

## **Influência do jateamento com microesferas de vidro nas propriedades superficiais do aço inoxidável AISI 316L grau ASTM F138**

### **Influence of glass microsphere shot peening on the surface properties of AISI 316L grade ASTM F138 stainless steel**

### **Influencia del granallado con microesferas de vidrio en las propiedades superficiales del acero inoxidable AISI 316L grado ASTM F138**

Matheus Felipe Theodoro Nascimento <sup>1</sup>  
Ricardo Luiz Perez Teixeira <sup>2</sup>

**Resumo:** O jateamento com microesferas de vidro é um processo de tratamento de superfície que aprimora as propriedades mecânicas de diversos materiais, aplicando tensões compressivas à superfície. Este estudo investiga os efeitos do jateamento com microesferas de vidro no aço inoxidável AISI 316L grau ASTM F138-19, utilizado em aplicações biomédicas. Foram analisadas mudanças no módulo de elasticidade, resistência ao escoamento, resistência máxima, ductilidade, dureza, rugosidade superficial, microestrutura, propriedades ferromagnéticas e biocompatibilidade após o jateamento. Os resultados indicam melhorias significativas no módulo de elasticidade e resistência do material, com ligeira elevação na ductilidade. A análise microestrutural revela irregularidades superficiais, aumento da rugosidade e presença de martensita  $\alpha'$ . A biocompatibilidade não é afetada, mas um tratamento de reversão é recomendado para atender às normas ISO 5832-1.

**Palavras-chave:** ASTM F138. Biomaterial. Difração de raios X. Jateamento.

**Abstract:** Shot peening with glass microspheres is a surface treatment process that enhances the mechanical properties of various materials by applying compressive stresses to the surface. This study investigates the effects of shot-peening with glass microspheres on AISI 316L grade ASTM F138-19 stainless steel, commonly used in biomedical applications. Changes in elasticity modulus, yield strength, ultimate tensile strength, ductility, hardness, surface roughness, microstructure, ferromagnetic properties, and biocompatibility were analyzed after the shot-peening process. The results indicate significant improvements in elasticity modulus and material strength, with a slight increase in ductility. Microstructural analysis reveals surface irregularities, increased roughness, and the presence of  $\alpha'$  martensite. Biocompatibility remains unaffected, but a reversion treatment is recommended to comply with ISO 5832-1 standards.

**Keywords:** ASTM F138. Biomaterial. X-ray diffraction. Shot-peening.

<sup>1</sup> Graduando em engenharia mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3472-9268>. E-mail: [d2018013915@unifei.edu.br](mailto:d2018013915@unifei.edu.br)

<sup>2</sup> Doutor em engenharia de materiais e metalúrgica. Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2641-4036>. E-mail: [ricardo.lui@unifei.edu.br](mailto:ricardo.lui@unifei.edu.br)

**Resumen:** El shot-peening con microesferas de vidrio es un proceso de tratamiento de superficie que mejora las propiedades mecánicas de diversos materiales al aplicar tensiones compresivas en la superficie. Este estudio investiga los efectos del shot-peening con microesferas de vidrio en el acero AISI 316L grado ASTM F138-19, utilizado en aplicaciones biomédicas. Se analizaron cambios en el módulo de elasticidad, resistencia al flujo, resistencia máxima, ductilidad, dureza, rugosidad superficial, microestructura, propiedades ferromagnéticas y biocompatibilidad después del shot-peening. Los resultados indican mejoras significativas en el módulo de elasticidad y resistencia del material, con una ligera elevación en la ductilidad. El análisis microestructural revela irregularidades superficiales, aumento de la rugosidad y presencia de martensita  $\alpha'$ . La biocompatibilidad no se ve afectada, pero se recomienda un tratamiento de reversión para cumplir con las normas ISO 5832-1.

**Palabras-clave:** ASTM F138. Biomaterial. Difracción de rayos X. Shot-peening.

Submetido 06/04/2024

Aceito 22/09/2024

Publicado 26/09/2024

### Considerações Iniciais

O processo de jateamento (*shot peening*) com microesferas de vidro, que utiliza pequenas partículas esféricas para induzir tensões compressivas na superfície de um material, tem sido amplamente estudado devido à sua capacidade de melhorar propriedades da superfície metálica como resistência ao desgaste, à corrosão sob tensão e à falha por fadiga (Linjee *et al.*, 2023; Gundgire *et al.*, 2022). Embora tenham sido obtidos resultados que demonstram a eficácia do *shot peening* na melhoria das propriedades da superfície do AISI 316L grau ASTM F138-19 (Linjee *et al.*, 2023; Gundgire *et al.*, 2022; ASTM, 2020; Resnik *et al.*, 2020), sua aplicação em contextos biomédicos ainda é pouco explorada pela literatura (Pereda *et al.*, 2012; Aparício *et al.*, 2003).

