

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE  
TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL



EMANUEL LUCIANO LUNES MEDEIROS

**APLICAÇÃO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE  
DEPOSIÇÃO A PLASMA COM GAIOLA CATÓDICA DE TITÂNIO  
EM SUBSTRATO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

Cajazeiras  
2022

IFPB / Campus Cajazeiras  
Coordenação de Biblioteca  
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva  
Catalogação na fonte: Suellen Conceição Ribeiro CRB-2218

M488a Medeiros, Emanuel Luciano Lunes de

Aplicação de diferentes configurações de deposição a plasma com gaiola catódica de titânio em substrato de aço inoxidável AISI 304/ Emanuel Luciano Lunes de Medeiros. – Cajazeiras/PB: IFPB, 2022.

48f.:il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Automação Industrial) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-IFPB, Campus Cajazeiras. Cajazeiras, 2022.

Orientador(a): Prof. Dr. Gemierson Valois da Mota Candido.

1. Aço. 2. Tratamentos térmicos. 3. Plasma. 4. Aço inoxidável AISI 304. 5. Titânio.

I. Medeiros, Emanuel Luciano Lunes de. II. Título.

CDU: 669.18 M488a

EMANUEL LUCIANO LUNES MEDEIROS

**APLICAÇÃO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DEPOSIÇÃO  
A PLASMA COM GAIOLA CATÓDICA DE TITÂNIO EM  
SUBSTRATO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Tecnologia em  
Automação Industrial do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,  
como parte dos requisitos para a obtenção do  
grau de Tecnólogo em Automação Industrial

Orientador: GEMIERSON VALOIS DA  
MOTA CANDIDO

Coorientador: PETTESON LINNIKER  
CARVALHO SERRA

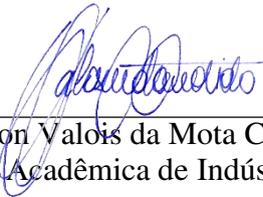
Cajazeiras  
2022

EMANUEL LUCIANO LUNES MEDEIROS

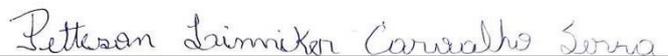
**APLICAÇÃO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DEPOSIÇÃO  
A PLASMA COM GAIOLA CATÓDICA DE TITÂNIO EM  
SUBSTRATO DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Tecnologia em  
Automação Industrial do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,  
como parte dos requisitos para a obtenção do  
grau de Tecnólogo em Automação Industrial

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Gemerson Valois da Mota Candido - (Orientador)  
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB



Prof. Msc. PETTESON LINNIKER CARVALHO SERRA - (Coorientador)  
Departamento de Indústria – IFPI



Prof. Msc. Leonardo Pereira de Lucena Silva - (Membro)  
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB.



Prof. Esp. Francisco Mendes de Abreu - (Membro)  
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB.

Cajazeiras, 20 de Agosto de 2022.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, antes de tudo, aos meus pais Maria Valdileide Lunes e Lavolsier da Silva Medeiros e à história deles. Sertanejos, nordestinos e despreziosos. Me deram as condições necessárias para o estudo e mais do que isso, me deram condições necessárias para viver o que eles não puderam. Dedico ao meu déficit de atenção que me provou que **ter** é diferente de o **ser**. Dedico à minha companheira Fernanda Fernandes de Oliveira, que aqui fica eternizada na minha história como o suporte para os meus piores momentos e as minhas piores passagens, e por fazer disso tudo algo bom. Dedico à minha doce irmã, Maria da Conceição Lunes Medeiros, que me deu o Norte para que eu chegasse lá e me tornasse o Norte dela. Às minhas tias e tios que assim como meus pais são o retrato da lenta marcha nordestina para um futuro repleto de incertezas e caos, dedico este trabalho e os resultados que serão colhidos a partir dele. Esta família me mostrou que o **fazer** não depende do **ter**. Dedico a esta minha família de sangue o resultado de mais de um ano de uma mansa e conflitante pesquisa.

Dedico à minha família adotiva: Everson, Matheus, Helves, Jean e Oclavio que ao longo desses anos de graduação me deram suporte de várias formas e inúmeras vezes, provando que **ser** é diferente de **ter**. Aos meus estimados colegas de quarto e de perrengue: Lunguinho, Bruno, Julio Cesar, William, Iarly e Marcos que aprenderam, desaprenderam, ajudaram, sofreram e se divertiram junto comigo e que sabem o que é uma dieta a base de pão, mortadela mista e refrigerante (kit espoca bucho). Dedico, por fim, a vida de Marcos Ivan, e a ciência combatida pelo governante deste país no presente momento desta pesquisa que, se fosse diferente, poderia ter salvado o meu amigo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto Federal da Paraíba, IFPB, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa. Ao IFPI e UFPI que através do professor Petteson abriram suas portas para minha pesquisa

Aos Professores do IFPB, nas pessoas de Gemerson e Fábio, que aceitaram de bom grado o meu trabalho para me auxiliar e me ajudar no que foi preciso. Agradeço aos demais professores por diversas vezes me apresentar os modelos de como ser e de como não ser, no meio acadêmico e pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso. Ao Núcleo de Extensão e Pesquisa do Campus Cajazeiras e aos profissionais que são engrenagens vitalícias para o funcionamento desta imensa máquina de saber que é o IFPB-Cajazeiras.

Aos desconhecidos que me deram carona e auxílio quando eu fiquei na estrada, ao restaurante do IFPB-Cajazeiras e as excelentes profissionais que ali trabalham. Agradeço a Edeildes, Alberto e a Aristoteles, exemplos de liderança que me acolheram e me ajudaram na longa caminhada de aprendizado extracurricular.

## RESUMO

A nitretação vem ganhando espaço entre os tratamentos térmicos que visam melhorias das propriedades superficiais. O aço inoxidável, mais especificamente o AISI 304 austenítico, tem excelente resistência a corrosão, que se somado com melhorias nas propriedades superficiais, podem ampliar o campo de aplicação, fazendo dele uma ótima opção de aplicação versátil na indústria. Propriedades como alta dureza, resistência à fadiga e ao desgaste, bem como aumento da resistência a corrosão, sem modificar de forma considerável a estrutura do substrato, são as mais visadas quando se emprega tratamentos superficiais tais como a deposição de filmes finos por meio do processo de *Sputtering*, que neste trabalho é parte concomitante à nitretação. As variações no processo, constituem parte importante dos avanços obtidos na área nos últimos anos. Os processos de nitretação aqui abordados, por exemplo, expressam de modo bastante claro as influências da variação de parâmetros no processo. Para averiguar as influências das variações no processo de melhoria das propriedades superficiais e objetivando contribuir com a literatura vigente este trabalho se propôs a avaliar as influências das variações: Analisar e relatar os resultados obtidos após tratamento termoquímico e as propriedades adquiridas e modificadas no aço AISI 304 após tratamento por plasma *Sputtering* e o impacto nas propriedades de resistência à corrosão. 3 variações do processo de nitretação a plasma foram realizadas, com 3 amostras para cada tipo de tratamento. Os ensaios e testes posteriores mostraram resultados satisfatórios de adesão e aumento na microdureza. Resultado de MEV, Adesão Rockwell C e os diagramas de corrosão apresentaram de forma mais específica os efeitos dos revestimentos sob a resistência e os aspectos de resistência e morfologia geral do substrato.

**Palavras-Chave:** Deposição a plasma; Gaiola catódica; AISI 304; Nitreto de titânio; Nitretação.

## ABSTRACT

Nitriding has been optimizing the treatments aimed to improving surface properties. Stainless Steel, more precisely the AISI 304 austenitic, have excellent corrosion resistance, which combined with his improvements in surface properties, can expanded the application field make it an excellent option for industrial applications. Properties such as high hardness, fatigue and wear resistance, as well as increased corrosion resistance, without considerably modifying the structure of the substrate, are the most targeted when using surface treatments, together with the deposition of thin films through the sputtering process, which in this work is part concomitant with nitriding. Variations in the process are an important part of the advances made in the area in recent years. The nitriding processes discussed here, for example, express quite clearly the influences of the variation of parameters in the process. In order to investigate the influences of variations in the process of improving surface properties and aiming to contribute to the current literature, this work aimed to evaluate the influences of variations: Analyze and report the results obtained after thermochemical treatment and the acquired and modified properties in AISI 304 steel after plasma sputtering treatment and the impact on corrosion resistance properties. 3 variations of the plasma nitriding process were performed, with 3 samples for each type of treatment. Subsequent trials and tests showed satisfactory results of adhesion and increase in microhardness. SEM, Rockwell C Adhesion and EIS diagrams shows more detailed the coatings under strength and general strength aspects of the substrate morphology.

**Keywords:** Plasma Deposition; Cathodic Cage; AISI 304; Titanium Nitride; Nitriding.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESECÍFICOS .....</b>	<b>13</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1. AÇOS INOXIDAVEIS .....</b>	<b>134</b>
<b>3.2. AÇOS INOXIDAVEIS AUSTENÍTICOS 304 .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3. TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4. NITRETAÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5. NITRETAÇÃO A PLASMA.....</b>	<b>21</b>
<b>3.6. DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.7. DEPOSIÇÃO A PLASMA COM GAIOLA CATÓDICA .....</b>	<b>23</b>
<b>3.8. TRATAMENTOS DUPLEX.....</b>	<b>28</b>
<b>4 MÉTODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 MATERIAL .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 TRATAMENTOS A PLASMA .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 CARACTERIZAÇÕES.....</b>	<b>28</b>
4.3.1 Corrosão.....	28
4.3.2 MEV .....	28
4.3.3 Microdureza .....	28
4.3.4 Adesão Rockwell C .....	28
<b>5 RESULTADOS E DISCUSÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 MEV .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2 MICRODUREZA .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 ADESÃO ROCKWELL C.....</b>	<b>31</b>
<b>5.4 CORROSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>37</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de Schaeffer.....	14
Figura 2 - Microestrutura Típica do Aço Inoxidável Ferrítico .....	16
Figura 3 - Microestrutura Típica do Aço Inoxidável Martensítico.....	17
Figura 4 - Microestrutura Típica do Aço Inoxidável Duplex .....	18
Figura 5 - Microestrutura Típica do Aço Inoxidável Austenítico .....	19
Figura 6 - Microestrutura Típica do Aço Inoxidável Austenítico 304 .....	20
Figura 7 - Principais Tratamentos Termoquímicos .....	21
Figura 8 - Esquemático do processo de Nitretação .....	23
Figura 9 – Camadas e Suas Dimensões .....	24
Figura 10 – Reator e Gaiola Catódica.....	26
Figura 11 – Esquemático dos processos .....	29
Figura 12 – Microscopia Eletrônica de Varredura das Amostras Tratadas .....	31
Figura 13 – Gráficos de Microdureza Hardness Vickers.....	32
Figura 14 – Micrografia da Adesão das Camadas Depositadas .....	33
Figura 15 – Potencial em circuito aberto.....	34
Figura 16 – Diagrama de Nyquist.....	35
Figura 17 – Diagrama de Bode.....	36
Figura 18 – Micrografia Eletrônica de Varredura das Amostras Após EIS .....	36

## LISTA TABELAS

Tabela 1 – Efeito dos principais elementos de liga presentes nos aços inoxidáveis. ....	15
Tabela 2 – Composição química dos aços da série ferrítica.....	16
Tabela 3 – Elementos de liga nos aços inoxidáveis 304.....	20
Tabela 4 – Elementos de liga da amostra .....	28
Tabela 5 – Processos e especificações.....	29

## LISTA DE ABREVIATURAS

°C – Graus Celsius  
304L – Low Carbon  
AISI – American Iron and Steel Institute  
C – Carbono  
CCC – Cúbico de Corpo Centrado  
Cl - Cloreto  
CFC – Cúbico de Face Centrada  
Cr – Cromo  
Cu - Cobre  
CVD - Chemical Vapor Deposition  
DPS – Deposição  
DPX – Duplex  
DPXS – Duplex Simultâneo  
E.U.A. – Estado unidos da América  
EIS – electrochemical impedance spectroscopy  
Fe - Ferro  
gf – Grama força  
H – Hidrogênio  
kgf – Kilo Grama força  
MEV – Microscopia Optica de Varredura  
Mo – Molibdênio  
N – Nitrogênio  
Na - Sódio  
Ni - Niquel  
OCP – Open Circuit Potential  
PACVD – plasma assisted chemical vapor deposition  
pH - potencial hidrogeniônico  
PIB – Produto Interno Bruto  
PVD – Physical Vapor Deposition  
sccm - Standard cubic centimetres per minute  
Si – Silício  
ST – Sem Tratamento  
TCC – Tetragonal de corpo Centrado  
Ti – Titânio  
torr – Torricelli: Unidade de pressão  
UFC – Universidade Federal do Ceará  
UFPI – Universidade Federal do Piauí  
W – Tungstênio

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$  - micro

$\alpha$  - Alfa

$\gamma$  - Austenita

® - Marca Registrada

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o surgimento dos aços inoxidáveis e o posterior estudo de suas propriedades, a busca por categorizar de forma sucinta todas as características do material e suas aplicações específicas, gerou toda uma área de estudos que fomenta o avanço desse setor na indústria. A oxidação e os problemas estruturais, e conseqüentemente, econômicos que ela gera, impulsionam estes avanços (TEBECHERANI, 2020; SIDACOINOX).

