



Deposição de Nitreto de Titânio em aço F138 por nitretação a plasma

Cleiton James Gomes^{1*}, Francisca de Fátima dos Anjos¹, Haroldo Reis Alves de Macêdo¹

¹Laboratório de Materiais – LabMat, PPGEM, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – Campus Teresina Central, Teresina, PI, Brasil.

RESUMO

Introdução. O aço inoxidável ASTM F138 é utilizado em implantes devido à combinação das suas propriedades mecânicas e de biocompatibilidade. **Objetivos.** Para aprimorar essas propriedades, são necessárias modificações superficiais. Uma forma viável de modificação é a nitretação por plasma em gaiola catódica de titânio, que permite a deposição de uma camada de nitreto de titânio para melhorar as propriedades superficiais do material. **Metodologia.** Foram Investigados os efeitos da nitretação por plasma em amostras de aço ASTM F138 em diferentes condições de tempo e temperatura. As amostras de aço inoxidável ASTM F138 passaram por um processo de nitretação por plasma em um reator especial, envolvendo etapas de limpeza e tratamento com uma mistura de hidrogênio e nitrogênio em diferentes condições de temperatura e tempo. Posteriormente, essas amostras foram caracterizadas por várias técnicas, como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia Raman (RAMAN), Rugosidade e Microdureza. **Resultados e discussão.** O processo de nitretação por plasma permitiu a deposição de filmes de nitreto de titânio (TiN) sobre amostras de aço ASTM F138, variando de acordo com as combinações de tempo e temperatura. Houve um aumento significativo na microdureza Vickers das amostras tratadas, chegando a incrementos de até 120% em relação às amostras não tratadas. Além disso, as amostras tratadas apresentaram maior rugosidade em comparação com as não tratadas, variando conforme o tempo de tratamento. **Conclusão.** Esses resultados destacam a eficácia do processo de nitretação por plasma na modificação das propriedades superficiais do aço ASTM F138, aprimorando suas características mecânicas e de biocompatibilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Aço inoxidável. Gaiola Catódica. Nitreto de Titânio.

Deposition of Titanium Nitride on F138 steel by plasma nitriding

ABSTRACT

Introduction. ASTM F138 stainless steel is used in implants due to the combination of its mechanical and biocompatibility properties. **Objectives.** To improve these properties, surface modifications are permitted. A viable form of modification is plasma nitriding on a titanium cathode cage, which allows the deposition of a layer of titanium nitride to improve the surface properties of the material. **Methodology.** The effects of plasma nitriding on ASTM F138 steel samples under different time and temperature conditions were investigated. The ASTM F138 stainless steel samples underwent a plasma nitriding process in a special reactor, involving cleaning and treatment steps with a mixture of hydrogen and nitrogen at different temperature and time conditions. Subsequently, these samples were discovered by various techniques, such as Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), Raman

Correspondência dos Autores

^{1a}ORCID: [0009-0003-1823-9802](https://orcid.org/0009-0003-1823-9802). Email: cleitonclk@hotmail.com

^{1b}ORCID: [0000-0001-5586-3055](https://orcid.org/0000-0001-5586-3055). Email: fatimadosanjoss@gmail.com

^{1c}ORCID: [0000-0002-4898-3347](https://orcid.org/0000-0002-4898-3347). Email: haroldoram@ifpi.edu.br (Autor correspondente)

Artigo submetido a sistemas de verificação de similaridade

Submetido 09/06/2023 – Aceito 08/01/2024 – Publicado 01/03/2024

Spectroscopy (RAMAN), Roughness and Microhardness. **Results and discussion.** The plasma nitriding process allowed the deposition of titanium nitride (TiN) films on ASTM F138 steel samples, varying according to time and temperature combinations. There was a significant increase in the Vickers microhardness of the included samples, reaching increments of up to 120% in relation to untreated samples. Furthermore, the treated samples showed greater roughness compared to the untreated ones, varying according to the treatment time. **Conclusion.** These results highlight the effectiveness of the plasma nitriding process in modifying the surface properties of ASTM F138 steel, improving its mechanical and biocompatibility characteristics.

KEYWORDS: Stainless steel. Cathodic cage. Titanium Nitride.

1 APRESENTAÇÃO

A solicitação de materiais metálicos destinados a implantes tem apresentado uma tendência de aumento constante ao longo das últimas décadas. Esses materiais são categorizados como biomateriais devido ao seu papel essencial na substituição de estruturas anatômicas comprometidas, o que culmina em notáveis aprimoramentos na qualidade de vida dos indivíduos afetados (Pires, Bierhalz, Moraes, 2015). O metal empregado na fabricação de próteses deve satisfazer diversos critérios, uma vez que, não pode induzir respostas adversárias no sistema biológico, garantindo assim a compatibilidade com o organismo humano (Asri *et al.*, 2017). Os experimentos demonstram que a biocompatibilidade de um material decorre das propriedades inerentes à molhabilidade e rugosidade (Leite *et al.*, 2020). Notavelmente, essas propriedades estão relacionadas à camada superficial mais externa do material. Além disso, a interação na superfície desempenha um papel crucial na determinação da bioadesão, uma especificidade essencial que influencia a ligação na região.

Os materiais mais investigados para implantes incluem ligas metálicas produzidas em titânio, tântalo, vitalium, bem como aço inoxidável AISI, aço inoxidável ASTM F138 (Pandey; Awasthi; Saxena, 2020), incluindo as biocerâmicas (Silva; Vasconcellos; Casselli, 2016). Nesse contexto, os aços inoxidáveis são os materiais mais utilizados nesta aplicação pelo Sistema Único de Saúde, (SUS) do Brasil, devido à sua resistência mecânica e economicidade (Terada *et al.*, 2007). Apesar desses materiais já serem comercializados no mercado de biomateriais, questões relacionadas à biocompatibilidade e resistência mecânica conduzem a uma busca contínua para seu aprimoramento. Técnicas de tratamento de superfície por revestimento são apontadas como uma solução viável, possibilitando a melhoria das fases iniciais de formação do tecido ósseo (processo de biointegração), ao mesmo tempo em que ampliam a resistência à fratura (Ferreira *et al.*, 2023).

