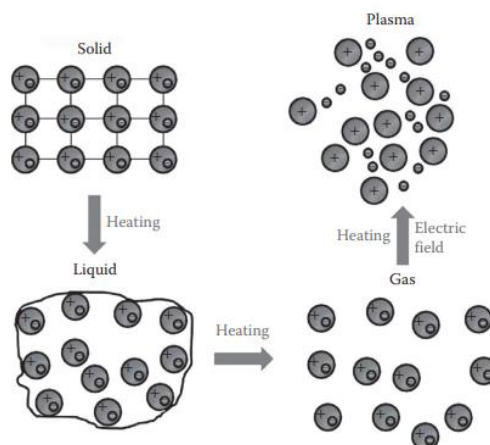
Figura 9 – Representação dos quatro estados da matéria em função da temperatura e entalpia específica



Fonte: Boulos (2016, p. 5).

A ionização de um gás ocorre quando os elétrons se desprendem de átomos ou moléculas (Figura 10), gerando íons positivos e formando um par de partículas carregadas. Esse processo altera as propriedades elétricas do gás, tornando-o condutor de eletricidade (Fridman, 2008). Ao ser ionizado, o gás neutro passa a ter a capacidade de conduzir eletricidade com a densidade das partículas carregadas influenciando sua condutividade. Uma diferença fundamental entre um gás ionizado e um gás neutro é a interação coulombiana entre as partículas carregadas, que afeta diretamente a dinâmica do plasma (Keidar; Beilis, 2013).

Figura 10 – Transição dos estados da matéria com aumento de energia



Fonte: CHU; LU (2014, p. 4).

Os gases ionizados podem ser classificados em duas categorias: fração baixa e alta

de partículas carregadas. Gases fracamente ionizados têm poucas partículas carregadas, permitindo que seu comportamento seja descrito pelas leis dos gases neutros. Em contraste, gases fortemente ionizados exigem a aplicação da eletrodinâmica para uma descrição precisa. O plasma é caracterizado pela quase- neutralidade em que as densidades das partículas carregadas positivas e negativas se equilibram e sua definição depende dessa condição (Keidar; Beilis, 2013).

O plasma é composto por uma grande quantidade de elétrons livres e íons que interagem devido às forças coulombianas de longo alcance. No entanto, não basta a presença de partículas carregadas para um sistema ser considerado plasma. De acordo com Bittencourt (2004), é necessário que o sistema atenda a certos critérios como a neutralidade macroscópica para ser classificado como plasma. Em equilíbrio e sem perturbações externas, o plasma mantém a carga líquida nula em um volume suficientemente grande, mantendo um estado de estabilidade.

A neutralidade macroscópica é um dos principais critérios para definir o plasma. Mesmo com muitas partículas carregadas, um plasma em equilíbrio deve ter uma carga líquida nula, sem variações significativas de densidade e temperatura em grande escala. Conforme descrito por Bittencourt (2004), esse equilíbrio é fundamental para que o sistema se comporte de maneira previsível e estável.

Portanto, o plasma é um estado distinto de matéria formado pela ionização de um gás, que apresenta propriedades únicas, como condução elétrica e interação entre partículas carregadas.

### **2.5.1 Plasma térmico**

O plasma térmico com ionização quase completa dos gases é amplamente utilizado em revestimentos cerâmicos resistentes à corrosão, soldagem e outras aplicações que requerem altas temperaturas. Já o plasma não-térmico, com menor ionização, é utilizado em processos como nitretação iônica e deposição de filmes finos. As características do plasma variam conforme o potencial aplicado, a composição gasosa, a geometria dos eletrodos, o tempo de exposição e a pressão (Disconzi *et al.*, 2021).

Os plasmas térmicos oferecem vantagens significativas para a geração de revestimentos, como altas taxas de deposição e a capacidade de vaporizar partículas sólidas, devido à alta densidade de energia. Essa característica também favorece a formação de estruturas nanométricas, graças às altas taxas de resfriamento. No entanto, a alta densidade de energia apresenta desvantagens como gradientes acentuados entre o meio transportador do precursor e o substrato, o que pode prejudicar o processo de deposição (Heberlein *et al.*, 1992).

O uso do plasma térmico em aplicações como corte, soldagem e pulverização está consolidado. As tochas de plasma, responsáveis pela geração do plasma térmico, operam a temperaturas extremamente elevadas e com baixa ionização do gás utilizado. Essas tochas são projetadas para gerar plasma sob condições controláveis, garantindo precisão nos processos industriais (Samal, 2016).

Um feixe de plasma conhecido como jato de plasma é gerado a partir de uma tocha de plasma. O jato de plasma pode produzir um arco de plasma com diferentes composições e condições operacionais, permitindo o controle preciso dos parâmetros envolvidos. Essa capacidade de controle é essencial em aplicações como soldagem, corte e revestimento, aumentando a flexibilidade dos processos industriais (Samal, 2016).

O funcionamento da tocha de plasma baseia-se no fluxo de gás ao redor do cátodo e através de um tubo ou bocal constritor. O processo é iniciado com um pulso de alta tensão, criando um caminho condutivo para o arco elétrico entre o cátodo e o ânodo. Esse aquecimento elétrico eleva a temperatura do gás a níveis extremos, promovendo sua dissociação e ionização (Iwao *et al.*, 2006).

A temperatura do plasma influencia a transferência de calor nos materiais tratados. No plasma térmico, a energia é transferida principalmente por radiação, significativa apenas em altas temperaturas. As colisões de íons, por sua vez, transferem calor de forma localizada intensificando o aquecimento nas microrregiões e promovendo reações exotérmicas na superfície dos materiais (Disconzi *et al.*, 2021).

Esses mecanismos geram gradientes térmicos, aquecendo mais intensamente a superfície do que o interior do material, o que dificulta a medição precisa da temperatura média. Além disso, as espécies ativas no plasma, como o hidrogênio, influenciam a microestrutura, favorecendo o crescimento de grãos e adensificação (Disconzi *et al.*, 2021).

## **2.5.2 Geração do plasma térmico**

As tochas de plasma são dispositivos que convertem energia elétrica em calor, transportado por um gás que pode ser levado ao estado de plasma. O gás utilizado pode participar ativamente das reações químicas. Existem dois tipos principais de tochas: de arco não transferido, onde o arco é gerado dentro do dispositivo e o gás aquecido é expelido, e de arco transferido, em que o arco conecta o eletrodo emissor ao material a ser tratado, promovendo maior eficiência na transferência de energia e aquecimento localizado (Samal, 2016).

Uma das vantagens do plasma é a possibilidade de fornecer energia ao sistema sob

qualquer potencial de oxigênio, permitindo condições de oxidação, redução ou atmosferas inertes, sem dependência direta da temperatura. Isso confere flexibilidade em relação a sistemas de combustão, onde o fluxo de energia e o potencial de oxigênio são limitados (Samal, 2016).

No tratamento de superfícies metálicas, uma descarga de arco pode ser transferida diretamente para a peça, tornando-a um dos eletrodos. Essa abordagem maximiza a eficiência na transferência de energia e as taxas de aquecimento da superfície, sendo ideal para processos que exigem precisão e alta performance (Samal, 2016).

A utilização do plasma é, geralmente, realizada em atmosferas contendo O<sub>2</sub> (oxigênio), H<sub>2</sub> (hidrogênio), N<sub>2</sub> (nitrogênio), F<sub>2</sub> (flúor), Cl<sub>2</sub> (cloro) ou suas misturas com gases inertes (Pavanati, 2009), o gás ionizante ou a atmosfera pode alterar significativamente o plasma gerado.

### **2.5.3 Gases de ionização**

No processo de obtenção de plasma térmico, diversos gases são utilizados como ar comprimido, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, H35 (mistura de argônio e hidrogênio), F5 (mistura de hidrogênio e nitrogênio), entre outros. A escolha do gás depende da aplicação desejada e do tipo de material a ser processado (Hypertherm, 2024). Cada gás possui características específicas que influenciam diretamente o desempenho do processo, como a intensidade do arco de plasma, a temperatura de trabalho e a interação com o material.

O ar comprimido é o gás mais versátil e amplamente utilizado no processo de plasma. Ele é eficaz para a maioria dos metais e opera com correntes mais baixas, sendo uma escolha econômica. Contudo, seu uso requer cuidados, pois o ar deve ser limpo para eliminar contaminantes como partículas, névoa de óleo e umidade (Hypertherm, 2024). Além disso, a soldabilidade do material pode ser afetada se o controle do processo não for adequado, o que pode resultar em oxidação da superfície durante a aplicação.

O argônio por sua vez, é um gás inerte e monoatômico amplamente utilizado quando se busca minimizar reações indesejadas. Sua alta pureza, disponibilidade em grandes quantidades e custo acessível fazem dele uma escolha popular, especialmente em processos que envolvem descargas elétricas. Como gás de plasma, o argônio reduz o desgaste dos eletrodos devido à sua natureza inerte e requer baixas voltagens para ionização, o que contribui para uma maior eficiência no processo (Beuthe, 1997).

O nitrogênio é especialmente útil em processos que exigem alto rendimento de consumíveis, como na geração de arcos de plasma de alta energia. Sua principal aplicação é como gás de proteção, onde minimiza a oxidação do material durante o processo. Além

disso, o nitrogênio é fundamental no processo de nitretação a plasma, que melhora as propriedades de materiais metálicos. Esse tratamento térmico resulta na formação de uma camada de nitretos, aumentando a dureza, resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga dos materiais (Hypertherm, 2024).