Esta necessidade de avanço trouxe inúmeros trabalhos que se propunham a contribuir para o avanço das aplicações dos aços inoxidáveis em utilidades, antes não recomendadas pelas características superficiais, agora possíveis por meio de tratamentos termoquímicos de superfícies (FIGUEROA *et al*, 2003; LEMOS *et al*, 2012; CARBÓ, 2008; SBARAI 2010).

A indústria metalmecânica, nas últimas duas décadas, cooptou de forma considerável, direcionamento para a implantação de tecnologias visando o desenvolvimento de aços com propriedades mecânicas e tribológicas com condições de atender os esforços e avanços do setor, de modo que desempenho e baixo custo fossem fatores impulsionadores para concretizar o resultado proveniente destas buscas. Segundo estudos, de 3 a 5% do PIB de um país se direciona aos esforços de combate a corrosão. Este processo de deterioração, como parte avançada do processo de oxidação, pode tornar o metal inapropriado para uso. Os aços inoxidáveis apresentam resistência, de modo geral, a corrosão a depender do ambiente. Para garantir máxima eficiência para cada tipo de aplicação, conhecer as ligas é essencial. Os elementos de liga ditam as características e suas respectivas propriedades ao passo que também margeiam a série do aço e o grupo ao qual pertence (TEBECHARINI, 2020; BOAS PRATICAS 2014; CARBÓ, 2008; BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006; LEMOS *et al*, 2012; CARBÓ, 2008; SBARAI 2010).

Os aços estão divididos em 4 grandes grupos a depender do tipo da microestrutura: Ferríticos, Martensíticos, Austeníticos e Duplex. Os austeníticos, mais especificamente, detém maior versatilidade de aplicação aproveitando a propriedade anticorrosão e menores possibilidades de endurecimento mediante tratamento térmico. A porcentagem de Níquel é fundamental para a construção tribológica da liga, permitindo que os aços inoxidáveis austeníticos estejam entre a classe dos materiais mais versáteis e conseqüentemente mais empregados dos setores produtivos. Porém as propriedades superficiais para certas aplicações não são totalmente indicadas (D'OLIVEIRA, 2017; BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

Processos para alteração da microestrutura como tratamentos térmicos e termoquímicos, são uma alternativa para constituir ligas de metal com características cruzadas. Tratamentos de superfície são amplamente utilizados e recomendados quando se deseja manter as características do substrato e altera apenas as propriedades da superfície. O tratamento termoquímico de nitretação é uma alternativa cada vez mais empregada na indústria, tanto pela eficácia quanto pelo controle preciso dos parâmetros empregados. Mais especificamente o tratamento de nitretação a plasma por gaiola catódica. Método este, que garante a deposição de camadas em forma de filmes finos sob o substrato, permitindo que se tenha materiais com características de substrato conservadas abaixo da camada de novas propriedades provenientes do tratamento. O tratamento termoquímico *Sputtering* mostra resultados satisfatórios como podemos ver em trabalhos como os de Serra *et al*, 2020 (FIGUEROA *et al*, 2003; LEMOS *et al*, 2012; CARBÓ, 2008; SBARAI 2010).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Comparar o resultado da aplicação dos tratamentos duplex, duplex simultâneo e de deposição, ambos utilizando gaiola catódica de titânio, nas propriedades de resistência mecânica e resistência a corrosão do aço inoxidável AISI 304.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Executar os tratamentos termoquímicos no aço austenítico AISI 304;
- Avaliar as influências na microdureza superficial;
- Avaliar os valores de adesão dos filmes depositados;
- Verificar o impacto dos tratamentos na resistência a corrosão com EIS e MEV.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

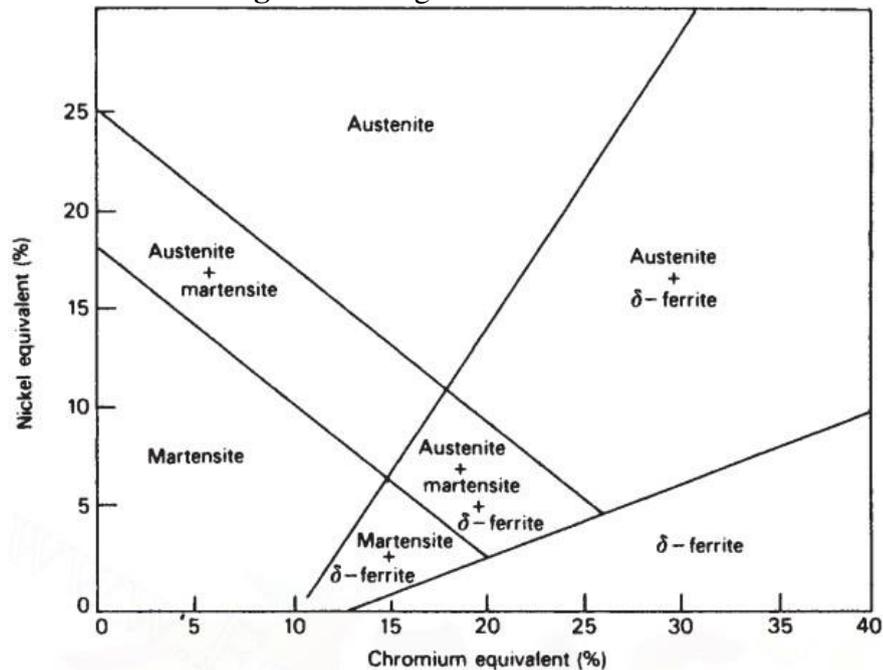
#### 3.1. AÇOS INOXIDÁVEIS

Acredita-se que os aços inoxidáveis foram descobertos por acidente, quando, por volta de 1912, fabricantes de armas viram a necessidade de utilizar, no interior dos canos de seus armamentos, um material que fosse resistente a erosão causada pela dispersão dos gases consequentes do processo de ignição dos projeteis. O cientista a quem foi dada a tarefa de sintetizar este material foi Harry Brearly. Na busca por esse material o próprio Brearly acabou sintetizando, por acidente, uma liga que era resistente à maioria dos reagentes metalográficos que se utilizava na época. A liga de Brearly era uma liga de Fe-Cr (com 13% de Cr) que ele apelidou de “Stainless Steel”, que na tradução livre quer dizer Aço que não mancha. Neste mesmo período avanços consideráveis surgiram na mesma área. Na Alemanha com Eduard Maurer e a companhia F. Krupp e nos Estados Unidos com Becket e Cristian (TEBECHERANI, 2020; SIDACOINOX; AVAGPG, USP). As ligas de Fe-Cr, porém, tiveram seus estudos minimamente abordados, pela limitação imposta pela tecnologia de análise da época e pela incapacidade de sintetizar uma liga com redução satisfatória dos teores de carbono, tendo voltado a ter relevante contribuição acadêmica, quase 70 anos depois (CARBÓ, 2008). Hoje, sabemos que as patentes e publicações feitas por volta dos anos 20, a respeito das ligas Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni, criaram a margem da divisão entre os aços austeníticos, martensíticos e ferríticos, estudados posteriormente (TEBECHERANI, 2020). E é possível ver no diagrama representado na Figura 1. como as porcentagens de Ni e Cr operam as margens dessa divisão. O motivo que induziu esse avanço e o desenvolvimento de toda essa nova área de estudos dentro da engenharia foi um processo conhecido como corrosão.

Sob linhas gerais podemos definir a corrosão como sendo um processo de deterioração de um material metálico, que pode torna-lo inepto para uso, ou estágio avançado de oxidação por reagentes químicos. Este processo se dá por ação química ou eletroquímica -do meio ambiente-, por vezes, aliada a esforços mecânicos que podem levar a alterações indesejáveis no material, por exemplo: desgaste, variações químicas ou modificações estruturais (LIMA *et al*, 2018). Existem 7 tipos que ganham destaque: corrosão geral; Inter cristalina; sob tensão; galvânica; alveolar; em frestas e em temperaturas elevadas. Estima-se que entre 3 e 5% do PIB de um país gira em torno de esforços para combater a corrosão e nesse sentido o estudo em busca de desenvolver ligas que, por algum motivo, sejam mais resistentes à corrosão é

indispensável. E como protagonista dos esforços industriais e acadêmicos, participam principalmente, os aços inoxidáveis (LEMOS *et al*, 2012; CARBÓ, 2008; SBARAI 2010).

**Figura 1** - Diagrama de Schaeffer.



Fonte: BHADSHIA; HONEYCOMBE (2006).

Trivialmente podemos dividir os aços inoxidáveis em duas grandes categorias: as ligas da série 400, referente aos aços do tipo ferríticos, que também englobam os martensíticos; e as ligas da série 300, referente aos austeníticos. Os elementos de liga ditam as características, como mostra o quadro 1. (D'OLIVEIRA, 2017). As ligas tendem a ter no mínimo 10,50% de Cr, que é o elemento que empresta as propriedades anticorrosão ao aço, e para séries específicas, um mínimo de Ni (entre 7 e 22%) que contribui com melhoria das propriedades mecânicas juntamente com a adição dos demais elementos específicos (TELLES, 2003).

**Tabela 1** – Efeito dos principais elementos de liga presentes nos aços inoxidáveis.

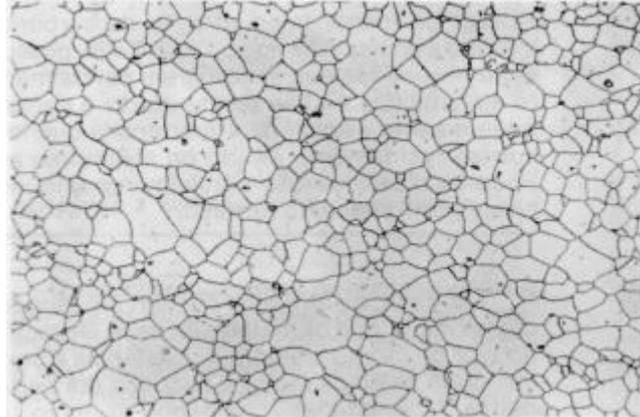
<b>Elementos de Liga</b>	<b>Influencia na estrutura</b>	<b>Influência nas Propriedades</b>
<b>Cromo (Cr)</b>	Forma carbonetos, acelera o crescimento dos grãos.	Aumento da resistência à corrosão e à oxidação, aumento da resistência à altas temperaturas
<b>Níquel (Ni)</b>	Refina o grão, diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço	Aumento da resistência à tração, alta ductilidade
<b>Manganês (Mn)</b>	Estabiliza os carbonetos, ajuda a criar microestrutura dura por meio de têmpera, diminui a velocidade de resfriamento	Aumento da resistência mecânica e temperabilidade da peça, resistência ao choque.
<b>Molibdênio (Mo)</b>	Influência na estabilização do carboneto, melhora a resistência corrosão por pites.	Alta dureza ao rubro, aumento da resistência à tração, aumento da temperabilidade
<b>Vanádio (V)</b>	Inibe o crescimento dos grãos, forma carbonetos	Maior resistência mecânica, maior tenacidade e temperabilidade, resistência à fadiga e à abrasão.
<b>Tungstênio (W)</b>	Forma carbonetos muito duros.	Aumento da dureza, aumento da resistência a altas temperaturas.
<b>Cobalto (Co)</b>	Forma carbonetos (fracamente), desloca a curva TTT para esquerda.	Aumento da dureza, aumento da resistência à tração, resistência à corrosão e à erosão.
<b>Silício (Si)</b>	Auxilia na desoxidação, auxilia na grafitização, aumenta a fluidez.	Aumento da resistência à oxidação em temperaturas elevadas, melhora da temperabilidade e da resistência à tração.

Fonte: Adaptado de D'OLIVEIRA (2017).

Os ferríticos que são conhecidos pela microestrutura ferrítica, ou seja, estabilizados na fase  $\alpha$ , fazem parte das ligas da série 400. De maneira generalista, podemos descrevê-los como sendo magnetizáveis; apresentam menor concentração de carbono e maior concentração de cromo, se comparado aos martensíticos; o que melhora a resistência à corrosão ao passo que diminui a resistência ao impacto, resultando em maiores limites de trabalhabilidade (OLIVEIRA, 2009). Apresentam características de cunho macia e tenaz, e, quando em temperatura ambiente, sua estrutura cristalina é cúbica de corpo centrado (CCC). Na Figura 2 é possível observar a microestrutura típica dos aços inoxidáveis ferríticos. Não podem ser

endurecidos por tratamento térmico e sua dureza é obtida através de deformação plástica a frio. Apresenta como estabilizador de ferrita o cromo, além de outros elementos, como alumínio, nióbio, molibdênio e titânio, como mostra a Tabela 1 (TEBECHERANI, 2020; PÓVOA, 2017; CARBÓ, 2008; OLIVEIRA, 2009).