A técnica de nitretação iônica por plasma, empregando gaiola catódica de titânio, demonstra eficácia, pois resulta na modificação da superfície do biomaterial, promovendo aumento da rugosidade, resistência ao desgaste e à corrosão. Conforme Sousa *et al.* (2014), quando aplicada a aços inoxidáveis, essa técnica facilita a deposição das camadas de nitreto de titânio (TiN) e dióxido de titânio (TiO₂). Isso ocorre devido ao processo de *sputtering* que atua diretamente sobre a tela, promovendo a combinação entre os átomos do material da gaiola e o nitrogênio presente na atmosfera, os quais se condensam na superfície da amostra. Segundo Daudt *et al.* (2013), os filmes de TiN vêm sendo utilizados com bastante sucesso como revestimento de biomateriais. Neste estudo, foram depositados filmes de nitreto de titânio (TiN) sobre as superfícies de aços ASTM F138, com o objetivo de aprimorar suas propriedades superficiais. Foram conduzidas diversas combinações de tempo e temperatura na busca por uma melhor condição visando a produção de um filme espesso e uniforme.

2 METODOLOGIA

2.1 Nitretação por plasma

As amostras de aço inoxidável ASTM F138 foram obtidas através de doação realizada pela empresa Sandinox, que cedeu duas barras retangulares de 30 cm x 1,2 cm. A barra foi cortada em peças de 0,8 cm x 1,2 cm através de corte transversal realizada por cortadeira automática refrigerada a óleo. Após o corte as amostras passaram por procedimento padrão de metalografia e limpas em solução de álcool etílico, secas e armazenadas para uso posterior. Para o tratamento por plasma, as amostras foram submetidas a banho ultrassônico com solução de cetona durante 10 minutos e secas. A gaiola e o suporte utilizados foram lixadas e submetidas à banho ultrassônico durante 10 minutos em solução de 50 mL de HNO₃, 25 mL de HF e 425 mL de H₂O e limpas com cetona PA.

O processo de nitretação por plasma foi realizado utilizando um Reator de plasma alimentado por uma fonte de tensão contínua de 1500 V e 2 A, respectivamente. A câmara de vácuo possui o formato cilíndrico, com 30 cm de diâmetro e 40 cm de altura, composta por aço inoxidável austenítico com visor em borossilicato. A nitretação foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa ocorreu o processo de limpeza através da injeção de 60 sccm de argônio na câmara e sua posterior evacuação (duas repetições). O pré-tratamento ou pré *sputtering* foi realizado utilizando 30 sccm de H₂ a uma pressão de 1,3 mbar, à temperatura de 300°C por 30 minutos. A segunda etapa é o tratamento por plasma propriamente dito, foi realizando usando 80% H₂ e 20% N₂, com pressão constante de 1,3 mbar, e variações de temperatura e tempo conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros De Tratamento.

AMOSTRAS	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉
Temperatura (°C)	350	350	350	400	400	400	450	450	450
Tempo (h)	3	4	5	3	4	5	3	4	5

Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

2.2 Caracterização

2.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização da morfologia do filme obtido foi realizada por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo SHIMADZU ® SSX - 550 do Laboratório de Materiais - LabMat, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI, nos modos detector de elétrons secundários (SE) e detector de energia dispersiva (EDS). Utilizando corrente 2,5 A e voltagem de 15 kV.

2.2.2 Caracterização da espessura do revestimento

A amostra foi cortada transversalmente, lixada e polida para determinação da espessura de camada utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo SHIMADZU ® SSX - 550 do LabMat -IFPI.

2.2.3 Difração de Raios-X

As análises de difração de Raios-X (DRX) foram realizadas no LabMat - IFPI, utilizando o equipamento de Difração de Raios X da marca Panalitical®, modelo Empyrean com tubo de radiação CoK α ($\lambda=1,79$ Å). A varredura foi realizada entre 20° e 90° com passo de 0,01° e 0,3°/minuto por meio da geometria Bragg Bretano. As fases do difratograma foram identificadas com auxílio do software X'pert HighScore versão 2.2a.

2.2.4 Espectroscopia Raman

As análises de espectroscopia Raman foram realizadas no laboratório de física dos materiais a Universidade Federal do Piauí - FISMAT-UFPI, utilizando um aparelho da marca Bruker® e modelo SENTERRA, com linha de comprimento de onda 785 nm, potência de 50 mW e lente objetiva de 100X.

2.2.5 Microdureza Vickers

As análises de microdureza foram realizadas utilizando microdurômetro SHIMADZU® HMV do LabMat-IFPI. As medições dos foram realizadas de acordo com a norma ASTM E 92, aplicando nestes ensaios cargas constantes de 2,94N durante 15 segundos em cinco pontos.

