



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

DENEY GONÇALVES CARVALHO JUNIOR

**EFEITOS DO TRATAMENTO DUPLEX INVERTIDO E SIMULTÂNEO NAS
PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DO AÇO AISI 1045**

**TERESINA
2025**

DENEY GONÇALVES CARVALHO JUNIOR

EFEITOS DO TRATAMENTO DUPLEX INVERTIDO E SIMULTÂNEO NAS
PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DO AÇO AISI 1045

Trabalho de Conclusão de Curso
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: Prof. Dr. Petteson Linniker
Carvalho Serra

TERESINA
2025

Efeitos do Tratamento Duplex Invertido e Simultâneo nas Propriedades Tribológicas do Aço AISI 1045

Deney Gonçalves Carvalho Junior

. Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra

RESUMO

Os processos de modificação superficial de materiais são fundamentais para aprimorar o desempenho de componentes metálicos em diversas aplicações industriais. Tratamentos termoquímicos, como a nitretação a plasma, e técnicas de deposição, como a gaiola catódica, são amplamente utilizados para aumentar a dureza, a resistência ao desgaste e a estabilidade superficial dos aços. Dentre essas abordagens, os tratamentos duplex, que combinam diferentes processos de forma sequencial ou simultânea, vêm se destacando por oferecer propriedades otimizadas aos materiais tratados. O presente estudo investigou os efeitos dos tratamentos duplex e duplex simultâneo nas propriedades tribológicas e na estabilidade superficial do aço AISI 1045. Foram aplicados processos de nitretação a plasma e deposição com gaiola catódica de titânio nas temperaturas de 350°C e 400°C. O objetivo principal foi comparar as melhorias na dureza, adesão e rugosidade entre o tratamento duplex invertido e o duplex simultâneo, buscando identificar a abordagem mais eficiente para aplicações industriais. A caracterização das amostras foi realizada por ensaios de microdureza Vickers, microscopia óptica, teste de adesão Rockwell C e medição da rugosidade superficial. Os resultados mostraram que todas as amostras tratadas apresentaram aumento significativo na dureza em relação ao material não tratado. O tratamento duplex simultâneo a 400°C alcançou a maior dureza (668,03 HV), enquanto o duplex invertido gerou camadas mais uniformes e menor rugosidade. Concluiu-se que ambos os tratamentos melhoraram as propriedades do aço AISI 1045, porém o duplex simultâneo mostrou-se mais vantajoso por combinar alta dureza, boa adesão e melhor acabamento superficial.

Palavras chaves: Aço AISI 1045; Dureza Superficial; Gaiola Catódica; Nitretação a Plasma; Tratamento Duplex.

ABSTRACT

Surface modification processes play a crucial role in enhancing the performance of metallic components across various industrial applications. Thermochemical treatments, such as plasma nitriding, and coating deposition techniques, like the cathodic cage, are widely employed to improve the hardness, wear resistance, and surface stability of steels. Among these approaches, duplex treatments—combining different processes either sequentially or simultaneously—have gained prominence for providing optimized material properties. This study investigated the effects of duplex and simultaneous duplex treatments on the tribological behavior and surface stability of AISI 1045 steel. Plasma nitriding and titanium cathodic cage deposition were applied at temperatures of 350°C and 400°C. The main objective was to compare the improvements in surface hardness, adhesion, and roughness between the inverted duplex and simultaneous duplex treatments, aiming to determine the most efficient approach for industrial use. Characterization of the samples was carried out using

Vickers microhardness testing, optical microscopy, Rockwell C adhesion analysis, and surface roughness measurements. The results showed that all treated samples exhibited a significant increase in hardness compared to the untreated material. The simultaneous duplex treatment at 400°C achieved the highest hardness value (668.03 HV), while the inverted duplex treatment produced more uniform layers and lower roughness, indicating better control of the deposition process. Overall, both treatments effectively enhanced the properties of AISI 1045 steel; however, the simultaneous duplex treatment proved more advantageous by combining high hardness, good adhesion, and smoother surface finish—making it a promising option for applications requiring improved wear resistance and surface quality.

Keywords: AISI 1045 Steel; Surface Hardness; Cathodic Cage; Plasma Nitriding; Duplex Treatment.

Data de Aprovação: 19/02/2025

1 INTRODUÇÃO

O aço AISI 1045 é amplamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos, como engrenagens, eixos, hastes, pinos e peças estruturais. Sua popularidade se deve à combinação de boa resistência mecânica, tenacidade e custo acessível. No entanto, a ausência de elementos de liga torna esse material suscetível à corrosão e limita sua dureza máxima, que depende da formação de martensita influenciada pelo teor de carbono (0,45%) (Guedes, 2017). Para ampliar sua aplicabilidade e vida útil, diversos tratamentos térmicos e de superfície são empregados com o objetivo de melhorar suas propriedades tribológicas.

Entre esses processos, a nitretação a plasma destaca-se como uma técnica termoquímica eficaz para aumentar a dureza superficial e melhorar a resistência ao desgaste, fadiga e corrosão do aço (Alves Jr., 2001; Ribeiro, 2007). Esse método promove o enriquecimento da superfície do material com nitrogênio, resultando na formação de uma camada endurecida, sem comprometer a ductilidade do núcleo (Chiaverini, 2008). Em comparação com outras formas de nitretação, a técnica a plasma apresenta vantagens como menor tempo de tratamento, maior uniformidade microestrutural e menor impacto ambiental (Garzón & Tschiptschin, 2005; Gavriljuk & Berns, 1999).

No campo da engenharia de superfícies, uma abordagem inovadora para otimizar a resistência mecânica e tribológica dos materiais é o tratamento duplex, que combina a nitretação a plasma com a deposição de um revestimento fino, como nitreto de titânio (TiN). Essa técnica é amplamente utilizada em aços ferramenta, moldes e matrizes, pois melhora a aderência do revestimento ao substrato e proporciona maior

estabilidade térmica, redução do coeficiente de atrito e resistência ao desgaste (Serra et al., 2020; Pinedo, 2011).

A evolução dessa tecnologia levou ao desenvolvimento de variações do tratamento duplex, incluindo as abordagens simultânea e invertida. No tratamento duplex simultâneo, a nitretação a plasma e a deposição do revestimento ocorrem no mesmo ciclo, reduzindo o tempo de processamento e otimizando recursos. Medeiros (2022) demonstrou que esse método, quando realizado a 400°C por 4 horas, resultou em um aumento de 148,3% na microdureza superficial do aço, além de uma adesão eficiente do revestimento, conforme o teste de Rockwell C (VDI 3198).

Já o tratamento duplex invertido propõe uma inversão na sequência convencional do processo, aplicando primeiro o revestimento e, posteriormente, a nitretação. Estudos sugerem que essa abordagem pode modificar a estrutura do revestimento previamente depositado, influenciando sua dureza e uniformidade. A principal vantagem desse método estaria na possibilidade de maior controle sobre a morfologia da camada superficial, embora sua viabilidade dependa de fatores como temperatura de nitretação, composição do material e técnica de deposição do revestimento (Feitor et al., 2020).

Embora existam diversas pesquisas sobre o tratamento duplex convencional, a comparação entre as versões simultânea e invertida ainda é pouco explorada. Compreender os efeitos dessas abordagens no aço AISI 1045 é fundamental para aprimorar sua aplicação industrial, especialmente em componentes mecânicos sujeitos a altas exigências de resistência ao desgaste e estabilidade superficial.

2 JUSTIFICATIVA

A aplicação de tratamentos superficiais em materiais metálicos tem sido amplamente explorada na engenharia de superfícies, principalmente para aumentar a resistência ao desgaste e melhorar a estabilidade mecânica dos componentes. Dentre esses tratamentos, a nitretação a plasma e o tratamento duplex, que combina a nitretação com a deposição de um revestimento fino, têm demonstrado grande potencial na otimização das propriedades tribológicas dos materiais. Esses processos são amplamente utilizados na indústria de manufatura, especialmente na melhoria da vida útil de ferramentas de corte, como brocas e matrizes de conformação (Santos; Kieckow; Casarin, 2013).

A nitretação a plasma se destaca por ser um tratamento termoquímico eficiente, promovendo o aumento da dureza superficial e melhorando a resistência ao desgaste sem comprometer a ductilidade do núcleo do material (Alves Jr., 2001). Estudos mostram que esse processo, quando realizado em temperaturas adequadas, contribui para a formação de camadas endurecidas que aprimoram o desempenho mecânico dos aços. Além disso, a combinação da nitretação com a deposição de filmes de nitreto de titânio, conhecida como tratamento duplex, pode oferecer melhorias significativas na resistência ao desgaste e aderência do revestimento ao substrato (Serra, 2020).

No entanto, apesar dos benefícios já conhecidos do tratamento duplex, a comparação entre suas variantes, como o tratamento duplex invertido e o duplex simultâneo, ainda carece de estudos mais aprofundados. A compreensão das diferenças entre essas abordagens é essencial para a aplicação otimizada desses tratamentos em diferentes contextos industriais, como nos setores automotivo, aeronáutico e de petróleo e gás, onde componentes metálicos estão sujeitos a condições severas de abrasão e fadiga mecânica (Almeida et al., 2021).