Este estudo foi conduzido na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo Edital UNIFEI nº 02/2021 PIBIC CNPq. Ele objetiva preencher uma lacuna importante de informações técnicas ao investigar os efeitos do *shot peening* com microesferas de vidro nas propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L grau ASTM F138-19 (ASTM, 2020) para o seu uso como material biomédico segundo a norma ISO 5832-1 (ISO, 2016). A ênfase deste estudo é analisar o comportamento da superfície do aço inoxidável submetido ao *shot peening*, um processo que pode induzir a transformação martensítica da austenita, conhecida como efeito de transformação de fase induzida pela plasticidade (TRIP, *Transformation-Induced Plasticity*). Esta transformação por efeito TRIP no aço inoxidável austenítico, documentada em estudos recentes (Smith *et al.*, 2024; García *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022), pode afetar a viabilidade do uso do aço como biomaterial metálico (ASTM 2020; ISO, 2016).

Os resultados deste estudo fornecem novos *insights* sobre o potencial do *shot-peening* para aplicações biomédicas, especialmente em relação à norma ASTM F138-19, destacando sua relevância como método de tratamento de superfície para aprimorar o desempenho desse material em contextos biomédicos (Smith *et al.*, 2024; Teixeira; Silva, 2024; García *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022; ASTM, 2020).

### Material e Métodos

Duas placas de aço inoxidável austenítico AISI 316L grau ASTM F138 (aço ASTM F138) foram fornecidas pela Aperam South America, empresa localizada na cidade de Timóteo,

MG, Brasil (APERAM, 2024). A composição química do aço AISI 316L grau ASTM F138 é consistente com os padrões ASTM empregados pela indústria para finalidades biomédicas (ASTM, 2012; ASTM, 2020). As placas do aço ASTM F138 fornecidas foram cortadas nas dimensões amostrais apropriadas para os testes propostos.

Para o *shot peening*, selecionou-se das duas placas de aço ASTM F138 fornecidas pela Aperam, apenas uma placa. Esta placa foi submetida ao *shot-peening* com microesferas de vidro. O processo de *shot-peening* utilizou vidros esféricos com diâmetros variando de 53  $\mu\text{m}$  a 105  $\mu\text{m}$  e durou um total de 5 minutos. Para a realização do *shot-peening*, foi utilizada uma pistola de ar comprimido com diâmetro de bico de 6,35 mm (1/4 polegada), pressão de ar de 600 KPa e ângulo de jato de 90°. O bico da pistola *blaster* foi posicionado a 10 cm da superfície da placa ASTM F138 (Lacerda *et al.*, 2019).

As medidas de rugosidade superficial foram realizadas em vários pontos das placas de aço ASTM F138 para a condição *shot-peening*. Para condição do aço ASTM F138 *como recebido* foi considerada o valor de rugosidade superficial média (Ra) fornecida pela APERAM de  $(0,5 \pm 0,1) \mu\text{m}$  (APERAM, 2024). A medida de rugosidade foi obtida usando o rugosímetro digital SJ-210 Mitutoyo (MITUTOYO, 2020; MITUTOYO CORPORATION, 2010). Pelo equipamento obtém-se valores para os parâmetros Ra, do desvio quadrático da rugosidade (Rq) e da soma dos maiores picos e vales mais profundos (Rz), conforme o obtido por Jing *et al.* (2021).

O teste de ferritoscopia foi realizado para verificar e detectar a fração ferromagnética volumétrica na placa na condição *como recebido* e após *shot peening*. A condição *shot peening* é passível de gerar fases ferromagnéticas em sua superfície pelo efeito TRIP (Teixeira *et al.*, 2023). Esse teste envolveu um campo magnético gerado por uma bobina interagindo com as fases magnéticas das amostras, sendo que a tensão resultante foi avaliada comparativamente aos padrões calibrados (Morais *et al.*, 2011). Para o teste de ferritoscopia, as placas ASTM F138 foram analisadas separadamente antes do corte por eletroerosão do fio (Chen *et al.*, 2022).