2.2.6 Rugosidade

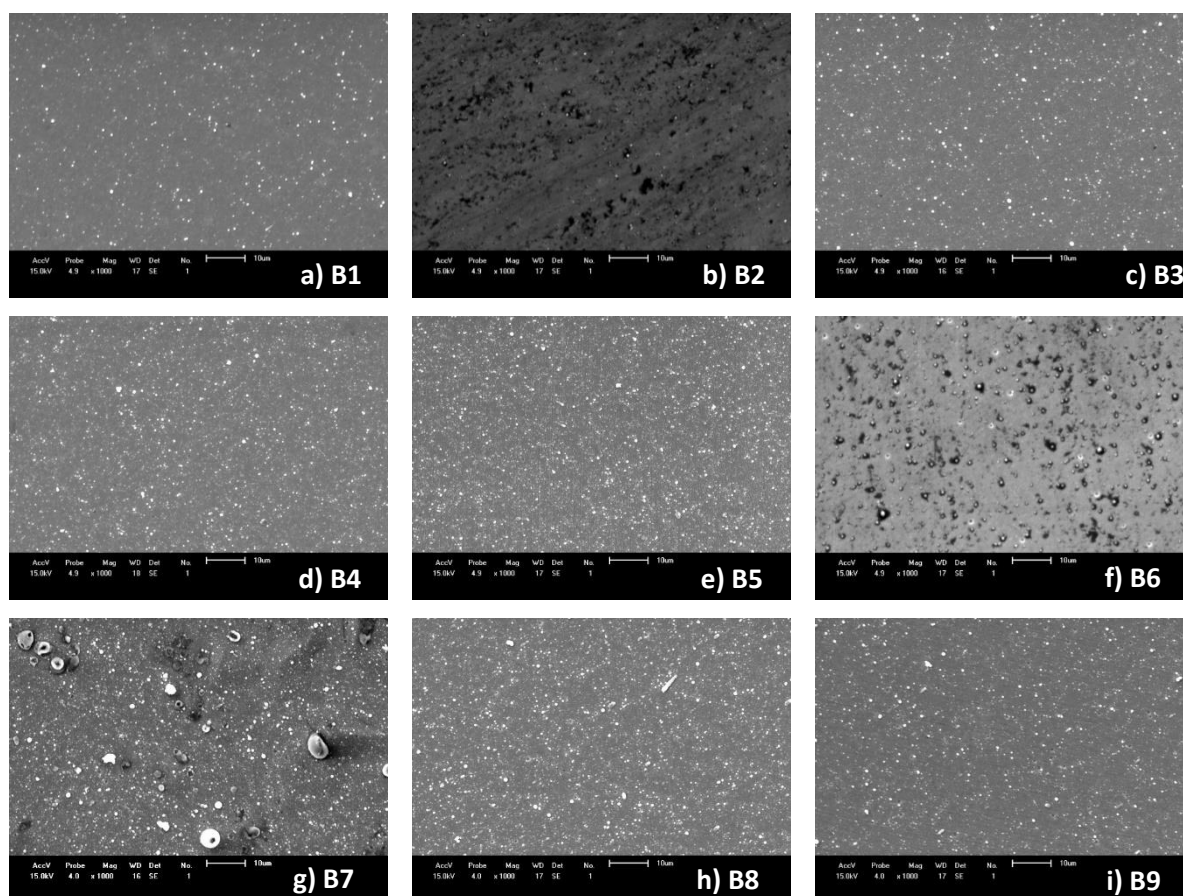
A rugosidade foi mensurada utilizando um rugosímetro da marca Time Group Inc. (modelo TA 630) do LabMat - IFPI. A verificação topografica foi executada em 7 pontos, com faixa de varredura de 2,5 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura 1, são apresentadas as micrografias obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostram a presença de um filme de nitreto de titânio (TiN) depositado em todas as condições de tratamento, o que é confirmado pelas análises subsequentes. Os filmes de nitreto de titânio (TiN) foram uniformes, com exceção das amostras B2 e B6, que exibiram porosidade superficial, e da amostra B7, na qual foram observadas partículas sobre a camada depositada. Essas irregularidades não comprometem a utilização do material modificado, uma vez que, em algumas aplicações, é necessário haver pontos de ancoragem para as células.

Figura 1: Micrografias das amostras nitretadas.

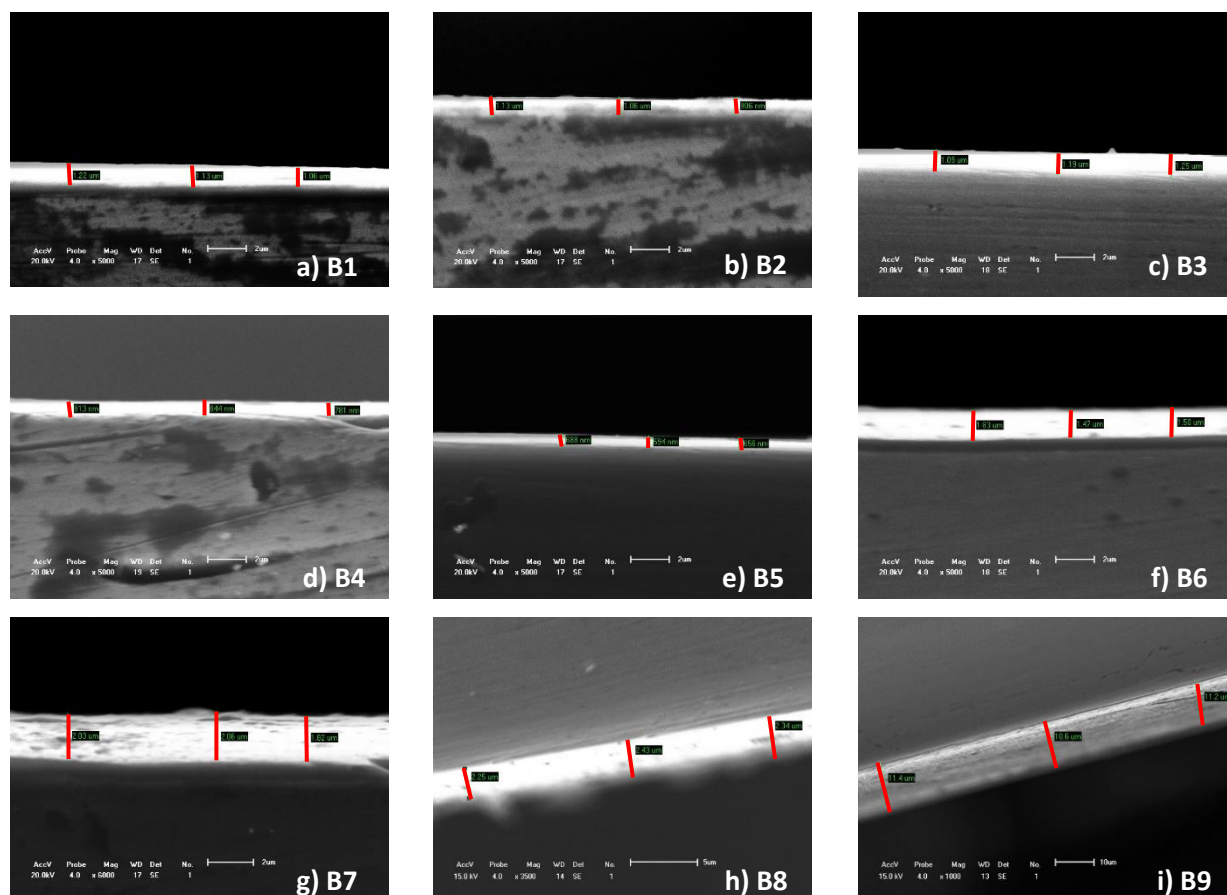


Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

3.2 Determinação da Espessura do Filme

As camadas de filmes de maior espessura foram obtidas por meio da aplicação de uma combinação de tempo e temperatura mais elevados, como evidenciado na Figura 2. Esta manifestação é sustentada por Alves *et al.* (2006), que delinea a interdependência entre o processo de nitretação, abrangendo a deposição, nucleação e formação do filme.