Pesquisas recentes indicam que a eficiência dos revestimentos não depende apenas da dureza superficial, mas também da adesão da camada ao substrato e da rugosidade resultante do tratamento (Tillmann et al., 2020). A nitretação antes da deposição do revestimento favorece a formação de uma camada de difusão, aumentando a resistência à compressão e reduzindo a incidência de trincas (Hawryluk et al., 2020). Além disso, a redução da rugosidade superficial das ferramentas tratadas melhora significativamente a resistência ao desgaste, proporcionando um melhor desempenho em serviço (Fernández-Abia et al., 2020).

Nesse contexto, este trabalho propõe uma análise comparativa entre os tratamentos duplex invertido e duplex simultâneo no aço AISI 1045, investigando seus efeitos na microdureza, adesão, rugosidade e estabilidade superficial. Os resultados obtidos permitirão avaliar qual abordagem apresenta maior eficiência para aplicações industriais, contribuindo para a tomada de decisões mais embasadas no setor metalúrgico. Além disso, a geração de dados técnicos sobre esses tratamentos poderá incentivar novas pesquisas científicas e a implementação de processos mais sustentáveis na engenharia de superfícies, considerando que a nitretação a plasma é um método ambientalmente responsável em comparação a outros processos de endurecimento superficial (Libório, 2020).

Portanto, este estudo é de grande relevância para a indústria de manufatura e engenharia de materiais, pois busca otimizar o desempenho de componentes metálicos por meio da aplicação de tratamentos superficiais avançados. A análise detalhada dos tratamentos duplex contribuirá para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes na melhoria da resistência ao desgaste, aumentando a durabilidade dos materiais e reduzindo os custos operacionais em diversos setores industriais (Sousa, 2020; Serra et al., 2020).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Comparar os efeitos das aplicações de tratamento duplex invertido e duplex simultâneo nas propriedades tribológicas do aço AISI-1045.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar qualidade de adesão das amostras submetidas ao tratamento duplex simultâneo;
- Avaliar os efeitos dos tratamentos na rugosidade superficial do aço 1045;
- Comparar as modificações superficiais provocadas pelos tratamentos duplex invertido e duplex simultâneo em termos de microdureza, morfologia da superfície, rugosidade e espessura das camadas formadas;
- Investigar os efeitos dos tratamentos duplex invertido e duplex simultâneo na microdureza superficial do aço 1045.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O AÇO AISI 1045: COMPOSIÇÃO, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA

O aço é uma liga metálica composta principalmente por ferro e carbono, com o teor de carbono variando de 0,008% a 2,11%, sendo comum mantê-lo abaixo de 1,5% (Callister e Rethwisch, 2016). O carbono é essencial para conferir dureza e resistência mecânica ao aço, tornando-o adequado para diversas aplicações (Martins e Marques, 2020). Sua maleabilidade, ductilidade, resistência à corrosão e facilidade de soldagem

são características que o tornam atrativo, especialmente em comparação com materiais como titânio e alumínio (Gomes, 2009). O aço é amplamente utilizado em setores como fabricação de máquinas pesadas, tubulações e ferramentas (Lins et al., 2010; Ferreira, 2016; Sousa, Cruz e Moura Neto, 2016).

Apesar da variedade de aços, algumas aplicações exigem materiais com propriedades específicas (Souza, 2016). Para facilitar a escolha do aço, há classificações baseadas em composição química, propriedades mecânicas e aplicação (Callister e Rethwisch, 2016). Os aços carbono são divididos em três categorias: baixo, médio e alto carbono, com diferenças em resistência, dureza e ductilidade (Souza, 2001; Callister e Rethwisch, 2016; ASM International, 2001). As propriedades mecânicas do aço, como dureza e tenacidade, são determinadas por suas microestruturas, principalmente ferrita e cementita, que influenciam diretamente seu desempenho (Van Vlack, 1999; Callister et al., 2016).

Nesse sentido, a nomenclatura dos aços leva em consideração principalmente a concentração de carbono, a presença de elementos de liga e, em alguns casos, suas aplicações específicas. No Brasil, o sistema mais utilizado para essa classificação é o da ABNT, baseado na norma NBR NM 87, que segue um modelo semelhante aos padrões internacionais adotados pela AISI e SAE (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000).

Tabela 1 - Tipos de Aço e sua Classificação Segundo as Normas SAE/AISI/ABNT

Designação SAE	AISI/ABNT	Tipos de Aço
10XX	10XX	Aços carbono comuns, com máximo 1% Mn
11XX	11XX	Aços resulfurados de corte fácil, alta % S
13XX	13XX	Aços manganês com 1,75% Mn
23XX	23XX	Aços níquel com 3,5% Ni
25XX	25XX	Aços níquel com 5,0% Ni
31XX	31XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	33XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,5% de Ni e 1,55% de Cr
40XX	40XX	Aços molibdênio com 0,25% Mo
41XX	41XX	Aços cromo-molibdênio com 0,50 a 0,95% Cr e 0,12 a 0,30% Mo
43XX	43XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,80% Ni, 0,50 a 0,80% Cr e 0,25% Mo
46XX	46XX	Aços níquel-molibdênio com 1,80% Ni, 0,50 a 0,80% Cr e 0,25% Mo

47XX	47XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,05% Ni, 0,45% Cr e 0,20 a 0,35% Mo
48XX	48XX	Aços níquel-molibdênio com 3,5% Ni e 0,25% Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,27 a 0,65% Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo-boro com 0,5% Cr e de 5 a 30 ppm B (*)
51XX	51XX	Aços cromo com 0,8 a 1,05% Cr
51XX	51XX	Aços cromo com 1,0% Cr e 1,0% min C
52XX	52XX	Aços cromo com 1,45% Cr e 1,0% min C
61XX	61XX	Aços cromo-vanádio 0,60-0,95% Cr e 0,10 a 0,15% V
86XX	86XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,55% Ni, 0,5% Cr e 0,20% Mo*
87XX	87XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,55% Ni, 0,5% Cr e 0,25% Mo
92XX	92XX	Aços silício-manganês com 1,4 a 2,0% Si, 0,85 a 0,65% Mn e 0,65% Cr
93XX	93XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,25% Ni, 1,20% Cr e 0,12% Mo
94BXX	94BXX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,45% Ni, 0,4% Cr, 0,12% Mo e 30 ppm B (*)
98XX	98XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,0% Ni, 0,80% Cr e 0,25% Mo

Fonte: GERDAU, 2024.

Esse sistema utiliza um código numérico composto, em geral, por quatro algarismos. Os dois primeiros indicam a família do aço, enquanto os dois últimos expressam o teor de carbono em centésimos de porcentagem. Esse método de designação facilita a identificação e padronização dos aços, sendo amplamente aplicado na indústria, como exemplificado na Tabela 1.

Assim, o aço AISI 1045, classificado como um aço carbono de teor médio de carbono, destaca-se como um dos mais comuns na indústria, conforme relatado pela ASM International (2001). De acordo com a norma SAE J403, ele possui uma composição química que inclui teor de carbono entre 0,43% e 0,50%, manganês entre 0,60% e 0,90%, silício entre 0,15% e 0,35%, fósforo com um limite máximo de 0,040% e enxofre com um limite máximo de 0,050%. Assim, a presença de pequenas quantidades desses elementos adicionais ao carbono confere ao material propriedades específicas.

Segundo o Guia de Seleção de Materiais da ASM International, o aço AISI 1045 é indicado para aplicações que demandam resistência moderada a altas cargas repetitivas, capacidade de suportar desgaste de moderado a severo e alta tenacidade. Além disso, sua ampla disponibilidade no mercado, aliada a um custo relativamente baixo, torna-o uma escolha vantajosa para diversas aplicações.

Nesse contexto, devido à sua alta resistência mecânica e dureza, esse aço é amplamente utilizado na fabricação de peças para máquinas, como eixos, engrenagens, virabrequins, hastes, pinos e buchas. Além disso, ele também é adequado para peças estruturais que exigem alta resistência, como em construções civis e pontes. Sua facilidade para ser usinado e soldado contribui ainda mais para sua popularidade em aplicações que exigem essas propriedades específicas (ASM International, SAE J403).

Por outro lado, embora o aço AISI 1045 ofereça diversas vantagens, ele apresenta algumas limitações importantes que devem ser consideradas. Uma das principais desvantagens é sua baixa resistência à corrosão, o que o torna inadequado para ambientes agressivos (ABNT, 2000). Além disso, Cunha *et al.* (2017) apontam que esse material pode apresentar baixa tenacidade em temperaturas extremamente baixas e sensibilidade a trincas por hidrogênio em determinadas condições.

Ademais, outra limitação relevante é sua resistência ao desgaste, que é inferior à de outros aços de alta resistência, devido à sua faixa limitada de dureza. Por isso, como apresentado na AISI 1045 Datasheet da GGD Metais, em aplicações que envolvem alta carga e desgaste severo, é preferível optar por um aço com maior resistência ao desgaste. Consequentemente, o aço AISI 1045 é mais adequado para aplicações que demandam dureza moderada, mas não deve ser utilizado em ferramentas de corte ou moldes.

Portanto, é fundamental considerar tanto as vantagens quanto as limitações do aço AISI 1045 ao selecioná-lo para uma aplicação específica, garantindo que suas características atendam às exigências do projeto.

4.2 O PROCESSO DE NITRETAÇÃO

A nitretação é descrita como um processo termoquímico que visa melhorar a dureza, a resistência ao desgaste e à fadiga das superfícies metálicas por meio da inserção de nitrogênio na camada superficial do material. Esse tratamento pode ser

aplicado em aços carbono, ligas de aço, ferro fundido e outras ligas metálicas. Além disso, sua utilização se destaca em diversos setores industriais, como os ramos aeronáutico, automotivo e de máquinas, uma vez que é uma técnica eficaz na melhoria das propriedades mecânicas, contribuindo para a redução de custos e o prolongamento da vida útil das peças (Cavalcante *et al.*, 2019).