**Figura 2** - Microestrutura típica do aço inoxidável ferrítico.



Fonte: TEBECHERANI (2020).

Suas áreas de aplicabilidade estão dentro de parâmetros que necessitam de boa resistência a corrosão e boa aparência superficial, sob solicitações mecânicas moderadas; exemplo: Sistemas de escapamentos de gases de combustão interna de motores a explosão, estampagem em geral, componentes para plataformas de petróleo, equipamentos para ácido nítrico, utensílios domésticos (baixelas, fogões, geladeiras, pias e talheres), moedas, balcões frigoríficos, aplicações em indústria química e petroquímica. (INSTITUTO DO INOX, 2021; HIPERMETAL, 2021; LOJA BRAZIL, 2019; PAREDES, 2015; ISSF, 2009).

**Tabela 2** – Composição química dos aços da série ferrítica.

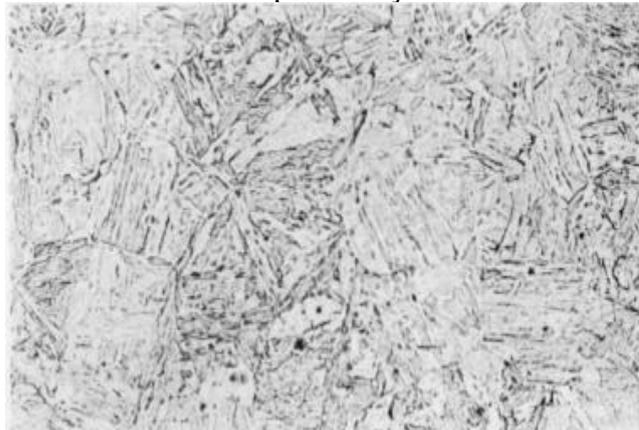
SÉRIE 400 – FERRÍTICA		
409	420	430
C % 0,08 Máx.	C% 0,15 Min.	C % 0,10 Máx.
Mn % 1,00 Máx.	Mn % 1,00 Máx.	Mn % 1,00 Máx.
Si % 1,00 Máx.	Si % 1,00 Máx.	Si % 1,00 Máx.
Cr % 10,511,75	Cr % 12-14	Cr % 16,0018,00
Ti6xC %0,75		

Fonte: Adaptado de IRESTAL (2013).

Já os Aços Inoxidáveis martensíticos, que compõem parte importante do extenso grupo das ligas da série 400, pode ser denotado como uma solução sólida supersaturada de carbono. Tem a estrutura cristalina Tetragonal de Corpo Centrado (TCC) (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006) e em comum com as ligas ferríticas é magnetizável. A microestrutura típica de um aço inoxidável martensítico é apresentada na Figura 3. Essas ligas de Fe com teores de Cr indo de

12 a 17% e C entre 0,1 e 0,5% (o que pode ser considerado elevado, se comparado as demais ligas) é o que as diferencia dos ferríticos, e, juntamente com as propriedades oriundas dessas diferenças, se destacam; pela baixa ductilidade, dureza e a variedade do grau de dureza que pode ser atingido controlando as condições de aquecimento e resfriamento, e pela resistência à corrosão atmosférica (que só pode ser obtida após a tempera); com baixa trabalhabilidade, boa resistência ao desgaste e índices negativos de soldabilidade em algumas ligas (que pioram de acordo com o aumento da concentração de carbono da liga). Sua aplicação pode ser encontrada em itens de cutelaria, eixos, instrumentos cirúrgicos, parafusos, porcas, pás e outras peças para turbinas a vapor, além de válvulas e hastes de registro, bombas, torres de fracionamento de petróleo, pistas de rolamento, moldes plásticos e utensílios de cutelaria (INSTITUTO DO INOX, 2021; HIPERMETAL, 2021; LOJA BRAZIL, 2019; PAREDES, 2015; ISSF, 2009).

**Figura 3** - Microestrutura típica do aço inoxidável martensítico.

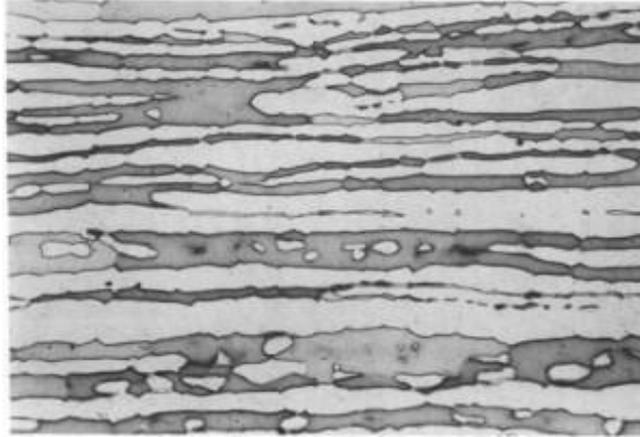


Fonte: TEBECHERANI (2020).

Outra variedade dos aços inoxidáveis é o aço inoxidável duplex, que incluem na sua estrutura, simultaneamente, estabilização nas duas fases: austenita e ferrita, com teores indo de 18% a 30% de Cr, 3,5% a 8% de Ni e 1,5% a 4,5% de Mo. Como era de se esperar a liga pode ter até três tipos de microestrutura cristalina; CCC ou fase ferrítica, a Cúbica de Face Centrada (CFC) ou fase austenítica e a TCC ou fase sigma. Outros elementos podem compor a liga a fim de garantir melhoria de propriedades estruturais, como: N, Cu, Si e W. Uma forma eficiente para prevenir corrosão-erosão e corrosão-tensão é o emprego de aços inoxidáveis duplex (CHIAVERINI, 2005; POVOA, 2017; PAIVA; PEREIRA, 2016; MARTINS; CASTELETTI, 2007). São endurecíveis por tratamento térmico, mas são mais duros que os aços ferrítico e austenítico em certas condições. Atrela o melhor das duas estruturas sendo ferromagnéticos

(como os ferríticos) e ao mesmo tempo mantendo boa conformabilidade e soldabilidade (como os austeníticos) (SIDACOINOX,2021).

**Figura 4** - Microestrutura típica do aço inoxidável duplex.



Fonte: BOAS PRATICAS (2014).

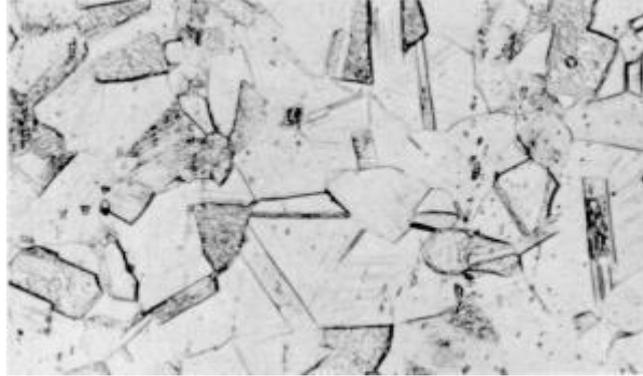
### 3.2. AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS 304

Os aços Inoxidáveis Austeníticos, ou ligas da série 300, detém características especiais que fazem dele um dos materiais inoxidáveis mais utilizados para aplicações em que essa propriedade é vital. Estas ligas de Ferro com C indo de 0,03 à 0,1% (para as ligas 304L), tem como principais elementos de liga o Cr, de 16 até 25% e Ni em teores que podem ir de 8 a 25%. O Ni melhora de forma considerável a resistência à corrosão e ainda auxilia na formação da camada de óxido protetora (passividade); contribui com melhorias nas propriedades mecânicas, transformando ligas ferríticas em ligas austeníticas. estabilizando a fase  $\gamma$ , até a temperatura ambiente, permitindo que os aços inoxidáveis austeníticos estejam entre a classe dos materiais mais versáteis e conseqüentemente mais empregados dos setores produtivos (TEBECHARINI, 2020; BOAS PRATICAS 2014; CARBÓ, 2008; BHADSHIA; HONEYCOMBE, 2006).

São caracterizados por deter ótima capacidade de encruamento e alta plasticidade, característica atrelada à ótima resistência mecânica e que indicam alta suscetibilidade à deformação a frio. Daí surge a margem para dividir sua classificação em austeníticos estáveis e austeníticos metaestáveis. Os austeníticos estáveis, conseguem manter sua estrutura austenítica mesmo após a deformação a frio. Enquanto os metaestáveis tendem a transformar a estrutura, em martensítica, quando sujeitos à deformação a frio (WALTERS, 2014; BOAS PRÁTICAS, 2014). Além da baixa condutividade térmica e alto coeficiente de expansão térmica linear, apresentam ótimas taxas de soldabilidade e conformabilidade, são materiais com

aportes bons o suficiente para corte, furo, dobra, estampo e curvas (ANDRADE *et al*, 2009; SIMÕES *et al*, 2010).

**Figura 5** - Microestrutura típica do aço inoxidável austenítico.



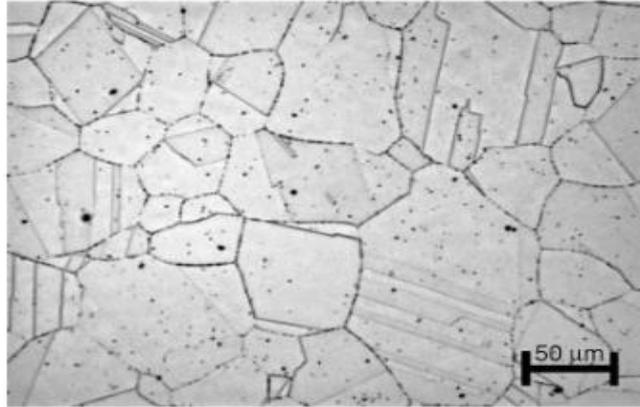
Fonte: TEBECHERANI (2020).

Propriedades como resistência a corrosão por pites, susceptibilidade à corrosão intergranular e resistência à oxidação e a corrosão podem ser alteradas com a adição ou redução de elementos, por exemplo, adição de molibdênio acima de 2%, redução no teor de carbono ou adição de silício, respectivamente (PADILHA E GUEDES, 1998).

Apresentam, à temperatura ambiente, um baixo limite de escoamento, limite de resistência alto e uma elevada ductilidade. São, entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão. São inúmeras as suas utilizações. Encontram aplicações na indústria química, alimentícia, de refino de petróleo e em diversos outros casos em que boa resistência à corrosão, facilidade de limpeza e ótimas características de fabricação são necessárias (PESSANHA, 2011).

Não obstante, os aços inoxidáveis austeníticos do tipo AISI 304, Figura 6, possuem estrutura CFC. Tem sua resistência mecânica aumentada quando trabalhados a frio, graças a formação da martensita. (ANDRADE *et al*, 2009; SIMÕES *et al*, 2010).

**Figura 6** - Microestrutura típica do aço inoxidável austenítico 304.



Fonte: FIRRAO *et all* (2006).

Dependendo do meio ambiente, o 304 não é o austenítico mais utilizado e isso se dá pela ação corrosiva provocada pelo ânion cloreto. Dependendo da concentração de cloretos no meio, da temperatura e do pH, três formas de corrosão podem ocorrer: por pites, por frestas e sob tensão. O níquel, que favorece a repassivação do material nas regiões onde o filme passivo foi quebrado por estas formas de corrosão, pode ser considerado como elemento fundamental de liga. Os aços 304, mais empregados, tem aproximadamente 17% de cromo e 8% de níquel, além de outros elementos como mostrado na Tabela 3. O molibdênio é adicionado em alguns dos aços austeníticos para aumentar sua resistência aos mecanismos de corrosão localizados tais como corrosão galvânica e por pite ou alveolar (CARBÓ, 2008).

**Tabela 3** – Elementos de liga nos aços inoxidáveis 304.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Co	Cu
0,060	0,39	1,31	18,09	8,03	0,040	0,0330	0,10	0,07

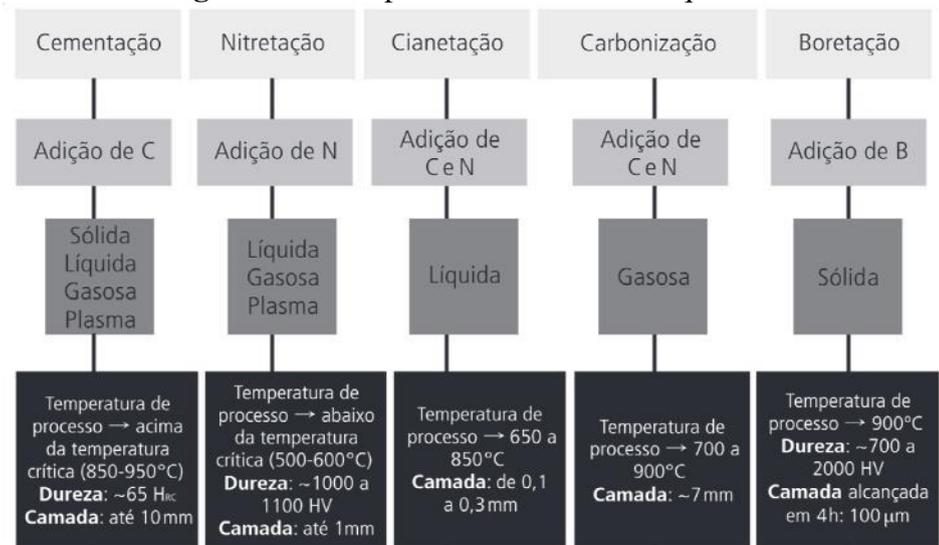
Fonte: ANDRADE (2009).