Figura 2: Micrografia do perfil das amostras mostrando a espessura da camada de TiN depositada por nitretação.



Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

Na Tabela 2, são apresentadas as espessuras médias das amostras em conformidade com a Figura 2. Foi verificado que a espessura do filme depositado varia em relação ao tempo e temperatura de tratamento. Para a temperatura de 450°C, constatou-se uma relação direta entre espessura da camada e o tempo de nitretação.

Tabela 2: Espessura média das camadas de TiN depositadas por nitretação.

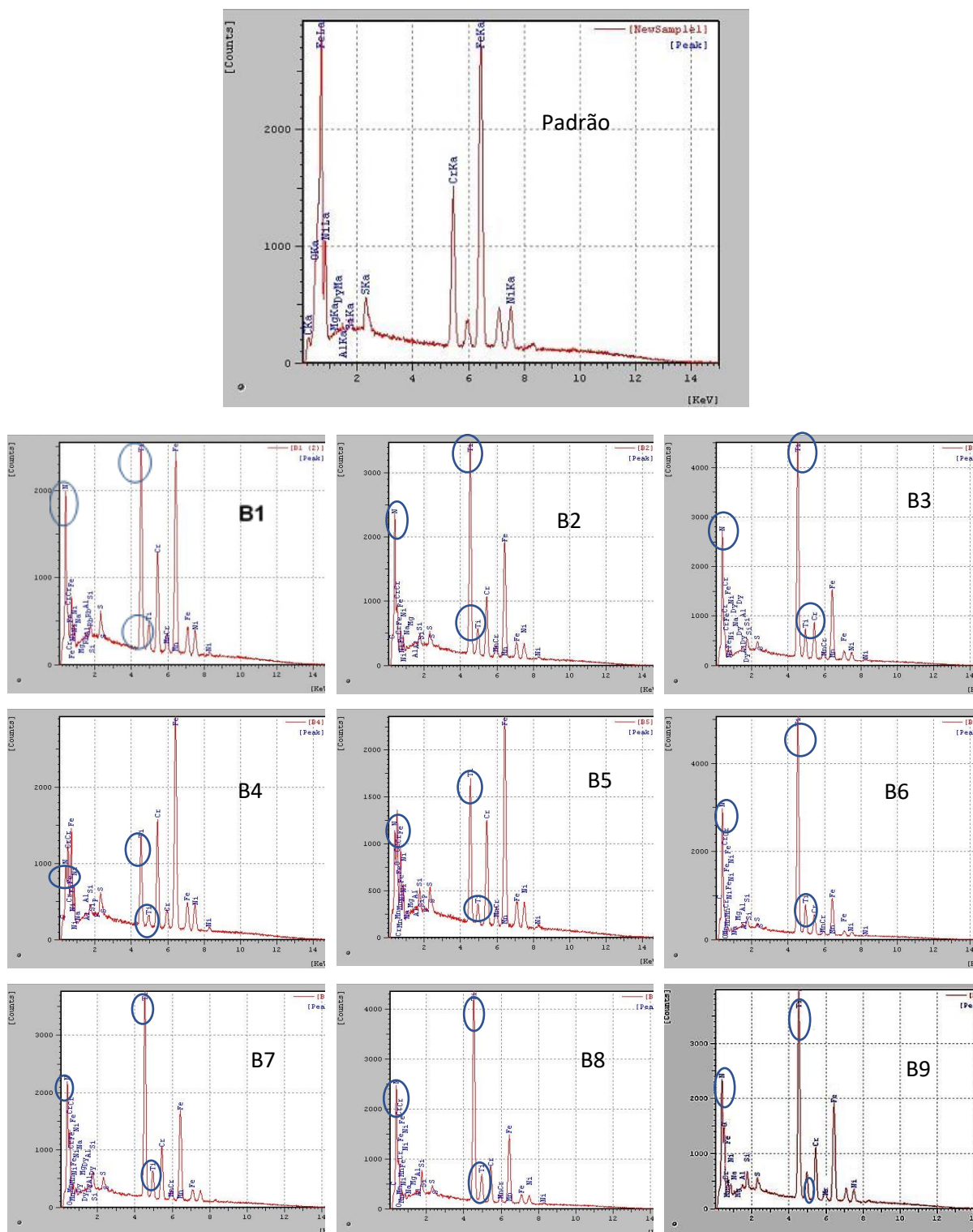
Amostra	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Espessura Média (μm)	1,20	1,03	1,17	0,812	0,646	1,53	1,97	2,34	3,85

Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

3.3 Espectroscopia de Dispersão de Raios X por Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS)

Através da análise dos gráficos de dispersão de energia (EDS) na Figura 3, a eficácia do processo de *sputtering* durante o tratamento de nitretação, evidenciada pela identificação de picos característicos de titânio e nitrogênio em todas as condições de tratamento.

Figura 3: Análise de EDS para amostra Padrão e amostras nitretadas.



Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

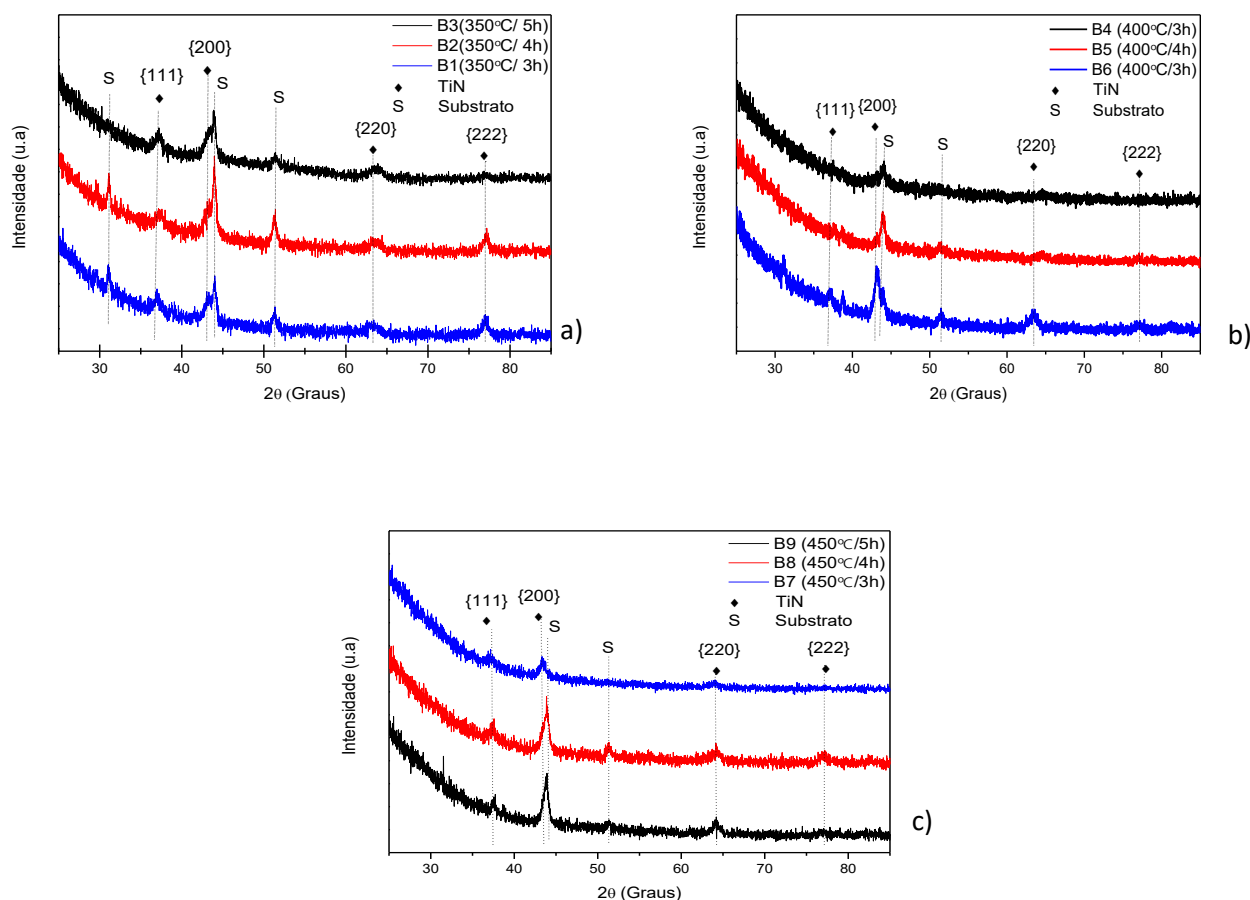
O aparecimento dos Picos de Ti e N nas condições B1, B2 e B3, indicam que houve o processo de deposição de nitreto de titânio (TiN) e o aumento da intensidade desses picos com o aumento da temperatura corrobora com as maiores medidas de espessura apresentadas na Figura 2 e Tabela 2. Em B4 e B5 observa-se picos de Ti e N com baixa intensidade em detrimento ao pico de Fe (substrato), este resultado indica uma baixa taxa de deposição de nitreto de titânio (TiN), resultando numa camada mais fina de TiN, conforme a Tabela 1, porém a amostra B6 apresenta uma elevação dos picos Ti e N, indicando aumento na taxa de deposição TiN, confirmado pela maior espessura do filme obtido.

Estes resultados sugerem que a taxa de deposição depende da temperatura de tratamento. Visto que para as amostras B7, B8 e B9, apresentaram maiores intensidades para os picos de Ti e N em detrimento ao pico de Fe (substrato), indicando uma elevada taxa de deposição de TiN, confirmado pela medição da camada apresentada na Tabela 1. Assim sugere-se que a deposição é influenciada pela temperatura de tratamento nos casos de tratamentos mais curtos e pela temperatura nos casos de tratamentos mais prolongados.

3.4 Análise por Difração de Raios X

Na figura 4, são apresentados os difratogramas das amostras nitretadas, de acordo com diferentes combinações de tempo e temperatura. As análises confirmaram a deposição de filme de nitreto de titânio na fase TiN.

Figura 4: Difratogramas das amostras nitretadas mostrando a fase TiN obtida por nitretação.



Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

As análises corroboram a deposição do filme de nitreto de titânio na fase TiN, confirmando os resultados obtidos por dispersão de energia (EDS). Esses resultados indicam uma menor deposição de titânio e nitrogênio, resultando uma menor espessura do filme depositado nas condições B4 e B5. A espessura reduzida dos filmes de nitreto de titânio (TiN) é evidenciada pela baixa intensidade dos picos associados aos planos cristalinos {111} e {222}. Nas condições de tratamento à temperatura de 450°C, observaram-se os planos característicos da fase TiN, consistentes com os resultados apresentados na Figura 2.

Os resultados obtidos corroboram com as observações de Iordanova *et al.* (2007). Ao analisar a cristalografia dos filmes de nitreto de titânio na fase TiN, eles destacaram um crescimento preferencial de núcleos com orientação cristalográficos nos planos {111} e {200}, paralelos à superfície do substrato. A formação do filme de nitreto de titânio, evidenciada nos difratogramas de raios X sendo também confirmada pelas análises de espectroscopia Raman.