Nesse sentido, o amplo uso desse processo está relacionado aos efeitos positivos observados nos materiais tratados. Entre esses efeitos, destacam-se o aumento da dureza superficial, da resistência ao desgaste e à fadiga, bem como melhorias na resistência à corrosão e na aderência de revestimentos. Tais características são atribuídas à formação de uma camada de nitretos na superfície do material, que apresenta uma estrutura cristalina distinta da matriz original, conferindo propriedades únicas à camada tratada (Cavalcante *et al.*, 2019).

Por isso, para compreender as variações do processo de nitretação, há a necessidade de classificar a técnica com base em alguns critérios, como o método empregado, o tipo de gás utilizado e a temperatura aplicada. Essa classificação facilita os estudos e a aplicação do processo em diferentes contextos, tornando-o mais eficiente e direcionado às necessidades específicas de cada caso (Cavalcante *et al.*, 2019).

Assim, a nitretação pode ser dividida em três tipos principais: gasosa, iônica e a plasma. No caso da nitretação gasosa, o material é submetido a uma atmosfera rica em nitrogênio sob altas temperaturas; já na nitretação iônica, ocorre o bombardeio do material com íons de nitrogênio em condições de vácuo. Por fim, na nitretação a plasma, o material é tratado em um ambiente de plasma rico em nitrogênio também a altas temperaturas (Araujo *et al.*, 2019).

4.3 O PROCESSO DE NITRETAÇÃO A PLASMA

Nesse método, a peça é colocada em uma câmara de vácuo e submetida a uma atmosfera de plasma a baixa pressão, composta por nitrogênio gasoso. Durante o processo, os íons de nitrogênio são acelerados em direção à superfície metálica, penetrando em sua estrutura. Isso resulta na formação de camadas de nitretos que aumentam a dureza e a resistência ao desgaste do material tratado (Chiaverini, 2009).

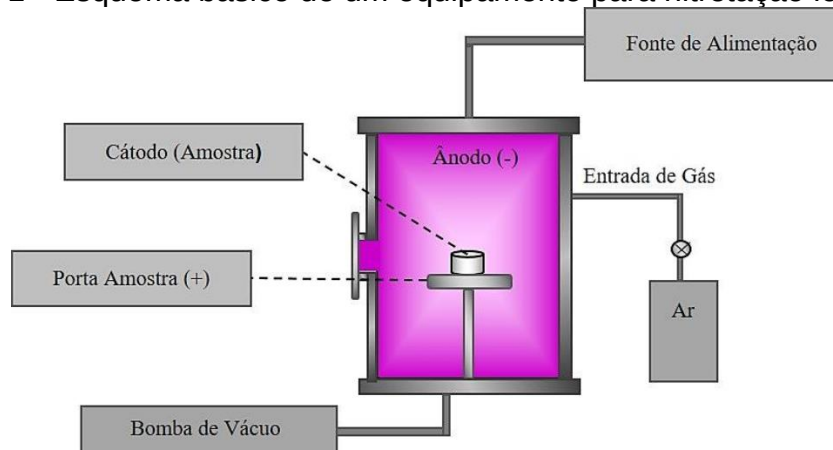
Assim, esse processo envolve a introdução de nitrogênio atômico na superfície do material por meio de um plasma a baixa pressão, o que leva à formação de uma

camada de nitretos na superfície do material. A espessura e a composição da camada de nitretos dependem de vários fatores, como a composição química do material, a temperatura de nitretação, o tempo de tratamento e a pressão do plasma (Meng *et al.*, 2019).

A Figura 1 apresenta um esquema básico de um equipamento para nitretação iônica. O sistema é composto por uma câmara de vácuo, onde a amostra é posicionada no interior e protegida por uma blindagem mecânica. A câmara recebe um fluxo controlado de gás, regulado por uma válvula, e está conectada a uma bomba de vácuo para a remoção de impurezas e ajuste da pressão interna (Souza, 2021).

A fonte de tensão aplicada cria um plasma ao redor da amostra, promovendo a difusão de nitrogênio em sua superfície. O controle de temperatura é um elemento essencial no processo, garantindo que as condições térmicas ideais sejam mantidas para a nitretação. O esquema ilustra os principais componentes envolvidos no processo, destacando a importância do vácuo, do controle da tensão elétrica e da temperatura para a eficácia da nitretação iônica (Souza, 2021).

Figura 1 - Esquema básico de um equipamento para nitretação iônica



Fonte: Souza (2021).

Desse modo, o processo oferece vantagens sobre outros tratamentos térmicos, como a nitretação gasosa e a cementação, sendo realizado em temperaturas mais baixas, o que contribui para reduzir a distorção dimensional das peças tratadas (Kumar *et al.*, 2020).

Entre os benefícios proporcionados pela nitretação a plasma, a significativa melhoria da dureza superficial é um dos mais destacados. Esse processo pode aumentar a dureza superficial de aços inoxidáveis austeníticos em até três vezes,

resultado da formação de camadas de nitretos durante o tratamento. Essas camadas são responsáveis por aprimorar as propriedades do material, tornando-o mais resistente a diversas condições de uso (Chen *et al.*, 2020).

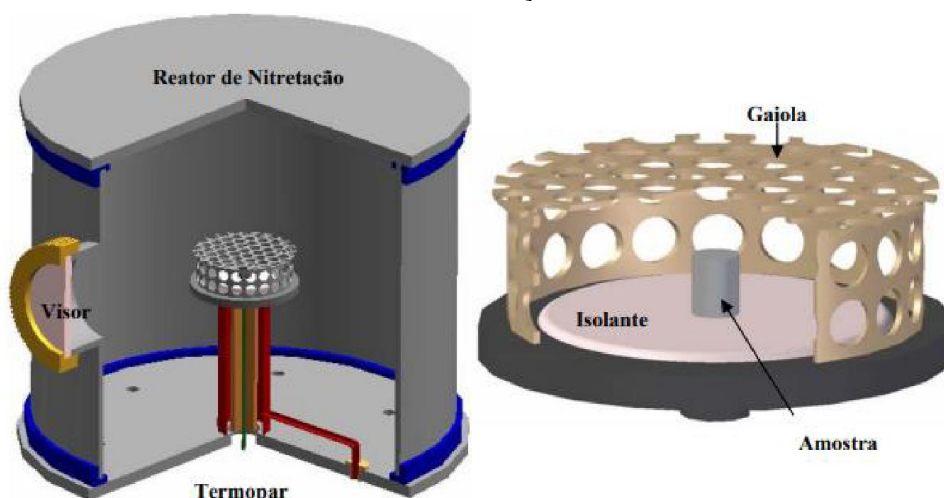
Por fim, as análises indicam que a nitretação a plasma não apenas melhora propriedades mecânicas e tribológicas, como também oferece vantagens em relação a outros processos de tratamento térmico, como a cementação e a têmpera convencional. A possibilidade de produzir camadas nitretadas mais profundas e uniformes em temperaturas mais baixas, minimizando a distorção dimensional, reforça sua aplicação industrial. Adicionalmente, o processo favorece melhorias na resistência à fadiga, à corrosão e na aderência de revestimentos, ampliando sua relevância para o tratamento de materiais como aços carbono, aços inoxidáveis e ligas de titânio.

4.4 A NITRETAÇÃO A PLASMA COM GAIOLA CATÓDICA

A gaiola catódica desempenha um papel crucial no processo de nitretação a plasma, sendo um dispositivo cilíndrico cuja geometria, tanto em termos de diâmetro quanto de altura, é definida com base nas características das amostras a serem tratadas (Sousa *et al.*, 2009).

No processo de deposição por plasma com gaiola catódica, utiliza-se a técnica de pulverização catódica reativa, com plasma convencional. Durante esse processo, as amostras são isoladas eletricamente, sendo colocadas sobre um substrato cerâmico de alumina. Uma fonte de tensão contínua é aplicada para gerar uma diferença de potencial que afeta exclusivamente a gaiola catódica, eliminando as limitações típicas dos plasmas de corrente contínua convencionais (Sousa *et al.*, 2009). Para ilustrar melhor esse processo, a Figura 2 a seguir apresenta um corte esquemático de um reator de nitretação a plasma com gaiola catódica.

Figura 2 - Corte de um Reator de Nitretação Iônica com a Gaiola Catódica.



Fonte: Sousa *et al.* (2009).

Dessa forma, o plasma gerado na gaiola catódica age principalmente na remoção de material das paredes dos furos, que reage com os gases presentes no plasma, sendo então depositado sobre o substrato colocado dentro da gaiola, o qual permanece em um potencial elétrico flutuante. As descargas de cátodo nos furos das paredes da gaiola resultam em densidades de íons superiores às de descargas convencionais, devido à maior densidade do plasma dentro dos furos, o que provoca a ejeção de uma quantidade significativa de íons das paredes (Silva *et al.*, 2017).

Por isso, podem ser destacadas as vantagens da técnica CCPD (Deposição Assistida por Plasma Quimicamente) como sua alta uniformidade, tridimensionalidade e alta taxa de deposição. Tais benefícios são viabilizados pela alta densidade de íons e moléculas presentes no plasma. Além disso, essa técnica permite a deposição de filmes em condições de maior pressão, temperaturas mais baixas e tempos de tratamento mais curtos quando comparada aos tratamentos convencionais de nitretação (Sousa *et al.*, 2015).