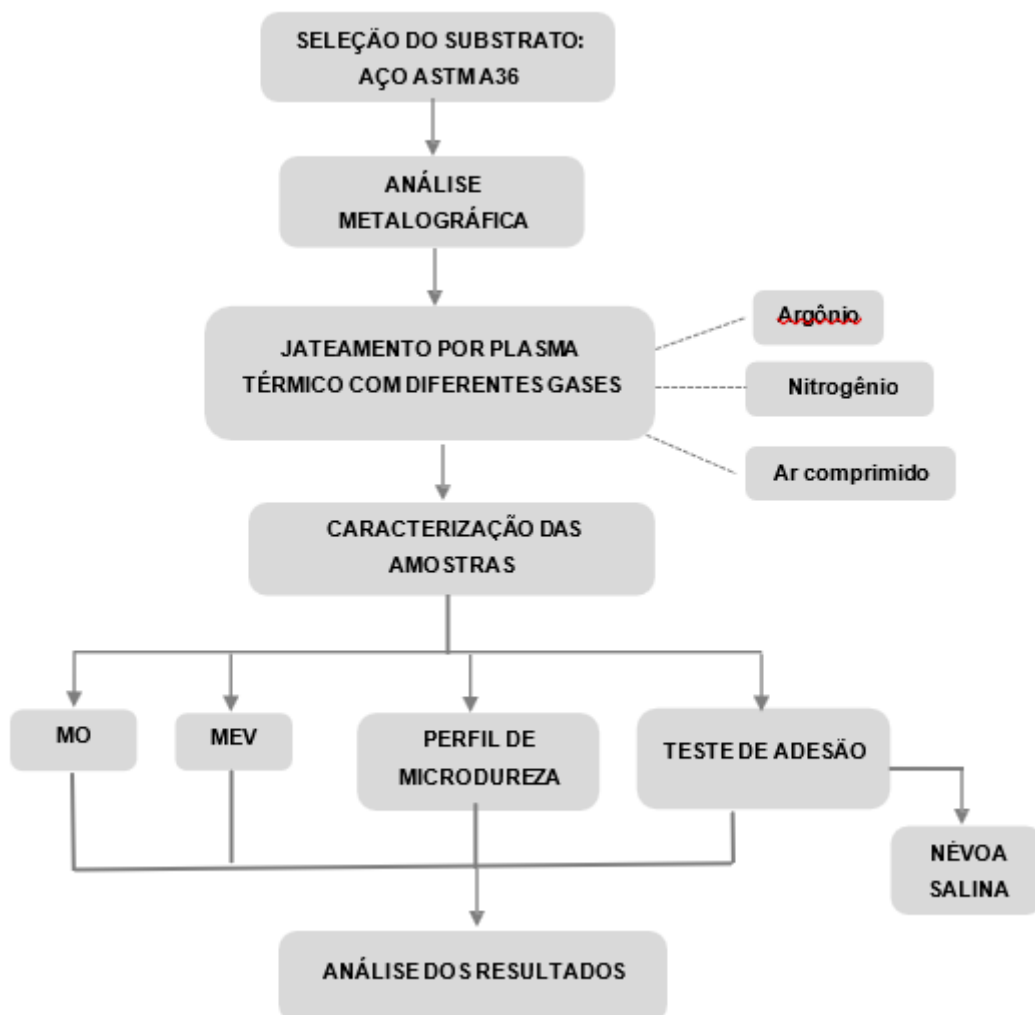
Em resumo, a escolha do gás em processos com plasma térmico deve ser cuidadosamente considerada levando em conta as propriedades do material a ser processado e os requisitos específicos de cada aplicação. (Marques; Modenesi; Baracarense, 2011).

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve o tipos e especificação do aço utilizado, as condições de tratamento superficial adotadas para o preparo prévio ao revestimento e os procedimentos de ensaios realizados para a caracterização microestrutural e mecânica dos materiais.

O planejamento experimental das etapas desenvolvidas está detalhado no Fluxograma 1 e é descrito detalhadamente na sequência.

Fluxograma 1 – Esquema das atividades experimentais desenvolvidas no trabalho



#### 3.1 AMOSTRAS DE AÇO

Foram utilizadas amostras de aço da classe ASTM A36, matéria-prima comumente utilizada na indústria para fabricação de embarcações mercantes, obtidas a partir de chapas espessas de processos de laminação e corte à quente. Os substratos foram fornecidos pelo Estaleiro Navisph. As amostras foram fornecidas com dimensões de 50x50x12mm. A Figura



11 apresenta as amostras após a remoção da carepa de laminação, graxas, óleos e oxidação, antes de serem jateadas.

Figura 11 – Amostras preparadas para serem jateadas por plasma



Fonte: Autoria própria (2024).

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os substratos de aço foram avaliados morfológica e microestruturalmente, utilizando os equipamentos e procedimentos descritos na sequência.

### 3.2.1 Metalografia

A análise metalográfica foi realizada no Laboratório de Materiais da UFSC/CTJ e no Laboratório de Materiais da UDESC/CCT em Joinville, com o objetivo de examinar a microestrutura do material antes e após o processo de jateamento por plasma.

Para a caracterização microestrutural, as amostras foram submetidas a um processo de preparação metalográfica, que incluiu as etapas de corte, desbaste, embutimento e lixamento com lixas de granulometrias sucessivas de 80, 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Posteriormente, foi realizado o polimento com Óxido de Alumínio ( $Al_2O_3$ ) em suspensão em água até uma granulometria de  $1\ \mu m$ . O ataque químico das amostras de aço foi realizado com solução de Nital a 1% (Ácido Nítrico + Álcool).

Para análise das fases, determinação do tamanho de grão e identificação de bandeamentos presentes no aço fornecido, foi utilizado um microscópio óptico. Adicionalmente, para a determinação das fases e caracterizações complementares, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura.

### 3.3 TRATAMENTO COM JATEAMENTO POR PLASMA TÉRMICO

Após o preparo das superfícies com a remoção de carepa de laminação, oxidação, óleos e graxas, as amostras foram submetidas ao jateamento utilizando uma tocha de plasma térmico. O processo foi realizado na empresa WeldVision Equipamentos de Solda e Corte, localizada em Joinville-SC, utilizando a máquina de corte a plasma Flash 45 (Figura 12).

A tocha empregada para a geração do plasma térmico é a mesma aplicada em processos de soldagem e corte, operando com base no mesmo princípio de funcionamento

Figura 12 – Equipamento utilizado no jateamento: máquina de corte e tocha a plasma Flash



Fonte: Autoria própria (2024).

Foram tratadas, ao todo, nove amostras. Os parâmetros relacionados à distância de aplicação, bico constritor da tocha, vazão do gás de ionização e corrente elétrica foram mantidos constantes em todas as aplicações. No entanto, por se tratar de um procedimento manual, dependente da habilidade do operador, sendo que a velocidade de aplicação pode ter apresentado pequenas variações. Os parâmetros empregados para o jateamento por plasma são descritos na Tabela 4.

Tabela 34 – Parâmetros utilizados no jateamento por plasma com diferentes gases

Parâmetros	Valor
Corrente de arco (A)	35
Distância entre a amostra e a tocha de plasma (mm)	3
Bico constritor $\varnothing$ (mm)	1.1
Velocidade da aplicação (aproximada) (mm/s)	25
Pressão do gás de trabalho (MPa)	0,3

Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA

A dureza é uma propriedade mecânica fundamental que expressa a capacidade de um material em resistir à deformação plástica permanente sob a aplicação de uma carga. Por sua vez, a microdureza refere-se a um método de ensaio que avalia essa resistência em uma escala microscópica, permitindo a análise de pequenas áreas e detalhes específicos da microestrutura do material (Radomski, 2024)

A dureza é uma propriedade mecânica amplamente utilizada na caracterização de materiais. Geralmente, sua medição é realizada por meio de ensaios mecânicos de risco ou penetração que analisam as impressões residuais deixadas pelo penetrador ou indentador. No ensaio de penetração, um indentador é pressionado contra a superfície do material, gerando uma impressão residual que depende da geometria do indentador (Garcia *et al.*, 2000).

Considerando o interesse em avaliar a influência do gás de trabalho utilizado nos processos de jateamento por plasma nas propriedades mecânicas, realizou-se ensaios de microdureza utilizando a norma ASTM E384. Para atendimento a norma, os ensaios foram realizados por meio de três aferições na superfície dos corpos de prova ensaiados na região de interesse. Os ensaios foram realizados em equipamento universal para microdureza Vickers (HV), disponível no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com a força de aplicação de 0,3 uN Joinville (Figura 13).

Figura 13 – Equipamento utilizado para perfil de microdureza HV

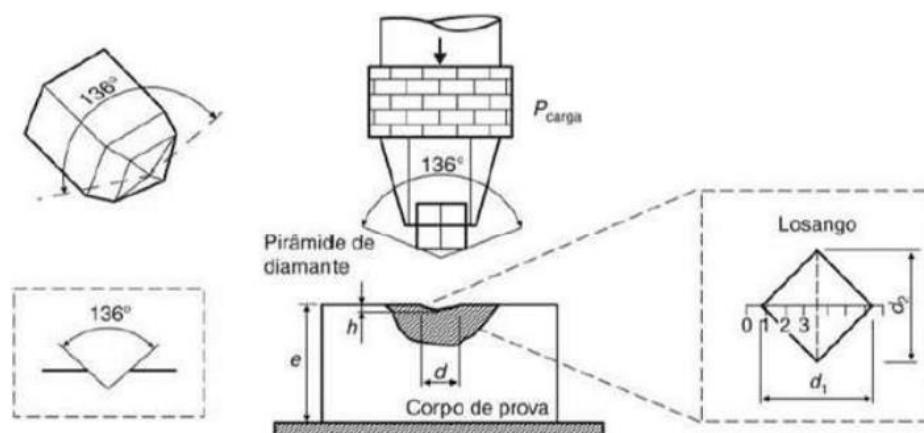


Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com Garcia *et al.* (2012), o ensaio de microdureza Vickers permite determinar os valores de microdureza a partir da relação entre a carga aplicada e a área superficial da impressão gerada. O método utiliza um penetrador padronizado, composto por uma pirâmide de diamante com base quadrada e um ângulo de 136° entre as faces opostas.

Ao observar a Figura 14, percebe-se que a impressão deixada pelo penetrador fornece duas diagonais, denominadas  $d_1$  e  $d_2$ , utilizadas para calcular a média das diagonais, indicado na Equação 1. Essas diagonais são medidas por meio de uma lente de aumento acoplado à máquina de testes e, em seguida, utilizadas no cálculo da dureza Vickers (HV), conforme a equação 2.

Figura 14 – Ilustração da impressão deixada pelo penetrador de ensaio HV



Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2000, p. 140).

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

$$HV = \frac{2P \cdot \text{SEN}(136^\circ/2)}{d^2} = \frac{1,854 \cdot P}{d^2} \quad (2)$$

Onde:

- $P$  = carga aplicada (N);
- $d$  = média do comprimento das diagonais da impressão (mm).

Para o ensaio, foi utilizada uma carga de 0.300 kgf (2940 mN) com o tempo de aplicação de carga de 10 s.