O teste de ferritoscopia foi realizado em vários pontos das placas de aço ASTM F138, tanto na condição *como recebido* quanto para a condição *shot-peening*. A ferritoscopia foi empregada para se avaliar a fração ferromagnética volumétrica em todo o corpo do aço inoxidável austenítico a partir do contacto da sonda magnética do ferritoscópio FMP30 da marca Helmut Fischer (HELMUT FISHER, 2024) sobre sua superfície das placas de aço ASTM

F138. Todo o processo de preparação das amostras e execução dos testes seguiu normas técnicas e diretrizes operacionais dos equipamentos utilizados, garantindo a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos (Maleki *et al.*, 2018; HELMUT FISHER, 2024). Os resultados da análise de ferritoscopia foram empregados, em conjunto os resultados de microscopia eletrônica e de difração de raios X, para tecer considerações da ocorrência de fases ferromagnéticas após *shot peening*. Apesar dos resultados individuais de ferritoscopia fornecerem poucas informações sobre qual a fase cristalográfica formada após o *shot peening*, permite-se tecer considerações importantes, pois a presença de fase ferromagnética no aço ASTM F138 não permite o seu uso como material biomédico, conforme a norma ISO 5832-1 (ISO, 2016),

As placas ASTM F138 foram cortadas em tamanho adequado por eletroerosão a fio para os testes propostos. Os *corpos de prova* foram cortados nas dimensões de 10 mm x 10 mm com espessura aproximada de 4,5 mm, exceto para o ensaio de tração uniaxial e ferritoscopia (Smith *et al.*, 2024). O processo de corte por eletroerosão a fio no equipamento EDM da marca EUROSTEC (Linjee *et al.*, 2023). O corte foi realizado empregando uma tensão de entrada de 220V, faixa de frequência de 50Hz a 60Hz e 4,5 kVA. No processo de corte, um fio de molibdênio submerso em sais minerais ionizantes à temperatura ambiente e este fio é utilizado para proporcionar o corte preciso e seguro das amostras utilizando um braço mecânico, conforme desenho de projeto para cada corte. A escolha da eletroerosão do fio como método de corte se deve ao aço ASTM ser um material condutivo, próprio para corte no equipamento, e, também, devido à sua capacidade extremamente precisa e metalograficamente segura de corte, sem induzir o efeito TRIP ou causar aquecimento na amostra metálica (Gundgire *et al.*, 2022; Siek *et al.* 2017).

As amostras para as análises de difração de raios X foram produzidas por corte eletroerosão a fio em triplicata para cada condição, *como recebido* e *shot-peening* com microesferas de vidro. As amostras de aço ASTM F138 cortadas nas dimensões de 10 mm x 10 mm com espessura de 4,5 mm. Todas as amostras cortadas produzidas foram polidas para a análise cristalográfica por difração de raios X. Para o polimento, após o corte, todas as amostras foram lixadas até granulação 600# e submetidas a eletropolimento em uma solução de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, na proporção de 2:1, com 15% de glicerol, a 40°C, sob corrente de 1,1 A/cm<sup>2</sup> por 4 minutos (Marques *et al.*, 2020; Han; Fang, 2019; ASTM, 2022). Após o polimento, todas as

amostras foram então limpas com álcool etílico absoluto e secas com corrente de ar seco à temperatura ambiente. Isto é necessário para se evitar qualquer fenômeno que prejudique a produção dos difratogramas. A análise cristalográfica por difração de raios X foi realizada utilizando as referências de fase cristalina disponíveis nos arquivos de informações do *Joint Committee on Powder Diffraction-International Centre for Diffraction Data* foram utilizadas para a análise de DRX (ABNT NBR ISO 4287:2002, 2002; ICCD, 2022; X'PERT QUANTIFY, 2024).

A difração de raios X (DRX) foi realizada utilizando-se o difratômetro Philips-PANalytical PW 1710 X equipado com detector de pontos, monocromador de cristal de grafite, tubo de cobre ( $Z=29$ ) e  $\lambda K_{\alpha} = 1,54184\text{\AA}$  médios e  $\lambda K_{\alpha 1} = 1,54056\text{\AA}$  para identificar as fases cristalográficas presentes nas amostras de aço AISI 316L grau ASTM F138 (MALVERN PANANALYTICAL, 2024). O ângulo de varredura foi ajustado em  $0,02^{\circ}$  por minuto com  $2\theta$  estabelecido em um intervalo de  $10^{\circ}$  a  $120^{\circ}$  em condições de baixa velocidade.