4.5 TRATAMENTO DUPLEX

O tratamento duplex é um processo que integra duas técnicas: a nitretação a plasma e a deposição de um revestimento fino, frequentemente composto por nitreto de titânio (TiN), de cromo (CrN), entre outros. Esse tratamento ocorre em duas fases: inicialmente, a nitretação a plasma, que incrementa a dureza da superfície do material;

posteriormente, a deposição do revestimento de TiN, que oferece maior resistência ao desgaste e melhora a estabilidade térmica do componente (Medeiros, 2022).

Esse processo é amplamente utilizado na engenharia de superfícies, com o objetivo de otimizar as propriedades tribológicas dos materiais, como estabilidade térmica e redução de atrito. A nitretação inicial aumenta a capacidade do substrato de suportar cargas. Como resultado, obtém-se um desempenho superior em termos de resistência ao desgaste e estabilidade mecânica (Serra, 2020).

O conceito de "tratamento duplex" refere-se à combinação da nitretação a plasma com a deposição de um filme fino, sendo uma solução eficiente para melhorar as propriedades tribológicas de aços. Esse processo tem sido aplicado, especialmente, em aços ferramenta, como os usados na fabricação de moldes e matrizes. A nitretação prévia assegura uma melhor adesão do revestimento ao substrato, o que resulta em um desempenho aprimorado em termos de resistência ao desgaste, estabilidade térmica e redução do atrito (Medeiros, 2022; Serra *et al.*, 2020).

Dentro do contexto do tratamento duplex, existem outras abordagens, como o tratamento duplex invertido e o tratamento duplex simultâneo. O tratamento duplex invertido é caracterizado pela inversão das etapas tradicionais: primeiro, realiza-se a deposição do revestimento, seguida pela nitretação a plasma. Essa abordagem pode ser aplicada quando se deseja modificar a superfície do material sem comprometer a aderência do revestimento ou suas propriedades mecânicas, sendo útil, por exemplo, em materiais que exigem maior resistência ao desgaste logo após a aplicação do revestimento (Serra, 2020).

Por outro lado, o tratamento duplex simultâneo envolve a execução das duas etapas de maneira quase simultânea, onde a nitretação a plasma e a deposição do revestimento ocorrem no mesmo ciclo de processamento. Esse processo visa otimizar a eficiência, reduzindo o tempo total de tratamento e maximizando a aderência do revestimento ao substrato, ao mesmo tempo em que melhora as propriedades tribológicas e térmicas do componente. O tratamento duplex simultâneo tem se mostrado vantajoso em aplicações industriais que exigem alta produtividade e desempenho superior dos materiais tratados (Medeiros, 2022; Serra *et al.*, 2020).

4.6 AS MEDIDAS DE RUGOSIDADE

A rugosidade diz respeito às marcas geradas pela ação da ferramenta sobre a superfície de uma peça. Trata-se de um fenômeno de curta duração, resultante do avanço da ferramenta, de suas imperfeições e das condições envolvidas no processo de remoção do material. Essa característica é composta por um conjunto de irregularidades, com espaçamentos uniformes ou não, que formam uma textura ou padrão particular na superfície. Independentemente do nível de precisão atingido, toda superfície apresenta imperfeições, as quais são reflexo do processo utilizado para sua fabricação (Amorim, 2002).

A medição da rugosidade é realizada, na maioria dos casos, por instrumentos que identificam as irregularidades por meio do deslocamento de um apalpador sobre a superfície, seguindo uma velocidade e uma extensão pré-definidas. O movimento gera um sinal elétrico que é amplificado e processado para fornecer informações sobre a textura superficial (Dagnall, 1998).

A norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) estabelece os principais parâmetros para a determinação da rugosidade. Para avaliá-la, considera quatro parâmetros principais: Ra (desvio aritmético médio), Rq (desvio médio quadrático), Rt (altura total do perfil) e Rz (altura máxima do perfil) (Espanhol, 2008), os quais abrangem características como amplitude (diferença entre pico e vale), altura máxima dos picos e profundidade dos vales dentro do perfil da superfície, conforme ilustrado na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Principais Parâmetros do Ensaio de Rugosidade.

Símbolo	Nome	Definição
Ra	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rq	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rt	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
Rz	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.

Fonte: Adaptada de Machado et al. (2011).

5 METODOLOGIA

5.1 MATERIAIS

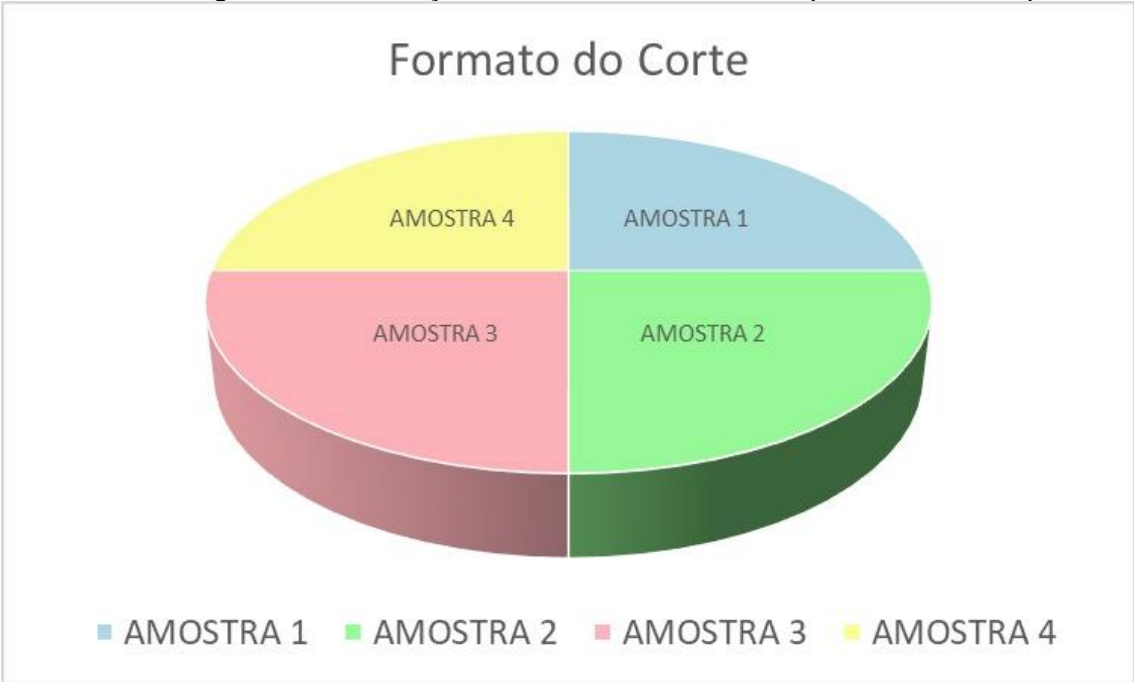
No contexto desta pesquisa, um tarugo foi cortado em 4 discos e cada disco dividido em 4 partes, totalizando 16 amostras do material AISI 1045, cuja composição química está descrita na Tabela 3. Essas amostras foram cortadas em formato de setores circulares, representados pela Figura 3, com dimensões de 10 mm de espessura, esse processo foi realizado por uma cortadeira metalográfica com resfriamento a óleo.

Tabela 3: Composição química do AISI 1045 (% em peso).

Elemento	Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
Concentração	0,43% até 0,50%	0,15% até 0,35%	0,30% até 0,60%	Máximo 0,03%	Máximo 0,05%

Fonte: Adaptado da ABNT NBR NM 87:2000.

Figura 3 – Ilustração do Processo de Corte (diâmetro: 6 cm).



Fonte: Autoral (2025).

5.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste estudo, as amostras foram preparadas através de um processo de lixamento e polimento realizado no Laboratório de Metalografia e Cerâmica do IFPI. O objetivo foi remover quaisquer imperfeições geradas durante as etapas preliminares de corte. O lixamento foi conduzido utilizando lixas d'água abrasivas com granulometrias progressivas de 220, 360, 600 e 1200, alterando-se a direção em 90° a cada troca de lixa, até que os riscos da etapa anterior fossem completamente eliminados. Em seguida, as amostras passaram por polimento com feltro e alumina.

5.3 EQUIPAMENTO PARA A NITRETAÇÃO

Os tratamentos foram conduzidos no reator de plasma, localizado no Laboratório de Tratamento de Materiais por Plasma (LabPlasma), da Universidade Federal do Piauí (UFPI). Para isso, foi utilizada uma fonte de tensão contínua. O reator, mostrado na Figura 4, é composto por uma câmara de vácuo fabricada em aço inoxidável, com diâmetro de 30 cm e altura de 40 cm.

Figura 4 - Reator de Tratamento a Plasma do LabPlasma – UFPI.



Fonte: Autoria Própria (2025).

5.4 NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS

A nomenclatura seguinte foi adotada para cada um dos quatro setores analisados:

Tabela 4: Nomenclatura e Caracterização das Amostras.

Código	Processo	Temperatura (°C)	Observações
SA350	Duplex Simultâneo	350	Sem Alumina
SA400	Duplex Simultâneo	400	Sem Alumina
DPNC350	Deposição com Gaiola de Titânio Seguida por Nitretação (Processo Invertido)	350	Com Alumina
DPNC400	Deposição com Gaiola de Titânio Seguida por Nitretação (Processo Invertido)	400	Com Alumina

Fonte: Autoral (2025).