### 3.5 MICROSCOPIA ÓPTICA

Para identificar possíveis alterações microestruturais resultantes do tratamento por plasma térmico, foram utilizadas as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica (MO). As análises de microscopia óptica foram realizadas com o microscópio óptico modelo OLYMPUS UTV0.5XC-3, pertencente ao Laboratório de Metalografia e Microscopia Óptica da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), localizado em Joinville, com objetivo de observar as características superficiais antes e após o processo de jateamento por plasma.

Para as análises, foram utilizados aumentos de 200X e 400X, que permitiram uma visualização geral da região de interesse, apresentando aspectos morfológicos da superfície. Essa ampliação possibilitou a identificação de características morfológicas, as fases do material, bem como a detecção de fases de bandeamentos decorrentes do processo de laminação.

### 3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para realizar uma análise superficial mais detalhada do material após os processos de jateamento com diferentes gases, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo JEOL JSM-6390LV, disponível no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Esse equipamento possui um filamento de tungstênio, com voltagem de aceleração variando de 0,5 kV a 30 kV, e resolução de 3nm em alta tensão e 4nm em baixa tensão. As amostras foram analisadas em ampliações de 400x, 800x e 1000x com tensão de 15kV, com o objetivo de investigar a influência dos parâmetros do jateamento nas alterações superficiais e morfológicas do material.

### 3.7 ENSAIO DE NÉVOA SALINA

O ensaio de névoa salina foi realizado no Laboratório Físico-Químico da empresa Whirlpool, localizado na cidade de Joinville. Para o ensaio utilizou-se a norma ABNT NBR 8094:1983 (Material metálico revestido e não revestido – Corrosão) por exposição à névoa salina que prescreve o método para execução de ensaio de exposição à névoa salina.

Utilizou-se uma solução de 5% de NaCl (cloreto de sódio), mantida a 35°C por 48 horas, posicionadas a 45°. O teste tem por finalidade submeter as amostras a um ambiente controlado que simule, em laboratório, as condições severas de salinidade típicas de

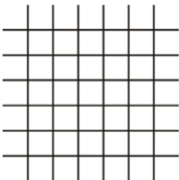
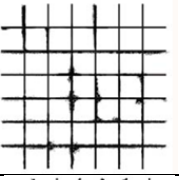
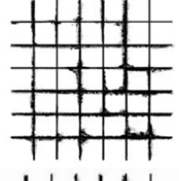

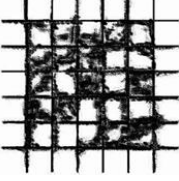
ambientes marítimos.

### 3.8 TESTE DE ADESÃO

O teste de adesão foi realizado de acordo com a norma NBR 11003:2009 (Tintas – Determinação da aderência), que estabelece os procedimentos para avaliar a aderência de tintas e revestimentos.

No presente trabalho, utilizou-se o método B (corte em grade), conforme especificado na norma (Quadro 2). Esta norma é aplicada à avaliação da aderência de tintas sobre substratos metálicos, seja em sistemas de pintura com uma ou mais camadas. É amplamente utilizada na indústria devido à sua simplicidade e à resposta imediata sobre a qualidade do filme.

**Quadro 2** – Parte da Norma ABNT NBR 11003:2009 - método B, utilizada para marcação com lâmina de aço nos substratos

<b>Código</b>	<b>Figura</b>
Gr0 Nenhuma área de película destacada	
Gr1 Área da película destacada, cerca de 5% da área quadriculada	
Gr2 Área da película destacada, cerca de 15% da área quadriculada	
Gr3 Área da película destacada, cerca de 35% da área quadriculada	
Gr4 Área da película destacada, cerca de 65% da área quadriculada	

Fonte: Adaptado da Norma ABNT NBR 11003 (2009, p. 9).

O procedimento para o teste consiste em utilizar uma lâmina de aço e a Fita Scotch 8809 de filme de poliéster com reforço bidirecional, adesivo a base de resina e borracha.

Inicialmente realiza-se um corte no revestimento (segundo o método B definido na norma) e em seguida aplica-se a fita sobre a área cortada. Posteriormente exerce-se uma força perpendicular à superfície revestida para remover a fita completamente.

A avaliação do resultado é feita por meio da análise da superfície revestida, comparando-a com as imagens disponibilizadas pela normativa que serve como referência para o teste de raspagem e indica o percentual de descamação do filme. A norma não define porcentagens específicas para a aprovação das peças, uma vez que o teste de raspagem fornece parâmetros qualitativos.

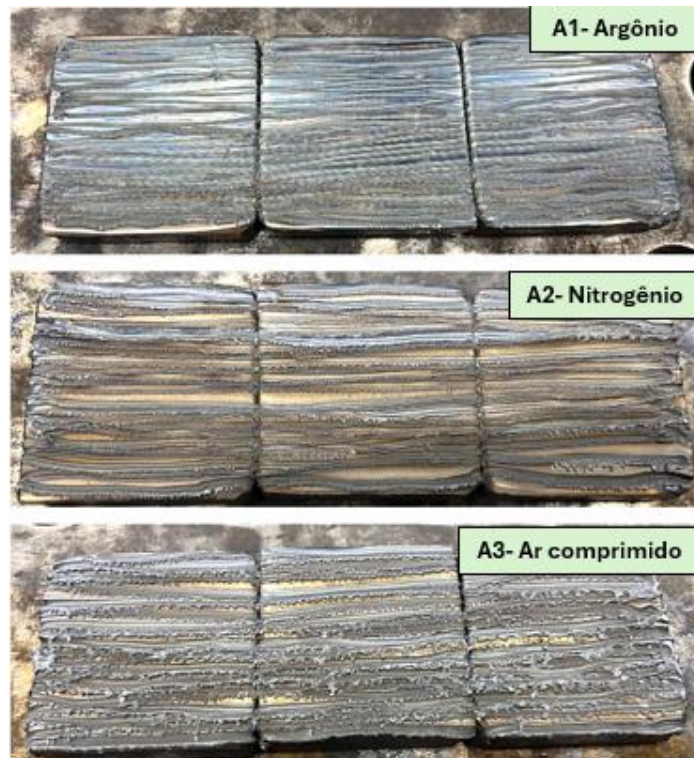
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados da análise microestrutural e das propriedades mecânicas das amostras do aço ASTM A36. Serão discutidas as características no estado de fornecimento sem jateamento e após o tratamento por jateamento com plasma térmico e com jateamento convencional.

### 4.1 JATEAMENTO POR PLASMA TÉRMICO

A Figura 15 apresenta imagens da superfície das amostras jateadas por plasma térmico com a utilização de diferentes gases. Nesta imagem é possível observar uma significativa alteração da morfologia da superfície das amostras. Os substratos jateados utilizando argônio como gás de ionização tiveram visualmente menor modificação superficial se comparada a superfície das amostras jateadas com nitrogênio e ar comprimido.

Figura 15 – Amostras após o jateamento por plasma térmico com diferentes gases



Fonte: Autoria própria (2024).

Os valores de rugosidade das amostras após o processo de jateamento por plasma térmico com diferentes gases e por jateamento com granalha de aço é apresentado na Tabela 5. As amostras jateadas com argônio apresentaram menor rugosidade entre os materiais estudados, da ordem de 2,82  $\mu\text{m}$ . Os substratos jateados com nitrogênio apresentaram um



aspecto intermediário de rugosidade entre os três tratamentos de 17,6  $\mu\text{m}$ . As amostras jateadas com o plasma de ar comprimido apresentaram rugosidade bastante elevada acima da escala de medida do rugosímetro, não possibilitando a medição.

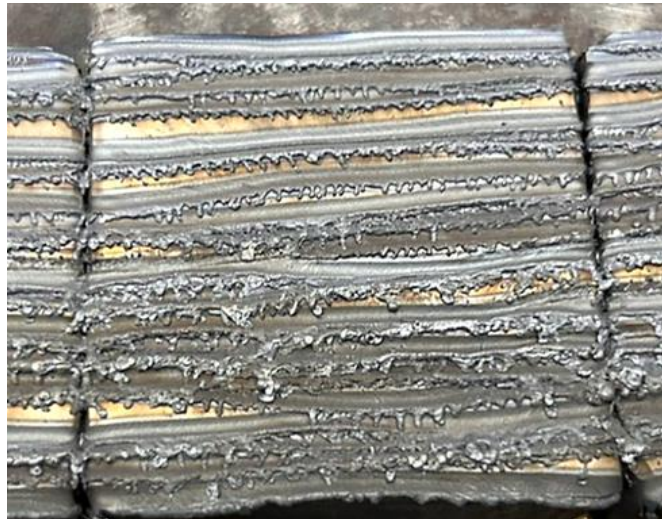
Tabela 45 – Valores de Ra das amostras jateadas por diferentes métodos

Métodos de jateamento	Valores de Ra ( $\mu\text{m}$ )
Jateamento por abrasivo	9,86
Plasma térmico – Argônio	17,6
Plasma térmico – Nitrogênio	2,82
Plasma térmico – Ar comprimido	–

Fonte: Autoria própria (2024).

Este resultado pode estar associado ao maior aporte térmico fornecido pelo plasma de ar comprimido, que promoveu microfusão no material, como pode ser visto na Figura 16, na qual se evidenciam áreas de respingos e fusão do material.

Figura 16 – Amostra jateada por ar comprimido: evidências de microfusão no material



Fonte: Autoria própria (2024).

Na tocha de plasma, o design do bico desempenha um papel crucial ao concentrar o arco elétrico e o fluxo de partículas ionizadas e elétrons livres em uma seção transversal extremamente reduzida. Esse fluxo apresenta alta densidade de energia. A formação do plasma ocorre quando o gás é submetido a temperaturas extremamente elevadas, variando entre 2000°C e 10.000°C. Nessas condições, as moléculas de gás passam pelo processo de ionização e dissociação (Maritime, 2005). Neste sentido, verifica-se que o aporte térmico gerado pelo processo, o gás utilizado, juntamente com parâmetros como o diâmetro do orifício do bocal, a velocidade de aplicação e as dimensões da amostra, desempenham um papel significativo na definição da rugosidade e da fusão nas áreas de incidência direta do fluxo de plasma. Esses fatores influenciam na qualidade superficial e a integridade do

material tratado, evidenciando a importância do controle preciso das variáveis operacionais para a obtenção de resultados consistente.