### 3.3. TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

As propriedades mecânicas de um aço podem ser alteradas com um tratamento térmico específico a depender da necessidade de aplicação ao qual o material será submetido. Porém, para se obter uma modificação química na microestrutura é preciso uma abordagem mais ínfima. Visando uma alteração na microestrutura afim de se obter melhores propriedades superficiais, aplicamos um tratamento termoquímico. Há um cuidado para se manter as propriedades do núcleo ou para não as alterar sem que haja a necessidade. Se aplicado corretamente seguindo os parâmetros específicos de cada material e aplicação, é possível

manter a tenacidade e ductilidade do material e trabalhando apenas as propriedades superficiais; aumentar a dureza e resistência ao desgaste (DO VALE, 2011). Os principais tratamentos termoquímicos estão dispostos na figura 8.

**Figura 7 - Principais tratamentos termoquímicos.**



Fonte: ANDRADE (2007).

### 3.4. NITRETAÇÃO

A nitretação é um processo que consiste na adição de nitrogênio no aço para aumentar a resistência à fadiga, à corrosão, ao desgaste e ao calor. O princípio do tratamento é promover a difusão do nitrogênio em (relativamente) baixas temperaturas. Como consequência, resulta em menor distorção e em camadas menos espessas do que as que são obtidas por cementação. Geralmente, forma-se a chamada camada branca de nitreto de alta dureza, camada rica em compostos (entre eles nitretos) próxima à superfície da peça (INFOMET). O processo foi patenteado nos anos 30, nos E.U.A. e na Suíça. A nitretação é muito utilizada na indústria metalmeccânica (automobilística, por exemplo), sendo aplicada em peças como girabrequins, camisas de cilindros, pinos, rotores; peças em geral que precisam ter alta resistência ao desgaste sob temperatura relativamente elevada (MANFRINATO, 2006;).

A nitretação pode ser a gás, em banho de sal ou a plasma. A plasma, em especial, por ser objeto deste estudo, será abordada e explorada de forma melhor posteriormente. No caso da nitretação gasosa, que é realizada em temperaturas que variam de 495°C a 565°C, O nitrogênio é produzido pela dissociação da amônia quando entra em contato com as peças quentes de aço.

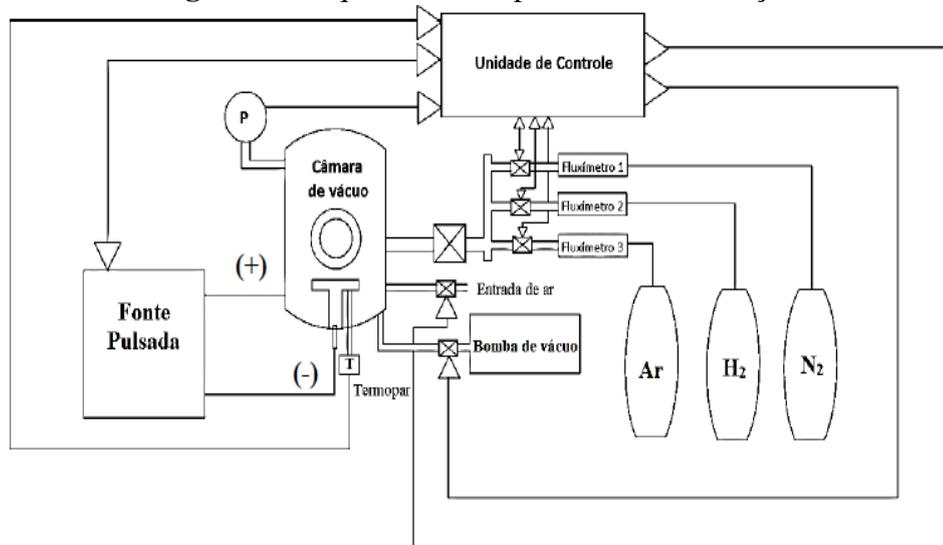
A camada branca, neste processo, normalmente apresenta espessuras de 20 a 25  $\mu\text{m}$ . Esta varia com o tempo, temperatura e composição do gás (DALMAS, 2013).

O processo de nitretação líquido ou em banho de sal, opera onde é necessário considerável aporte de calor, juntamente com a adição de elementos químicos na superfície do aço e consiste em um mergulho (ou banho) de uma fusão de sais a base de bário, cianeto, estrôncio, cianato, carbonatos, nitratos, nitritos, sódio e potássio. Utiliza as mesmas faixas de nitretação sólida para a temperatura, entre 495°C e 565°C, por um período considerado curto se comparado aos demais métodos, normalmente 2 horas (JANECZKO, 2019; RANALLI *et al*, 2009; INFOMET).

### 3.5. NITRETAÇÃO A PLASMA

As partículas de um gás, após serem parcialmente ionizadas, adquirem a propriedade de agirem umas sobre as outras a distância, por forças eletromagnéticas. Apesar de continuarem a interagir via colisões por moverem-se livremente, deixam de ser um gás e se tornam um meio com características próprias, chamado de plasma. O plasma, pode ser reconhecido como um dos estados possíveis de organização da matéria. O quarto estado da matéria, como também é chamado, pode ser gerado a partir da aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos em um meio à baixa pressão (ZIEBELL, 2004; SERRA, 2018).

A nitretação a plasma, por sua vez, é um processo com forte participação na indústria metalmeccânica. Neste processo, gera-se o plasma através da aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos, em ambiente contendo um gás ou mistura de gases à baixa pressão. Os íons do gás são acelerados sob a superfície de uma peça com carga negativa (potencial catódico). Após a difusão térmica dos íons neutralizados sob a superfície, são originadas as camadas de revestimento sob o material e é importante manter o oxigênio residual do ambiente controlado, para evitar má formação da camada nitretada (DO VALE, 2011; SPHAIR, 2017). A Figura 8, mostra um esquemático geral do sistema e processo.

**Figura 8** - Esquemático do processo de nitretação.

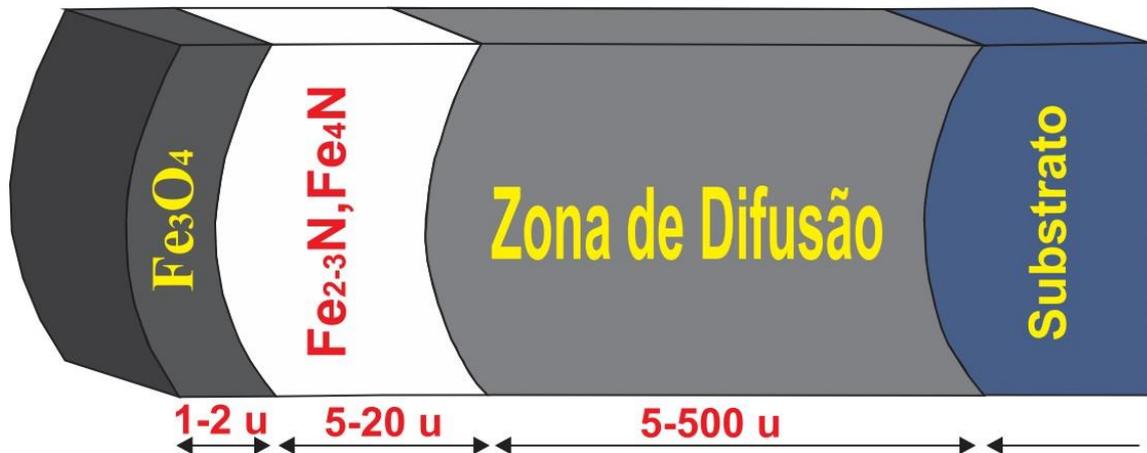
Fonte: SERRA (2018).

Em especial os aços inoxidáveis austeníticos, pelas aplicações as quais são submetidos, sofrem frequentemente severo desgaste. Modificando a estrutura e a composição da superfície do componente esse tipo de problema pode ser resolvido sem prejudicar a resistência à corrosão. Várias técnicas foram desenvolvidas com essa intenção, nas quais estão a nitretação por plasma em baixas temperaturas (o que favorecem o controle geométrico e dimensional dos componentes nitretados) e os tratamentos duplex que envolvem a deposição de revestimentos cerâmicos sobre substratos previamente nitretados (DO VALE, 2011; OLIVEIRA, 2005; SPHAIR, 2017).

Além do controle dimensional com o baixo gradiente de temperatura necessário, esse processo tem como vantagens menores problemas ambientais, melhor estabilidade dimensional, melhor reprodutibilidade, reduzido tempo de tratamento, uniformidade de espessura da camada, facilidade de automação e melhor controle da camada nitretada. (MACHADO, 2018; MANFRINATO, 2006).

Essa camada nitretada composta, basicamente por Fe – N, é formada pela combinação desses nitretos e a difusão de nitrogênio no interior das peças. A camada nitretada divide-se em: camada de compostos ou camada branca, constituída por nitretos, e uma zona de difusão, que consiste em uma solução sólida de nitrogênio dissolvido na matriz, como mostra a Figura 8 (SERRA, 2018).

**Figura 9** – Camadas e suas dimensões.



Fonte: Adaptado de VENDRAMIM (2022).

Como citado anteriormente uma das vantagens do processo é a possibilidade de controle dos parâmetros de nitretação, que permitem a obtenção de propriedades que podem ser controladas por ajustes de parâmetros de tratamento como: o fluxo e composição dos gases, a pressão e a temperatura (SERRA, 2018).

### 3.6. DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS

Os filmes finos formam uma camada de revestimento com espessuras que podem chegar até 300  $\mu m$  (numa escala de nanômetros até alguns micrômetros) depositados sob a peça; superfície ou substrato (CARVALHO, 2016; MELLO, 2011). É importante que o filme fino possua todas ou a maioria das seguintes propriedades: deve ser quimicamente estável no ambiente no qual será utilizado; ser fortemente aderente à superfície (substrato); deve ter espessura uniforme; deve ser puro ou ter composição controlável e deve ter baixa densidade de defeitos (MELLO, 2011). Sabemos que altas temperaturas podem ocasionar em uma série de efeitos não desejados na interface das peças. Os processos PVD (Physical Vapor Deposition) têm a vantagem de depositarem filmes em temperaturas muito mais baixas do que nos processos de CVD (Chemical Vapor Deposition), tornando o processo versátil (MOURA, 1994).

A deposição química de vapor ou (na sigla inglesa) CVD, utiliza gases para realizar a deposição dos filmes sobre o substrato, pulverizando a substância a ser depositada. A maioria dos processos CVD, operam sob uma faixa de pressão de poucos torr abaixo da pressão atmosférica. Uma temperatura relativamente alta, próximo de  $1000^{\circ}C$ , é necessária para o processo CVD. Sampaio (2017), apresenta que o plasma pode ser utilizado como fonte de energia em substituição do calor se os reagentes corretos forem escolhidos. O processo de

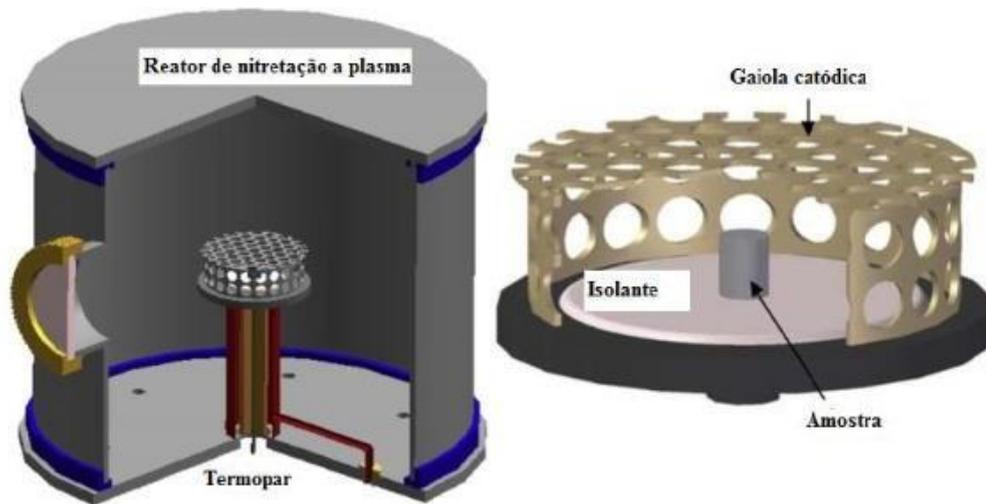
deposição química de vapor assistida por plasma (PACVD) é uma possível alternativa uma vez que utiliza plasma frio. O plasma é gerado utilizando um reator como fonte de energia (SAMPAIO, 2017; WASA *et al*, 2004).