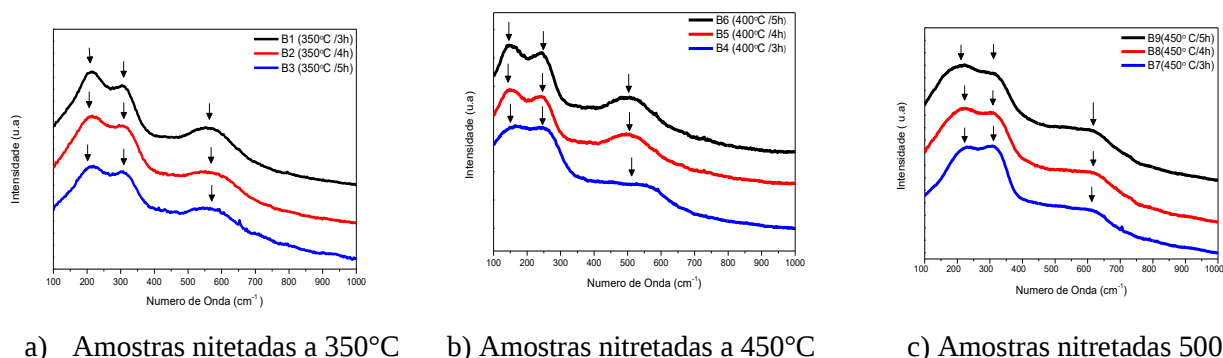
3.5 Análise por Espectroscopia Raman

Através da espectroscopia Raman (Figura 5) verificamos a presença de picos na faixa de 200 cm^{-1} , 300 cm^{-1} e 600 cm^{-1} característicos da formação filme TiN, corroborando com os resultados já apresentados para a formação da camada de TiN. Resultados semelhantes foram encontrados por Sousa *et al.* (2015). Os picos que ocorrem entre 170 cm^{-1} a 250 cm^{-1} estão relacionados com os modos transversais (TA) e longitudinais (LA) entre 250 cm^{-1} a 345 cm^{-1} , correspondendo a vibrações de Ti próximos das vacâncias de N, enquanto os picos entre 550 cm^{-1} a 600 cm^{-1} estão relacionados aos modos ópticos ligados as vibrações dos átomos de N ou vacâncias.

Os resultados para as amostras tratadas a 350°C (Figura 5a) em diferentes tempos de deposição, nota-se a presença de todos os picos das bandas transversais acústica (TA), longitudinais acústicas (LA), óptico transversal/óptico longitudinal (TO/LO) o que indica um filme com uma camada uniforme. A presença dos picos das bandas TA, LA, TO/LO continua evidente nas amostras B5 e B6 (Figura 5b), porém, na amostra B4 ocorreu diminuição significativa de todas as bandas, este fato corrobora com a espessura da camada apresentada na Tabela 1.

Na Figura 5c, o aumento da temperatura, culminou na diminuição dos picos relativos as bandas ópticas, este resultado está em conformidade com as pesquisas realizadas por Cheng *et al.* (2002), que cita as limitações dos filmes de TiN quando depositados em altas temperaturas. Os resultados obtidos mostram a diminuição dos modos ópticos de primeira ordem com o aumento da temperatura de tratamento das amostras, a dispersão dessa banda, segundo Vasconcelos *et al.* (2007) essa pode ser uma indicação qualitativa da diminuição do nitrogênio.

Figura 5: Espectroscopia Raman mostrando as bandas características da fase TiN depositada por nitretação a) nitretadas a 350°C, b) nitretadas a 450°C e c) nitretadas a 500°C.

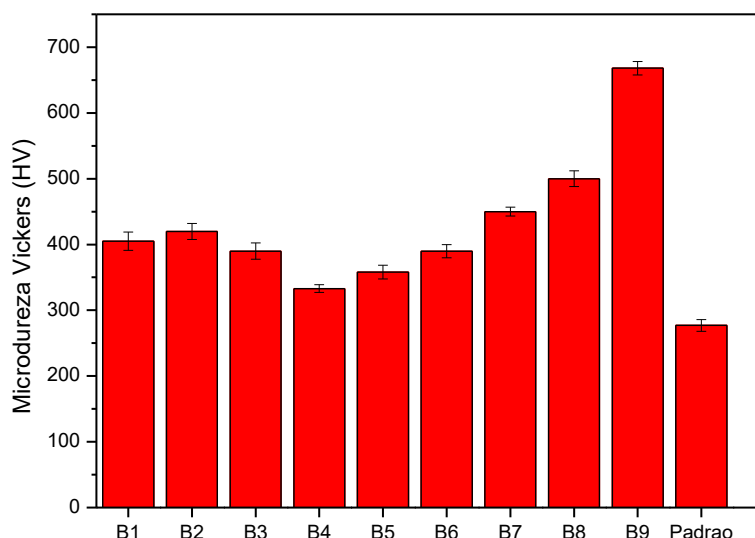


Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

3.6 Análise de Microdureza

Registou-se um incremento na microdureza Vickers das amostras tratadas, variando de 30% a 120% em relação à amostra padrão (não submetido a tratamento). Tal aumento substancial de dureza é propriedade intrínseca do filme de nitreto de titânio (TiN) depositado nas amostras, conforme descrito por Valero *et al.* (2005). Os Valores correspondentes de microdureza estão apresentados na Figura 6.

Figura 6: Valores médios de microdureza Vickers para as diferentes condições de tratamento



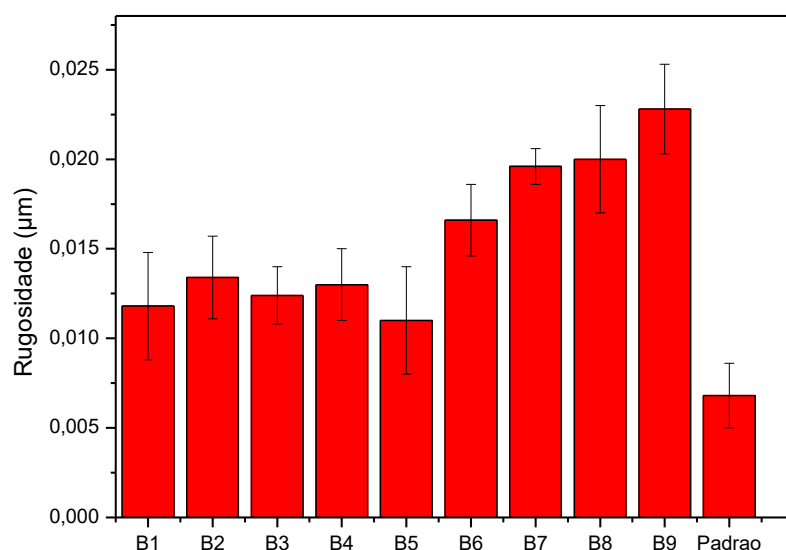
Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

Foi observado que as amostras submetidas ao tratamento a uma temperatura de 450°C apresentam um perfil de microdureza superficial mais acentuado. Destaca-se a amostra B9, tratada com uma combinação prolongada de tempo e temperatura de deposição, evidenciando a formação significativa do filme de nitreto de titânio (TiN). Essa observação é consistente com as investigações conduzidas por Sousa (2007), que destacaram uma dureza reduzida dos aços austeníticos. Contudo, quando tratados por plasma em temperaturas superiores a 450°C, observa-se um aumento notável dessa característica, atribuído à formação do filme de nitreto de titânio (TiN).