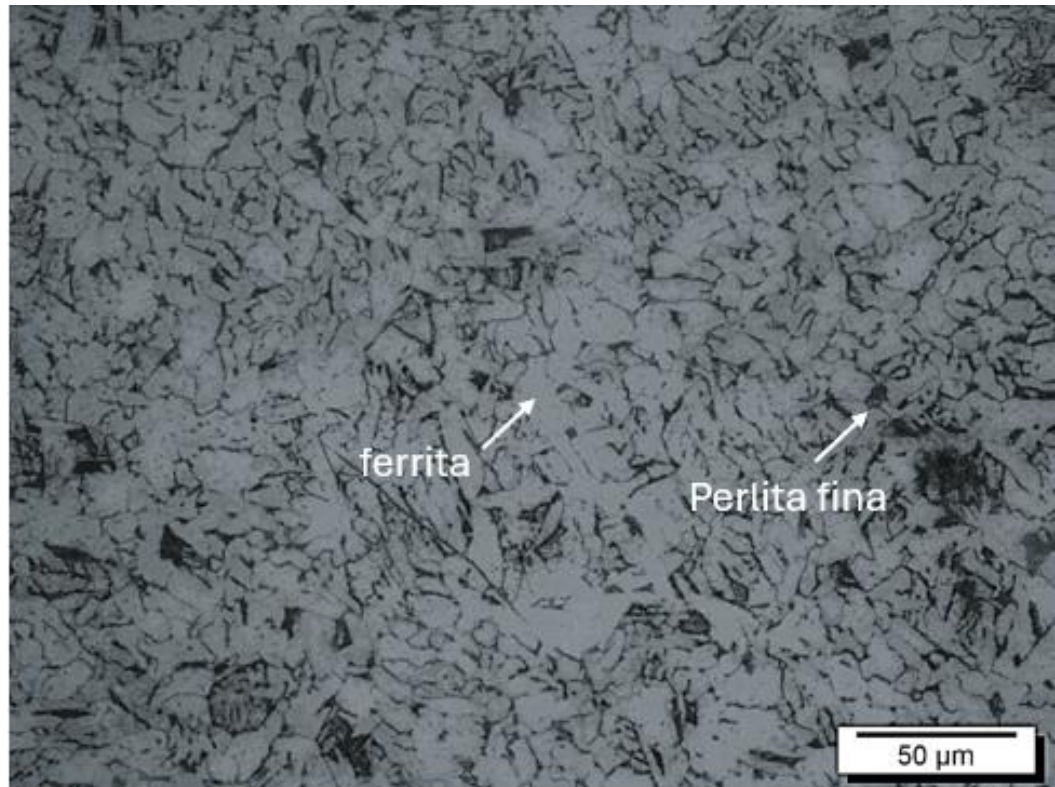
Outro aspecto relevante nos processos que envolvem plasma quente como a soldagem a plasma (PAW), é o papel dos gases ionizantes. Esses gases não apenas mantêm o arco elétrico estabilizado e permitem a geração do plasma, mas também desempenham a função essencial de proteger a região de incidência contra a interação com oxigênio e outros elementos presentes no ambiente (Marques, Modenesi, Bracarense, 2011). Gases como argônio e nitrogênio são comumente utilizados devido à sua eficácia na proteção e à contribuição para a estabilidade do plasma, além de possibilitarem sua formação em temperaturas mais baixas, aumentando a eficiência e a precisão do processo.

A análise comparativa das amostras jateadas por argônio e nitrogênio tratadas com argônio e nitrogênio, respectivamente, em condições idênticas às aplicadas por ar comprimido, sugere que as diferenças observadas na rugosidade podem estar relacionadas às características específicas dos gases utilizados e ao aporte térmico fornecido pela tocha. Esses fatores influenciam diretamente as propriedades da superfície tratada, destacando a importância da escolha do gás ionizante para o controle das características do material final.

## 4.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA DO AÇO

A análise inicial da amostra do aço referência conforme recebida, envolveu a preparação e a observação por meio de técnicas de metalografia para identificar sua microestrutura e teor de carbono aproximado. A Figura 17 apresenta uma micrografia obtida por microscopia óptica do aço após ataque químico, com aumento de 400X.

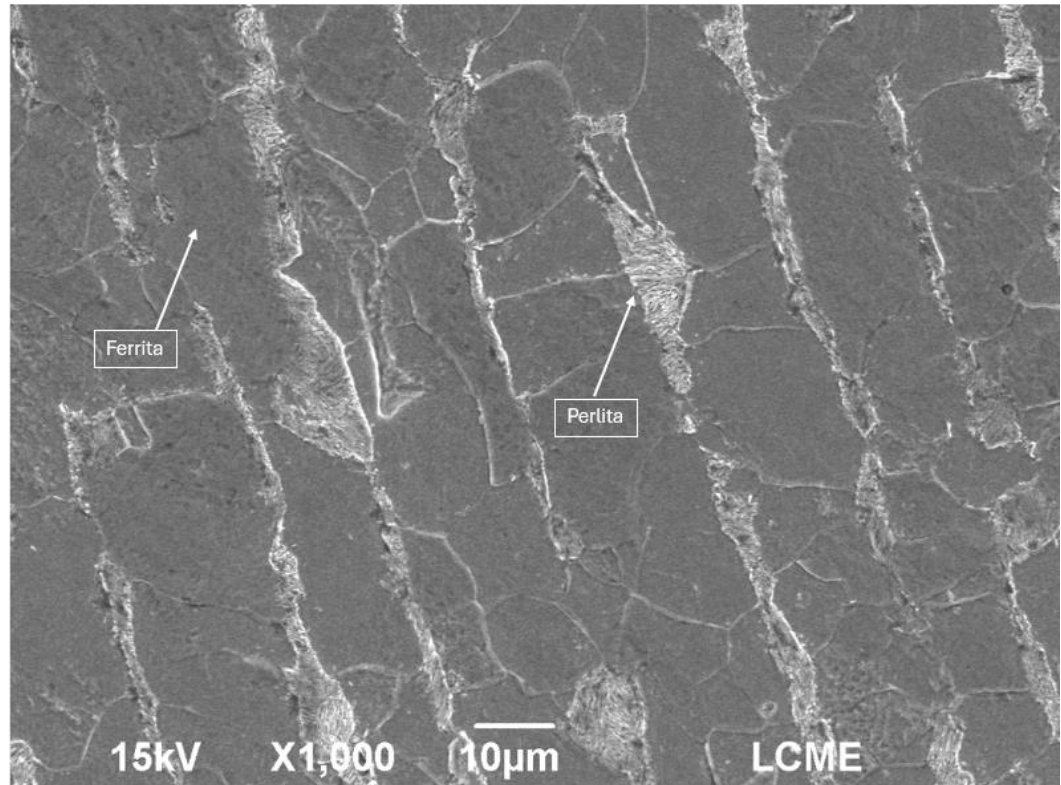
Figura 17 – MO aumento de 400x do aço A36 sem tratamento evidenciando as fases presentes ferrita e perlita



Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com a Figura 18, pode-se observar que o aço estudado, antes dos processos de modificação da superfície, apresenta as fases ferrita, de coloração mais clara, e lamelas de perlita fina (ferrita + cementita) de coloração mais escura.

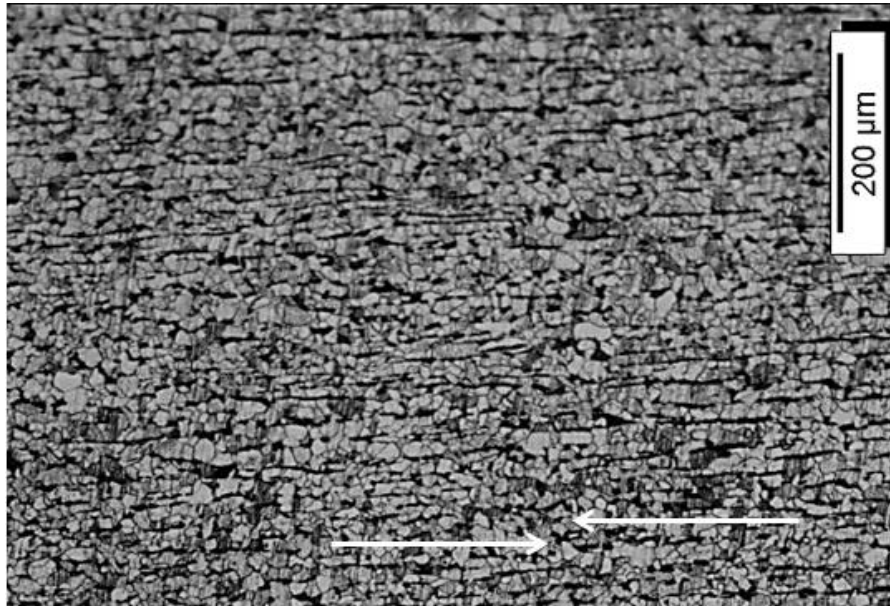
Figura 18 – MEV aumento de 1000x: Lamelas de perlita e matriz ferrítica no aço A36 sem tratamentos superficiais



Fonte: Autoria própria (2024).

Se observada na seção transversal, é possível identificar a formação de *fases bandeadas* ou *bandeamento*, descrito no item **2.1.5**, no sentido de laminação da chapa que resulta da segregação de elementos substitucionais durante a solidificação (Figura 19).

Figura 19 – MO do aço de referência aumento de 100x, constituído por ferrita proeutetóide e perlita, com bandeamento no sentido de laminação



Fonte: Autoria própria (2024).

Os substratos de aço ASTM A36 foram cedidos, sendo a composição química exata não divulgada para assegurar a confidencialidade da empresa. A análise das imagens obtidas por microscopia óptica (MO) com suporte do software ImageJ, possibilitou estimar as proporções de fases escuras e claras na micrografia. Observou-se que a fase clara corresponde a aproximadamente 65,01% do total das fases presentes na amostra.