### **3.7. DEPOSIÇÃO A PLASMA COM GAIOLA CATÓDICA**

Os filmes finos podem ser obtidos por uma variedade de técnicas, como por exemplo, deposição eletrolítica, deposição por evaporação, deposição física a partir da fase vapor, deposição química a partir da fase vapor, deposição por sputtering (MELLO, 2011). O processo de PVD pode ser dividido em dois grupos: Térmicos e Sputtering. Neste último, o princípio pode ser exemplificado; quando a superfície de um sólido é bombardeada com partículas eletricamente carregadas, como ions os átomos dessa superfície são arrancados em consequência da colisão. Neste processo, mais especificamente, utilizamos este princípio como meio de passar características específicas de um material arrancando seus átomos e os depositando sobre um outro material que “necessite” dessas características a nível superficial. O material a ser depositado é convertido à fase vapor por processo físico, especificamente no processo que utiliza o sputtering como forma de evaporação, temos o desalojamento dos átomos da superfície da fonte através de transferência de momento por bombardeio iônico. O vapor é transportado da fonte até o substrato através de uma região de baixa pressão. O vapor passa por uma região de baixa pressão e condensa sobre o substrato formando o filme fino (DOI, 2013; WASA *et all*, 2004; GOMES, 2017).

O processo de Deposição a Plasma com Gaiola Catódica, pode ser citado como uma junção dos processos anteriores. E, por ser um processo sputtering, muitos gases usados neste processo são moléculas que possuem alto potencial de ionização. Também neste processo, a pressão de trabalho é superior as demais, entre 0,1 e 1 torr, resultando em maior frequência de colisões e menor caminho livre para os elétrons (JUNIOR, 2001). A Figura 9 ilustra o mecanismo do processo.

**Figura 10** – Reator e gaiola catódica.



Fonte: SOUSA *et al* (2016).

A amostra é deixada sobre uma superfície isolante, garantindo que apenas a gaiola seja submetida a diferença de potencial, protegendo a peça de defeitos antes inerentes aos processos de PVD como defeitos de borda e aberturas de arco. A gaiola por sua vez possui geometria bem definida e vários furos disposto de forma precisa para garantir o efeito do catodo oco. Este efeito aparece quando as luminescências negativas se aproximam ou se sobrepõem dentro de um furo e produz confinamento de elétrons e oscilações nestas regiões, causando a ionização e a excitação adicional dos átomos ao ponto que é possível observar o aspecto visual do plasma para fora dos furos. Através do fluxo de gás, o material na região é arrancado e se deposita sobre a peça (WASA, 2004; SAMPAIO, 2017; SOUSA, 2007; GOMES, 2017; ARAUJO, 2006).

### 3.8. TRATAMENTOS DUPLEX

Tratamento duplex é o termo utilizado para definir o processo resultante de dois tratamentos: Nitretação a plasma e em seguida deposição de um filme fino. A tecnologia de engenharia de superfícies busca alcançar com esse tratamento, elevação das propriedades tribológicas de aços (SERRA *et al*, 2020; PINEDO, 2011). Sua utilização vem sendo ampliada comercialmente em aços ferramentas que por sua vez são usados para a fabricação de moldes e matrizes. O tratamento duplex aumenta a capacidade de suportar o carregamento do substrato, pois o processo que o antecede (nitretação), garante uma melhor adesão do filme sob o substrato, melhorando seu desempenho tribológico; como, estabilidade térmica e baixo atrito.

Analogamente o tratamento duplex conduz a um aumento significativo das cargas necessárias para trincamento e delaminação do TiN. Esta melhoria na adesão, resultado da melhor compatibilidade de propriedades mecânicas entre o revestimento e o substrato nitretado, conduzirá a um maior tempo de residência do revestimento em serviço. O nitreto de titânio (TiN) é um dos revestimentos de PVD mais utilizados. O PVD tem a vantagem de ser realizado em baixa temperatura de processamento quando comparado ao CVD e não alterar significativamente as propriedades do substrato (CALESTINI, 2013; SILVEIRA, 2021).

## 4 MÉTODOLOGIA

### 4.1 MATERIAL

A amostra utilizada como objeto de estudo, foi o aço inoxidável austenítico AISI 304, com composição apresentada na Tabela 3. fornecido pela Villares Metals com referência V304UF. As amostras foram cortadas em formato cilíndrico com as dimensões: 25 mm de diâmetro; 8 mm de espessura, utilizando uma cortadeira metalográfica Teclago. Em seguida foram lixadas com lixas de 220 mesh, 400 mesh, 600 mesh e 1200 mesh e finalizadas com polimento utilizando pasta de diamantada de 1  $\mu$ m. Após o polimento foram imersas em álcool e levadas ao ultrassom por 10 minutos e finalmente secas com secador comum.

**Tabela 4** – Elementos de liga da amostra.

C %	Si %	Mn %		Cr %	Ni %	Mo %	W %	Fe
0,080	<=1,00	Máx. 2,00		18,00	8,00	-	-	-Em balanço.

Fonte: VILLARES METALS (2022).

### 4.2 TRATAMENTOS A PLASMA

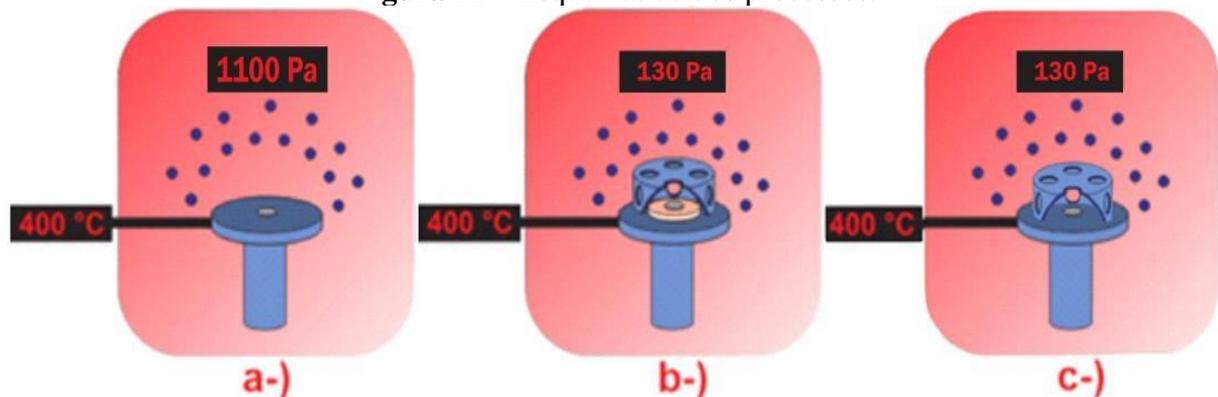
Foram utilizadas 3 amostras para cada tipo de tratamento. Por sua vez, cada amostra passou por um tratamento de pré-sputtering com atmosfera de 30 sccm de H<sub>2</sub> e 30 sccm N<sub>2</sub> (gases neutros), como forma subsequente da limpeza, a uma temperatura de 300 °C por 1 hora. As temperaturas dos processos descritos abaixo foram escolhidas com base nas justificativa citadas no trabalho de SERRA *et al.* (2021) e que mostraram que os tratamentos em 400 °C são mais eficientes no aumento da resistência a corrosão por evitar a precipitação do nitreto de cromo. Um resumo dos processos pode ser visto na Tabela 4.

Na primeira etapa do tratamento duplex, amostra A1, a nitretação convencional, representado pela Figura 10 a-), foi realizada nas temperaturas de 400°C, com atmosfera composta de 80 sccm de H<sub>2</sub> e 8 sccm de N<sub>2</sub>, o percentual foi mantido abaixo de 10% de N<sub>2</sub> para que fosse inibida a formação de camada de compostos (Fe<sub>2</sub>-3N, Fe<sub>4</sub>N, por vezes chamada de camada branca) e melhorasse as condições de adesão do filme depositado na sequência. Já na segunda etapa do Duplex, a deposição, representado pela figura 10. B-), as amostras foram colocadas sob a alumina, foram submetidas às mesmas 4 horas com 400 °C de temperatura. A atmosfera foi modificada para 60 sccm de H<sub>2</sub> e 15 sccm de N<sub>2</sub>.

O processo do tratamento duplex simultâneo, amostra A2, foi realizado a uma temperatura de 400 °C por 4 horas, com atmosfera composta de 60 sccm de N<sub>2</sub> e 15 sccm de H<sub>2</sub>. Utilizando a gaiola, mas deixando as amostras diretamente sob o porta amostra, ou seja, gaiola e amostras em potencial catódico, como mostrado na figura 10. c-).

No tratamento aplicado à amostra A3, a deposição não foi precedida de nitretação convencional e a configuração é a mostrada na Figura 10 b-). O tratamento foi realizado a uma temperatura de 400 °C durante 4 horas, com atmosfera composta de 60 sccm de N<sub>2</sub> e 15 sccm de H<sub>2</sub>. Utilizando a alumina para manter a amostra em potencial flutuante durante todo o processo e a gaiola em potencial catódico.

**Figura 11** – Esquemático dos processos.



Fonte: Próprio autor.

**Tabela 5** – Processos e especificações.

Amostra	Nitretação			Deposição			
	Temperatura	Tempo	Composição (%)	Tipo	Temp. °C	Tempo	Composição (%)
A1	400 °C	4 h	80H <sub>2</sub> - 8N <sub>2</sub>	C/Alumina C/Gaiola	400 °C	4 h	10H <sub>2</sub> - 40N <sub>2</sub>
A2	-	-	-	C/Alumina C/Gaiola	400 °C	4 h	15H <sub>2</sub> - 60N <sub>2</sub>
A3	-	-	-	S/Alumina C/Gaiola	400 °C	4 h	15H <sub>2</sub> - 60N <sub>2</sub>

Fonte: Próprio autor.

## 4.3 CARACTERIZAÇÕES

### 4.3.1 Corrosão

Os testes de Polarização Potenciodinâmica e Espectroscopia de Impedância eletroquímica (EIS) foram usados a fim de aferir o comportamento das amostras mediante corrosão. A polarização Potenciodinâmica foi medida em uma solução de 3,5% de NaCl em temperatura ambiente após estabilização de 3600 segundos do circuito de potencial aberto (OCP) na margem de -0,2V vs. OCP para  $3 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  de Densidade de Corrente. Os diagramas obtidos foram classificados usando o software Zview®.

### 4.3.2 MEV

Para avaliar a morfologia da superfície, foram obtidas imagens da superfície utilizando o microscópio eletrônico de varredura – MEV da *FEI Company*, modelo *Quanta* TM 250-FEG.

### 4.3.3 Microdureza

As medidas de microdureza na escala Vickers foram obtidas utilizando o microdurômetro da marca INSIZE, modelo ISH-TDV 1000, pertencente ao Laboratório de Metalografia do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Piauí – UFPI. Para as medidas de microdureza foram feitas 5 medidas em cada amostra com carga de 50 gf e tempo de indentação de 15 segundos. Para o perfil de microdureza da seção transversal também foi feito 5 medições em cada amostra com 0,05 kgf de carga em um período de 15 s de indentação.