5.5 PROCESSO DE NITRETAÇÃO E TRATAMENTO DUPLEX

O processo de *pré-sputtering* foi realizado a uma temperatura constante de 300°C durante 60 minutos, em uma atmosfera contendo 50% de argônio e 50% de hidrogênio, com uma pressão de $3,5 \times 10^2$ Pa. Essas condições foram mantidas para todas as amostras.

Após o término do processo de *pré-sputtering*, iniciou-se o segundo estágio, que consistiu na introdução controlada da mistura de gases e no ajuste da pressão de operação. A Tabela 5 a seguir apresenta os parâmetros adotados na nitretação.

Tabela 5: Parâmetros Utilizados na Etapa de Nitretação.

Processo	Mistura	Temperatura	Pressão	Tempo
Nitretação convencional	75% H2 e 25% N2	350 °C	2,1 x 10 ² Pa	4 Horas
		400 °C		

Fonte: Autoria própria (2025).

A nitretação convencional foi realizada em duas temperaturas distintas, 350°C e 400°C, com o controle das temperaturas sendo feito por meio de um aumento progressivo da tensão elétrica até atingir os valores desejados.

O processo de tratamento duplex invertido consiste em duas fases distintas. A primeira fase, foi realizada a deposição por meio da utilização técnica de gaiola catódica, com uma gaiola de titânio. Na segunda fase, chamada apenas de nitretação foi realizada de acordo com as condições previamente descritas. A Tabela 6 a seguir detalha os parâmetros do tratamento para a deposição com gaiola catódica.

Tabela 6: Parâmetros Utilizados nos Tratamentos Duplex Simultâneo e Duplex Invertido.

AMOSTRA	Processo	Mistura	Temperatura	Pressão	Tempo
SA350	Duplex Simultâneo	25% H ₂ e 75% N ₂	350 °C	2,1 x 10 ² Pa	4 Horas
SA400	Duplex Simultâneo		400 °C		
DPNC350	Deposição com Gaiola de Titânio Seguida por Nitretação		350 °C		
DPNC400	Deposição com Gaiola de Titânio Seguida por Nitretação		400 °C		

Fonte: Autoria própria (2025).

5.6 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Como parte da caracterização das amostras, foi realizada uma análise microscópica para melhor identificar e compreender as microestruturas formadas. Esse estudo foi conduzido no Instituto Federal do Piauí (IFPI), utilizando um microscópio óptico com ampliações de 100x e 200x após um ataque químico com uma solução de Nital 5%. O objetivo dessa etapa foi identificar a formação das camadas.

5.7 ENSAIO DE MICRODUREZA

As medições de microdureza na escala Vickers foram realizadas com o microdurômetro INSIZE, modelo ISH-TDV 1000, localizado no Laboratório de Metalografia da Universidade Federal do Piauí (UFPI), no departamento de Engenharia Mecânica. O ensaio de microdureza foi conduzido de acordo com a norma ABNT/ISO 6507-1:2008. Esse método emprega um equipamento devidamente calibrado, equipado com um penetrador de diamante em formato de pirâmide de base quadrada.

Durante o processo de medição, foi feito um perfil com 5 medidas em cada peça seguindo o sentido da borda para o núcleo, com a média calculada a partir dos resultados, utilizando uma carga de 50 kgf e um tempo de indentação de 15 segundos. Assim, o penetrador é pressionado contra a superfície da amostra. Após essa etapa, as diagonais da marca deixada na superfície são medidas para determinar a área da impressão, e, ao dividir a força aplicada por essa área, obtém-se o valor da microdureza Vickers.

Figura 5 - Microdurômetro Insize ISH-TDV 1000.



Fonte: Autoria Própria (2025).

5.8 ENSAIO DE RUGOSIDADE

A avaliação da rugosidade superficial das amostras foi realizada após o tratamento das superfícies. As medições seguiram os critérios estabelecidos pela norma ASTM D4417:2014 com 5 medidas em cada peça utilizando o rugosímetro digital portátil TR-210 – Precision, que possui uma precisão de $1\mu\text{m}$. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Materiais do Instituto Federal do Piauí, no departamento de pós-graduação em Engenharia de Materiais.

Os valores obtidos correspondem à rugosidade média (R_a) das superfícies analisadas. O parâmetro R_a representa a média das variações de altura entre os picos e vales da superfície do material nos pontos avaliados. Já o parâmetro R_q , ou rugosidade quadrática média, fornece uma medida estatística da dispersão dessas

variações, sendo mais sensível a picos e vales extremos, o que pode influenciar diretamente na aderência do revestimento. O monitoramento da rugosidade superficial tem como objetivo garantir a aderência mecânica do filme ao substrato, além de analisar possíveis interferências das etapas do processo de deposição no acabamento final da superfície.

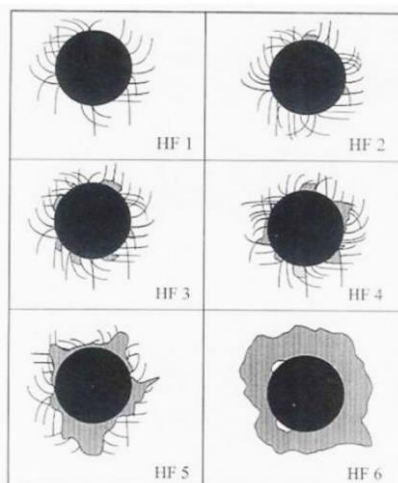
Além dos parâmetros R_a e R_q , outros índices de rugosidade, como R_z e R_t , também são utilizados para avaliar as características da superfície. O parâmetro R_z representa a altura média das cinco maiores irregularidades dentro do comprimento de amostragem, sendo um indicativo da profundidade dos sulcos e da altura dos picos mais acentuados. Já o parâmetro R_t corresponde à distância vertical entre o ponto mais alto e o mais baixo da superfície dentro do mesmo comprimento avaliado, fornecendo uma medida do desnível máximo presente.

5.9 ENSAIO DE ADESÃO ROCKWELL C

A verificação da aderência das camadas depositadas foi conduzida por meio do teste de adesão Daimler-Benz VDI Rockwell C, seguindo as diretrizes da norma VDI 3198. Para a realização do ensaio, foi empregado um durômetro equipado com uma ponta cônica de diamante, sendo utilizado especificamente o modelo ISH-TDV 1000 e uma carga de 50 kgf, localizado no Laboratório de Metalografia da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

Esse método de teste baseia-se na aplicação de uma carga controlada sobre a superfície do material revestido, utilizando um penetrador de Rockwell C, com o objetivo de avaliar a integridade da adesão entre o revestimento e o substrato. A análise dos danos resultantes da indentação permite classificar a aderência da camada conforme os critérios estabelecidos pela norma.

Figura 6 - Referência para Ensaio de Adesão Rocwell C.



Fonte: VDI 3198, 1991.

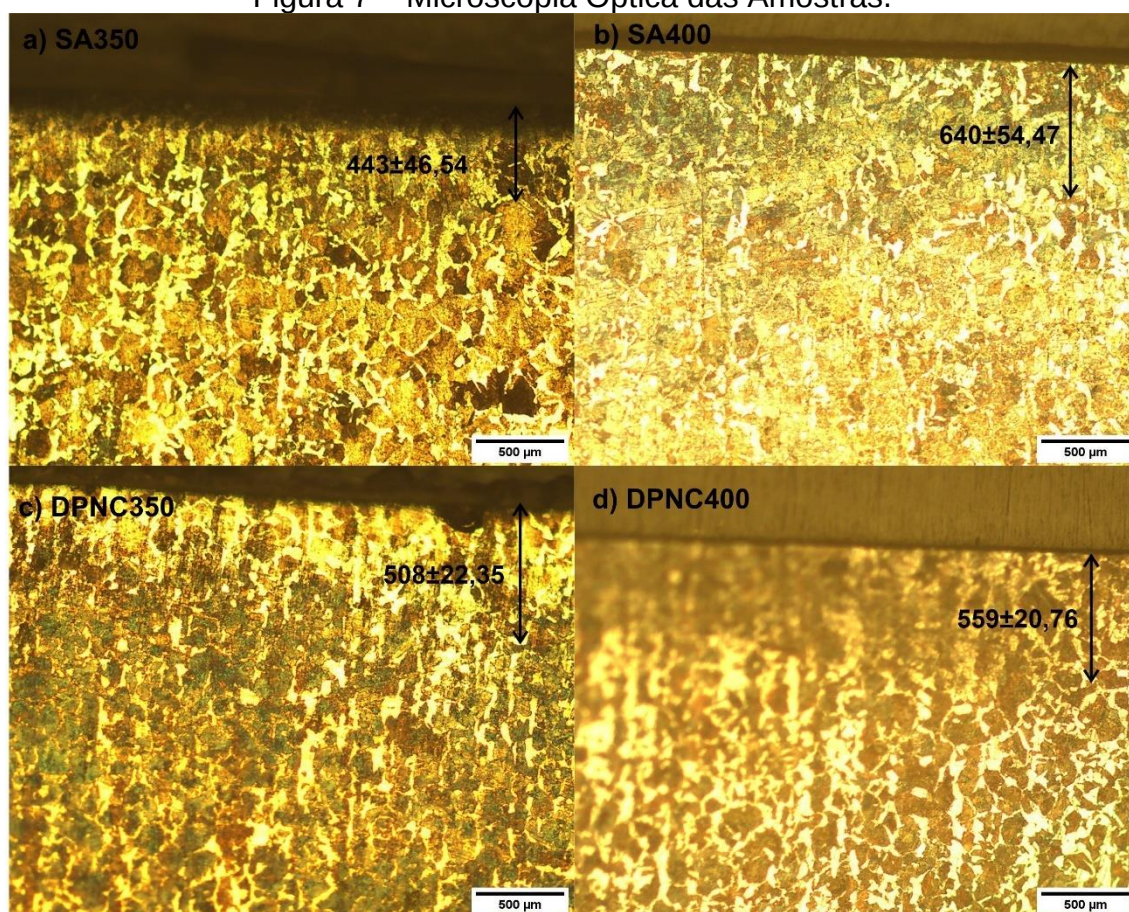
Os revestimentos que apresentam maior aderência, as classificações HF1, HF2, HF3 e HF4, conforme ilustrado na Figura 6, são capazes de resistir às cargas aplicadas, sendo, portanto, considerados adequados. Em contrapartida, as classificações HF5 e HF6 indicam uma adesão insuficiente entre o filme e o substrato, resultando na formação de microfissuras, tornando-os inaceitáveis. Esse método é utilizado para análises comparativas e paramétricas, sendo aplicável tanto em pesquisas acadêmicas quanto no setor industrial (VIDAKIS *et al.*, 2003).

