



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO ENGENHARIA MECÂNICA

MOISÉS ARAGÃO PEREIRA

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DUPLEX A BAIXA TEMPERATURA COM
GAIOLA CATÓDICA DE TITÂNIO NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DO AÇO
INOXIDÁVEL AISI 316L

TERESINA

2023

MOISÉS ARAGÃO PEREIRA

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DUPLEX A BAIXA TEMPERATURA COM
GAIOLA CATÓDICA DE TITÂNIO NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DO AÇO
INOXIDÁVEL AISI 316L**

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí. Campus Teresina Central.

Orientador: Dr. Mário Viana Medeiros Filho
Coorientador: Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra.

TERESINA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

P436i Pereira, Moisés Aragão
Influência do tratamento duplex a baixa temperatura com gaiola catódica de titânio na resistência a corrosão do aço inoxidável AISI 316l / Moisés Aragão Pereira. - 2023.
42 f.
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2023.
Orientador : Prof Dr. Petteson Liniker Carvalho Serra.
1. Deposição a plasma. 2. Gaiola catódica. 3. AISI 316l. 4. Nitreto de titânio. I. Título.

CDD - 620

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

MOISÉS ARAGÃO PEREIRA

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DUPLEX A BAIXA TEMPERATURA COM
GAIOLA CATÓDICA DE TITÂNIO NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DO AÇO
INOXIDÁVEL AISI 316L**

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí. Campus Teresina Central.

Aprovada em: 15 / 12 / 2023 .

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mário Viana Medeiros Filho (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Renan Matos Monção
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Wesley Rick Viana Sampaio
Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo, aos meus queridos pais pelo apoio e incentivo ao longo do curso. Gostaria de estender meus agradecimentos ao meu orientador, Dr. Mário Viana Medeiros Filho, e ao meu coorientador, Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra, pela orientação, incentivo, ensinamentos e pela oportunidade de desenvolver este trabalho. À equipe do LabPlasma (UFPI), em especial ao Dr. Ediones, Marcos Cristino e Brenda Jakellinny, pela ajuda na preparação das amostras e tratamentos.

RESUMO

O aço inoxidável, especialmente o AISI 316L, é reconhecido por sua notável resistência à corrosão. Quando combinado com aprimoramentos nas propriedades de superfície, suas possibilidades de aplicação são ampliadas de maneira significativa. Foi aplicado um tratamento duplex, consistindo em nitretação convencional seguida de deposição com gaiola, um método eficaz para aprimorar tais propriedades. O titânio foi escolhido como material para a gaiola devido às suas características, tais como alta dureza, resistência térmica, química, resistência ao desgaste e à corrosão. A análise dos filmes finos foi conduzida por meio de técnicas como microscopia eletrônica de varredura, Adesão Rockwell C, Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X e ensaios eletroquímicos de corrosão. Todas as amostras apresentaram resultados satisfatórios de adesão e um aumento na microdureza. As amostras NCDT350 e NCDT400 exibiram pouca perda de resistência à corrosão. Notavelmente, em alguns testes, a amostra NCDT350 revelou melhorias na resistência à corrosão, destacando-se como aquela que proporciona a melhor combinação entre resistência à corrosão e dureza superficial.

Palavras-Chave: Deposição a plasma; Gaiola catódica; AISI 316L; Nitreto de titânio; Nitretação.

ABSTRACT

Stainless steel, particularly AISI 316L, is renowned for its remarkable corrosion resistance. When coupled with enhancements in surface properties, its potential applications are significantly expanded. A duplex treatment, comprising conventional nitriding followed by cage deposition, was applied, proving to be an effective method to enhance these properties. Titanium was chosen as the material for the cage due to its characteristics, such as high hardness, thermal and chemical resistance, as well as resistance to wear and corrosion. Thin film analysis was conducted through techniques such as scanning electron microscopy, Rockwell C adhesion, Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, and electrochemical corrosion tests. All samples exhibited satisfactory adhesion results and an increase in microhardness. The NCDT350 and NCDT400 samples showed minimal loss of corrosion resistance. Remarkably, in certain tests, the NCDT350 sample demonstrated improvements in corrosion resistance, standing out as the one providing the best combination of corrosion resistance and surface hardness.

Keywords: Plasma Deposition; Cathodic Cage; AISI 316L; Titanium Nitride; Nitriding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis.	17
Figura 2: Passividade de aços-cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial.	18
Figura 3: Comportamento passivo do aço inoxidável em soluções ácidas oxidantes.	19
Figura 4: Classes de aços inoxidáveis austeníticos.	20
Figura 5 – Ilustração de um sistema de nitretação por plasma.	22
Figura 6 – Representação em corte do reator de nitretação iônica, com a gaiola catódica.	23
Figura 7: Imagem do reator de tratamento a plasma do LabPlasma – UFPI.	26
Figura 8 - Aparelho de ultrassom utilizado para limpar as amostras.	27
Figura 9 - Gaiola Catódica de titânio.	29
Figura 10 - Microdurômetro Vickers.	30
Figura 11 – MEV da Superfície Transversal das Amostras: a) NDTI350 2000x; b) NDTI350 10000x c) NDTI400 2000x; d) NDTI400 10000x.	32
Figura 12 – MEV da Superfície (Morfologia) - a) e b) NDTI350; c) e d) NDTI400.	33
Figura 13 - Imagens mostrando a morfologia superficial da amostra NDTI350 e o mapa de composição elementar.	34
Figura 14 - Imagens mostrando a morfologia superficial da amostra NDTI400 e o mapa de composição elementar.	35
Figura 15 – Gráfico com os valores médios de microdureza das amostras.	36
Figura 16 – Micrografia da adesão das camadas depositadas com ampliação de 100x e 200x - a) e b) NDTI350; c) e d) NDTI400.	37
Figura 17 - Valores de potencial de circuito aberto do aço base e das amostras NDTI350 e NDTI400 obtidos durante exposição a solução de NaCl 3,5% m/m por 1h.	38
Figura 18 – Curvas de polarização potenciodinâmica do aço base e das amostras NDTI350 e NDTI400 obtidas durante exposição a solução de NaCl 3,5% m/m por 1h.	39
Figura 19 - Curvas de Nyquist do aço base e das amostras NDTI350 e NDTI400 obtidas durante exposição a solução de NaCl 3,5% m/m.	40

Figura 20 - Curvas de Bode do aço base e das amostras NDTI350 e NDTI400 obtidas durante exposição a solução de NaCl 3,5% m/m.	41
Figura 21 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após os ensaios de corrosão - a) e b) ST; c) e d) NDTI350; e) e f) NDTI400.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI - American Iron and Steel Institute

Als - Aços inoxidáveis

Ar - Argônio

C – Carbono

Cr - Cromo

Cu - Cobre

°C - Graus Celsius

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva

gf - Grama força

H – Hidrogênio

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

N – Nitrogênio

Ni – Níquel

Ti – Titânio

UFPI – Universidade Federal do Piauí

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	JUSTIFICATIVA	14
3	OBJETIVOS	15
3.1	Objetivo Geral.....	15
3.2	Objetivos Específicos	15
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1	Aços Inoxidáveis.....	16
4.2	Aços Inoxidáveis Austeníticos 316L.....	19
4.3	Nitretação a Plasma	20
4.4	O Processo	21
4.5	Nitretação a Plasma com Gaiola Catódica (CCPD).....	22
4.6	Tratamentos Duplex	24
4.7	Espectroscopia de Impedancia Eletroquímica (EIE)	24
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
5.1	Material.....	24
5.2	Preparação das Amostras	25
5.3	Tratamento	25
5.3.1	Limpeza das Amostras	26
5.3.2	Nitretação Convencional.....	27
5.3.3	Tratamento Duplex	28
5.4	Nomenclatura	29
5.5	Caracterização	29
5.5.1	Microdureza	29
5.5.2	Adesão Rockwell C.....	30
5.5.3	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	31

5.5.4	Ensaio de Corrosão	31
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6.1	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	32
6.2	Espectroscopia de energia dispersiva de raios-x (EDS).....	34
6.3	Microdureza	35
6.4	Adesão Rockwell C.....	36
6.5	Corrosão	37
7	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um problema significativo em praticamente todos os setores da atividade humana e tem sido objeto de estudo em diversos países, independentemente do seu nível de desenvolvimento. Os efeitos negativos da corrosão são alarmantes, com perdas estimadas em torno de 1 a 5% do PIB. Na indústria siderúrgica, cerca de 20% da produção global de aço é direcionada para reparar danos causados pela corrosão. É importante destacar que a corrosão não só impacta a economia, mas também pode levar a perdas humanas, devido às contaminações, aos vazamentos e às falhas de componentes em serviço (MICHELON et al., 2022).

Os aços inoxidáveis austeníticos, notáveis por sua resistência à corrosão, desempenham um papel fundamental na mitigação desse problema. Graças à presença predominante de cromo e níquel, essas ligas formam uma camada protetora de óxido de cromo (Cr_2O_3) em sua superfície, conferindo-lhes essa notável resistência à ação corrosiva (SANTOS, 2019).

Dentre os aços inoxidáveis austeníticos, destaca-se o aço inoxidável AISI 316L, uma variante do aço 316. No entanto, sua composição com baixo teor de carbono resulta em limites de escoamento e resistência à tração inferiores à outros aços comerciais utilizados em aplicações tribológicas. Em certas situações, as características de baixa dureza e propriedades tribológicas do AISI 316L podem comprometer sua eficácia. Nesse contexto, a aplicação de tratamentos termoquímicos surge como uma alternativa promissora, elevando a dureza superficial do material e, consequentemente, melhorando sua resistência ao desgaste (ARAÚJO, 2019).

Uma estratégia viável para aumentar a dureza e a resistência ao desgaste dos aços inoxidáveis austeníticos, sem comprometer a tenacidade do núcleo, envolve a utilização de tratamentos superficiais. Dentre esses tratamentos, destaca-se a nitretação a plasma, um processo que promove modificações nas propriedades da superfície por meio da interação entre o plasma e a superfície metálica exposta. Este método é reconhecido por sua capacidade de controle, alta reprodutibilidade e por ser ambientalmente responsável, atendendo à crescente demanda por práticas industriais mais sustentáveis (SERRA, 2018).

Além da nitretação, outra abordagem eficaz para aprimorar as propriedades superficiais dos aços é a aplicação de revestimentos de elevada dureza por meio da deposição física de vapor (PVD), especialmente quando combinada com um tratamento preliminar de nitretação, conhecido como tratamento duplex. Esse processo proporciona uma transição suave entre a dureza da superfície e o substrato, melhorando a adesão do filme depositado e reduzindo a probabilidade de delaminação (SERRA, 2018). Um dos revestimentos mais utilizados é o nitreto de titânio TiN, que tem como características, alta dureza, resistência térmica, química, resistência ao desgaste e resistência a corrosão (SERRA, 2020; DONATTI, 2021).

É importante mencionar que a temperatura de nitretação desempenha um papel fundamental nas propriedades resultantes do material. A nitretação a temperaturas superiores a 500 °C aumenta a dureza e a resistência ao desgaste, porém, em detrimento da resistência à corrosão. Em contraste, a nitretação a temperaturas inferiores a 450 °C produz uma fase supersaturada de nitrogênio na austenita, conhecida como austenita expandida ou fase S, que combina elevada dureza, resistência ao desgaste e excelente resistência à corrosão (MACEDO, 2018).

A fim de avaliar as modificações nas superfícies dos substratos após o processo de nitretação, recorreremos à técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O principal objetivo desta análise foi verificar a uniformidade e regularidade da camada nitretada. Também foram realizados ensaios de microdureza Vickers para mostrar o aumento da dureza superficial das amostras tratadas.