### 4.3.4 Adesão Rockwell C

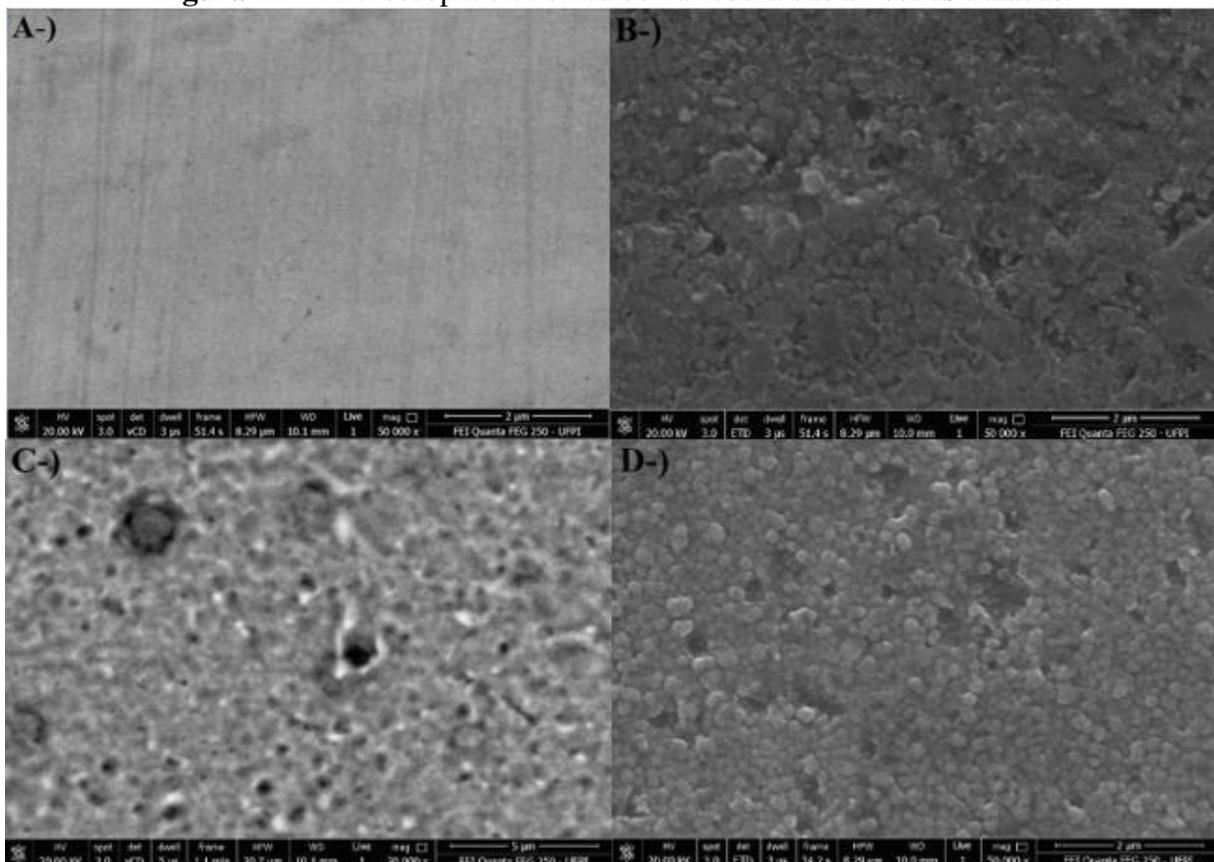
A adesão das camadas depositadas foi analisada pelo teste de adesão Daimler-Benz VDI Rockwell C, usando um durometro com ponta cônica de diamante, Insize modelo ISH-BRV, tudo de acordo com a padronização VDI 3198.

## 5 RESULTADOS E DISCUSÃO

### 5.1 MEV

A figura 12 mostra as amostras depois dos tratamentos e antes da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica e da Polarização Potenciodinâmica. A amostra sem tratamento figura 12 a-) é exibida a fim de comparação para expor a diferença na morfologia após os tratamentos e seus efeitos e defeitos.

**Figura 12** – Microscopia eletrônica de varredura das amostras tratadas.



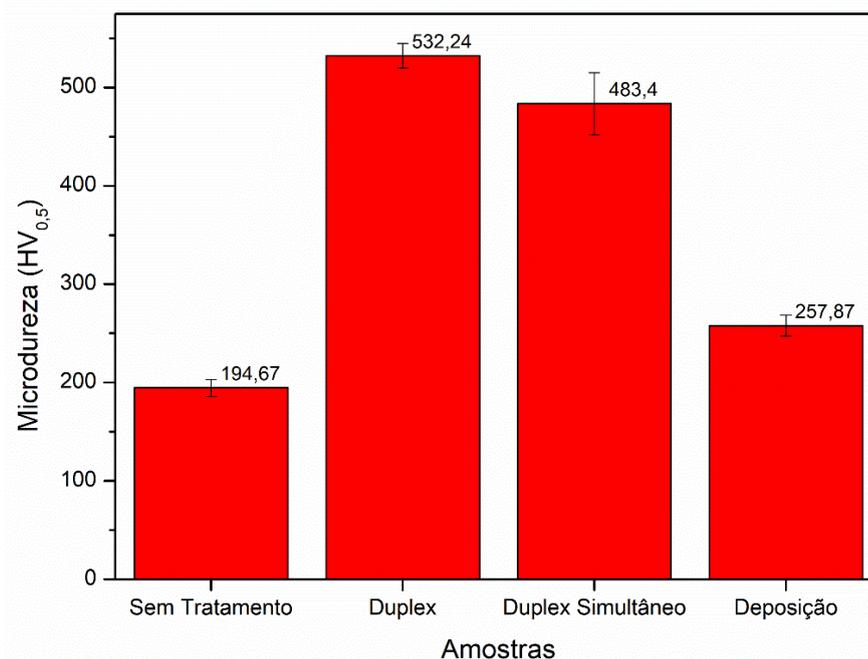
Fonte: Autoria Própria.

A figura a-) mostra a microestrutura típica da superfície antes da nitretação. Os resultados obtidos mostram deposição em todas as amostras. A amostra proveniente de tratamento duplex (Figura b-), apresentou maior homogeneidade e estrutura de grãos pequenos formando ilhas maiores distribuídos de forma uniforme, com lacunas avantajadas na superfície tratada e com a presença de alguns defeitos superficiais. A amostra de duplex simultâneo

(Figuras c-) apresentou falhas em alguns pontos e, concomitante a este resultado, sua aderência pode ser considerada menor em comparação aos demais tratamentos uma vez que o filme apresentou também defeitos enquanto a duplex é nitretada anteriormente a duplex simultânea tem o efeito do *sputtering*. A deposição simples (figura d-) apresentou homogeneidade na deposição dos filmes com contornos de grãos bem definidos, essa maior uniformidade é devido ao estado da superfície (polida antes do tratamento). A união de grãos para formação de ilhas menores e uma maior quantidade trincas e defeitos, fator que pode favorecer a corrosão por pites.

## 5.2 MICRODUREZA

**Figura 13** – Gráficos de Microdureza Hardness Vickers.



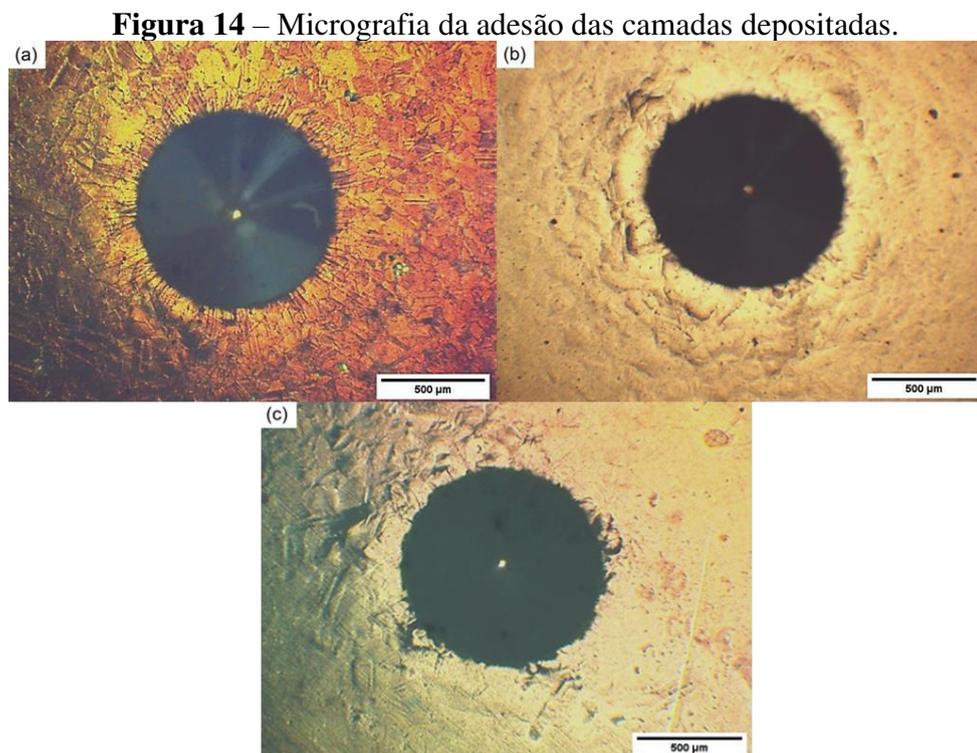
Fonte: Autoria Própria.

Como é possível observar, o tratamento duplex (nitretação seguida de deposição) obteve os maiores valores de microdureza. Entre os tratamentos realizados, o aumento da dureza foi de aproximadamente 173,4%. Com a baixa taxa de erro que se deve ao fato de que a nitretação prévia suplementa as condições ótimas para adesão do filme depositado permanecendo a homogeneidade do revestimento. O tratamento de duplex simultâneo, por sua vez, obteve um resultado satisfatório se comparado com a amostra sem tratamento, mas inferior ao duplex, ainda assim obteve 148,3% de aumento na microdureza superficial. Apresentou uma taxa de erro maior que pode estar associada tanto a possibilidade das identificações estarem transpassando

a camada depositada (situação possibilitada pela espessura mínima do filme), quanto pela irregularidade causada pela deposição simultânea, típica do processo, em fator majoritário a este erro está o Sputtering que está presente em todo processo que causa como principal consequência o efeito de borda. A deposição comum também obteve microdureza superior à amostra não tratada com aumento de 32,46%, valor baixo se comparado aos demais. Contudo, esse baixo valor corresponde à soma da dureza do substrato e do filme. Isso se dá pela baixa dureza do próprio substrato em conjunto com a espessura mínima do filme depositado, de forma que o valor. Por fim, é possível afirmar que todos os processos geram aumento na microdureza superficial e, conseqüentemente, resultados que devem ser considerados.

### 5.3 ADESÃO ROCKWELL C

A figura 14 apresenta o resultado das amostras após passarem pelo teste de Daimler-Benz VDI Rockwell C - VDI 3198.



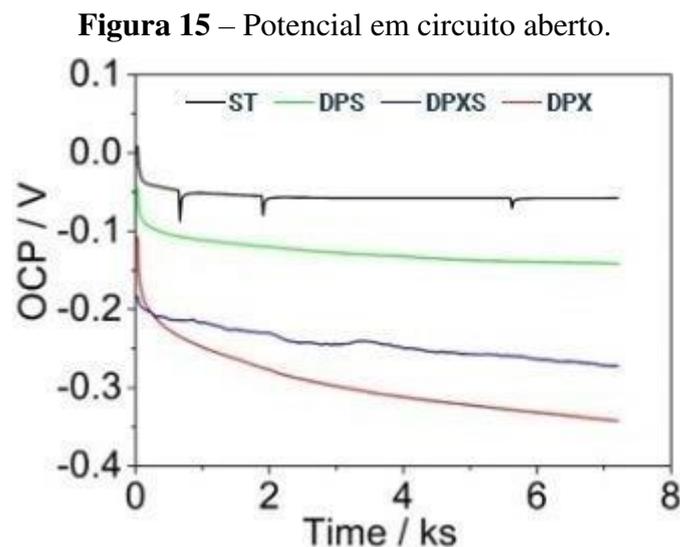
Fonte: Autoria própria.

As amostras (a) duplex e (b) deposição simultânea (sem alumina), como é possível observar na figura 14; apresentaram excelente adesão no substrato, seguindo o padrão da norma HF1 e HF2 respectivamente, sem ocorrências consideráveis de delaminação em grades áreas ou trincas irregulares, o que, de acordo com o padrão VDI 3198, está dentro da categoria de

falhas aceitáveis em anuência com as categorias HF1 à HF4. Sendo as próprias figuras (a) com trincas regulares e perpendiculares, ou seja, HF1 e (b) HF1, notando, nesta última, que mesmo nos pontos em que o substrato deformou, a camada não delaminou, isso mostra um comportamento plástico por parte do revestimento. Já a figura (c) com deposição com alumina, apresentou maiores defeitos de borda se comparada as figuras (fator com as influências já citadas anteriormente) (a) e (b), baixa taxa de delaminação e poucas e trincas irregulares, contudo não apresentou condições ótimas de adesão sob o substrato, mais próxima da categoria HF3, estando, ainda, dentro do perfil aceitável do padrão VDI, assim com as demais. Expondo, por tanto, que os tratamentos que envolveram nitretação tiveram melhor adesão.

## 5.4 CORROSÃO

A figura 15 apresenta o diagrama do potencial em circuito aberto (OCP) das amostras, com todas as curvas de trajetória descendente, indicando a dissolução do metal na solução. As quedas iniciais representam a diminuição da densidade de corrente no estágio inicial e deve-se a possível geração de uma camada de passivação mais densa na superfície das amostras.

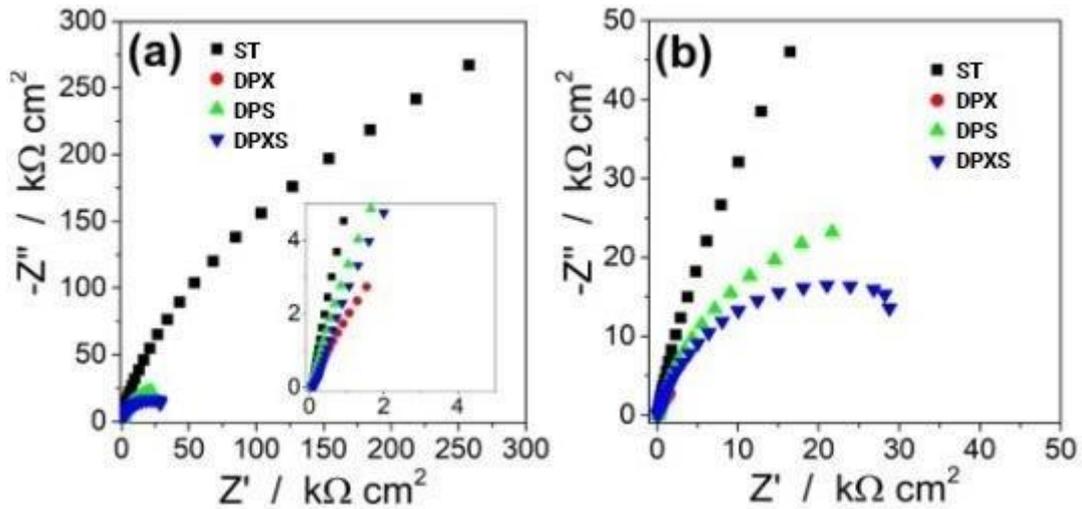


Fonte: Autoria Própria.