Para a análise metalográfica por microscopia eletrônica por varredura (MEV) com feixe de elétrons secundários, cortou-se, por eletroerosão a fio, as placas do aço ASTM F138 para a produção de amostras em triplicada, nas dimensões de 10 mm x 10 mm, para cada condição, *como recebido* e *shot-peening* com microesferas de vidro. Todas as amostras produzidas no corte por eletroerosão a fio foram embutidas a quente, lixadas com lixa de água de granulometria grosseira de 80# até a granulometria mais fina de 600# e, em seguida, realizou-se o polimento eletrolítico, para se obter uma superfície lisa, espelhada. Apenas as três amostras do ASTM F138 na condição *como recebido* foram polidas eletroliticamente em solução com  $H_3PO_4$  e  $H_2SO_4$  na proporção volumétrica de 2:1, contendo 15% do volume de glicerol. O eletropolimento foi realizado à temperatura de  $40^{\circ}C$ , com aplicação de corrente de  $1,1 A/cm^2$  por 4 min (Marques *et al.*, 2020; Han; Fang, 2019; ASTM, 2022). O MEV com elétrons secundários foi escolhido para a análise metalográfica, pois pode oferecer uma visualização tridimensional de alta resolução da morfologia da superfície do aço ASTM F138, o que permite uma melhor identificação das fases cristalinas diminutas, características presentes no ASTM F138, e a detecção de defeitos, difíceis de serem visualizados por microscopia ótica metalográfica (Teixeira *et al.*, 2023).

As amostras analisadas por MEV, nas duas condições, *como recebido* e *shot-peening* com microesferas de vidro, foram produzidas para comparação e avaliação da morfologia das



fases cristalinas presentes na superfície do aço ASTM F138. Além disso, a utilização da energia de feixe eletrônico de 20 keV no MEV possibilitou uma análise mais detalhada da topografia superficial e da morfologia das fases cristalinas, complementando as informações de caracterização obtida após o ataque químico metalográfico, utilizado para revelação da morfologia da superfície do aço ASTM F138. Esse método de análise metalográfica foi validado por estudos anteriores (Marques *et al.*, 2020).

Para o ataque químico metalográfico, e posterior revelação da microestrutura do ASTM F138 para visualização por microscopia eletrônica, foi empregada uma solução aquosa de 10% m/m de ácido oxálico. O ataque químico metalográfico foi do tipo eletrolítico. A densidade de corrente aplicada durante o ataque químico metalográfico eletrolítico foi de 1 A/mm<sup>2</sup> por 3 min (Han; Fang, 2019). Após o ataque, as seis amostras de F138, três na *como recebido* e três na *shot peening* com microesferas de vidro, foram limpas em álcool absoluto e secas em fluxo de ar seco a temperatura ambiente.

A partir das micrografias obtidas por MEV, também foi possível estimar o tamanho médio de grão das amostras, seguindo os padrões da norma ASTM E112-12 - Métodos de teste padrão para determinar o tamanho médio de grão (ASTM E112, 2012). Utilizando para isso o método das intercepções lineares, foram traçadas 7 linhas de intercepção em cada micrografia, e a Equação 1 foi aplicada para determinação final do tamanho médio de grão. Nessa equação, G representa o tamanho de grão e Ø o diâmetro do grão, sendo que um maior valor de G indica um tamanho de grão menor (Ferreira; Lima, 2016).

$$G = -6,6353 \cdot \log(\varnothing) - 12,6 \quad (1)$$

Para a análise de microdureza das superfícies do aço ASTM F138, tanto na condição *como original* quanto após o tratamento por *shot peening*, foi inicialmente utilizado o método de microdureza Vickers com o microdurômetro WILSON modelo 402 MVD, aplicando uma carga de 0,2 kgf por 10 segundos. Este equipamento é adequado para ensaios de microdureza (cargas inferiores a 0,2 kgf) e de dureza de baixa carga (cargas entre 0,2 kgf e 5 kgf) (ASTM, 2017; ABNT, 2019), operando à temperatura ambiente. As amostras analisadas foram as mesmas previamente submetidas às análises de MEV, garantindo a consistência e a coerência entre os diferentes ensaios, o que fortalece a robustez dos resultados obtidos. No entanto,

observou-se que cargas inferiores a 0,5 kgf não produziam marcas suficientemente claras, mesmo com ampliação de 400x, comprometendo a confiabilidade dos resultados. Diante desse desafio, optou-se por aplicar uma carga de 0,5 kgf por 10 segundos (à temperatura ambiente), tanto na condição *como original* quanto após o tratamento por *shot peening*, o que possibilitou a obtenção e a avaliação de impressões mais definidas e precisas. As medições foram realizadas em diversos pontos das amostras, abrangendo regiões críticas para uma avaliação detalhada das variações de dureza Vickers de baixa carga.