Neste estudo, foram aplicados tratamentos de nitretação a plasma em duas faixas de temperatura, 350 °C e 400 °C. Além disso, foi empregado um processo duplex que consiste na nitretação convencional seguida da deposição a plasma utilizando gaiola catódica feita de titânio. O objetivo principal foi investigar as condições de tratamento que oferecem a melhor combinação de propriedades, incluindo resistência à corrosão e dureza da superficial, para melhorar o desempenho de aços inoxidáveis.

2 JUSTIFICATIVA

A resistência à corrosão em aços inoxidáveis é um fator crucial para sua aplicação em diversas áreas. Contudo, a nitretação, que visa aprimorar as propriedades tribológicas desses materiais, pode ter um impacto adverso na resistência à corrosão (CHIAVERINI, 2008). Portanto, é fundamental examinar as condições de tratamento que possam proporcionar uma combinação otimizada de propriedades, equilibrando a resistência à corrosão e a dureza da superfície nos aços inoxidáveis. O presente estudo tem como objetivo investigar tratamentos termoquímicos em temperaturas mais baixas, buscando melhorar as propriedades tribológicas sem comprometer a resistência à corrosão.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Investigar as condições de tratamentos que oferecem a melhor combinação de propriedades tribológicas e resistência à corrosão.

3.2 Objetivos Específicos

- Aumentar a microdureza superficial do aço AISI 316L;
- Investigar condições de tratamento duplex com nitretação sem camada de compostos e com um filme uniforme depositado por deposição com gaiola catódica.
- Investigar condições de tratamentos que mantenham a resistência a corrosão a valores próximos ao do aço AISI 316L.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

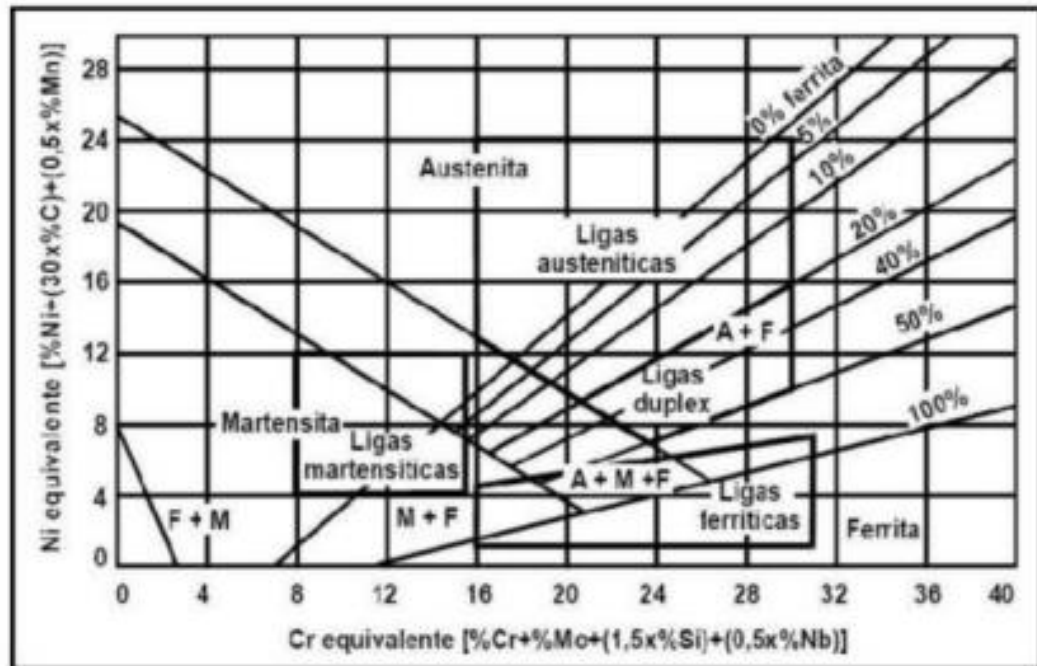
4.1 Aços Inoxidáveis

A descoberta dos aços inoxidáveis remonta a uma casualidade curiosa que ocorreu por volta de 1912. Naquela época, os fabricantes de armas identificaram a necessidade de encontrar um material capaz de resistir à erosão provocada pela dispersão dos gases gerados no processo de ignição dos projéteis, particularmente no interior dos canos de suas armas. Essa missão de desenvolvimento foi confiada ao cientista Harry Brearly. Enquanto buscava incessantemente por tal material, Brearly, de maneira inesperada, produziu uma liga que demonstrou notável resistência à maioria dos reagentes metalográficos usados naquela época. Essa liga, composta principalmente de ferro e cromo com uma concentração de 13% de cromo, recebeu a denominação de "Stainless Steel", termo que traduzido significa "Aço que não mancha" (TEBECHERANI, 2001; MEDEIROS, 2022).

No âmbito da microestrutura, os AIs podem ser classificados em quatro categorias principais: ferríticos, martensíticos, austeníticos e duplex. Dentro do grupo dos aços inoxidáveis austeníticos, merece destaque o AISI 316L, em que o níquel desempenha um papel central ao estabilizar a fase austenita em temperatura ambiente, conforme demonstrado por (ARAÚJO, 2019).

Devido à diversidade e à quantidade de elementos de liga presentes nos aços, uma ampla variedade de microestruturas pode ser obtida. Esses elementos são classificados em dois grupos distintos: aqueles que promovem a estabilização da fase austenita, como níquel, carbono, nitrogênio e manganês, e aqueles que promovem a estabilização da fase ferrita, a exemplo do cromo, silício, molibdênio, titânio e nióbio. Para tornar mais compreensível essa relação entre os elementos de liga, optou-se por agrupá-los com base em características químicas semelhantes nos equivalentes de cromo e níquel. Assim, resultou na criação do diagrama de Schaeffler, também conhecido como diagrama de relação de fases de Schaeffler, que estabelece uma ligação entre a microestrutura de um aço trabalhado e sua composição química. A Figura 1 mostra esse diagrama (ASM, 1999).

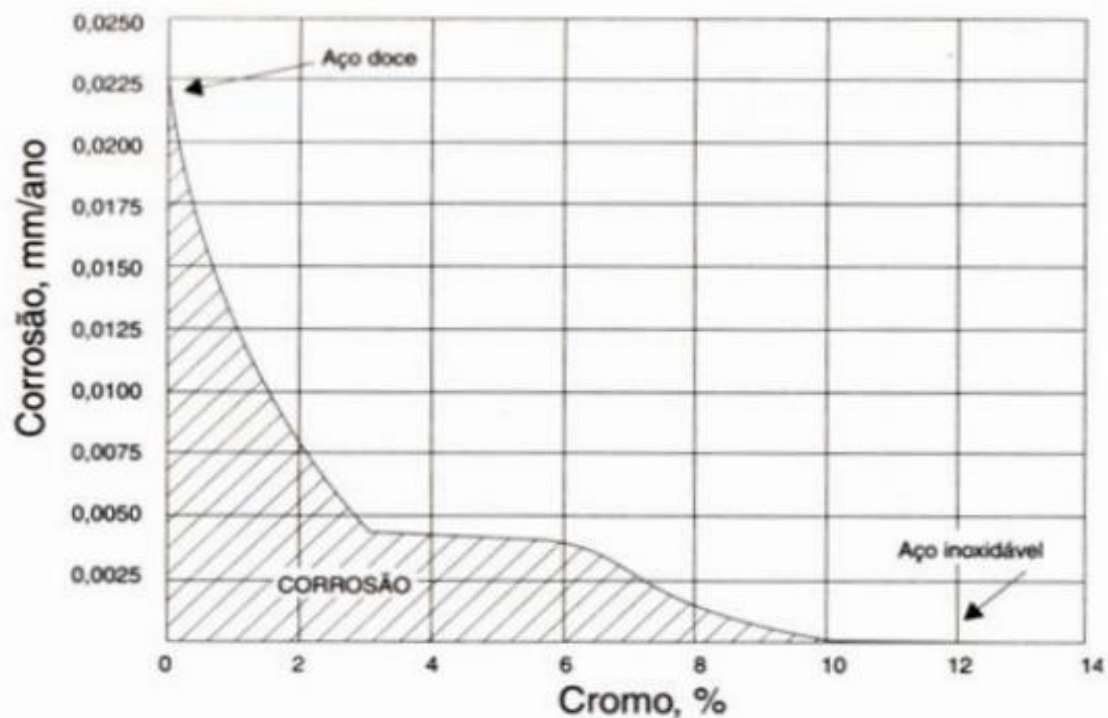
Figura 1: Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis.



Fonte: (ASM, 1999).

O cromo desempenha um papel crucial na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis, conforme ilustrado no gráfico da Figura 2, que mostra claramente que um teor de cromo superior a 10% confere ao aço uma notável capacidade anticorrosiva (CHIAVERINI, 2005). Essa característica é resultado da formação da camada passiva, um filme fino, contínuo, transparente e não poroso que se desenvolve rapidamente na superfície do aço, devido à interação de cromo presente no material com o oxigênio do ar. Essa camada passiva atua como uma barreira protetora, passivando e protegendo a superfície do aço inoxidável contra a corrosão (ASM, 1987).

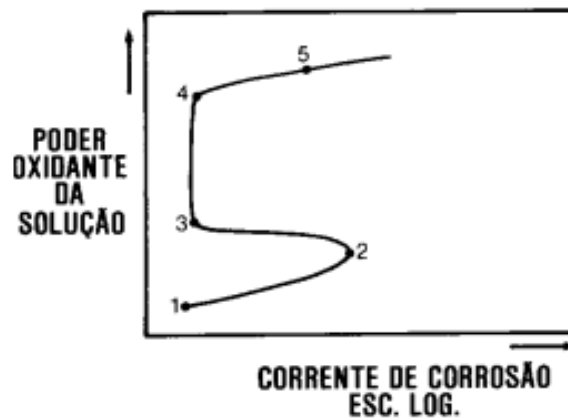
Figura 2: Passividade de aços-cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial.



Fonte: (CHIAVERINI, 2015)

A capacidade do aço inoxidável de manter essa camada passiva é fundamental para seu desempenho em ambientes corrosivos. A Figura 3 ilustra o comportamento passivo do aço inoxidável em soluções ácidas oxidantes. Inicialmente, observamos que a taxa de corrosão cresce à medida que o poder oxidante da solução aumenta, resultando em um comportamento semelhante ao de outros metais (Região 1 a 2 na Figura 3). No entanto, ao atingir o limite da região ativa (ponto 3), ocorre uma acentuada redução na taxa de corrosão, devido ao meio tornar-se suficientemente oxidante, desencadeando a formação do filme passivo. A partir do ponto 4, aumentos adicionais no poder oxidante resultarão novamente em um aumento da taxa de corrosão. Assim, identificamos as regiões 1-2 como a região de atividade, 3-4 como a região de passividade, e, a partir do ponto 4 e estendendo-se além do ponto 5, temos a Região de Transpassividade (TEBECHERANI, 2001).

Figura 3: Comportamento passivo do aço inoxidável em soluções ácidas oxidantes.