6 RESULTADOS

6.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

A análise da seção transversal das amostras, realizada por microscopia óptica com ampliações de 100x na Figura 7, demonstrou que todos os tratamentos resultaram na formação de uma camada superficial uniforme.

Figura 7 – Microscopia Óptica das Amostras.



Fonte: Autoria Própria (2025).

A menor espessura da camada nas amostras SA350 e DPNC350 pode ser atribuída à menor difusão e recombinação de íons devido à temperatura mais baixa. No entanto, o tratamento foi eficiente para formar uma camada uniforme, que se espera ser rico em Ti e com dureza superior ao material de base, assemelhando-se ao que foi descrito por Medeiros Filho (2023).

Comparativamente, as amostras DPNC apresentaram maior uniformidade no processo, sugerindo que esse tratamento promove um controle mais homogêneo da camada formada. Esse comportamento indica que o processo DPNC pode oferecer um melhor controle na formação da camada, resultando em uma distribuição mais homogênea do revestimento.

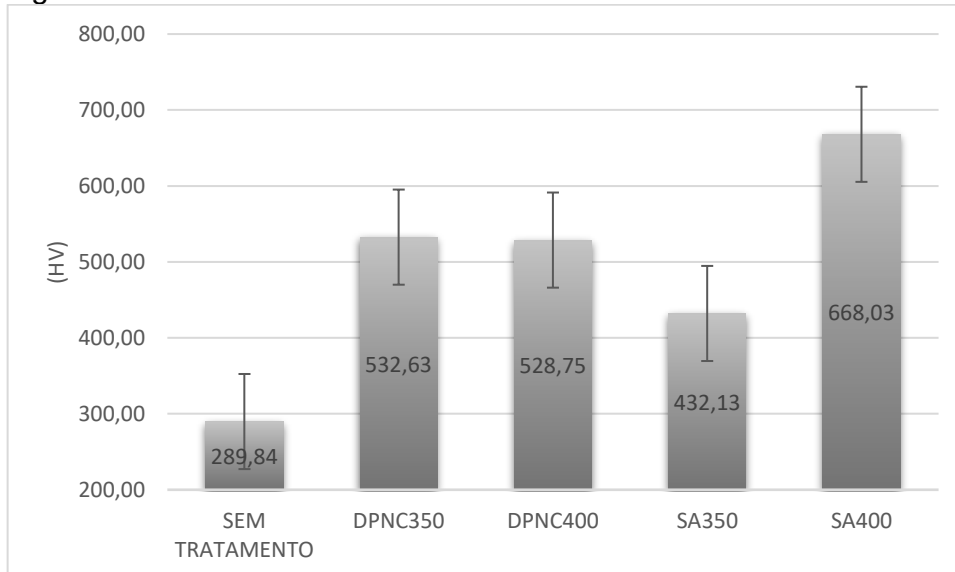
Além disso, observou-se que o crescimento da camada foi diretamente influenciado pela temperatura, tanto nas amostras SA quanto nas DPNC. Essa tendência reforça o que foi descrito por Monção (2022) e Medeiros Filho (2023), que destacam que temperaturas mais elevadas favorecem o aumento da espessura da

camada devido à intensificação da difusão dos elementos. No entanto, a uniformidade parece estar mais relacionada ao tipo de processo do que à temperatura isoladamente.

6.2 ENSAIO DE MICRODUREZA

Os resultados do ensaio de microdureza são apresentados na Figura 8 abaixo. Ao analisar o gráfico de microdureza apresentado, observa-se um aumento significativo na microdureza Vickers das quatro amostras em comparação com a condição inicial, que não passou por tratamento. A amostra sem tratamento apresentou um valor de 289,84 HV. Dentre as amostras analisadas, a que obteve a maior dureza foi a SA400, atingindo 668,03 HV. Esse valor representa um aumento aproximado de 131% em relação à amostra sem tratamento.

Figura 8 - Gráfico de Valores Médios de Microdureza das Amostras.



Fonte: Autoria Própria (2025).

. As demais amostras, DPNC 350 e DPNC 400, apresentaram valores de microdureza de 532,63 HV e 528,74 HV, respectivamente. Ambos os valores são significativamente superiores ao da condição inicial, com aumentos de aproximadamente 84% e 82%. Por fim, a amostra SA350 obteve a menor dureza média dentre as tratadas, registrando 432,13 HV, o que representa um incremento de cerca de 49% em relação à condição inicial.

Esses resultados confirmam as expectativas para esse tipo de tratamento de nitretação em relação à microdureza das amostras. O estudo de Serra (2020) aponta que o aumento da dureza superficial das amostras tratadas apresenta uma correlação direta com a elevação da temperatura do tratamento.

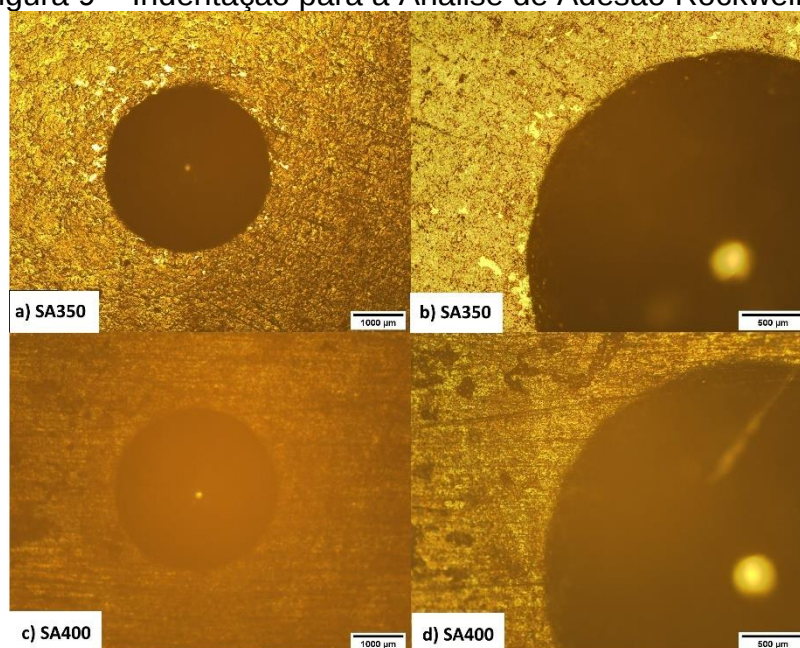
Além disso, o trabalho de Medeiros Filho (2023) explica que esse aumento pode estar relacionado à maior concentração de fases endurecidas formadas por nitretos e ferro, especialmente em temperaturas mais elevadas. Isso justifica os valores observados na faixa de 400°C, onde a formação dessas fases é favorecida, resultando em um acréscimo significativo na dureza das amostras tratadas.

6.3 ENSAIO DE ADESÃO ROCKWELL C

O teste de indentação Rockwell-C foi realizado para avaliar a aderência dos filmes formados apenas nas amostras SA350 e SA400, ambas revestidas com TiN. As imagens apresentadas na Figura 9 mostram a superfície dessas amostras após o ensaio estático com carga de 150 kgf.

A análise das indentações, comparada aos padrões estabelecidos pela norma VDI 3824, não revelou danos significativos na região próxima às circunferências das marcas de indentação. Isso indica que a adesão das camadas ao substrato é satisfatória.

Figura 9 – Indentação para a Análise de Adesão Rockwell C.