Conforme indicado por Sousa (2007), o aumento de dureza pode ser atribuído tanto ao incremento do teor de nitrogênio retido em solução sólida quanto à maior espessura da camada modificada pelo tratamento. Nos casos dos tratamentos realizados em temperaturas mais baixas, as camadas nitretadas resultantes apresentam espessuras menores, podendo eventualmente serem menores que a profundidade de endentação. Isso revela uma dureza superficial aparentemente menor. Além disso, como destacado por Borgioli *et al.* (2005), a rugosidade exerce influência sobre a dureza. Portanto, a seguir, apresentamos uma análise da rugosidade.

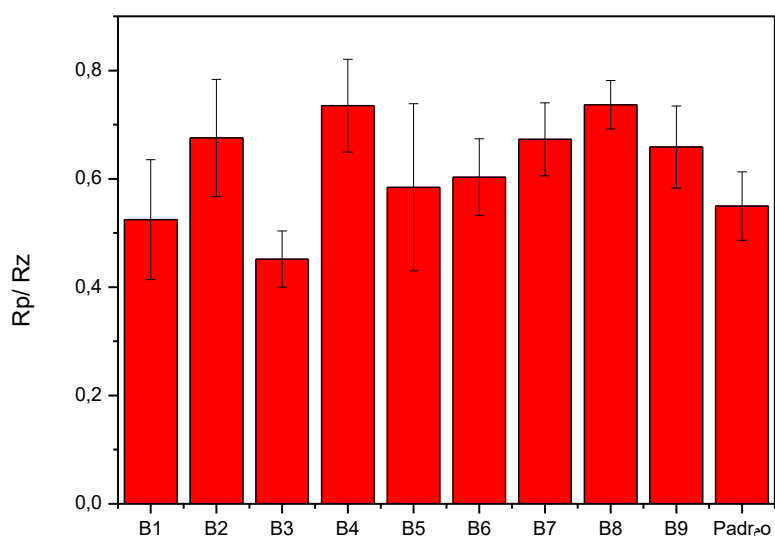
3.6 Rugosidade

O tratamento por plasma utilizando a gaiola catódica de titânio possibilitou a deposição de filmes de nitreto de titânio (TiN) com diferentes morfologias sobre as amostras de aço ASTM F138 dependendo da combinação de tempo e temperatura utilizados. A morfologia dos filmes varia de acordo com as modificações de tempo e temperatura. As superfícies das amostras tratadas tiveram um aumento significativo da rugosidade (Ra) em comparação com a amostra padrão (não tratada), conforme indicado na Figura 7.

Figura 7: Perfil de rugosidade (R_a) das amostras tratadas em comparação a amostra padrão.

Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

As amostras B7, B8 e B9, submetidas a um período de tratamento mais prolongado, exibiram os maiores valores de rugosidade, evidenciando, dessa forma, a relação desta propriedade com o tempo de tratamento. Em contrapartida, as amostras B1, B2 e B3, tratadas por apenas 3 horas, apresentaram valores menores de rugosidade (R_a). Somente o parâmetro “ R_a ” de rugosidade é insuficiente para caracterizar a superfície do biomaterial, portanto foi analisada a relação rugosidade máxima e rugosidade média (R_p/R_z), uma vez que estes fornecem o formato dos picos, se arredondado ou pontiagudo. Os resultados são apresentados na Figura 8.

Figura 8: Perfil de rugosidade (R_p/R_z) das amostras tratadas em comparação a amostra padrão.

Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

Segundo Muzilli (2005), valores da relação entre rugosidade máxima e rugosidade média (R_p/R_z) superiores a 0,5 indicam que a superfície é composta por picos pontiagudos. Portanto, todas as amostras analisadas exibem superfícies com essas características (Figura 8). Esse achado sugere um aumento na biocompatibilidade do material, corroborando com a pesquisa de Macêdo (2012) que encontrou maiores níveis de proliferação em superfícies de titânio que apresentavam picos pontiagudos. Assim, o aumento da rugosidade média “ R_a ” e do perfil pontiagudo dos picos conferem ao material um aumento da quantidade de pontos de ancoragem, essencial para a adesão de células osteoblástica em implantes, conforme relatado por Elias, Oshida e Lima (2008).

4.4 CONCLUSÃO

O processo de nitretação por plasma demonstrou ser eficaz na formação de uma camada de nitreto de titânio (TiN) em todas as amostras avaliadas. A confirmação da deposição de nitreto de titânio (TiN) foi realizada por meio de análises de difração de Raio-X (DRX), energia dispersiva (EDS), espectroscopia Raman e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Notou-se uma maior espessura do filme do filme nas amostras tratadas a 450° C. Além disso, observou-se um aumento significativo tanto na dureza quanto na rugosidade do material tratado, características cruciais para sua biocompatibilidade e aplicabilidade em implantes médicos. Esses resultados ressaltam a importância da pesquisa contínua nessa área para aprimorar os biomateriais utilizados em procedimentos médicos e promover melhorias na qualidade de vida dos pacientes.

AGRADECIMENTOS. Este estudo teve apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI), por meio da concessão de bolsa de estudos em nível de mestrado. Agradecemos à FAPEPI o apoio recebido. Agradecemos também ao Instituto Federal do Piauí - IFPI e à Universidade Federal do Piauí - UFPI por terem disponibilizado toda a estrutura laboratorial necessária.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES. Os autores contribuíram de forma significativa para este trabalho. **CJG, FFA:** Conceituação, Metodologia; Software, Curadoria de dados, Análise formal, Redação – rascunho original, Visualização, Investigação; **HRAM:** Redação – revisão e edição, Aquisição de financiamento, Administração do projeto, Recursos, Supervisão. Todos os autores participaram ativamente das discussões dos resultados, além de terem revisado e aprovado a versão final do artigo.

CONFLITO DE INTERESSE. Os autores declaram que não possuem nenhum interesse comercial ou associativo que represente um conflito de interesses em relação ao conteúdo do manuscrito.