Para o ensaio de tração uniaxial, foram produzidos *corpos de prova* por corte eletroerosão a fio a partir das placas de aço ASTM F138 nas condições *como recebido* e *shot peening*. As amostras foram cortadas em triplicada, tanto para a condição *como recebido* quanto para a condição *shot-peening*. As dimensões das amostras cortadas de aço ASTM F138 seguiu o recomendado pela norma ASTM E8/E8M-22 para tamanho dos *corpos de prova subsize*, com 6,00 mm de largura e 25,00 mm para o comprimento de referência, conforme a ASTM (2022). A análise da resistência à tração uniaxial foi realizada tanto para as condições *como recebido* quanto para *shot-peening*, porém verificou-se durante os ensaios de tração dificuldades específicas nos *corpos de prova* na condição de *shot-peening*. Na condição *shot peening* ocorreram rupturas prematuras durante o carregamento inicial do ensaio, o que dificultou a obtenção de uma curva representativa de tensão deformação com reprodutibilidade nessa condição, ocorrência também relatada por Talenon *et al.* (2004) e por Maleki *et al.* (2018).

Os testes de citotoxicidade com microrganismos foram conduzidos em duplicata para as condições *como recebido* e *shot-peening*, visando avaliar a atividade antimicrobiana das amostras (Siek *et al.*, 2017; ISO, 2009). Para a análise da citotoxicidade, cortou-se, por eletroerosão a fio, as placas do aço ASTM F138 para a produção de amostras nas dimensões de 10 mm x 10 mm, tanto para a condição *quanto para a condição shot-peening* com microesferas de vidro. Os ensaios foram realizados em placas de Petri para se avaliar a ação antimicrobiana da superfície do aço ASTM F138 para as condições *como recebido* e *shot-peening* contra *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Staphylococcus aureus*. Os testes de citotoxicidade foram realizados de acordo com padrões de análise específicos e protocolos de esterilização adequados segundo a ATCC (2024).



## Resultados e Discussões

Os difratogramas de raios X do aço ASTM F138, apresentados na Figura 1, evidenciam a presença das fases austenítica ( $\gamma$ ) e martensítica  $\alpha'$  ( $\alpha'$ ). A coexistência dessas fases na microestrutura do material é confirmada pela observação de picos distintos de martensita  $\alpha'$  a  $82,3^\circ$  e  $65,0^\circ$  por  $2\theta$ , ao lado dos picos da fase austenítica (Teixeira *et al.*, 2023).

Os padrões de difração de raios X confirmam a predominância da fase austenítica ( $\gamma$ ) na amostra de aço ASTM F138 na condição *como recebido*, enquanto a amostra submetida a *shot peening* exibe mais picos que indicam a presença da fase martensita  $\alpha'$ , validando a ocorrência do efeito TRIP induzido pelo *shot peening* (Teixeira *et al.*, 2023).

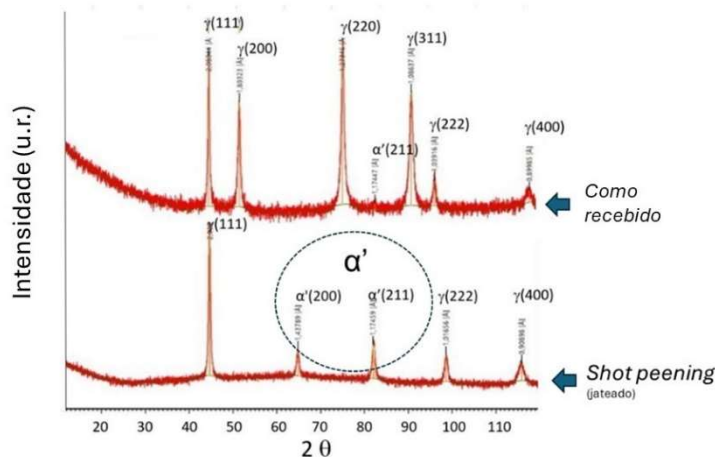
A análise detalhada dos difratogramas da Figura 1 para as amostras de ASTM F138 na condição *como recebido* revela as características esperadas de uma estrutura austenítica ( $\gamma$ ) para um aço inoxidável austenítico ASTM F138, em conformidade com as normas pertinentes (Teixeira *et al.*, 2023; Lacerda *et al.*, 2019; ASTM, 2020). No entanto, a detecção dos picos de martensita  $\alpha'$  na condição *como recebido* indica a possibilidade de ter ocorrido uma deformação plástica prévia por laminação a frio durante os estágios de fabricação ou processamento das placas, destacando a influência significativa das condições de processamento na formação da microestrutura final do material (Teixeira *et al.*, 2023).