Fonte: (TEBECHERANI, 2001)

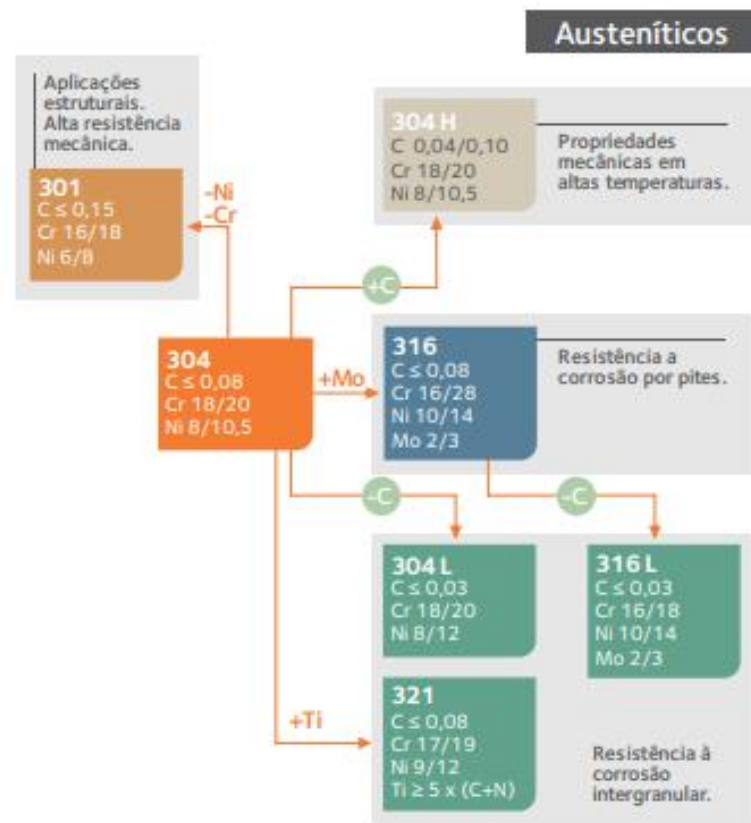
4.2 Aços Inoxidáveis Austeníticos 316L

O aço inoxidável 316L (AISI 316L), uma liga de aço comumente utilizada, se destaca por oferecer uma ampla gama de aplicações em setores industriais diversos, como naval, energético, aeroespacial, semicondutor e médico, devido à sua notável resistência à corrosão (GRAY et al., 2017). Sua composição química, semelhante ao AISI 316, porém com menor teor de carbono ($\leq 0,03\%$ em massa), é essencial para diminuir a sensitização, ou seja, a precipitação de carbonetos de cromo. Isso, por sua vez, preserva o cromo nas áreas externas dos contornos dos grãos, aumentando a resistência à corrosão intergranular (BROCH, 2022; PADILHA, 2004).

De acordo com Padilha (2004), os principais elementos de liga presentes nessa liga (em porcentagem em massa) incluem carbono (máximo de $0,03\%$), manganês (máximo de $2,0\%$), silício (máximo de $1,0\%$), cromo ($16,0\%-18,0\%$), níquel ($10,0\%-14,0\%$) e molibdênio ($2,0\%-3,0\%$). A presença desses elementos desempenha um papel crucial nas propriedades e desempenho do aço inoxidável 316L.

Os aços inoxidáveis da série 300, aos quais pertencem o AISI 316L, são conhecidos por serem não-magnéticos e apresentarem uma estrutura cúbica de faces centradas. A formação básica dessa série de aços envolve a presença dos elementos ferro, cromo e níquel (Fe-Cr-Ni), como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Classes de aços inoxidáveis austeníticos.



Fonte: Carbó (2008)

4.3 Nitretação a Plasma

O processo conhecido como nitretação iônica, também referido como nitretação em descarga luminosa ou nitretação por plasma, foi objeto de patentes nos Estados Unidos por J.J. Egan em 1931 e na Alemanha por Berghaus em 1932. No entanto, seu uso comercial só teve início em 1960 (ALVES JR., 2001).

A técnica de nitretação a plasma envolve a aplicação de um alto potencial catódico em um ambiente contendo gás nitrogênio a baixa pressão, resultando na produção de plasma que reage com a superfície de componentes metálicos. Isso leva à formação de íons e espécies neutras reativas que interagem com a superfície de aços e ferros fundidos, resultando na criação de camadas de nitreto e compostos metálicos que se difundem na superfície do material. Isso resulta no aumento da dureza, da resistência ao desgaste e na melhoria das propriedades tribológicas dos componentes (ALVES JR., 2001).

A possibilidade de controlar os parâmetros do processo de nitretação oferece a capacidade de obter camadas com espessuras e características variadas. Essas características podem ser ajustadas por meio do controle de variáveis como o fluxo e a composição dos gases, a pressão e a temperatura durante o tratamento (ALVES JR., 2001).

4.4 O Processo

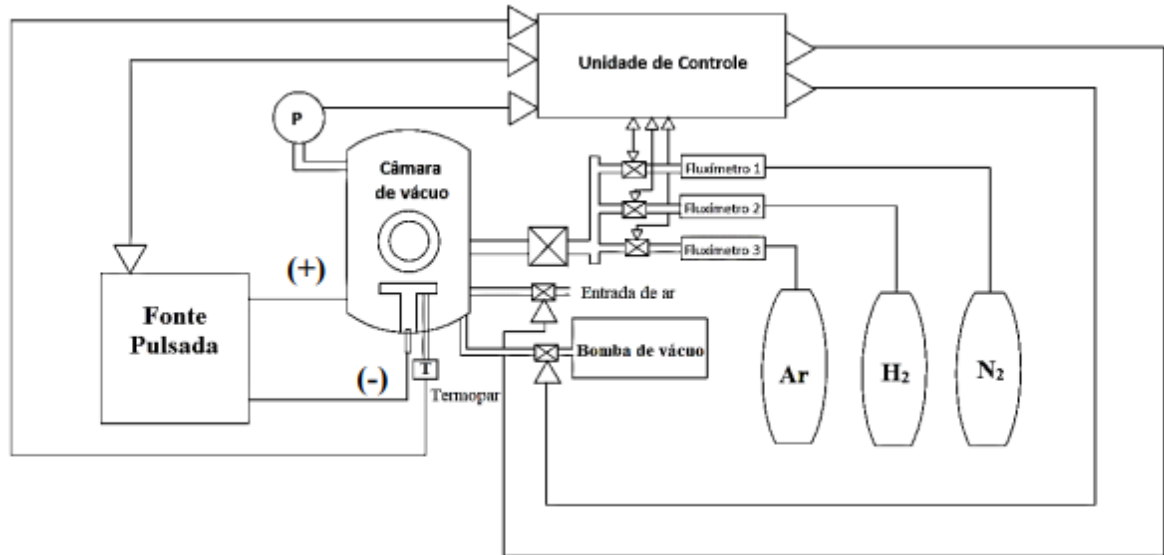
A Figura 5 esquematiza o conjunto fundamental utilizado no processo de nitretação a plasma. Os elementos primordiais compreendem uma câmara de vácuo (reator) equipada com dois eletrodos, onde o cátodo também funciona como suporte para a amostra; uma fonte de potência, exemplificada na Figura 5 como uma fonte pulsada, porém dependendo do tratamento pode ser uma fonte contínua; um sistema de fornecimento de gases, constituído por cilindros de armazenamento e fluxímetros destinados ao controle da taxa de fluxo de gases, juntamente com mangueiras e conexões; um sistema de vácuo equipado com uma bomba de vácuo encarregada de manter a câmara em níveis de pressão reduzidos; dispositivos de medição de pressão e temperatura; e uma unidade de controle que permitir controlar os parâmetros (SERRA, 2018).

No processo de tratamento, é inicialmente estabelecida uma condição de vácuo, aproximadamente da ordem de 10^{-2} torr. Posteriormente, é aplicada uma diferença de potencial na faixa de 400 V a 1200 V, seguida da introdução controlada da mistura de gases até que se alcance a pressão de trabalho, situada entre 1 e 20 torr. Conforme a pressão se eleva, a luminosidade da descarga plasma aumenta gradualmente, culminando no momento em que a pressão apropriada para a nitretação é atingida, momento em que a amostra encontra-se completamente envolvida pelo plasma (SERRA, 2018).

Nesse contexto, os íons passam a ser acelerados na direção ao cátodo, ocasionando o aquecimento da peça devido ao impacto iônico. A temperatura é então ajustada através do ajuste da corrente elétrica até atingir um valor pré-determinado. O registro do tempo de nitretação deve ser iniciado quando a temperatura desejada for atingida. Após a conclusão do período de tratamento, a fonte de energia é

desativada e a peça deve ser resfriada naturalmente no interior do reator (ALVES JR., 2001).

Figura 5 – Ilustração de um sistema de nitretação por plasma.



Fonte: (Serra, 2018)

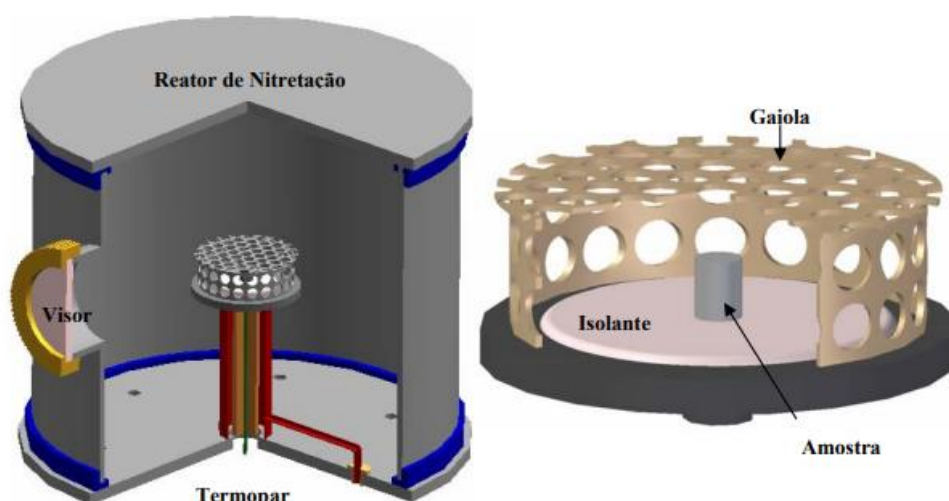
4.5 Nitretação a Plasma com Gaiola Catódica (CCPD)

A gaiola catódica, que é fundamental para o processo em questão, é um dispositivo de configuração cilíndrica cujo diâmetro e altura são determinados em consonância com as dimensões da amostra que será submetida ao tratamento. A mesma é feita a partir de uma chapa metálica, com diâmetro dos furos de 8 mm e distância entre centros de furos adjacentes de 9,2 mm (SOUSA et al., 2009).

No âmbito da deposição por plasma em gaiola catódica, emprega-se uma técnica de pulverização catódica reativa via plasma convencional. Neste procedimento, as amostras em análise são isoladas eletricamente, uma vez que são posicionadas sobre um substrato cerâmico de alumina. Uma fonte de tensão contínua é aplicada para criar uma diferença de potencial que atua exclusivamente na gaiola catódica, livrando assim as amostras das limitações associadas ao plasma de corrente contínua convencional. Para uma melhor compreensão desse processo, a Figura 6

apresenta um corte ilustrativo de um reator de nitretação a plasma com a gaiola catódica (SOUSA et al., 2009).

Figura 6 – Representação em corte do reator de nitretação iônica, com a gaiola catódica.



Fonte: Sousa et al. (2009).

De acordo com Silva et al. (2017), a atuação do plasma na gaiola catódica envolve principalmente a remoção de material das paredes dos furos, o qual reage com os gases presentes no plasma, e é depositado sobre o substrato posicionado no interior da gaiola, que se encontra em um potencial elétrico suspenso. As descargas de catodo oco que ocorrem nos furos das paredes da gaiola produzem maiores densidades de íons do que as descargas convencionais. Isso ocorre porque a densidade do plasma dentro dos furos é muito maior, o que resulta na ejeção de uma quantidade elevada de íons das paredes dos furos.