Com base nesse resultado, utilizando a Equação 3, foi possível determinar a porcentagem de carbono ( $C'$ ) presente na amostra utilizando a regra da alavanca invertida e o diagrama Fe-C (Callister Junior; Rethwisch, 2016, p. 232-235).

$$0,6501 = \frac{0,76 - C'}{0,76 - 0,022} \quad (3)$$

$$C' = 0,27$$

Uma composição  $C'$ , localizada à esquerda do eutetóide no diagrama ferro-carbono, entre 0,022%p C e 0,76%p C, é classificada como uma liga hipoeutetóide (Callister Junior; Rethwisch, 2016). O teor de carbono determinado na amostra,  $C=0,27\%$ , confirma que o aço analisado é uma liga desse tipo, com microestrutura predominantemente composta de ferrita proeutetóide ( *$\alpha$  proeutetóide*) e perlita (Chiaverini, 1996). A partir desses dados, torna-se possível calcular a fração mássica de perlita e ferrita proeutetóide presentes no material.

As Equações 4 e 5, são expressões da regra da alavanca para o cálculo da fração mássica de perlita e ferrita proeutetóide (Callister Junior; Rethwisch, 2016, p. 235-239), respectivamente.

$$\%perlita = \frac{c' - 0,022}{0,76 - 0,022} \quad (4)$$

$$\%perlita = \frac{0,27 - 0,022}{0,74} = 0,331$$

$$\%\alpha \text{ proeutetoide} = \frac{0,76 - c'}{0,76 - 0,022} \quad (5)$$

$$\%\alpha \text{ proeutetoide} = \frac{0,76 - 0,27}{0,74} = 0,666$$

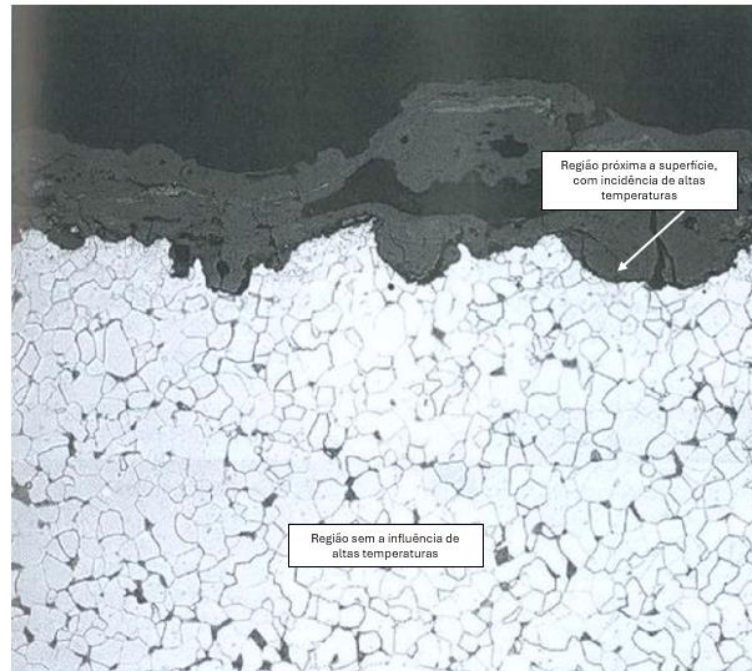
O aço ASTM A36 utilizado é um aço de baixo teor de carbono,  $C' = 0,27$ , sendo classificado como uma liga hipoeutetóide. Formando as fases perlita e  $\alpha$  proeutetoide, compondo de 33% e 66%, respectivamente, da microestrutura do aço (Arruda *at el.*, 2019).

#### 4.2.1 Análise metalográfica das amostras jateadas por plasma térmico

Colpert (2008) afirma que altas temperaturas e a atmosfera do processo influenciam diretamente a composição e formação de óxidos e a intensidade do processo de oxidação e descarbonetação. Não é possível afirmar que os conscientes nas regiões afetadas pelo plasma térmico sejam óxidos ou regiões de descarbonetação pois não foram realizadas análises químicas, porém, é uma hipótese a ser considerada.

Na Figura 20, observa-se uma seção transversal próxima à superfície de um aço estrutural exposto a altas temperaturas, onde a região escura corresponde a uma camada de óxidos com pontos de descarbonetação (Colpert, 2008, p. 375).

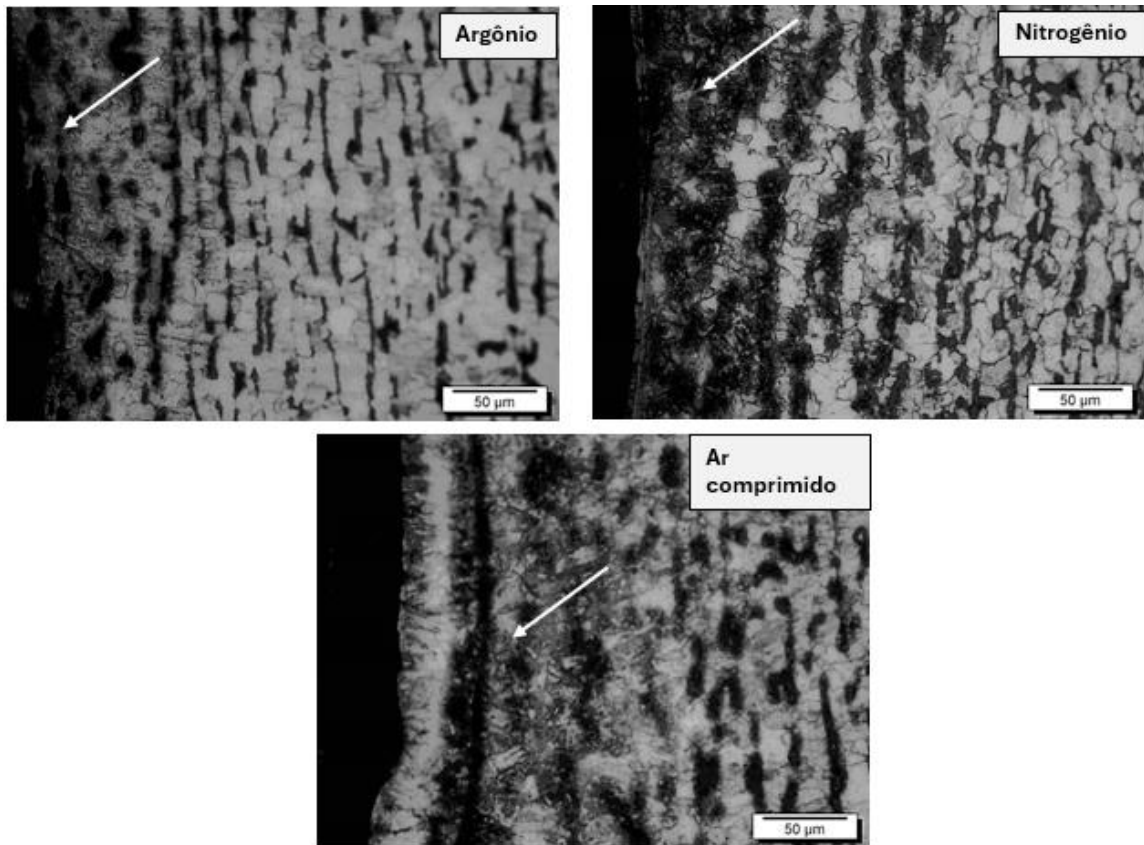
Figura 20 – Seção transversal do aço estrutural com superfície oxidada e regiões de descarbonetação causada por altas temperaturas, aumento de 400x



Fonte: Adaptado de Colpert (2008, p. 375).

Na Figura 21 pode-se observar que o tipo do gás utilizado para o processo de jateamento por plasma influi na microestrutura do material, em regiões próximas a superfície com incidência direta do plasma. A amostra aparentemente mais afetada foi aquela na jateada utilizando nitrogênio como gás de trabalho. Isto pode ter permitido a migração deste elemento no material, favorecendo a formação de compostos diferentes daqueles inicialmente existentes no aço naval.

Figura 21 – Análise da micrografia da sessão transversal das amostras antes e após o jateamento por plasma, aumento de 400x



Fonte: Autoria própria (2024).

O nitrogênio ionizado ( $N^+$ ) apresenta energia cinética superior às demais formas de nitrogênio, o que facilita sua dissolução no material. Na presença de oxigênio, a liberação do nitrogênio ocorre em baixa taxa, promovendo preferencialmente a formação de óxido nítrico (NO) em vez de nitrogênio atômico, o que aumenta significativamente sua solubilidade em comparação à forma atômica (Blake, 1979). Em contrapartida, as amostras submetidas a tratamentos com outros gases não exibiram sinais tão evidentes de oxidação ou decarbonetação, como as regiões escurecidas próximas à superfície, embora esses efeitos não possam ser completamente descartados.

#### 4.3 TESTE DE ADESÃO

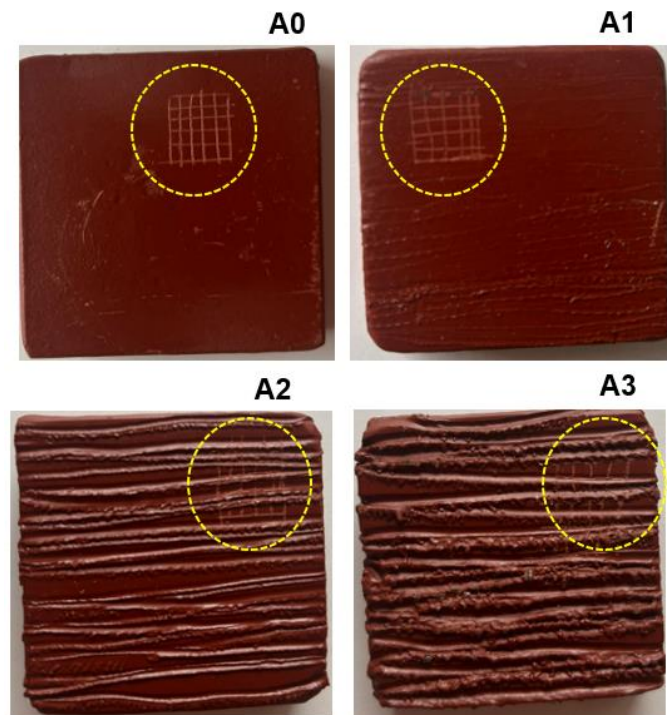
A análise das amostras em condições que simulem o ambiente de trabalho é essencial para validar a eficácia dos tratamentos aplicados. Para avaliar a influência do tratamento por plasma na resistência à corrosão do aço naval em estudo, as amostras foram expostas a um ambiente de névoa salina, conforme descrito no item 3.7.