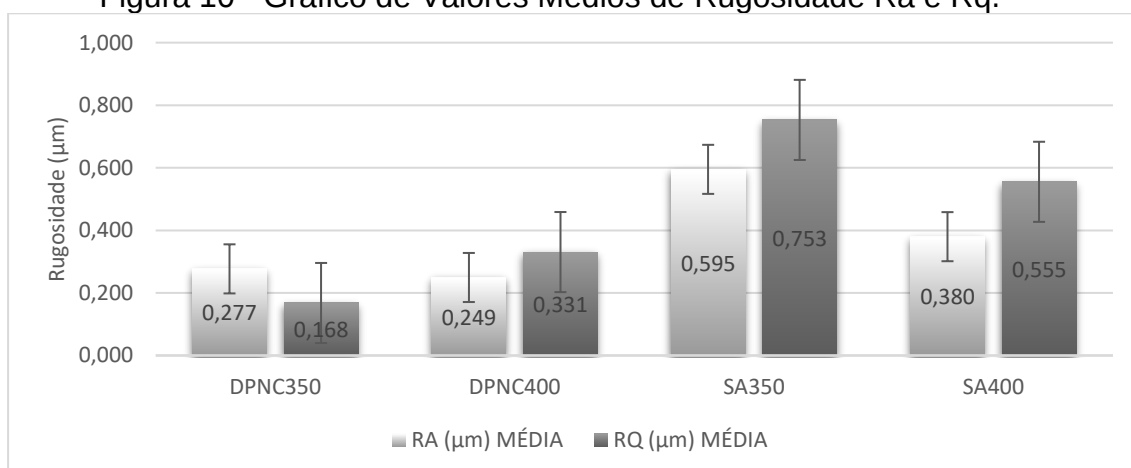
Fonte: Autoria Própria (2025).

Além disso, segundo a norma VDI 3198, as amostras foram classificadas com aspectos de adesão HF 1, apresentando falhas dentro dos limites aceitáveis para esse grupo. Dessa forma, pode-se concluir que a aderência dos filmes nos substratos avaliados é adequada para aplicações que requerem boa estabilidade do revestimento.

6.4 ENSAIO DE RUGOSIDADE

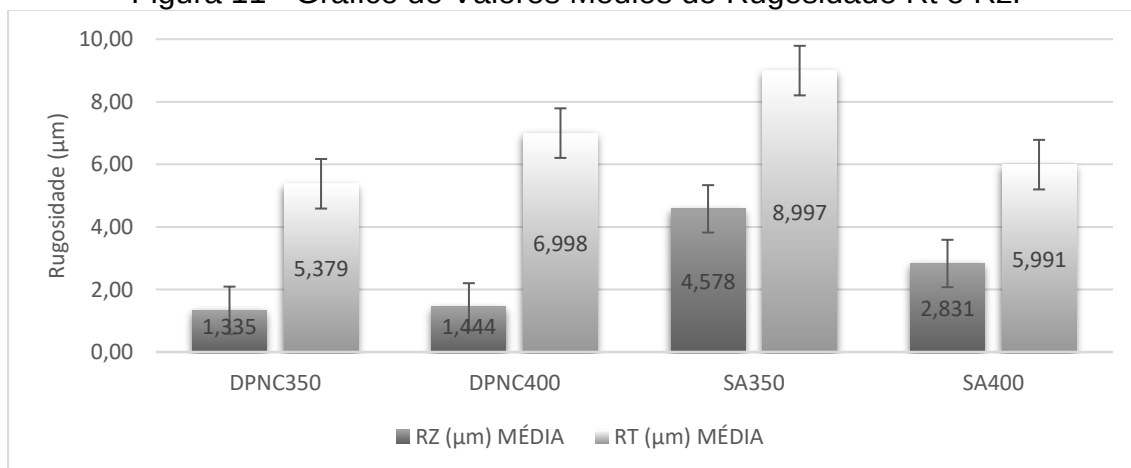
Os resultados do ensaio de rugosidade são apresentados na Figura 10 abaixo. Ao analisar o gráfico apresentado, observa-se que há uma diferença significativa nos dois grupos de amostras, indicando que os tratamentos realizados podem influenciar diretamente na rugosidade superficial.

Figura 10 - Gráfico de Valores Médios de Rugosidade Ra e Rq.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 11 - Gráfico de Valores Médios de Rugosidade Rt e Rz.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Como o primeiro parâmetro comparado, a média de rugosidade das amostras partiu de 0,249 μm até 0,595 μm , sendo a amostra DPNC400 com menor valor, apresentado uma superfície mais uniforme. Contrário a isso, a amostra SA350 apresentou o maior valor de R_a , sugerindo uma superfície menos uniforme. As amostras DPNC350 e SA400 apresentaram valores intermediários, mas apresentando a tendência de que o tratamento de nitretação seguido por deposição promove superfícies menos rugosas em comparação ao tratamento sem alumina.

Para o segundo parâmetro, a altura média também apresentou maior uniformidade para o tratamento de nitretação seguido por deposição. A amostra SA350 apresentou o maior valor de R_z , com 4,578 μm , e a DPNC350 o menor valor, com 1,335 μm . As demais Amostras, seguiram esse mesmo padrão, com a DPNC400 sendo mais uniforme do que a SA400, com 1,444 μm e 2,831 μm , respectivamente.

E por fim, o último parâmetro comparado foi a altura da superfície, com as amostras SA350 e DPNC400 liderando, com 8,997 μm e 6,998 μm , respectivamente. As amostras DPNC350 e SA400 apresentaram alturas com valores menores, a altura medida da primeira foi 5,379 μm e da segunda foi 5,991 μm .

Os impactos da nitretação a plasma na rugosidade da superfície foram amplamente abordados em diversos estudos. Mancosu (2005) destaca que esse tratamento altera significativamente os parâmetros de rugosidade, resultando em superfícies mais ásperas, com picos elevados e dispersos. Além disso, a técnica de deposição com gaiola catódica se destaca por proporcionar uma camada mais uniforme, como apontado por De Sousa *et al.* (2008).

Dessa forma, a menor rugosidade observada nas amostras submetidas ao tratamento de deposição seguido por nitretação pode ser atribuída à maior uniformidade da camada depositada, reforçando a eficácia dessa abordagem para a melhoria das propriedades superficiais dos materiais analisados. Resultados semelhantes foram relatados na literatura, onde se verificou que os processos de nitretação e outros tratamentos elevaram a rugosidade das amostras (Ribeiro *et al.*, 2008).

7 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo comparar os efeitos dos tratamentos duplex invertido e duplex simultâneo nas propriedades superficiais do aço AISI-1045. A

análise foi focada em parâmetros como microdureza, rugosidade superficial, adesão das camadas, e morfologia da superfície, para determinar qual dos tratamentos oferece as melhores propriedades para o aço.

A microscopia óptica revelou que todos os tratamentos resultaram na formação de filmes uniformes na superfície do aço, com as amostras DPNC apresentando maior homogeneidade na deposição do revestimento, sugerindo um controle mais preciso durante o processo. A espessura do filme foi influenciada pela temperatura de tratamento, sendo maior nas amostras tratadas a temperaturas mais elevadas. Contudo, o tratamento DPNC se destacou por oferecer uma camada mais uniforme e homogênea, o que pode ser considerado uma vantagem em termos de desempenho funcional.

Os resultados do ensaio de microdureza demonstraram um aumento significativo da dureza superficial em todas as amostras tratadas, em comparação com a condição inicial. A amostra SA400 obteve o maior valor de dureza, com 668,03 HV, um aumento de cerca de 131% em relação à amostra não tratada. Esse aumento foi esperado, dado que o aumento da dureza está diretamente relacionado à formação de fases endurecidas, como nitretos, formadas durante os tratamentos, especialmente a temperaturas mais elevadas. As amostras DPNC também apresentaram um aumento considerável na dureza, embora com valores ligeiramente inferiores à amostra SA400, confirmando a eficiência dos tratamentos duplex simultâneos.

No ensaio de adesão Rockwell C, as amostras tratadas com a adição do filme de titânio mostraram uma boa aderência das camadas, sem danos significativos, o que reforça a viabilidade dos tratamentos duplex e duplex simultâneo para aplicações que exigem estabilidade do revestimento.

Quanto à rugosidade superficial, a amostra DPNC400, em particular, apresentou a menor rugosidade, com valores mais homogêneos de Ra e Rq. A menor rugosidade observada nas amostras do tipo DPNC destaca o tratamento como um método eficaz para melhorar as propriedades superficiais seguindo esse critério.

Em conclusão, os tratamentos duplex invertido e duplex simultâneo foram eficazes na melhoria das propriedades investigadas e na estabilidade superficial do aço AISI-1045. O tratamento DPNC mostrou-se promissor devido à sua capacidade de fornecer filmes mais uniformes e reduzir a rugosidade superficial, enquanto o tratamento SA400, resultou na maior dureza. Ambos os tratamentos têm potencial para melhorar o desempenho do aço AISI-1045 em aplicações industriais, com o

tratamento duplex simultâneo oferecendo vantagens em termos de controle e uniformidade do filme formado.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 6507-1. **Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12527/abnt-nbriso6507-1-materiais-metalicos-ensaio-de-dureza-vickers-parte-1-metodo-de-ensaio>. Acesso em: 6 out. 2025.

ALMEIDA, P. R. Q. et al. **Plasma duplex treatment influence on the tribological properties of the UNS S32760 stainless steel**. Surface and Coatings Technology, v. 426, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897221009488>. Acesso em: 6 out. 2025.

ALVES JUNIOR, C.. **Nitretação a plasma: fundamentos e aplicações**. Natal: EDUFRN, 2001.

AMORIM, H. J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3791>. Acesso em: 6 out. 2025.

ASM handbook. v. 4: **Heat treating**. Materials Park: ASM International, 2013
ASM International. ASM Handbook, Volume 1: **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. ASM International, 2001.

ASM INTERNATIONAL. ASM handbook. v. 1: **Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys**. Materials Park: ASM International, 2001.

ASM INTERNATIONAL. ASM handbook: **Heat treating**. 10. ed. Materials Park, OH: ASM International, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87: aço carbono e ligados para construção mecânica – designação e composição química**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/20809/abnt-nbrnm87-aco-carbono-e-ligados-para-construcao-mecanica-designacao-e-composicao-quimica>. Acesso em: 6 out. 2025.