APROVAÇÃO ÉTICA. Não se aplica.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. R.; ARAÚJO, F. O.; RIBEIRO, K. J. B.; COSTA, A. P.; SOUSA, R. R. M.; SOUSA, R. S. Use of cathodic cage in plasma nitriding, **Surface and coatings technology**, v. 201, p. 2450-2454, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.014>.
- ASRI, R. I. M.; HARUN, W. S. W. ; SAMYKANO, M. ; LAN, N. A. C. ; GHANI, S. A. C. ; TARLOCHAN, F. ; RAZA, M. R. Corrosion and surface modification on biocompatible metals: A review. **Materials Science and Engineering C**, v. 77, p. 1261-1274, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.102>.

- BORGIOLO, F.; FOSSATI, A.; GALVANETTO, E.; BACCI, T. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature. **Surface & Coatings Technology**, v. 200, p. 2474-2480, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.110>.
- CHENG, Y. H.; TAY, B. K.; LAU, S. P.; KUPFER, H.; RICHTER, F. Substrate bias dependence of Raman spectra for TiN films deposited by filtered cathodic vacuum arc. **Journal of Applied Physics**, v. 92, p. 1845, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1491588>.
- DAUDT, N. F.; BARBOSA, J. C. P.; MACÊDO, M. O. C.; PEREIRA, M. B.; ALVES JR, C. P. Effect of cage configuration in structural and optical properties of tin films grown by cathodic cage discharge. **Materials Research**, v.16, n. 4, p. 766-771, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000065>.
- ELIAS, C. N.; OSHIDA, Y.; LIMA, J. H. C. Relationship between surface properties (roughness, wettability and morphology) of titanium and dental implant removal torque. **Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials**. v. 1, p. 234-42, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2007.12.002>.
- FERREIRA, L. M. O.; VICENTE, M. C. L.; OLIVEIRA, M. E. A.; COSSATIS, J. J. Evolução do tratamento de superfície nos implantes dentários; Revisão de literatura. **Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences**. v. 5, n. 2, p. 86-100, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36557/2674-8169.2023v5n2p86-100>.
- IORDANOVA, I. ; KELLYB, P. J. ; MIRCHEVA, R. V. ; ANTONOV, R. V. Crystallography of magnetron sputtered TiN coatings on steel substrates. **Journal Vacuum**, vol. 81, p.830- 842, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2006.09.018>.
- LEITE, G. B.; FONSECA, Y. R.; GOMES, A. V.; ELIAS, C. N. Relação entre os parâmetros de rugosidade 3D e a molhabilidade do titânio com grãos micrométricos e sub-micrométricos. **Revista Matéria**, v. 25, n. 2, e-12655. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1055>.
- MACÊDO, H. R. A. **Tratamento térmico do titânio e suas consequências sobre as propriedades físico-químicas e de biocompatibilidade**. 2012. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/12794/1/TratamentoT%c3%a9rmicoTit%c3%a2nio_Mac%20edo_2012.pdf. Acessado em: 30 mar. 2023.
- MUZILLI, M. **Influência do tratamento de superfície na rugosidade Ra e dureza Vickers de cerâmicas para cobertura incisal**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Materiais Dentários) - Programa de Pós-Graduação em Materiais Dentários, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. DOI: DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2005.328555>.
- PANDEY, A.; AWASTHI, A.; SAXENA, K. K. Metallic Implants with properties and latest production techniques: a review. **Advances in Materials and Processing Technologies**, v. 6, n. 2, p. 405-440, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1731236>.
- PIRES, A. L.; BIERHALZ, A. C. K.; MORAES, A. M. Biomateriais: Tipos, Aplicações e Mercado. **Revista Química Nova**. v. 38, n. 7, p. 957-971, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150094>.

REZENDE, M.C.R.; DEKON, S.F.C.; GRANDINI, C.R.; BERTOZ, A. P. M.; CLARO, A. P. R.A. Tratamento de superfície de implantes dentários. **Revista odontológica de Araçatuba**, v. 32, n. 2, p. 38-43, 2011.

SILVA, R. O. F.; VASCONCELLOS, A. A.; CASSELLI, H. Ceramic abutments used in dentistry: a literature review. **Revista Odontologia Clinico-Científica**, v. 15, p. 19-24, 2016.

SOUSA, R. R. M. **Nitretação em Plasma com Gaiola Catódica: Investigação do mecanismo e estudo comparativo com a nitretação em plasma de tensão contínua**. 2017. 164 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2007. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/12709/1/%26%2365279NitretacaoPlasmaGaiola_Sousa_2007.pdf. Acessado em: 30 mar. 2023.

SOUSA, R. R. M.; MOURA, Y. J. L.; SOUSA, P. A. O.; MEDEIROS NETO, J. Q.; COSTA, T. H. C.; ALVES JUNIOR, C. Nitriding of AISI 1020 steel: comparison between conventional nitriding and nitriding with cathodic cage. **Materials Research**, v. 17, n. 3, p. 708-13, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000027>.

SOUSA, R. R. M.; ARAÚJO, F.O.; COSTA, T. H. C.; NASCIMENTO, I. O.; SANTOS, F. E. P.; ALVES, J. R. C.; FEITORE, M. C. Thin Tin and TiO₂ Film Deposition in Glass Samples by Cathodic Cage. **Materials Research**, v. 18, p. 347-352, 2015. DOI : <https://doi.org/10.1590/1516-1439.313914>.

TERADA, M.; ANTUNES, R. A.; PADILHA, A. F.; COSTA, I. Corrosion resistance of three austenitic stainless steels for biomedical applications. **Materials and Corrosion**, v. 58, n. 10, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.200704070>

VALERO, J. A. M.O, PETITCORPS, Y. L, MANAUD, J.P, CHOLLON, G. Low temperature, fast deposition of metallic titanium nitride films using plasma activated reactive evaporation. **Journal of Vacuum Science & Technology A**, v. 23, p. 394-400, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.1874152>.

VASCONCELLOS, M. A. Z.; HINRICHS, R.; JAVORSKY, C. S.; GIURIATTI, G.; BORGES DA COSTA, J. A.T. B. Micro-Raman characterization of plasma nitrided Ti6Al4V-ELI. **Surface Coatings e Technology**, v. 202, p. 275-279, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.038>.