A Figura 22 evidencia a superfícies após teste de adesão, com exceção da amostra



A0 (jateamento por abrasivo), todas as demais amostras apresentaram deslocamento entre os graus Gr1 e Gr2, isto é, de 5% a 15% da área marcada. Segundo a ABRACO (Associação Brasileira de Corrosão, 2020), quando o teste de aderência for realizado pelo Método B – Corte em grade, o critério de aceitação deve ser o nível Gr1 como máximo permitido, se os valores estão entre Gr1 e Gr2 por exemplo, o maior índice prevalece.

Figura 22 – lagem das amostras pintadas após teste de adesão, utilizando o método B da norma NBR 11003

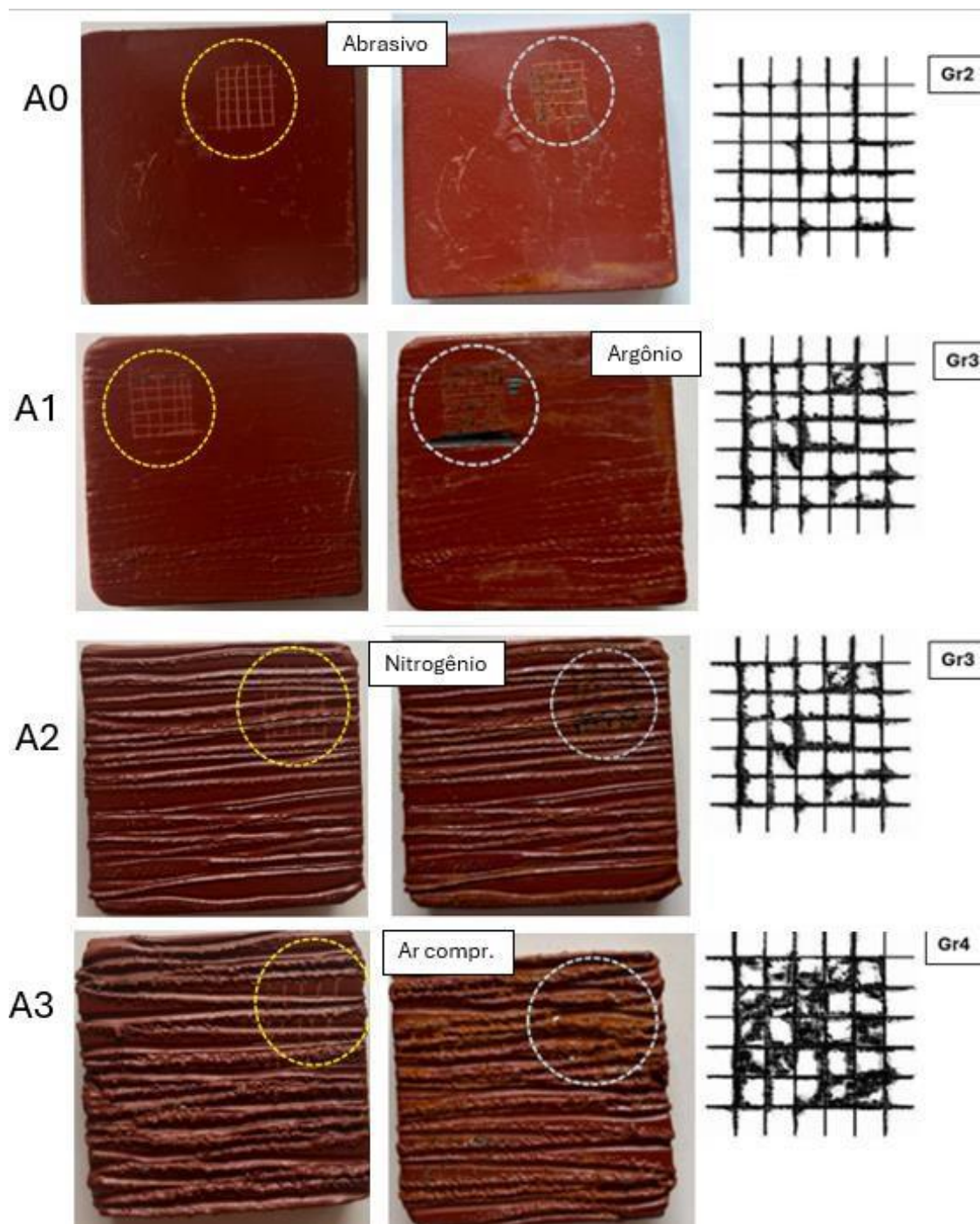


Fonte: Autoria própria (2024).

Os substratos foram subidos ao ensaio de névoa salina e novamente comparados com o deslocamento indicado por norma. Os resultados (Figura 23) mostraram que a amostra A0 jateada por granalha de aço apresentou o melhor desempenho, com grau 02 (aderência satisfatória e baixo deslocamento), enquanto as amostras A2 e A3 alcançaram grau 03 (moderado deslocamento), e a amostra A4 obteve o pior desempenho com grau 04 (deslocamento significativo).

Esses dados evidenciam que, embora todas as amostras tenham sido revestidas com o mesmo primer/revestimento epóxi bicomponente (Intergard 269), a qualidade do preparo superficial do aço influencia diretamente a aderência e a eficiência do revestimento.

Figura 23 – Testes de adesão por fita filamentosa, amostras jateadas por processo convencional e por plasma, antes e após imersão em névoa salina



Fonte: Autoria própria (2024).

A amostra A3 apresentou-se completamente recoberta por óxidos e ferrugem, indicando um desempenho inferior em termos de resistência à corrosão. Kruger (2023), atingiu resultados satisfatórios após testes de névoa salina e adesão em amostras submetidas a diferentes valores de corrente e mantendo o ar comprimido como gás de ionização, resultados contrários aos obtidos com os parâmetros definidos no tópico 3.3, a

hipótese adotada para esse resultado é o aporte térmico envolvido em processos de arco não transferido e o ar comprimido ser um gás reagente.

#### 4.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Os resultados de microdureza Vickers das amostras estudadas estão apresentados na Tabela 6. Analisando os resultados, verifica-se uma expressiva variação dos resultados para diferentes tipos de jateamento. Além disso, pode-se observar que as amostras que sofreram jateamento convencional tiveram um aumento significativo da dureza se comparada a do aço antes do jateamento, da ordem de 900 HV. Dentre as amostras jateadas por plasma pode-se verificar que houve, em geral, uma redução na microdureza.

A microdureza, mais elevada se comparada as demais, apresentada pela amostra jateada por processo convencional pode estar associada à formação de tensões residuais de compressão, semelhante ao processo de *shot peening*, no qual a deformação plástica gerada pelas esferas aumenta a dureza superficial (Kastilnik, 1994). Assim, o jateamento convencional também pode induzir tensões residuais que aumentam a dureza do aço.

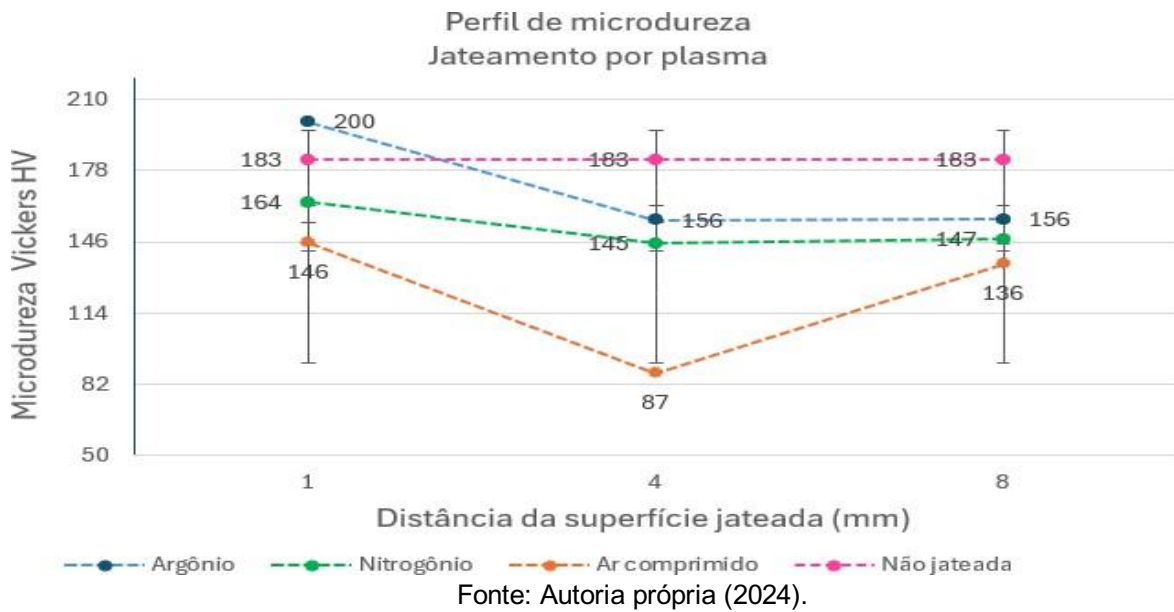
Tabela 56 – Perfil de microdureza (HV) e valor de referência do substrato A36

Processo de jateamento	Distância aproximada da superfície jateada		
	1 mm	6 mm	8 mm
Argônio	200 HV	156 HV	156 HV
Nitrogênio	147 HV	145 HV	156 HV
Ar comprimido	136 HV	87 HV	146 HV
Abrasivo	973 HV	1171 HV	282 HV
A36 Referência	183 HV		

Fonte: Autoria própria (2024).