A amostra sem tratamento (ST) posteriormente, estabilizou-se por volta de 1 ks com -0,5mV devido ao equilíbrio alcançado entre a geração e a dissolução da camada de filme de óxido. A amostra de deposição (DPS) apresentou estabilidade por volta de 6ks com -0,1mV, assegurando a homogeneidade do filme, como visto no MEV da figura 18 D-). As amostras de Duplex (DPX) e de Duplex Simultâneo (DPXS) apresentaram diminuição do potencial sem

margem de estabilização passados 7 ks, este comportamento pode ser atribuído a presença dos defeitos e da formação de ilhas na superfície, como vistos no MEV da figura 12, que favorecem a Inter cristalina localizada e por pites, confirmados no MEV da figura 18.

**Figura 16** – Diagrama de Nyquist.

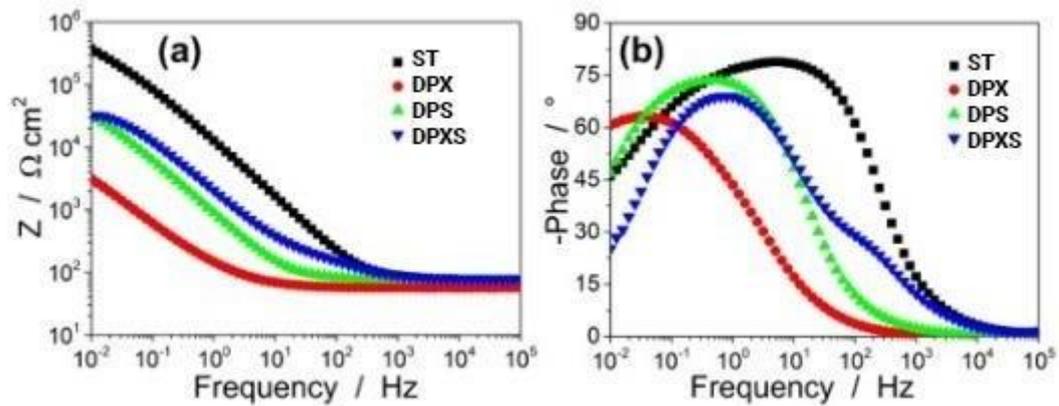


Fonte: Autoria Própria.

A figura 16 a-) e b-) apresentam o diagrama de Nyquist, onde podemos observar claramente uma faixa elevada referente ao ciclo capacitivo para a amostra sem tratamento (ST). Sugerindo que houve perda da resistência de polarização e aumento da taxa de corrosão nas amostras tratadas indicando um comportamento menos nobre nas superfícies após os tratamentos, como constatado anteriormente. Redução essa que quando comparada com outros trabalhos como o de Lemos e Dias, 2012. se expressam de forma menos drástica para o processo neste trabalho, devido a aplicação de temperatura e tempo de tratamento menores.

A figura 17.a-), apresenta o diagrama de Bode, expondo que a amostra ST tem um módulo de impedância total maior se tornando mais evidente nas zonas de baixa e média frequência.

Figura 17 – Diagrama de Bode.

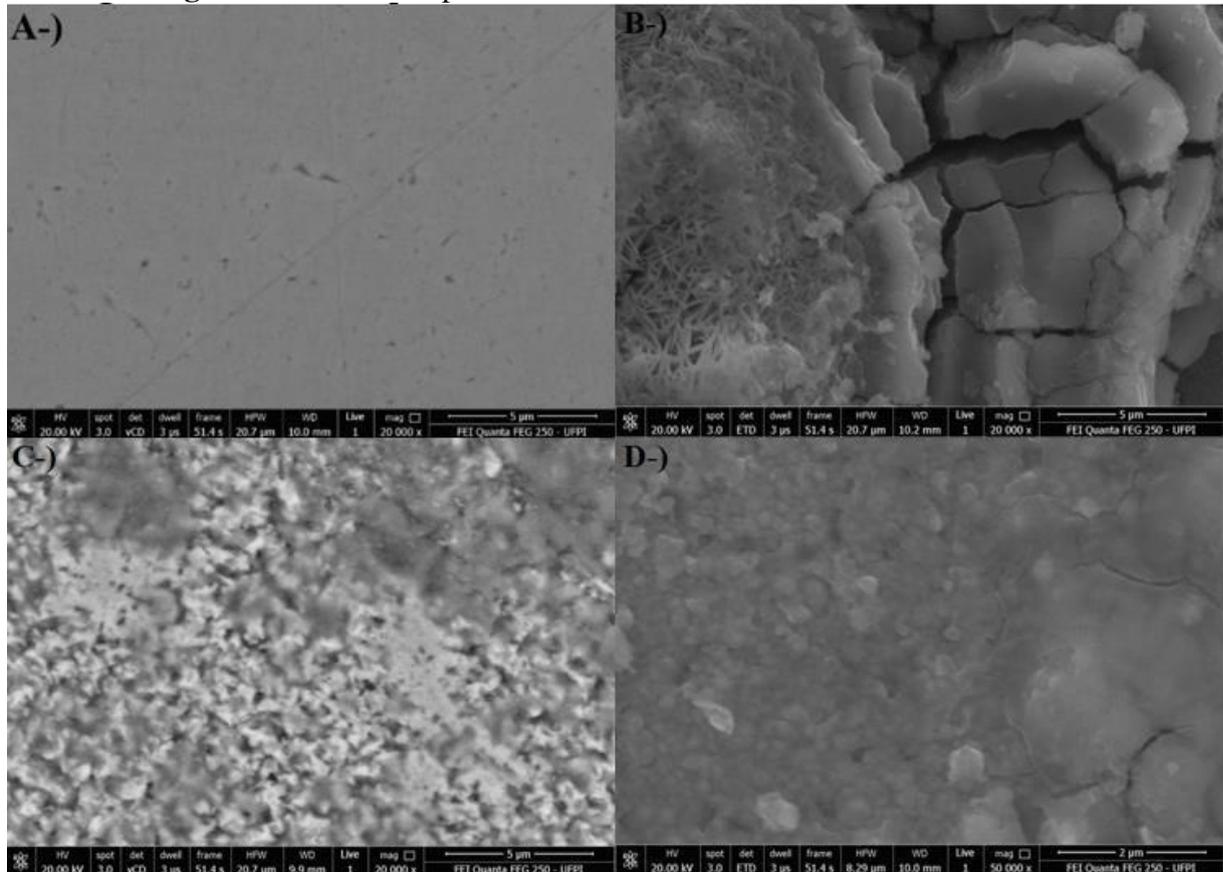


Fonte: Autoria Própria.

Este resultado em contrapartida as amostras tratadas podem ser atribuídas a quantidade de falhas superficiais. As amostras apresentaram um menor módulo de impedância total, menores que a amostra sem tratamento, para baixas frequências, sendo inferiores ao metal base, mas com perdas de resistência a corrosão mínimas, após os tratamentos, sendo mais evidente na amostra de tratamento DPX. Isto evidencia também, a influência da quantidade de falhas na morfologia das superfícies tratadas, fato constatado pela figura 18 B-). O Ângulo de Fase exposto no diagrama de Bode figura 17.b-) tem o metal base com maior cobertura ao longo da frequência o que reforça a estabilidade e homogeneidade superficial em contrapartida as demais amostras, reforçando que a amostra de DPX teve os resultados mais pobres a amostra DPXS com maior cobertura ao longo da frequência, sendo superior em certos aspectos até mesmo a DPS. Que pode ser atribuída a uma maior quantidade de trincas e defeitos se comparada as demais amostras. Contudo as amostras DPS e DPXS, tiveram bons comportamentos, sob linhas gerais, contribuindo de forma positiva para a melhoria das propriedades superficiais sem perdas consideráveis de resistência a corrosão, com destaque para a deposição. Esta observação pode ser comprovada com as amostras de MEV (figura 18) que apresentaram para estas amostras, menor densidade de defeitos.

A figura 18 apresenta a morfologia da superfície após o ensaio de corrosão com sinais que agregam as vantagens dos tratamentos e corroboram com os resultados de corrosão da EIS.

**Figura 18** – Microscopia eletrônica de varredura das amostras tratadas.



Fonte: Autoria Própria.

A amostra sem tratamento, A-) não apresentou sinais consideráveis de corrosão. A figura B-), amostra de duplex foi a que mostrou resultados menos nobres segundo as análises de MEV pois apresentou características de corrosão transgranular e intergranular seguidas da formação de fissuras, reforçando as análises feitas através do EIS. A amostra C-), duplex simultâneo, apresentou poucos sinais de corrosão grave do filme e características de corrosão puntiforme (pites) com poucos pontos que podem ser considerados como indícios de um pré estado de corrosão generalizada uniforme. O filme manteve padrões de homogeneidade e características boas de resistência ao ensaio. Já amostra D-) de deposição simples apresentou sinais de corrosão localizada e puntiforme com indícios de corrosão intergranular, afirmação anteriormente levantada pelos ensaios de corrosão.

## 6 CONCLUSÃO

Após análise, as amostras tratadas mostraram aumento de dureza superficial para os tratamentos feitos com a temperatura de 400 °C e a baixa pressão. A análise feita em Microscópio Óptico expôs adesão do filme em todas as amostras, com as amostras de duplex e de deposição apresentando estrutura de grãos formando ilhas e com defeitos superficiais as margens dessas formações.

Os resultados de microdureza trazem um aumento de até 173,4% de dureza superficial, com filme aplicado por tratamento duplex, que se deve pelo tratamento de nitretação prévio. O tratamento de duplex simultâneo apresentou resultado igualmente satisfatório com aumento de 148,3% e com taxa de erro mais elevada. A deposição, por sua vez, aumentou a dureza do substrato em 32,46% fator que pode ser ocasionado pela espessura inferior da camada superficial, uma vez que não temos formação de camada nitretada, sendo parte deste valor atribuído a dureza do próprio substrato.

Na perspectiva do ensaio de Daimler-Benz VDI Rockwell C - VDI 3198. Os 3 tratamentos apresentaram condições satisfatória de adesão sob o substrato, com maior destaque do tratamento duplex e duplex simultâneo, mostrando a efetividade da aplicação de nitretação juntamente combinada com a deposição. Por fim, vale ressaltar que o tratamento duplex simultâneo é uma boa alternativa sob a perspectiva de tempo e uso de recursos - não necessitando de um tratamento que o sucedesse - uma vez que apresentou um resultado excelente e bastante satisfatório nesta caracterização. Já a deposição se enquadra no padrão HF3 que ainda está dentro do perfil de adesão aceitável, mas não em condições ótimas.

Sob linhas gerais podemos afirmar que a amostra sem tratamento e a amostra de deposição apresentaram resultados mais nobres de resistência a corrosão, porém as amostras tratadas, duplex e duplex simultâneo, apresentaram margens para perdas de resistência a corrosão aceitáveis, para a mesma escala de tempo, provando que os tratamentos são vantajosos, como pode ser visto na figura 18. em especial o duplex simultâneo, para os níveis de dureza obtidos juntamente com a pouca redução da resistência a corrosão.

O diagrama de Nyquist igualmente ao OCP, evidência comportamentos menos nobres para as amostras tratadas, indicando um aumento na taxa de corrosão, e assim como no diagrama de Bode detalha que os resultados podem ser atribuídos a uma mudança no regime de corrosão que era uma corrosão generalizada agora passando para uma corrosão por pites, onde os contornos de grãos e os defeitos auxiliam na absorção da solução agindo como canais que

levam até partes menos ricas em cromo. Estas observações podem ser comprovadas com as amostras de MEV da figura 18.

## REFERÊNCIAS

OCHOA E.A., WISNIVESKY D., MINEA T., GANCIU M. **Microstructure and properties of the compound layer obtained by pulsed plasma nitriding in steel gears.** Surface & Coatings Technology. 2009.

Figueroa C. A., Ochoa E., Alvarez F. **Influence of the ion mean free path and the role of oxygen in nitriding processes.** JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, VOLUME 94. Instituto de Física “Gleb Wataghin,” Unicamp, Campinas, SP, Brazil. 2003.