ASTM D4417. **Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2014. Disponível em: <https://store.astm.org/d4417-21.html>. Acesso em: 6 out. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard specification for steel bars, carbon, merchant quality, M-grades.** ASTM A576/A576M-17. 2021. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/673710994/ASTM-A576-17>. Acesso em: 6 out. 2025.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** John Wiley & Sons, 2016.

CAVALCANTE, J. A., SANTOS, A. L., & BATALHA, G. F. **Nitretação a plasma de aços de ferramentas.** Revista Brasileira de Engenharia de Materiais, 2019.

CHEN, J.; ZHU, H.; LI, Y.; WANG, W.; WANG, L. **Effect of low-temperature plasma nitriding on the microstructure, hardness, and wear resistance of AISI 304 stainless steel.** Journal of Materials Science, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492824020439>. Acesso em: 6 out. 2025.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** São Paulo: ABM, 2008.

CUNHA, C. P.; ALMEIDA, L. H. B.; SILVA, F. S.; MIRANDA, T. M. **Estudo da resistência à corrosão em aço 1045 revestido com ligas de alumínio.** Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2017.

DAGNALL, H. **Exploring surface texture.** 3. ed. England, Taylor Hobson Limited, 1998.

ESPANHOL, Victor. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco.** 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/14374>. Acesso em: 6 out. 2025.

FEITOR, M. C. et al. **Application of nitriding and duplex treatment on steel drills-HSS.** Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), v. 7, n. 4, p. 11699-11708, abr. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/7b5e7c17-d910-412f-8a30-f526a1bca670>. Acesso em: 6 out. 2025.

FERNÁNDEZ-ABIA, A.; PUNEET, R.; GOPAL, V. **Influence of surface roughness on tool wear.** Wear, 2020.

FERREIRA, V. F. **Fabricação de ferramentas de corte a partir de aços carbono.** Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P. **Nitretação gasosa em alta temperatura de aços inoxidáveis.** Revista Matéria, v. 10, n. 4, p. 502-525, 2005. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001595799>. Acesso em: 6 out. 2025.

GAVRILJUK, V. G.; BERNIS, H. **High nitrogen steels.** Berlin: Springer-Verlag, 1999.

GERDAU. **Tipos de aço e sua classificação** – normas SAE/AISI/ABNT. Disponível em: <<https://voce.mais.gerdau.com.br/automotivo/tipos-de-aco-e-sua-classificacao-normas-saeaisiabnt>>. Acesso em: 6 out. 2025.

GOMES, R. Z.; MOURA NETO, C. KINA, H. Y. **Aços de alta resistência e baixa liga: desenvolvimento e perspectivas para a indústria brasileira**. Revista Escola de Minas, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/d919dffb-b888-491f-9696-9afcc5e05c22/content>. Acesso em: 6 out. 2025.

HAWRYLUK, M.; FERNANDEZ-ABIA, A.; PUNEET, R. **Performance of duplex treatment on forging tools**. Materials and Design, 2020.

KUMAR, S.; SINGH, J.; KUMAR, A.; SHARMA, A. **A review on plasma nitriding process**. Materials Today: Proceedings, 2020.

LIBÓRIO, M. S. **Environmental responsibility in manufacturing**. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), v. 7, n. 4, 2020.

LINS, V.S. e COTA, A.B. **Aços: propriedades, fabricação e aplicações**. 1.ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2010.

MARTINS, R. S.; MARQUES, P. V. **Influência do teor de carbono na microestrutura e propriedades mecânicas do aço**. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 2020.

MEDEIROS, E. L. L.. **Aplicação de diferentes configurações de deposição a plasma com gaiola catódica de titânio em substrato de aço inoxidável AISI 304**. 2022. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/2641>. Acesso em: 6 out. 2025.

MENG, X.; QIU, F.; HU, J.; ZHAO, L. **Effects of plasma nitriding on the corrosion resistance and mechanical properties of biomedical Ti-13Nb-13Zr alloy**. Surface and Coatings Technology, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492824001260>. Acesso em: 6 out. 2025.

PINEDO, C. E. **Nitretação por plasma de aços inoxidáveis**. Metalurgia & Materiais, v. 60, nº 543, Caderno Técnico – Editorial, p. 162-164, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289883420_Plasma_nitriding_of_stainless_steel. Acesso em: 6 out. 2025.

PINEDO, C. E. **Revestimento PVD e nitretação sob plasma aplicados em ferramentas para conformação e corte a frio**. Sede da ABM, São Paulo, 2011. Disponível em:

<https://www.heattech.com.br/trabalhos/2011%20-209o%20Moldes%20ABM.pdf>. Acesso em: 6 out. 2025.

PINEDO, C. E., “**Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros Parte II - Tratamento Superficial**”, In: 2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes - ABM, pp.293–301, São Paulo, set. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/8GXQzr5WqZ9wV3LVRbHqyWz/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 6 out. 2025.

PINEDO, C.; MAGNABOSCO, R. **Mecanismos de nitretação sob plasma do aço inoxidável martensítico AISI 420 nitretado a alta e baixa temperatura**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 12, p. 257-264, 2015. Disponível em: <https://tecnologiамmm.com.br/article/10.4322/2176-1523.0844/pdf/tmm-12-3-257.pdf>. Acesso em: 6 out. 2025.

RIBEIRO, K. J. B. **Nitretação em plasma com gaiola catódica: caracterização e avaliação do desempenho da camada nitretada em facas de corte**. 2007.

SAE International. SAE J403 - **Chemical Compositions of SAE Carbon Steels**, 2015. Disponível em: https://www.sae.org/standards/j403_201406-chemical-compositions-sae-carbon-steels. Acesso em: 6 out. 2025.

SANTOS, E. M.; KIECKOW, F.; CASARIN, J. J. **Avaliação do desgaste de brocas helicoidais de aço-rápido (HSS) modificadas superficialmente por nitretação a plasma**. Revista Eletrônica Extensão da URI, 2013. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/271/Cleiton%20Fischer_TCCFAB_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 6 out. 2025.

SERRA, P. L. C. **Application of nitriding and duplex treatment on steel drills-HSS**. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/7b5e7c17-d910-412f-8a30-f526a1bca670>. Acesso em: 6 out. 2025.

SERRA, P. L. C. et al. **A review of duplex treatment effect on high-speed steel tools**. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), 2020. Disponível em: <https://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42353339.pdf>. Acesso em: 6 out. 2025.

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, v. 25, n. 2, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Teresina, UFPI, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/8GXQzr5WqZ9wV3LVRbHqyWz/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 6 out. 2025.

SERRA, Petteson Linniker Carvalho et al. **Estudo de nitretação a plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, p. e-12772, 2020. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rmat/a/8GXQzr5WqZ9wV3LVRbHqyWz/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 6 out. 2025.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

SILVA, A. C. M. da. **Estudo da temperabilidade do aço SAE 1040**. ABM Week, Rio de Janeiro, RJ. 2682-2688, 21 ago. 2015. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/estudo-da-temperabilidade-do-aco-sae-1040>. Acesso em: 6 out. 2025.

Silva, R. B., Almeida, L. H., & Marques, F. P. **Influência do resfriamento na temperabilidade e na formação de trincas em aços temperáveis**. In Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2019.

SOUSA, R. R. M. **Competitiveness in manufacturing industries**. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), 2020.

SOUSA, R.R.M., ARAÚJO, F.O., GONTIJO, L.C., COSTA, J.A.P., ALVES, A. **Cathodic cage plasma nitriding (CCPN) of austenitic stainless steel (AISI 316): Influence of the different ratios of the (N₂/H₂) on the nitrided layers properties**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/CVYMMPFJd49JpHX7ktk5BQF/abstract/?lang=en>. Acesso em: 6 out. 2025.

SOUSA, R.R.M., DE ARAÚJO, F.O., RIBEIRO, K.J.B., et al, **"Uniformity of temperature in cathodic cage technique in nitriding of austenitic stainless"**, Surface Engineering, v. 24, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/174329408X326830>. Acesso em: 6 out. 2025.

SOUZA, A. S. **Aços Especiais: tipos, aplicações e propriedades**. Revista Eletrônica de Iniciação Científica, 2016.

SOUZA, J. M. C.; CRUZ, P. E. C.; MOURA NETO, C. B. **Influência do aço carbono nas propriedades de tanques para armazenamento de combustíveis**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, 2016.

SOUZA, Letícia et al. **Avaliação do aquecimento de amostras de aço imersas em plasma**. Matéria (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/YmymrRC9WkTM48qVsStT6fn/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 6 out. 2025.

SOUZA, M. S., & LEMOS, A. S. **Influência do operador na qualidade do tratamento térmico de têmpera**. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, 2016.

SOUZA, R. O., BOCCHI, J. T., & Vicente, F. B. **Nitretação a plasma em aço inoxidável austenítico AISI 304: efeitos nas propriedades mecânicas**. In Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2018. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/319241598_Nitretacao_por_plasma_de_aco_inoxidavel_AISI_304_estudo_da_influencia_da_atmosfera_de_tratamento_na_microestrutura_da_camada. Acesso em: 6 out. 2025.

TILLMANN, W.; DILDROP, M.; SPRUTE, T. **Influence of nitriding parameters on adhesion of coatings**. Surface and Coatings Technology, 2020.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

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, p. 481-485, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603003005>. Acesso em: 6 out. 2025.