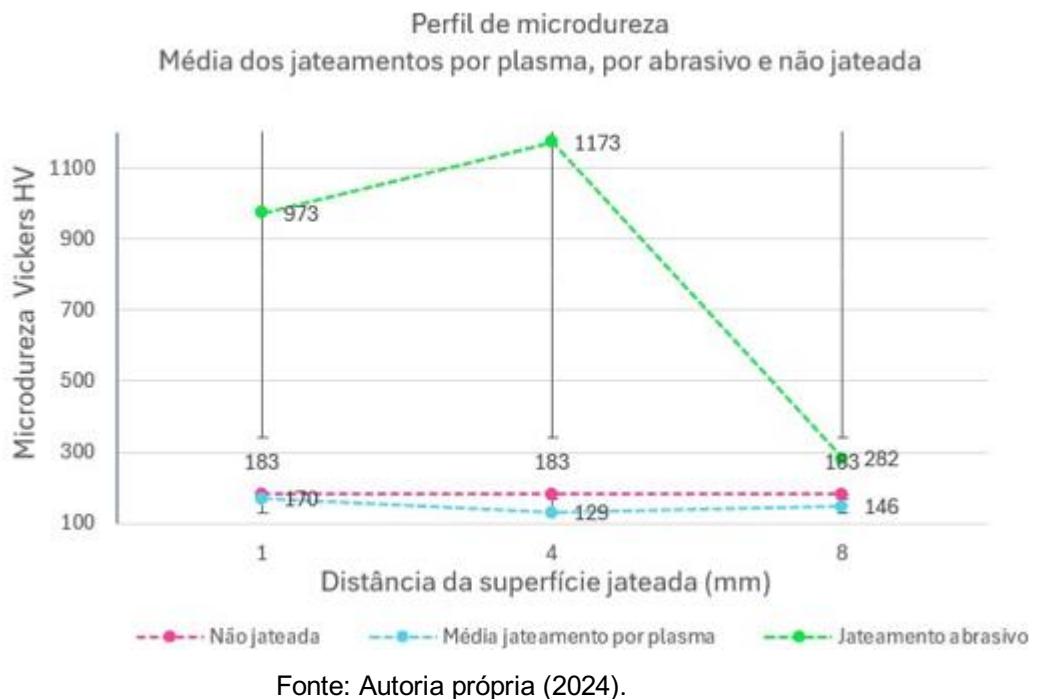
As amostras tratadas com plasma térmico apresentaram redução de microdureza em relação ao jateamento abrasivo, possivelmente devido ao recozimento. Esse processo, causado pelo aquecimento e subsequente resfriamento promove o reequilíbrio do material e reduz as tensões residuais, diminuindo a microdureza superficial. Contudo, a microdureza da superfície permaneceu superior à das regiões internas do aço nas amostras tratadas com plasma, como pode ser observado na Figura 24 que indica a média do perfil de microdureza das amostras em estudo em HV (Figura 24).

Figura 24 – Perfil de microdureza das amostras após os processos de jateamento por plasma e aço não jateado



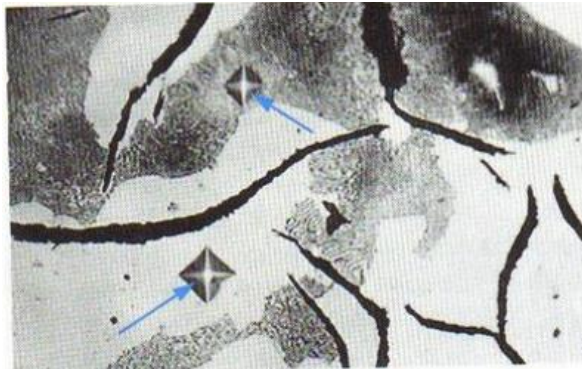
Um comparativo entre a média da microdureza jateamento utilizando plasma térmico, abrasivo e o metal referência não jateado (Figura 25).

Figura 25 – Perfil de microdureza da média das amostras jateadas por plasma térmico, jateado por abrasivo e referência não jateada



O ensaio de microdureza Vickers permite observar impressões microscópicas geradas pela carga aplicada com o auxílio de lentes de aumento (Figura 26). Esse método possibilita a análise das microestruturas, revelando variações no tamanho das marcas deixadas pelo indentador (Brandt; Warner, 2005). A precisão na medição depende da visualização detalhada das regiões, fundamental para compreender as propriedades mecânicas do material.

Figura 26 – Marcação do penetrador HV em diferentes fases



Fonte: Brandt e Warner (2005, p. 27).

As variações de microdureza apresentada pelas amostras não seguem a tendência esperada de redução com o afastamento da superfície. Isso pode ser explicado pela dificuldade em distinguir claramente as fases microestruturais como ferrita e perlita, devido à ausência de polimento e ataque ácido adequados, resultando em medições menos precisas.

Regiões com maior teor de carbono, ricas em perlita, demonstraram dureza superior às áreas ferríticas. A perlita, sendo uma fase mais dura, aumenta a resistência à deformação, elevando a dureza dessas regiões e contribuindo significativamente para as propriedades mecânicas do material (Chiaverini, 1996).

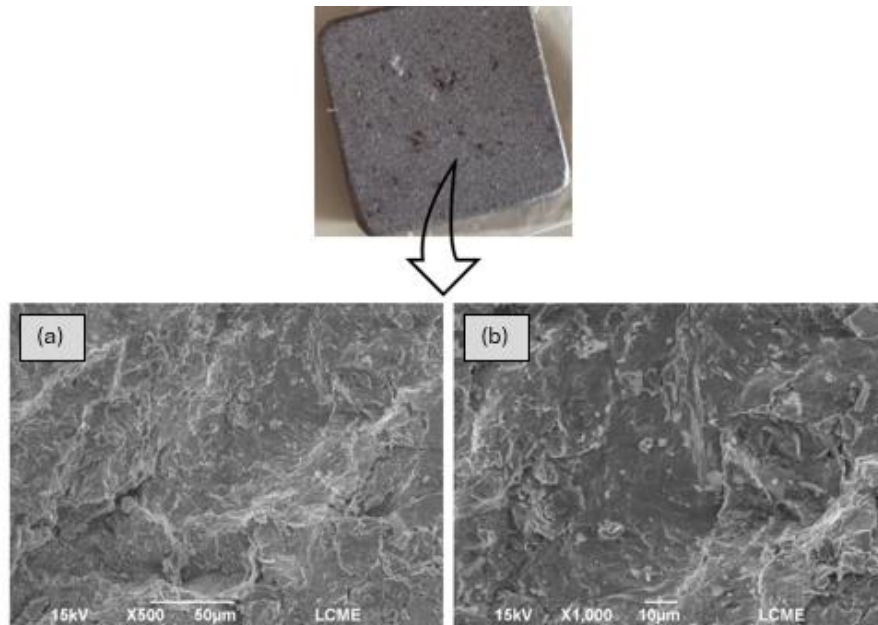
#### 4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Nesta seção, são apresentadas as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras jateadas por plasma com diferentes gases e por processo convencional. A técnica de MEV possibilita uma avaliação detalhada da morfologia da superfície e permite investigar a influência do gás utilizado no processo de jateamento nas alterações superficiais apresentadas.

Na Figura 27, pode-se observar as imagens de MEV da superfície do aço A36 após o processo de jateamento convencional, por granalhas de aço, com aumento de

500 e 1000X. Avaliando-se estas imagens, verificam-se que imperfeições e a alteração na uniformidade da superfície do metal jateado com abrasivo, sem preparação metalográfica prévia. A rugosidade da superfície obtida através desse método foi de  $9,5 \mu\text{m}$ .

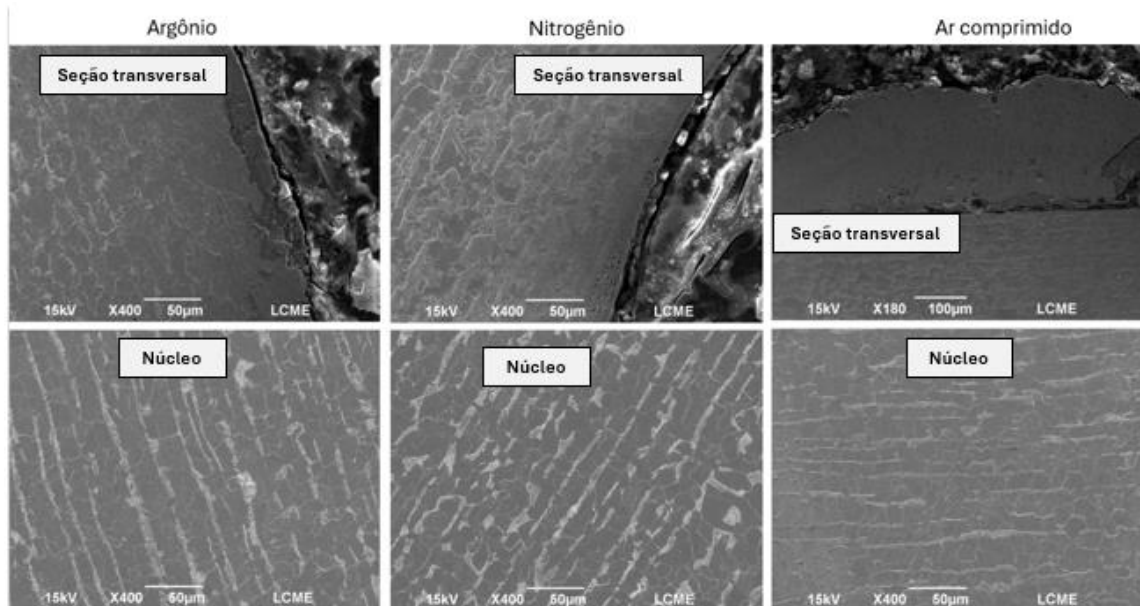
Figura 27 – MEV da superfície do aço A36 jateada por processo convencional sem preparação metalográfica, (a) aumento 500x e (b) aumento de 1000x



Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 28 são apresentadas as imagens obtidas por MEV das amostras jateadas por plasma térmico com diferentes gases, evidenciando a análise sobre a região transversal ao jateamento e o núcleo do material. Avaliando-se as imagens, pode-se observar que nas proximidades da superfície tratada, o material apresenta características diferentes em relação às regiões sem incidência direta do plasma.

Figura 28 – MEV das amostras jateadas por plasma térmico com diferentes gases evidenciando as regiões transversal e o núcleo das amostras



Fonte: Autoria própria (2024).

Observando as imagens de MEV apresentadas na Figura 28 fica evidente que na região próxima à superfície o tipo de gás utilizado influencia na morfologia apresentada pelo material. A região plana aparente no aço jateado com ar comprimido é significativamente maior do que aquela apresentada no material jateado por argônio. As diferenças em tempos de aporte térmico em cada um dos processos altera a zona fundida e conseqüentemente as propriedades.