Segundo Magalhães de Sousa et al. (2015), as principais vantagens da técnica CCPD (Chemically Assisted Plasma Deposition) incluem uniformidade, tridimensionalidade e alta taxa de deposição. Esses benefícios são viabilizados devido à elevada densidade de íons e moléculas presentes no plasma. Além disso, a técnica CCPD possibilita a deposição de filmes em pressões mais elevadas, temperaturas mais baixas e tempos de tratamento mais curtos do que os tratamentos convencionais.

de nitretação. Essas vantagens tornam a técnica CCPD uma opção atraente para aplicações que requerem revestimentos de alta qualidade, como peças de máquinas que devem operar em condições adversas.

4.6 Tratamentos Duplex

O termo "tratamento duplex" é utilizado para descrever o processo resultante da combinação de dois tratamentos: nitretação a plasma, seguida pela deposição de um filme fino. Essa abordagem na engenharia de superfícies tem como objetivo aprimorar as propriedades tribológicas de aços. Comercialmente, essa tecnologia tem sido cada vez mais aplicada em aços ferramenta, notadamente utilizados na produção de moldes e matrizes. O tratamento duplex melhora a capacidade do substrato de suportar cargas, uma vez que o processo de nitretação anterior garante uma aderência mais eficaz do filme ao substrato, resultando em melhorias no desempenho tribológico, estabilidade térmica e redução do atrito (SERRA et al., 2020; MEDEIROS, 2022).

4.7 Espectroscopia de Impedancia Eletroquímica (EIE)

Espectroscopia de impedancia eletroquímica (EIE) é uma técnica bastante utilizada para o estudo e avaliação do comportamento eletroquímico de materiais metálicos e para verificação de sua resistência a corrosão. Em razão de ser um ensaio não destrutivo, essa técnica possibilita a realização de ensaios em função do tempo e, dessa forma, prever o comportamento em ensaios de longa duração (MORAIS, 2010).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Material

No contexto desta pesquisa, foram utilizadas treze amostras do material 316L, cuja composição química está descrita na Tabela 1. Essas amostras foram transformadas em cilindros, com dimensões de 25 mm de diâmetro e 8 mm de espessura, através do processo de corte realizado com uma cortadeira metalográfica.

Tabela 1: Composição química do AISI 316L (% em peso).

AISI	C %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	W %	Si %	OUTROS %
316L	Máx. 0,03	Máx. 2,00	16,00	10,00	2,50	-	<= 1,00	-

Fonte: Villares Metals (2023).

5.2 Preparação das Amostras

No âmbito deste estudo, as amostras foram submetidas a um processo de lixamento e polimento nas instalações do Laboratório de Metalografia e Cerâmica do IFPI, com o objetivo de eliminar todas as imperfeições provenientes das etapas anteriores de corte. Para esse fim, foram empregadas lixas d'água abrasivas com granulometria variando entre malhas 220, 360, 600 e 1200, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. Posteriormente, as amostras foram submetidas a um processo de polimento, utilizando um disco de feltro em conjunto com pasta de diamante (6µm) e lubrificante apropriado para materiais ferrosos.

5.3 Tratamento

Os tratamentos foram realizados no reator de plasma, nas instalações do Laboratório de Tratamento de Materiais por Plasma, conhecido como LabPlasma, localizado na Universidade Federal do Piauí (UFPI). Uma fonte de tensão contínua foi aplicada para este propósito. O reator, ilustrado na Figura 7, possui uma câmara de vácuo construída em aço inoxidável, com dimensões de 30 cm de diâmetro e 40 cm de altura.

Figura 7: Imagem do reator de tratamento a plasma do LabPlasma – UFPI.



Fonte: Autoria própria (2023).

5.3.1 Limpeza das Amostras

Antes de iniciar o processo de tratamento termoquímico, é essencial realizar uma etapa de limpeza por meio de ultrassom nas amostras. O objetivo é obter superfícies limpas e livres de quaisquer resíduos de óxidos ou impurezas. Esse procedimento envolve imergir amostras em álcool e submetê-las a uma vibração por ultrassom por um período de dez minutos. O equipamento utilizado para esta etapa é ilustrado na Figura 8. Após a limpeza, as amostras são cuidadosamente secas com o auxílio de um secador.

Figura 8 - Aparelho de ultrassom utilizado para limpar as amostras.



Fonte: Autoria própria (2023).

5.3.2 Nitretação Convencional

A nitretação convencional foi realizada em duas temperaturas distintas, a 350°C e 400°C, com as temperaturas desejadas sendo alcançadas por meio da aplicação gradativa da tensão elétrica.

O processo de *pré-sputtering* foi executado a uma temperatura constante de 300°C, por um período de 60 minutos, e ocorreu em uma atmosfera composta por 50% de argônio e 50% de hidrogênio, seguindo essas condições para todas as amostras.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no *pré-sputtering*

Comp. da mistura (%)	Pressão (Pa)	Tempo	Temperatura (°C)
50 Ar e 50 H_2	$3,4 \times 10^{-2}$	1 hora	300°

Fonte: Autoria própria (2023).

Após a conclusão do *pré-sputtering*, deu-se início ao segundo estágio, que envolveu a introdução controlada da mistura de gases e o ajuste da pressão de trabalho. A tabela a seguir detalha os parâmetros usados na nitretação convencional.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na nitretação convencional

Comp. da mistura (%)	Pressão (Pa)	Tempo	Temperatura (°C)	Nomenclatura
91 H_2 e 9 N_2	$1,5 \times 10^3$	4 horas	350°	NC350
91 H_2 e 9 N_2	$1,6 \times 10^3$	4 horas	400°	NC400

Fonte: Autoria própria (2023).

5.3.3 Tratamento Duplex

O processo de tratamento duplex se divide em duas etapas distintas. A primeira etapa é conhecida como nitretação convencional, a qual foi realizada sob as mesmas condições anteriormente mencionadas. O pré-sputtering executado foi semelhante ao utilizado na nitretação convencional (Tabela 2).

Na segunda etapa, foi realizada a deposição por meio da técnica de gaiola catódica, utilizando uma gaiola feita de titânio (Figura 9). A tabela a seguir descreve os parâmetros de tratamento para deposição utilizando gaiola catódica.

Tabela 4 - Parâmetros de tratamento utilizados para deposição utilizando gaiola catódica.

Nitretação Convencional	Gaiola	Comp. da mistura (%)	Pressão (Pa)	Tempo	Temperatura (°C)
NC350	Titânio	75 N_2 e 25 H_2	$2,1 \times 10^2$	4 horas	350
NC400	Titânio		$2,0 \times 10^2$		400

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 9 - Gaiola Catódica de titânio.



Fonte: Autoria própria (2023).

5.4 Nomenclatura

A nomenclatura seguinte foi adotada para as amostras em estudo.

- ST = Sem Tratamento
- NC350 = Nitretação convencional a 350 °C
- NC400 = Nitretação convencional a 400 °C
- NCDT350 = Nitretação convencional e Deposição com Gaiola de Titânio a 350 °C
- NCDT400 = Nitretação convencional e Deposição com Gaiola de Titânio a 400 °C

5.5 Caracterização

Com o objetivo de caracterizar as amostras e verificar o impacto nas propriedades mecânicas do material com os tratamentos, foram realizados os ensaios de Microdureza na superfície das amostras, Adesão Rockwell C, Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Ensaio de Corrosão.

5.5.1 Microdureza

As medidas de microdureza na escala Vickers foram adquiridas por meio do microdurômetro INSIZE, especificamente do modelo ISH-TDV 1000, conforme representado na Figura 10, sendo disponibilizado pelo Laboratório de Metalografia da

Universidade Federal do Piauí (UFPI), que faz parte do departamento do curso de Engenharia Mecânica. No processo de medição de microdureza, foram feitas 5 medidas em cada amostra, obtendo-se uma média, utilizando uma carga de 50 gf e um tempo de indentação de 15 segundos.

Figura 10 - Microdurômetro Vickers.



Fonte: Autoria própria (2023).

5.5.2 Adesão Rockwell C

A avaliação da adesão das camadas depositadas foi realizada por meio do teste de adesão Daimler-Benz VDI Rockwell C, utilizando um durometro equipado com ponta cônica de diamante, especificamente o modelo ISH-BRV da Insize, em conformidade com a norma VDI 3198.

5.5.3 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Para examinar a superfície das amostras tratadas, juntamente com suas respectivas camadas de filmes e realizar a avaliação composicional, foram capturadas imagens por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo QUANTA FEG 250, da marca FEI COMPANY, disponível no Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados – LIMAV, da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

5.5.4 Ensaios de Corrosão

As medidas eletroquímicas foram realizadas utilizando um potenciostato/galvanostato AUTOLAB, modelo PGSTAT302N, equipado com um analisador de frequência (módulo FRA2) e o software NOVA 2.1.4. Os ensaios de corrosão foram conduzidos em um sistema convencional de três eletrodos, utilizando uma célula de vidro. O eletrodo de referência utilizado foi Ag/AgCl/KCl(sat.), enquanto o contra eletrodo consistiu em um fio de platina, e os discos de aço 316L foram utilizados como eletrodo de trabalho.

O estudo englobou a realização de medidas de potencial de circuito aberto (OCP), espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e polarização potenciodinâmica. Todos os ensaios de corrosão foram conduzidos em uma solução de NaCl 3,5% m/m (Dinâmica 99%). Primeiramente, o potencial foi mensurado a cada 20 segundos durante 1 hora para avaliar o comportamento do OCP do aço ao entrar em contato inicial com a solução corrosiva.

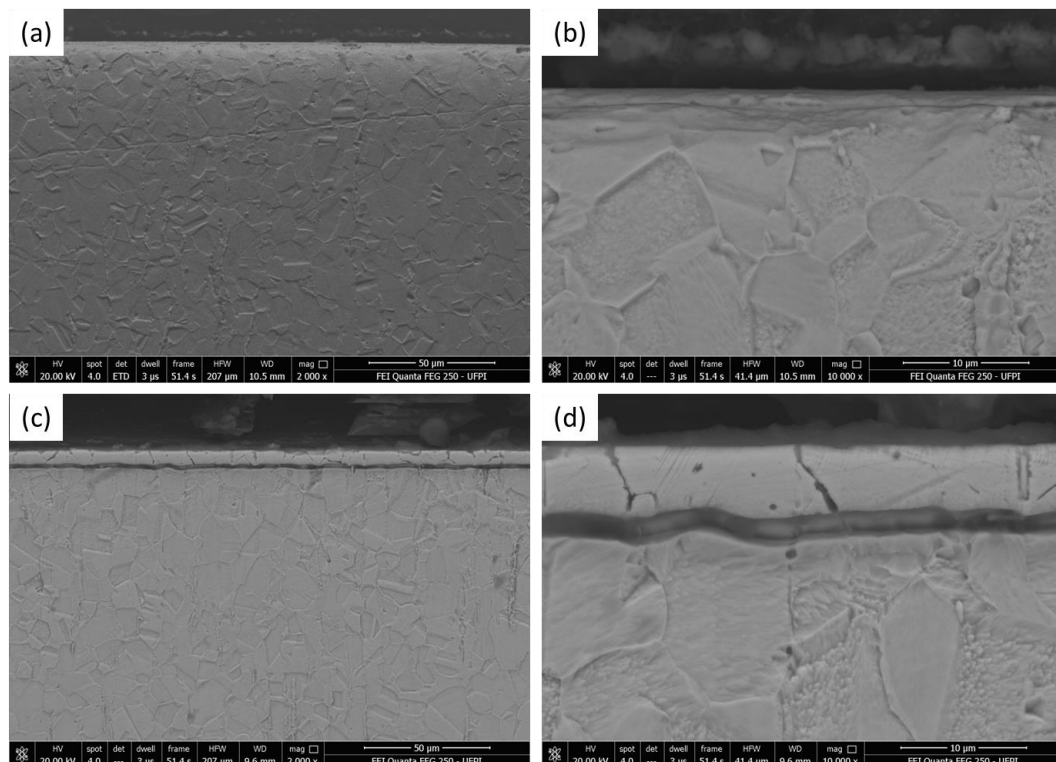
As medidas de impedância foram realizadas dentro da faixa de frequência de 105 a 10⁻² Hz, com uma amplitude de ± 5 mV e aquisição de 10 frequências por década. Todas as medições de impedância foram conduzidas a partir do potencial de circuito aberto. As medidas de polarização potenciodinâmica foram iniciadas em -250 mV em relação ao OCP e interrompidas quando a corrente atingiu 1 mA cm⁻², utilizando uma velocidade de varredura de 1 mV s⁻¹.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A Figura 11 apresenta a análise da seção transversal das amostras NCDT350 e NCDT400 por meio de micrografias de varredura eletrônica (MEV). Observa-se que todos os tratamentos resultaram na formação de uma camada superficial uniforme. A amostra NCDT350 exibiu uma espessura de filme inferior em comparação com a NCDT400. Conforme mencionado por Medeiros Filho (2023), a menor espessura do filme na NCDT350 é atribuída à redução na difusão e recombinação de íons devido à temperatura mais baixa, ainda assim o mesmo foi eficiente para fornecer um filme uniforme, que se espera ser rico em Ti e com dureza superior ao material de base. Em contraste, a amostra NCDT400 apresenta uma camada mais espessa, indicando que temperaturas de tratamento mais elevadas contribuem para uma camada mais espessa, corroborando os resultados de (MONÇÃO, 2022).