ZAGONEL L. F., BASSO R. L. O., ALVAREZ F. **Precipitates Temperature Dependence in Ion Beam Nitrided AISI H13 Tool Steel.** Plasma Process. Polym. 2007.

TEBECHERANI, CIRO T. P. **Aços Inoxidáveis.** Pelotas, 2021. Disponível em: <[http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/~adccg/lib/exe/fetch.php?media=artigo\\_para\\_pipesystem\\_sobre\\_inox1.pdf](http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/~adccg/lib/exe/fetch.php?media=artigo_para_pipesystem_sobre_inox1.pdf)>. Acesso em: 01 de dez. De 2021.

AMBIENTE VIRTUAL DE APOIO À GRADUAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO. Universidade do Estado de São Paulo. **AÇOS INOXIDÁVEIS: TIPOS, PROPRIEDADES, MICROESTRUTURA.** São Paulo, 2021. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4366975/mod\\_resource/content/0/aula09-a%C3%A7o\\_inoxid%C3%A1vel.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4366975/mod_resource/content/0/aula09-a%C3%A7o_inoxid%C3%A1vel.pdf)>. Acesso em: 01 de dez. De 2021.

Serra P. L. C., Neto J. R. B., Furtado A. S. A., **Estudo de nitretação a plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido.** Revista Matéria Volume 25. Número 02. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Teresina, UFPI 2020.

SIDACOINOX. **INFORMAÇÕES TÉCNICAS AÇO INOXIDÁVEL.** Disponível em: <<http://sidacoinox.com.br/>>. Acesso em: 01 de dez. De 2021.

CARBÓ H. M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações.** ArcelorMittal Inox Brasil. 2008.

PARAEDES, Ramón S. **Introdução e Conceitos Básicos dos Aços Inoxidáveis** Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Eng. Laboratório de Aspersão Térmica e Tratamento Superficial. Departamento de Engenharia Mecânica. UFPR 2015.

D’OLIVEIRA A. S. C. M. **Classificação dos Aços Inoxidáveis.** Laboratório de Materiais e Tratamentos Superficiais (LaMaTS) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal do Paraná – UFPR 2017.

TELLES, P.S. **Materiais e Equipamentos de Processo.** 6. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PÓVOA Paulo V. N. **Aço inoxidável como material para equipamentos da indústria de alimentos** Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Química. Uberlândia. 2017.

OLIVEIRA R. G. **PRODUÇÃO E RECICLAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.** Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM) POLI/UFRJ. Rio de Janeiro. 2009

INTERNATIONAL STAINLEE STEEL FORUM (ISSF). **A SOLUÇÃO FERRÍTICA: PROPRIEDADES, VANTAGENS E APLICAÇÕES.** Guia Essencial para o Aço Inoxidável Ferrítica. 2009.

INSTITUTO DO INOX. **AÇO INOX.** Disponível em: <<https://www.institutodoinox.com.br/inox.html>>. Acesso em: 27 de dez. De 2021.

HIPERMETAL. **AÇO INOXIDÁVEL.** Disponível em: <<http://www.hipermetal.com.br/nossos-produtos/aco-inoxidavel/>>. Acesso em: 27 de dez. De 2021.

LOJA BRAZIL. **Tipos de Aço Inox: Entenda cada um e suas diferenças.** Disponível em: <<https://www.lojabrazil.com.br/blog/aco-inox-entenda-as-diferencas/>>. Acesso em: 27 de dez. De 2021.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels: microstructure and properties.** FORMATION OF MATENSITE. London, 2006. p, 95- 116.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 7ª ed. Associação Brasileira de metais 2005, p, 393.

PAIVA W. R., PEREIRA W. A. **TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO AISI 420** Universidade de Rio Verde. 2016.

INFOMET. **AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.** Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=207>>. Acesso em: 31 de dez. De 2021.

**Aços inoxidáveis para equipamentos e instalações farmacêuticas. 2014** Disponível em: <<http://boaspraticasnet.com.br/acos-inoxidaveis-para-equipamentos-e-instalacoes-farmaceuticas/>>. Acesso em: 31 de dez. De 2021.

MARTINS M., CASTELETTI L. C. **AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX - OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO.** 2007

VELHO A. T. **ESTAMPABILIDADE DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS E FERRÍTICOS.** Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharias. Blumenau, 2020

SIMÕES M. S., CASTRO L. R., ANDRADE M. S. **Atrito interno em aços inoxidáveis austeníticos contendo cobre.** FAPEMIG/CETEC Curso de Graduação em Engenharia Mecânica/Mecatrônica, PUC-MG. 2010.

LIMA, Dos Santos P. P., J. P. FILHO, Da Silva, JUNIOR M. Q. S. **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L, EM MEIOSALINO, OBTIDO POR METALURGIA DO PÓ.** Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. 2017.

LEMONS G. V. B., DIAS V. W., SANTOS B. P., *et al.* **AValiação da Corrosão do Aço Inoxidável AISI 304 Nitretado a Gás.** 67º Congresso Internacional. Associação Brasileira de Metalurgia. Rio de Janeiro, 2012.

SBARAI, C. **Tratamento de Superfície – Uma Visão Atual e Dinâmica do Setor, Corrosão & Proteção.** 2010 CORROSÃO EM DUTOSGANHA DESTAQUE. Nº 33. De ago. 2010

WALTERS J. **Materiais de forjamento – Parte VII: aços inoxidáveis.** Aquecimento Industrial. 2014. Disponível em: < <https://www.aquecimentoindustrial.com.br/materiais-de-forjamento-parte-vii-acos-inoxidaveis/>>. Acesso em: 03 de jan. De 2020.

DO VALE, A. R. M., **Tratamento Térmico.** IFPA., UFSM., Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – Rede e-Tec. Brasil. Pará 2011.

DALMAS, F. **ESTUDO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL NA NITRETAÇÃO DE ANÉIS EM AÇO CROMO-MOLIBDÊNIO** Universidade de Caxias do Sul – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. 2013.

G. A. Ranalli., A. S. N. Pallone., V. F. Pereira., R. G. Oliveira., N. A. Mariano., **Efeitos da nitretação por plasma com pós-oxidação e por banho de sal na resistência à corrosão de um aço ferramenta.** Matéria (Rio de Janeiro), Volume: 14, Número: 2, Publicado: 2009

JANECZKO E. S. **NITRETAÇÃO POR PLASMA A BAIXA TEMPERATURA DE AÇOS INOXIDÁVEIS COM MARTENSITA DE CARBONO E DE NITROGÊNIO.,** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Mecânica. Curitiba. 2019.

MACHADO, Izabel., **TRATAMENTOS TÉRMICOS E DE SUPERFÍCIE** Introdução à Manufatura Mecânica. 2018.

MANFRINATO M. D., **INFLUÊNCIA DA NITRETAÇÃO A PLASMA NO COMPORTAMENTO EM FADIGA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENITICOS AISI 304 E 316.** Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006

SPHAIR A. C. **NITRETAÇÃO POR PLASMA DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO COM FLUXO PULSADO DE NITROGÊNIO.**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – PPGEM – Curitiba. 2017.

OLIVEIRA A. M. **Nitretação e Carbonitretação por Plasma em Aços Inoxidáveis e Suas Influências nas Resistências à Corrosão e ao Desgaste.**, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2005

SERRA, Petteson L. C., **APLICAÇÃO DE NITRETAÇÃO E TRATAMENTO DUPLEX EM BROCAS DE AÇO RÁPIDO – HSS.** Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. UFPI - Teresina. 2018.

ZIEBELL, L. F. **O quarto estado da matéria.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Porto Alegre. 2004.

VENDRAMIM J. C. Nitretação a Plasma., ISOFLAMA Indústria e Comércio de Equipamentos Ltda. Disponível em: <[www.isoflama.com.br](http://www.isoflama.com.br)>. Acesso em 12 de jan. de 2022.

PESSANHA E. C. **QUANTIFICAÇÃO DA FERRITA DELTA E AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO MICROESTRUTURA/ PROPRIEDADES DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 347 SOLDADO** Universidade Estadual do Norte Fluminense. CAMPOS DOS GOYTACAZES. 2011.

PADILHA A. F.; GUEDES L. C. **AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS. MICROESTRUTURAS E PROPRIEDADES.** Hemus; 1ª edição 1994.

CARVALHO R. G. **Deposição e Caracterização de Filmes Finos de NbAlN por Magnetron Sputtering Reativo.** Universidade Federal de Sergipe. PPGCEM. São Cristóvão. 2016.

MOURA, J. A. S. ; RESENDE S, M.; *et al.* **Investigations of Fe(111) Thin Films.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials., v. 140-14, p. 663-664, 1994.

MELLO, Carina B., **DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS BASEADA EM IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO EM PLASMA COM DESCARGA LUMINESCENTE E MAGNETRON SPUTTERING.** Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologias Espaciais. São José dos Campos. 2011.

DOI, Ioshiaki **Deposição de Filmes Finos por PVD – Pt I.**, FEEC/UNICAMP

Physical Vapor Deposition Capítulo 12. 2013.

IRESTAL GROUP., **FICHA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE AÇO INOXIDÁVEL** Tabela de Correspondência Aproximada de Qualidades de Aço Inoxidável. 2013. Disponível em: <[www.irestal.com](http://www.irestal.com)>. Acesso em 12 de jan. de 2022.

ANDRADE M. S., RESENDE A.L., SANTOS T. F. A. **Efeito da taxa de aquecimento na reversão da martensita induzida por deformação em um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304.**, Metalurgia & Materiais. Revista Escola de Minas. 2009.

FIRRAO D., MATTEIS G., SCAVINO G. *et al.*, **Mechanical Twins in 304 Stainless Steel After Small-Charge Explosions.** Materials Science and Engineering A 424. p. 23–32., Itália. 2006.

JUNIOR C. A., **Nitretação a plasma - Fundamentos e Aplicações.**, Editora UFRN, 2001.

SOUSA, R. R. M., ALVES JR. C., DE ARAUJO F. O. *et al.*, **Cathodic Cage Plasma Nitriding (CCPN) of Austenitic Stainless Steel (AISI 316): Influence of the Different Ratios of the (N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) on the Nitrided Layers Properties.** 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.05.008>>. Acesso: 13 jan. de 2022.

WASA, K., KITABATAKE M., ADACHI H., **Thin film materials technology: sputtering of control compound materials:** Springer., p. 44. 2004.

SAMPAIO W. R. V., **DEPOSIÇÃO DE FILMES CARBONOSOS EM AÇO AISI D2 PELA TÉCNICA DE GAIOLA CATÓDICA** Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Piauí., Teresina. 2017.

WASA, K., KITABATAKE M., ADACHI H., **Thin film materials technology: sputtering of control compound materials:** Springer., p. 39. 2004.

GOMES C. J. **MODIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO AÇO ASTM F138 POR MEIO DA NITRETAÇÃO IÔNICA EM GAIOLA CATÓDICA DE TITÂNIO.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. PPGEM. Teresina. 2017.

SOUSA R. R. M. **Nitretação em Plasma com Gaiola Catódica: Investigação do mecanismo e estudo comparativo com a nitretação em plasma de tensão contínua.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte. PPGCEM. Natal. 2007.

ARAUJO F. O. **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS PARA DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS POR DESCARGA EM CATODO OCO.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte. PPGF. NATAL. 2006.

SERRA P. L. C., NETO J. R. B., FURTADO A. S. A., SAMPAIO W. R. V., FEITOR M. C, COSTA T. H., SOUSA C. R. R. M., Estudo de nitretação a plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido. **Laboratório de Hidrogênio, Coppe - Universidade Federal do Rio de Janeiro, em cooperação com a Associação Brasileira do Hidrogênio, ABH2.** Rio de Janeiro. 2020.

PINEDO C. E., **REVESTIMENTO PVD E NITRETAÇÃO SOB PLASMA APLICADOS EM FERRAMENTAS PARA CONFORMAÇÃO E CORTE A FRIO.** Sede da ABM. São Paulo. 2011

**CALESTINO D., MESQUITA R. A. COMPOSTOS UTILIZADOS COMO RECOBRIMENTOS PVD PARA MELHORIA DE QUALIDADE E DESEMPENHO EM MOLDES E MATRIZES.** 11º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo, SP. 2013

**COSTA E. S., SOUSA R. R. M., MONÇÃO R. M., LIBÓRIO M. S., CARVALHO T. H. C. Nitretação e deposição por plasma em ferramentas de aços AISI M2 e D2 utilizadas na conformação e estampagem de pregos: um estudo de viabilidade 2021.**



## Documento Digitalizado Restrito

### Trabalho de Conclusão de Curso

**Assunto:** Trabalho de Conclusão de Curso  
**Assinado por:** Emanuel Medeiros  
**Tipo do Documento:** Anexo  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Restrito  
**Hipótese Legal:** Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)  
**Tipo do Conferência:** Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Emanuel Luciano Lunes Medeiros, ALUNO (2016210110219) DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL - CAJAZEIRAS**, em 14/10/2022 19:43:23.

Este documento foi armazenado no SUAP em 17/10/2022. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 651782  
Código de Autenticação: ff0563a1a1