A amostra jateada utilizando nitrogênio como gás de trabalho, apresenta alteração da microestrutura do material, que pode ser associada a formação de nitretos devido a difusão do nitrogênio no material. A existência desta zona fundida, mais evidente e em maior escala na amostra jateada com ar comprimido pode explicar os elevados valores de rugosidade apresentados, que não puderam ser medidos devido a limitação do equipamento. A presença desta zona fundida é evidente na Figura 28 e justifica a redução do valor de microdureza do material apresentada para esta condição, da ordem de 146HV.

A região de fusão da amostra jateada com argônio, da ordem de 25µm, é significativamente menor que a apresentada pela amostra jateada com ar comprimido, o que também pode ser observado na Figura 28. Avaliando-se a microdureza apresentada, verifica-se que esta apresentou um valor próximo à do material sem jateamento, com rugosidade da ordem de 2,8µm.

Pode-se desta forma, inferir que a utilização de um plasma mais controlado, com gás inerte promove menor alteração na superfície do material tratado. Com relação a amostra

jateada com nitrogênio, verifica-se uma rugosidade intermediária entre as demais estudadas, da ordem de 17  $\mu\text{m}$ , com valores de microdureza da ordem da apresentada pelo substrato.

Neste caso, mesmo as análises de MEV evidenciando uma modificação da microestrutura formada, não foi possível verificar alteração na microdureza do material, o que se deve possivelmente, ao reduzido tamanho da camada de nitretos formada. Análises de composição química desta região seriam necessárias de forma a investigar o tipo e quantificar as fases de nitretos formadas e sua influência nas propriedades do material.

Avaliando-se as imagens de MEV obtidas no interior das amostras, verifica-se nas mesmas uma orientação preferencial dos grãos que são equivalentes para todas as amostras, não havendo distinção nesta morfologia, como esperado, considerando que o processo de aquecimento é muito intenso na superfície e que não afeta de forma considerável o núcleo do material.



## 6. CONCLUSÃO

Os aços estruturais como o ASTM A36, amplamente utilizados em construções navais, são vulneráveis à oxidação e degradação em ambientes agressivos. Para mitigar esses efeitos, o revestimento protetor é essencial, sendo o preparo da superfície uma etapa crucial para garantir sua eficiência. Este estudo comparou os métodos de jateamento abrasivo e por plasma térmico no preparo de superfícies para revestimento.

Os resultados mostraram que o jateamento abrasivo aumentou significativamente a dureza superficial devido às tensões residuais de compressão geradas pelo impacto das partículas, enquanto o plasma térmico reduziu a dureza, atribuído ao recozimento causado por altas temperaturas e resfriamento lento. Por meio das análises microestruturais, pode-se observar que o plasma térmico modificou a superfície do material gerando microfusões, no caso do plasma de argônio e ar comprimido e modificação microestrutural no caso do plasma de nitrogênio, sendo mais evidente a modificação superficial no caso do plasma de ar comprimido.

Nos testes de adesão o jateamento por abrasivo apresentou melhor desempenho, com apenas 15% de deslocamento da película, enquanto o plasma térmico alcançou até 65%, com maior oxidação superficial, devido a alta rugosidade e irregularidades da superfície. Isso evidencia o melhor desempenho do método abrasivo para garantir maior aderência e resistência à corrosão.

O jateamento por abrasivo demonstrou ser o método mais eficaz para o preparo de superfícies no aço ASTM A36, garantindo melhor desempenho do revestimento em comparação ao plasma térmico nas condições analisadas. Para aprimorar o uso do plasma térmico nessa aplicação, é essencial realizar ajustes rigorosos nos parâmetros e gases, de modo a evitar alterações indesejadas nas propriedades da superfície e maximizar sua eficácia em contextos específicos.

### 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, observou-se a necessidade de realizar atividades complementares como:

- Estudar os parâmetros para geração do plasma térmico como: corrente elétrica, pressão e escolha do gás, distância de aplicação;
- Comparar os efeitos do jateamento por plasma com aplicação automatizada aumentando a velocidade da aplicação do plasma térmico;
- Realizar análise metalográfica com foco na superfície de incidência do plasma térmico;

- Alterar o tempo de aplicação do plasma térmico evitando microfusões.

## REFERÊNCIAS

- ABRACO - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO, **Qualificação para inspetor de pintura industrial**. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <https://abraco.org.br/>. Acesso em 09 dez 2024.
- ARRUDA, N. F. *at el*. **Influência do regime transiente sobre a microdureza e microestrutura nos aços ASTM-A36 e SAE-1045 soldados pelo processo MAG**. Soldagem & Inspeção. 2019;24:e2414. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.14>. Acesso em: 10 dez 2024.
- BELKIND, A.; GERSHMAN, S.; **Plasma cleaning of surfaces**. Vacuum Technology and Coating, 2008.
- BEUTHE, T. G.; CHANG, J. S.; KANEDA, T. **Modelling of argon thermal plasma by a chemical kinetic model at the atmospheric gas pressure**. Japanese Journal Applied PhysCs, n. 41. p. 21-30. 1997.
- BOULOS, M I; FAUCHAIS, P L; PFENDER, E. **Handbook of thermal plasmas**. Switzerland: Springer International, 2016.
- BRANDT, D. A., WARNER, J. C., **Metallurgy fundamentals**. New York: Goodheart, 2005.
- BRESCIANI FILHO, E. *et al*. **Conformação plástica dos metais**. 4. ed. Campinas: Editora da UNICAMP.,1991.
- CALLISTER JUNIOR, W. C.; RETHWISCH, D. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- CHIAVERINI, V., **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.
- CHU, P. K; LU, X. **Low temperature plasma technology: Methods and applications**. New York: CRC Press, 2014. Disponível em: <http://www.crcpress.com>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- COLPAERT; H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Editora Edgarg Blücher Ltda. 2008.
- CROLL, S.G. **Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection**. Progress In Organic Coatings, [S.l.], v. 148, p. 105847, nov.

2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105847>. Acesso em 7 dez. 2023.

DISCONZI, O. H. A. *et al.* **Avaliação do aquecimento de amostras de aço imersas em plasma.** Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Pesquisa em Tecnologia e Mecânica dos Materiais. Rio de Janeiro: Revista Matéria. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em 7 dez. 2023.

FRAGATA, F. L.; GNECCO C. **Perfil de rugosidade de superfícies de aço-carbono x espessura de pintura: um tema importante para ser debatido.** Corrosão & proteção, São Paulo, n. 51, p. 16-23, 2014.

FRIDMAN, A. **Plasma chemistry.** New York: Cambridge University Press, 2008. Disponível em: [www.cambridge.org/9780521847353](http://www.cambridge.org/9780521847353). Acesso em 09 dez. 2023.

GARBATOV, Y. *et al.* **Tenile strength assessment of corroded small scale specimens.** Corros Sci, v. 85, p. 296-303, 2014.

GARCIA, A *et al.* **Ensaaios dos materiais.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

GNECCO, C. *et al.* **Manual de construção em aço: Tratamento de superfície e pintura.** Rio de Janeiro: IBS/SBCA, p. 8-17, 2003.

**GUIA ILUSTRADO PARA SELEÇÃO DO GÁS DE PLASMA:** Como escolher os melhores gases para sua tocha a plasma multigás. Hypertherm. 2024. Disponível em: [www.hypertherm.com/pt/resources/articles/](http://www.hypertherm.com/pt/resources/articles/). Acesso em 09 dez 2024.

HEBERLEIN, J. *et al.* **Thermal plasma deposition of nanophase hard coatings.** Surf. Coatings Technol. [s.l.]. 2001.

IWAO, T. *et al.* **Portable application of thermal plasma and arc discharge for waste treatment, thermal spraying and surface treatment.** IEEJ Transactions On Electrical And Electronic Engineering, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 163-170, 2006.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/tee.20033>. Acesso em 09 dez 2024.

KASTILNIK, T. **Surface engineering.** Ohio: ASTM Handbook. vol. 5. p. 278–302. 1994.

KEIDAR, M; BEILIS, I. **Plasma engineering: Applications from aerospace to bio- and nanotechnology.** London, Waltham and San Diego: Academic Press (Elsevier Inc.), 2013.

Disponível em: [www.store.elsevier.com](http://www.store.elsevier.com). Acesso em: 09 dez 2024.

KRAUSS, G Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels. Metall Mater Trans B 34, p.781–792, 2003.

KRUGER, P. A. **Análise da utilização do plasma térmico como substituto ao jateamento abrasivo em aço naval**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

LAMB, T. **Ship design and construction**. Chelsea: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003.

MAFRA, M. **Estudo dos mecanismos de limpeza por plasma: Interação pós-descarga de Ar-O<sub>2</sub> e hexatriacontano**. 2008. 142 p. Tese (Doutorado em ciência e engenharia de materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2008.

**MARITIME Welding**. 2005.

MARQUES, V.P.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem fundamentos e tenologias**. Belo Horizonte: Editora Universidade Federal de Minas Gerais. 2011.

MASFELD, *et al.* **Corrosion processes**. New York: Applied science publishers, 1982.

MENEGOTTO, R. **Elaboração de procedimento para determinação do sólido por volume de tintas base de solvente pelo método extensor de 100 µm**. ABRACO, Revista Corrosão & Proteção. n. 71. 2020.

MOURÃO, M. B. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

PANNONI, F. D. **Aços estruturais**. [s.l: s.n.], 2005.

PAVANATI, H. C. **Aspectos básicos sobre plasmas DC fracamente ionizados**. Florianópolis: LABMAT, 2009.

Radomski, N. **O que é o teste de microdureza?** Comparação entre Vickers e Knoop. [s.l.] EVIDENT Technology Center Europe. 2024. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/>. Acesso em: 05 dez 2024.

REVIE, R. W. *et al.* **Corrosion and corrosion control**: An introduction to corrosion science and engineering. 4. ed. New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc., 2008.

SAMAL, S. **Thermal plasma technology**: The prospective future in material processing. *Journal Of Cleaner Production*. [s. l.], p. 3131-3150. 20 jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.154>. Acesso em: 09 dez 2024.

SAMUELS, L.E.; **Light Microscopy of Carbon Steels**. Ohio: ASM INTERNATIONAL, Materials Park, p. 110-118. 1999.

SINGH, A. A. M. M. *et al.* **Enhacement of Corrosion Resistance On Plasma Spray Coated Mildsteel Substrate Exposed To Marine Environment**. *Corros Sci* v.15, parte 1, p. 84-86, 2014.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. [s.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008.