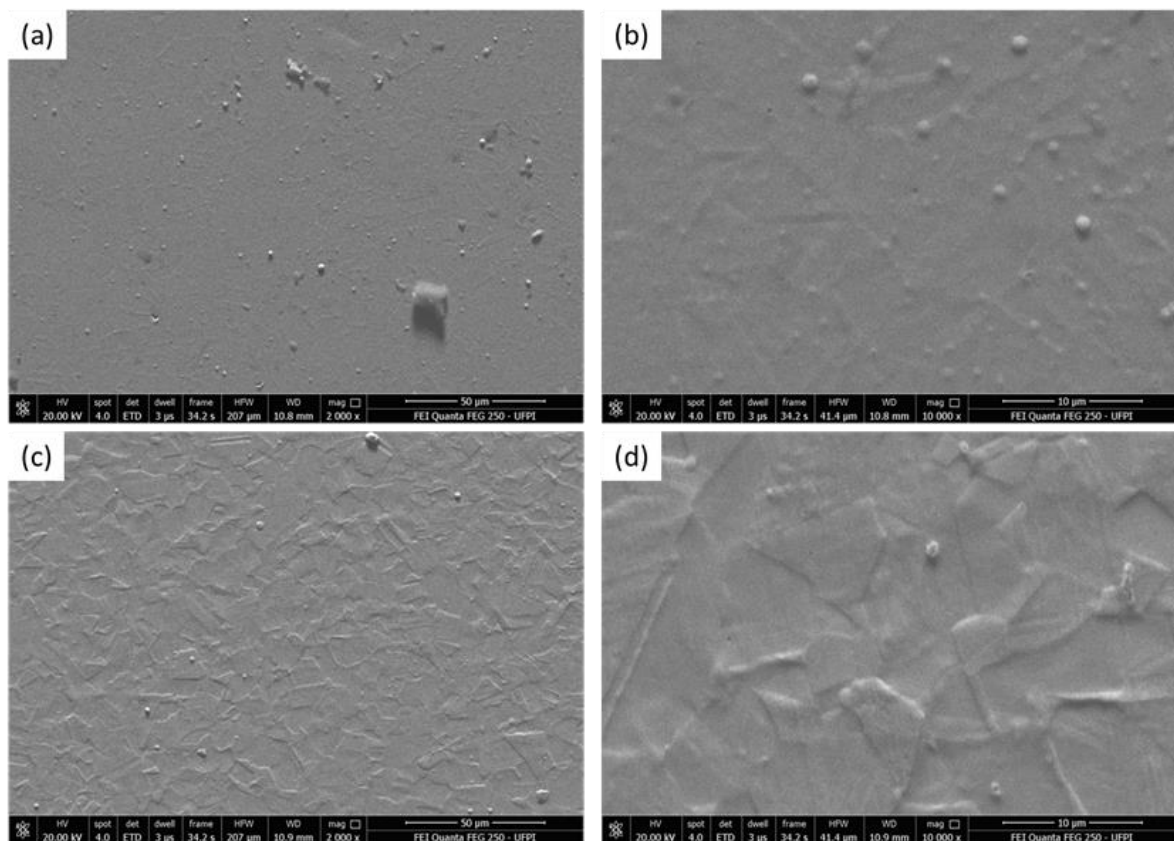
Figura 11 – MEV da Superfície Transversal das Amostras: a) NDTI350 2000x; b) NDTI350 10000x c) NDTI400 2000x; d) NDTI400 10000x.



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 12 exibe o MEV da superfície do filme depositado, exibindo a sua morfologia. É evidente que a superfície da amostra NDTI350 apresenta um aspecto mais liso e planar, o que pode contribuir para melhores resultados de resistência à corrosão. Por outro lado, a amostra NDTI400 revela um filme com superfície mais irregular, o que pode ser um ponto negativo na resistência à corrosão. Essa variação pode ser atribuída ao aumento da temperatura, que intensifica o processo de sputtering na superfície, resultando em um aumento na rugosidade superficial, conforme discutido por Serra (2020).

Figura 12 – MEV da Superfície (Morfologia) - a) e b) NDTI350; c) e d) NDTI400.

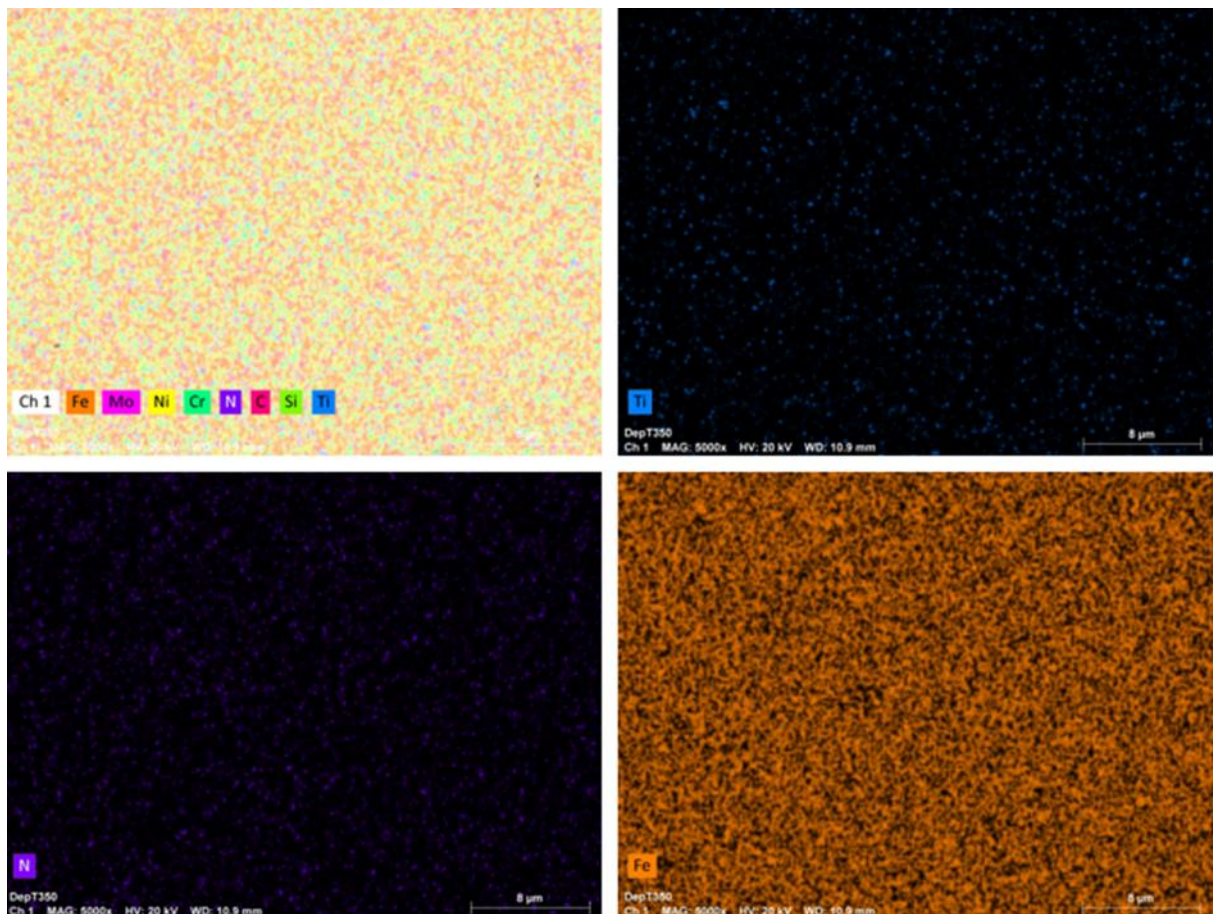


Fonte: Autoria própria (2023)

6.2 Espectroscopia de energia dispersiva de raios-x (EDS)

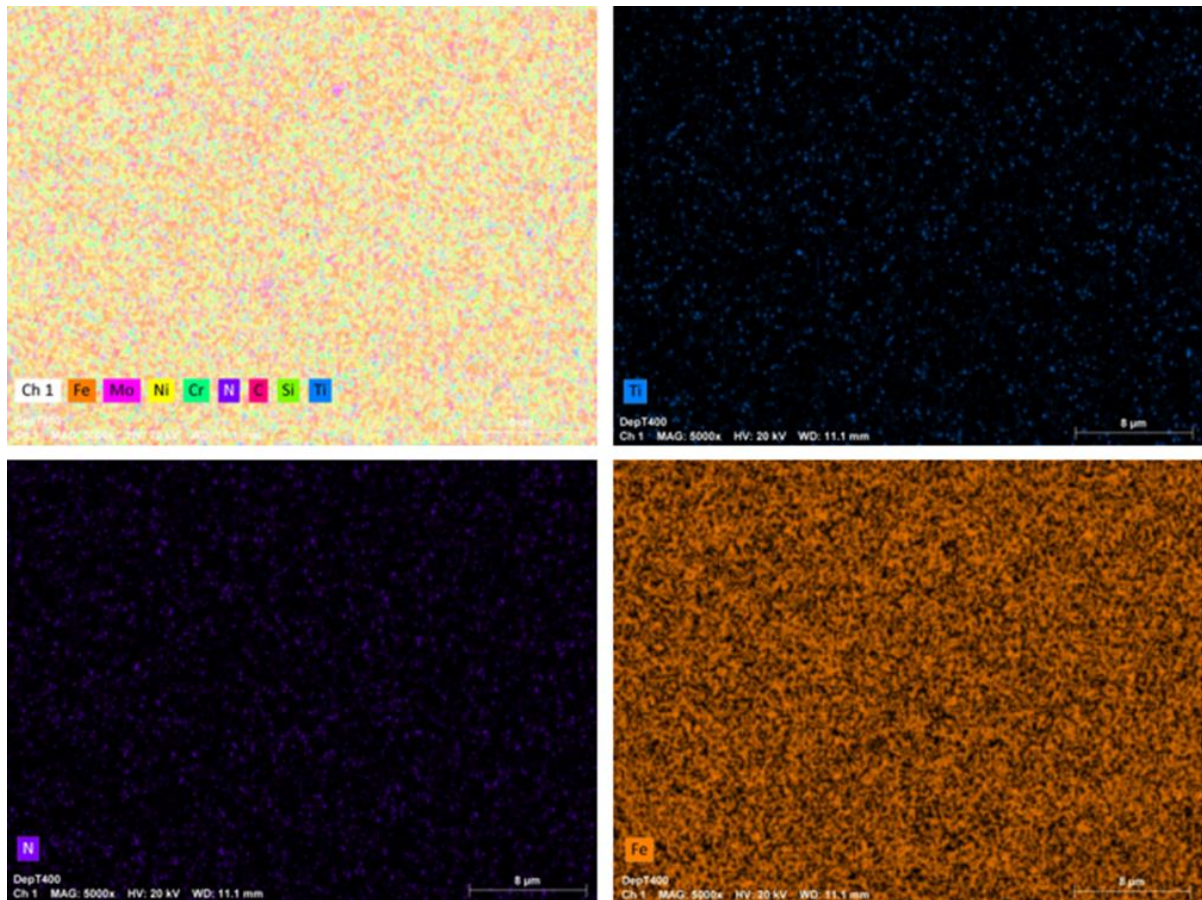
Nas Figuras 13 e 14, são exibidos os espectros de EDS da superfície das amostras NDTI350 e NDTI400. Evidencia-se a presença dos elementos cromo, ferro, carbono, níquel e molibdênio, todos pertencentes ao aço, o que é esperado devido à deposição sobre um substrato de aço 316L, que naturalmente contém esses elementos em sua composição. Observa-se, nas mesmas Figuras, a distribuição uniforme de nitrogênio (N) e titânio (Ti) pelo filme, característica distintiva do tratamento duplex. A presença desses elementos sugere a formação de nitreto de titânio durante o processo.

Figura 13 - Imagens mostrando a morfologia superficial da amostra NDTI350 e o mapa de composição elementar.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 14 - Imagens mostrando a morfologia superficial da amostra NDT1400 e o mapa de composição elementar.



Fonte: Autoria própria (2023)

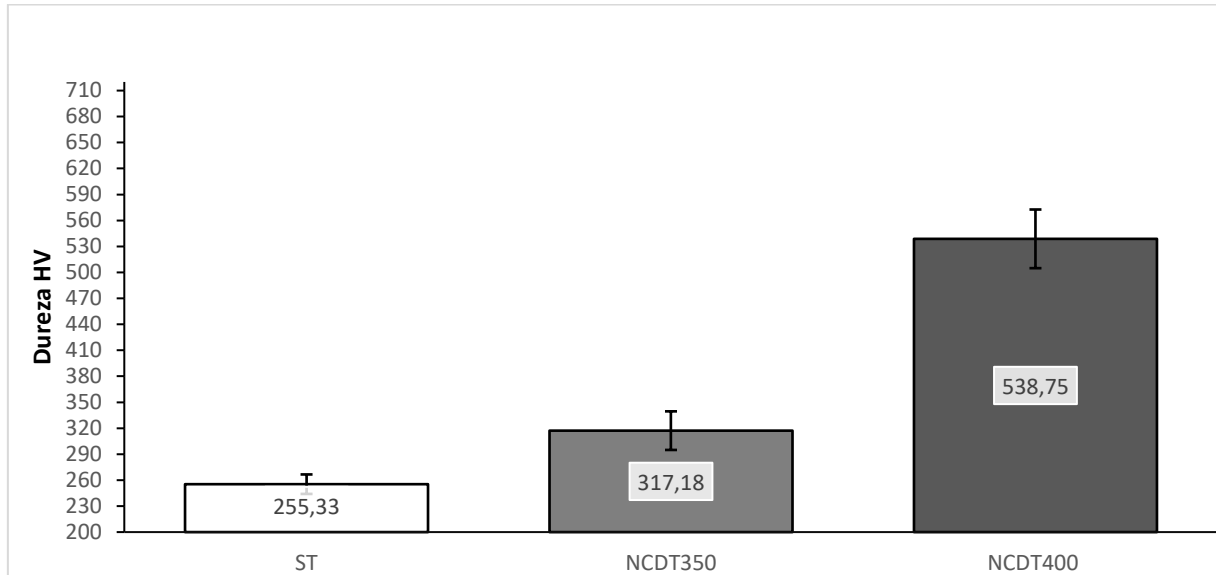
6.3 Microdureza

Ao examinar o gráfico de microdureza da Figura 15, destaca-se um aumento significativo nas microdurezas de todas as amostras tratadas quando comparadas à amostra não tratada, ST. É notável que a amostra NCDT400 apresentou maior dureza, atingindo 538,75 HV, representando um aumento de aproximadamente 110% em relação à amostra sem tratamento. Já a amostra NCDT350 apresentou um incremento de 25% em sua microdureza.

O acréscimo na dureza superficial em relação ao aumento da temperatura de tratamento está em consonância com as conclusões de Serra (2020). Segundo as observações de Medeiros Filho (2023), esse incremento na dureza está diretamente

associado ao aumento na concentração de fases mais duras, como os nitretos de cromo e ferro, o que se intensifica em temperaturas mais elevadas.

Figura 15 – Gráfico com os valores médios de microdureza das amostras.



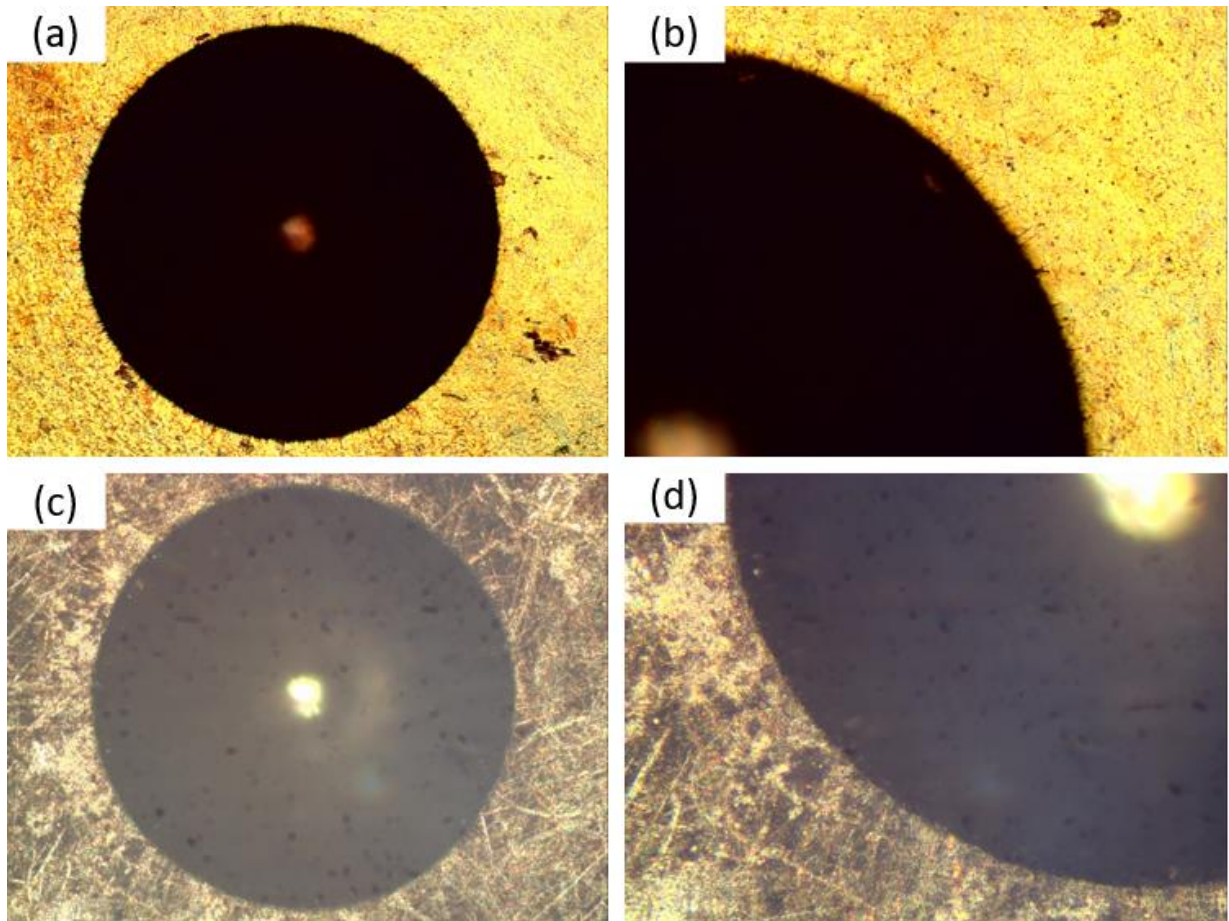
Fonte: Autoria própria (2023)

6.4 Adesão Rockwell C

A Figura 16 ilustra os resultados obtidos pelas amostras submetidas ao teste de Daimler-Benz VDI Rockwell C - VDI 319, que categorizam a resistência de adesão em seis classes, variando de HF1 a HF6. A classificação HF1 denota o surgimento apenas de pequenas fissuras radiais ao redor da indentação, enquanto HF6 representa a condição mais desfavorável de adesão do revestimento, caracterizada por extensas áreas de delaminação do filme ao redor da indentação (VIDAKIS, 2003; JASEMPOOR, 2022).

Conforme evidenciado nas Figura 16, as amostras NCDT350 e NCDT400 apresentaram excelente adesão ao substrato, seguindo os critérios estabelecidos pela norma HF1. Não foram observadas ocorrências significativas de delaminação em áreas extensas ou trincas irregulares, enquadrando-se nas categorias HF1 de acordo com a norma VDI 3198. Este resultado indica condições satisfatórias de adesão para ambas as amostras.

Figura 16 – Micrografia da adesão das camadas depositadas com ampliação de 100x e 200x - a) e b) NDTI350; c) e d) NDTI400.



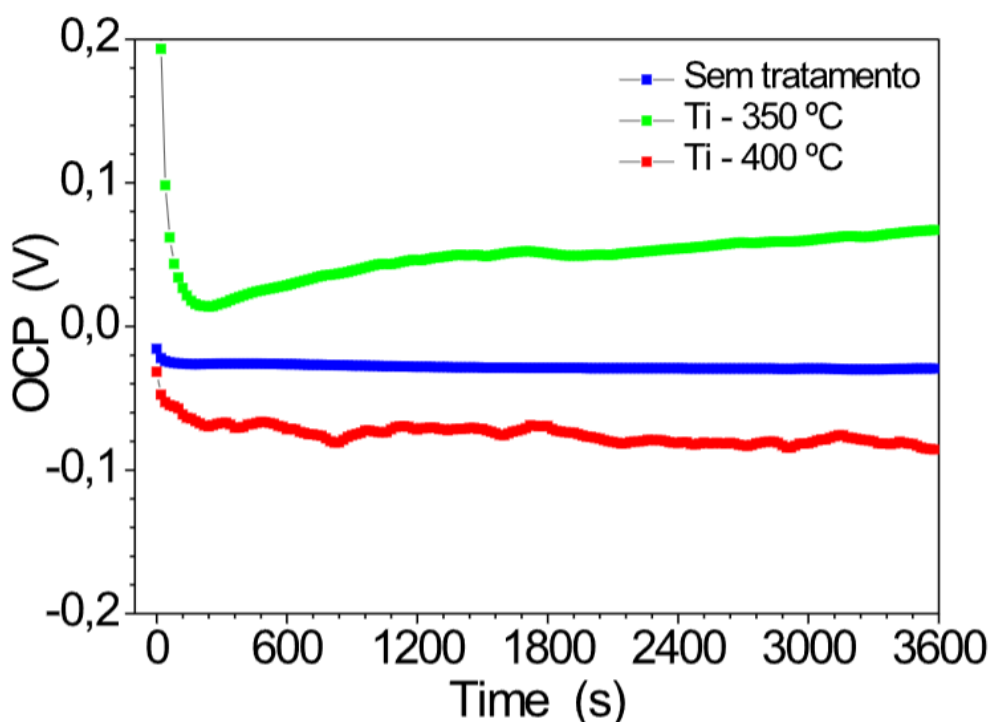
Fonte: Autoria própria (2023)

6.5 Corrosão

A Figura 17 exibe o diagrama do potencial em circuito aberto (OCP) das amostras, com todas as curvas demonstrando trajetórias descendentes, indicando a dissolução do metal na solução. As quedas iniciais refletem a redução da densidade de corrente na fase inicial, possivelmente devido à formação de uma camada de passivação mais densa na superfície das amostras (MEDEIROS, 2022). Na Figura 17, é perceptível que a amostra NDTI350 apresentou um ganho de potencial em relação à amostra sem tratamento, indicando uma boa resistência à corrosão. Por outro lado, a amostra NDTI400 demonstrou uma perda de potencial em comparação com a

amostra sem tratamento e uma estabilização menor, sugerindo uma diminuição na resistência à corrosão. Esse comportamento pode ser atribuído à superfície irregular, formando ilhas, conforme observado nas micrografias MEV na Figura 12, o que pode propiciar a corrosão por pites.

Figura 17 - Valores de potencial de circuito aberto do aço base e das amostras NDTI350 e NDTI400 obtidos durante exposição a solução de NaCl 3,5% m/m por 1h.

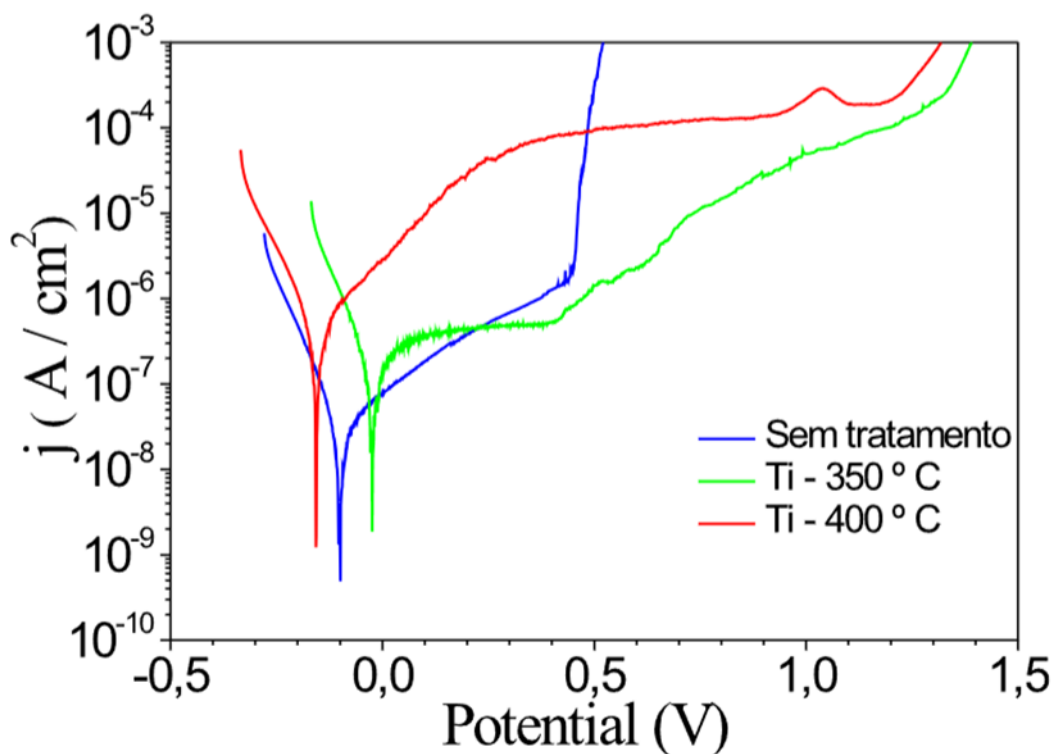


Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 18 visualiza as curvas de polarização para os substratos de aço inoxidável 316L não tratados, bem como para as amostras NDTI350 e NDTI400, com o objetivo de analisar o comportamento dessas amostras em termos de resistência à corrosão. Observa-se claramente, na Figura 18, que a amostra NDTI400 exibe uma resistência à corrosão inferior em comparação com as outras amostras. A temperatura, nesse contexto, pode influenciar o aumento na porcentagem de nitreto de cromo formado, resultante da difusão de cromo do substrato em temperaturas mais elevadas. Esse fenômeno promove um empobrecimento de cromo na matriz, resultando em uma redução na resistência à corrosão e, simultaneamente, dificulta a

formação da característica camada passiva desses materiais (COSTA, 2021). Em contrapartida, a amostra NDTI350 demonstra uma melhoria na resistência à corrosão em comparação com a amostra não tratada, em termos de potencial, embora apresente uma corrente de corrosão mais elevada.

Figura 18 – Curvas de polarização potenciodinâmica do aço base e das amostras NDTI350 e NDTI400 obtidas durante exposição a solução de NaCl 3,5% m/m por 1h.

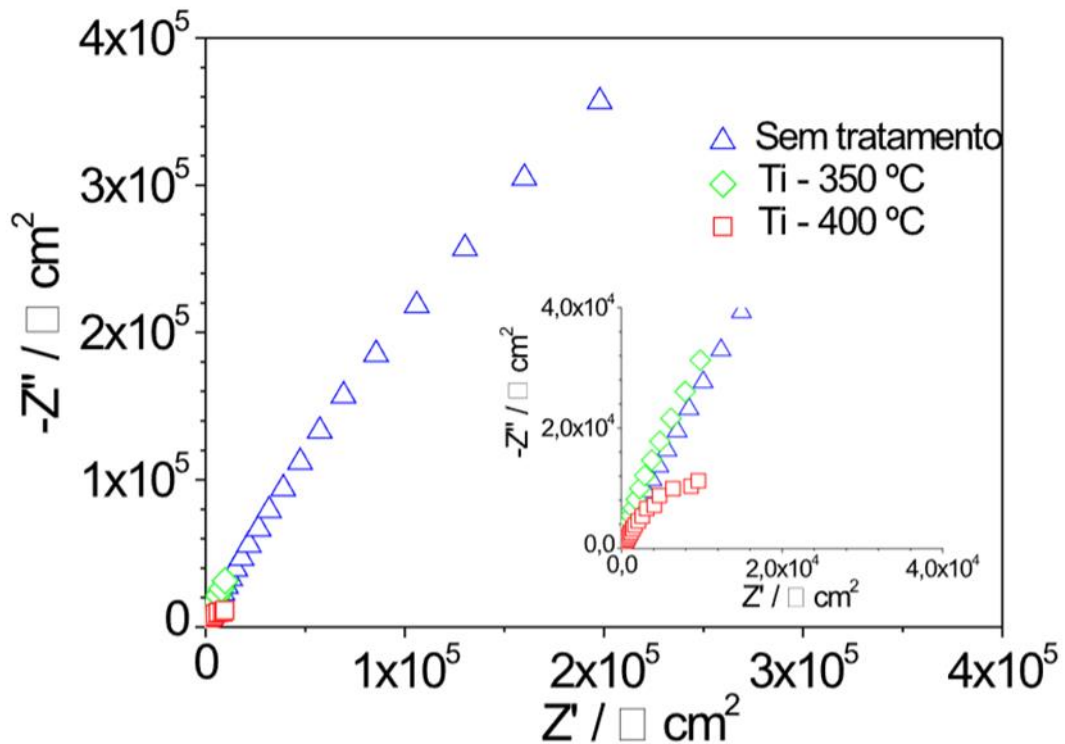


Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 19 apresenta o diagrama de Nyquist, no qual é possível observar que a amostra NDTI350 exibe um diâmetro de arco capacitivo maior em comparação com a amostra sem tratamento. Essa observação sugere uma maior resistência à corrosão para a amostra tratada. O aumento do diâmetro do arco capacitivo em diagramas de Nyquist é indicativo de um aumento na resistência à corrosão (JASEMPOOR, 2022). Em contrapartida, a amostra NDTI400 apresenta um valor menor de diâmetro,

indicando uma diminuição na resistência à corrosão em relação à amostra sem tratamento.

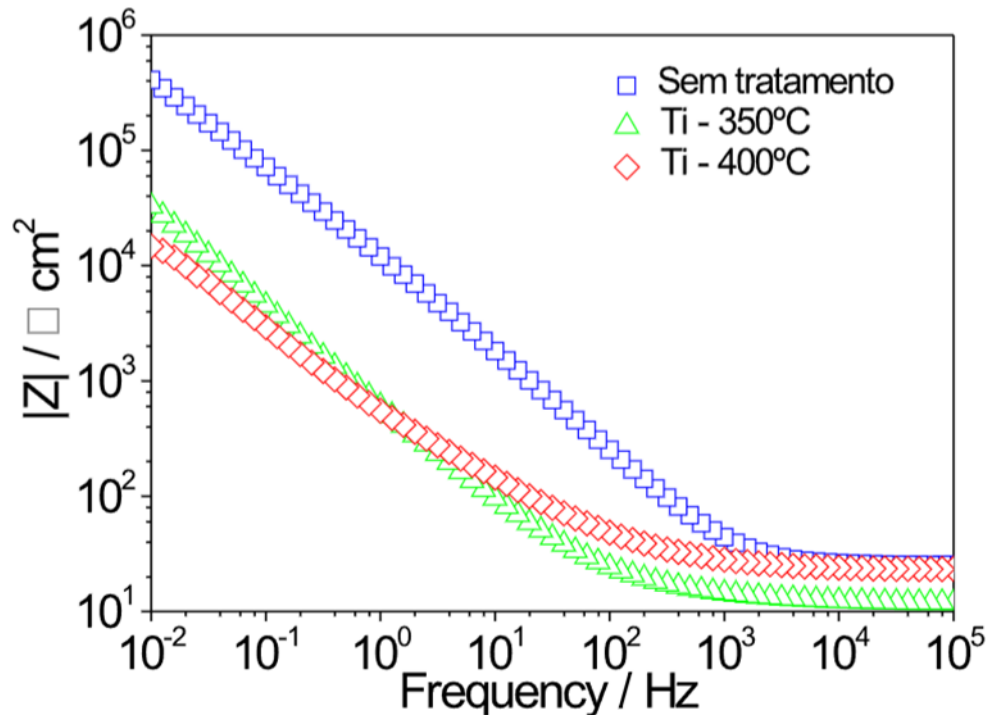
Figura 19 - Curvas de Nyquist do aço base e das amostras NDTI350 e NDTI400 obtidas durante exposição a solução de NaCl 3,5% m/m.



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 20 apresenta o diagrama de Bode, evidenciando que a amostra sem tratamento exibe um módulo de impedância total maior, sendo essa diferença mais notável nas zonas de baixa e média frequência. Esta amostra demonstra melhor resistência à corrosão. Por outro lado, a amostra NDTI350 exibe uma resistência superior em baixas frequências (10^0 Hz) em comparação com a amostra NDTI400, que, por sua vez, apresenta uma resistência superior na faixa de frequências (10^0 - 10^3 Hz), e se equipara em frequências mais elevadas. Entretanto, tanto as amostras NDTI350 quanto NDTI400 exibiram, de maneira geral, comportamentos satisfatórios, contribuindo positivamente para a melhoria das propriedades superficiais sem perdas consideráveis de resistência à corrosão.

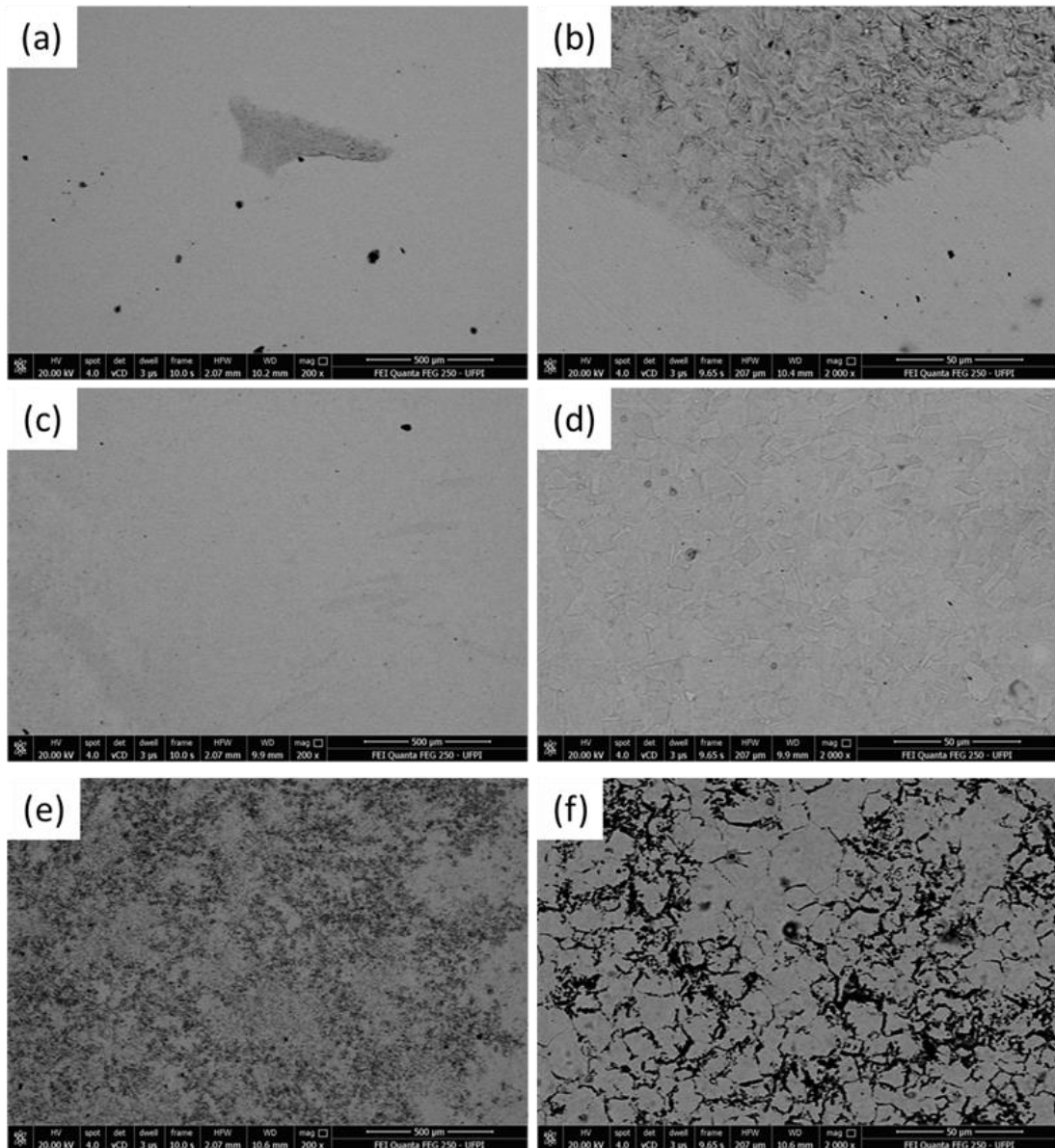
Figura 20 - Curvas de Bode do aço base e das amostras NDTI350 e NDTI400 obtidas durante exposição a solução de NaCl 3,5% m/m.



Fonte: Autoria própria (2023)

Após os ensaios eletroquímicos, as amostras foram analisadas por MEV para avaliação da superfície. A Figura 21 apresenta a morfologia resultante do teste de corrosão, abrangendo tanto as amostras não submetidas a tratamento quanto as tratadas. A amostra sem tratamento, representada em (a) e (b), e a amostra NDTI350, em (c) e (d), não apresentaram sinais consideráveis de corrosão, sendo a corrosão por pites o tipo predominante. Por outro lado, a amostra NDTI400 apresentou sinais de corrosão mais grave, revelando características de corrosão generalizada.

Figura 21 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após os ensaios de corrosão - a) e b) ST; c) e d) NDTI350; e) e f) NDTI400.



Fonte: Autoria própria (2023)

7 CONCLUSÕES

Filmes finos foram depositados em substratos de aço inoxidável AISI 316L por meio de tratamentos duplex com gaiola catódica de titânio, resultando em modificações superficiais capazes de aprimorar a dureza sem perdas significativas na resistência à corrosão. As conclusões deste estudo podem ser resumidas da seguinte forma:

Em todas as condições, observou-se a formação de uma camada depositada na superfície do material tratado.

A análise da Micrografia de Varredura Eletrônica (MEV) da superfície do filme depositado revelou que a amostra NDTI350 exibe uma superfície mais lisa e plana, características que podem contribuir para o aprimoramento de sua resistência à corrosão. Em contrapartida, a amostra NDTI400 apresentou um filme com uma superfície mais irregular, possivelmente comprometendo sua resistência à corrosão.

Os resultados da análise de EDS mostraram a presença de níveis consideráveis de titânio e nitrogênio na região do filme, indicando a possível formação de nitreto de titânio (TiN).

O teste de microdureza Vickers revelou um aumento significativo da dureza superficial em todas as amostras.

Os ensaios eletroquímicos de corrosão foram conduzidos para avaliar a resistência à corrosão das amostras. Os resultados indicam que todas as amostras mantiveram níveis satisfatórios de resistência à corrosão. Notavelmente, a amostra NDTI350 demonstrou melhorias em alguns testes, destacando-se como a mais promissora na obtenção da melhor combinação entre resistência à corrosão e dureza superficial.

REFERÊNCIAS

ALVES JUNIOR, Clodomiro. **Nitreção a plasma: fundamentos e aplicações**. Natal: Edufrn, 2001.

ARAÚJO, E. DE et al. Effect of ionic plasma nitriding process on the corrosion and micro-abrasive wear behavior of AISI 316L austenitic and AISI 470 super-ferritic stainless steels. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 2, p. 2180–2191, 2019.

CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. (Janeiro, 2008)

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

DONATTI, G.P; GONTIJO L.C., Estudo morfológico e eletroquímico do efeito de corrosão de eletrólito baseado em fertilizantes do tipo cloreto de potássio e ureia sobre substratos de aço estruturais SAE 1020 recobertos com filmes de dióxido de titânio crescidos via sputtering em gaiolacatódica dupla. **Revista Matéria**, v.26, n.2, p. e12989, 2021.

GRAY, G. T. et al. Structure/property (constitutive and spallation response) of additively manufactured 316L stainless steel. **Acta Materialia**, v. 138, p. 140–149, 2017.

JASEMPOOR, F; ELMKHAH, H; IMANTALAB, O; FATTAH-ALHOSSEINI, A., Improving the mechanical, tribological, and electrochemical behavior of AISI 304 stainless steel by applying CrN single layer and Cr/CrN multilayer coatings, **Wear**, v. 504–505, p. 204425, 2022.

MACEDO, F.R.C., **Nitreção a Plasma Convencional e com Gaiola Catódica do Aço Inoxidável Ferrítico AISI 410s e do Aço Inoxidável Austenítico AISI 304: Investigação e Análise dos Parâmetros de Tratamento**. Dissertação de Mestrado., Teresina (2018).

MAGALHÃES DE SOUSA, R. R. et al. Cathodic cage plasma deposition of TiN and TiO₂ thin films on silicon substrates. **Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films**, v. 33, n. 4, p. 041502, 2015.

MEDEIROS, E. L. L., **Aplicação de Diferentes Configurações de Deposição a Plasma com Gaiola Catódica de Titânio em Substrato de Aço Inoxidável AISI 304**. Monografia., Teresina (2022).

MEDEIROS FILHO, M.V., **Estudo Comparativo das Propriedades de Aços AISI 1045 e AISI 6160 Submetidos a Tratamento Duplex com Gaiolas de AISI 904l e Hastelloy C-276**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Teresina (2023).

MICHELON, A.O., MARQUES, F.M., ROCHA, A.S. et al., Influência da Velocidade de Avanço da Ferramenta de Usinagem na Resistência à Corrosão dos Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 316. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**. v. 26, p 03-09, 2022.

MONÇÃO, R.M., **Estudo da Resistência à Corrosão de Filmes Finos Formados por Plasma em Aço AISI 316L Utilizando Gaiola Catódica de Hastelloy**. Dissertação de Mestrado., Teresina (2022).

MORAIS, V.L., **Estudo comparativo da deformação a frio e da resistência à corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos AISI 201 e AISI 304**. Dissertação de Mestrado., Dissertação de Mestrado, São Paulo (2010).

OLIVEIRA JÚNIOR, R.B., **Avaliação do Efeito de Modificações Superficiais a Plasma no Desempenho do Aço AISI 316 Frente ao Desgaste e Corrosão**. Tese de Doutorado., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (2011).

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C.; **Aços Inoxidáveis Austeníticos - Microestrutura e propriedades**, Hemus Livraria, Distribuidora e Editora S.A., São Paulo, 2004.

SANTOS, T. A; SANTOS, R. C.; MARTINS, W. P., et al., Avaliação da susceptibilidade à corrosão de um aço inoxidável AISI 316L submetido à simulação térmica com o uso da Gleeble. **Revista Matéria**, v.24, n3, p. e12445, 2019.

SERRA, P.L.C., **Aplicação de Nitretação e Tratamento Duplex em Brocas de aço Rápido – HSS**. Dissertação de Mestrado., Teresina (2018).

SERRA, P.L.C.; BARROS NETO, J.R.; FURTADO, A.S.A., et al., Estudo de nitretação a plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido. **Revista Matéria**, v.25, n.2, p. e12772, 2020.

SOUSA, R.M et al. Nitretação em gaiola catódica: influência do tempo de tratamento. **Revista Matéria**, v. 13, n. 1, p. 119 – 124, 2008.

SOUSA, R. R. M. et al. Nitretação iônica em gaiola catódica do aço ferramenta tipo AISI D2 para trabalho a frio. **Revista Matéria**, v. 14, p. 861–868, 2009.

VIDAKIS, N; ANTONIADIS, A; BILALIS, N., The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143–144, p. 481–485, 2003.

VILLARES, Metais. **Aço inoxidável austenítico: V316XLUF**. 2023. Disponível em: <<https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis/Austeniticos/V316XLUF>>. Acesso em: 20 nov. 2023.