Os resultados dos difratogramas do Gráfico 1 para a condição *shot peening* indicam a presença mais intensa de sinais da fase martensita  $\alpha'$ . É esperado que a presença de martensita  $\alpha'$  na superfície do aço ASTM F138, após o *shot peening*, produzidas pelo efeito TRIP, contribuam para a elevação da resistência mecânica da superfície do aço ASTM F138, bem como para a mudança de seu comportamento magnético de aço inoxidável austenítico paramagnético para ferromagnético (Teixeira *et al.*, 2023).

É mostrada pelos difratogramas do Gráfico 1 uma ausência de picos de  $\epsilon$ -martensita tanto para a condição *como recebido* quanto para a condição *shot peening*. Para a análise da formação da fase cristalina de  $\epsilon$ -martensita, observou-se nos difratogramas do Gráfico 1 o surgimento de linhas tênues adjacentes às linhas dos sinais de  $\gamma$  (111) e de  $\alpha'$  (110). Pela análise, nos difratogramas do Gráfico 1 há a inexistência da fase cristalina de  $\epsilon$ -martensita para ambas as condições. Esse resultado das análises dos difratogramas do Gráfico 1 para a fase cristalina  $\epsilon$ -martensita indica que ocorreu uma deformação plástica menos severa na superfície do aço

ASTM F138, condição desfavorável para a geração da fase cristalina  $\epsilon$ -martensita ou ‘fase de alta pressão’ no ferro (Marques *et al.*, 2020; Rafaja *et al.*, 2020; APERAM, 2024).

Gráfico 1 - Difratomogramas de raios-X das amostras AISI 316L grau ASTM F138: *como recebido* e *shot peening*.



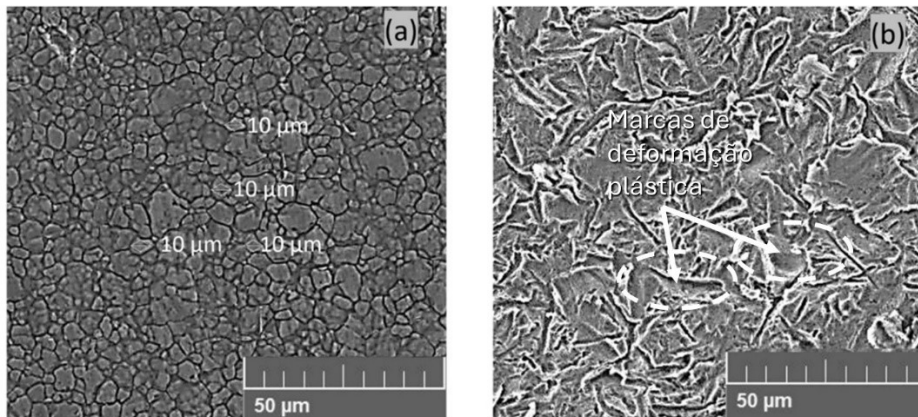
Fonte: dados dos autores (2024).

Além dos resultados cristalográficos obtidos pela análise dos difratogramas de raios X apresentados no Gráfico 1, tem-se as micrografias de MEV na Figura 1. Elas complementam as observações sobre as fases cristalinas ao evidenciar comparativamente as diferenças morfológicas na microestrutura da superfície da amostra *como recebido* e aquela submetida a *shot peening*. A presença de grãos poligonais da fase austenítica reveladas pelo ataque químico metalográfico na condição *como recebido* contrasta com as marcas de deformação plástica evidenciadas na amostra na condição *shot peening*, deformação plástica devido ao contato deslizante da microesfera de vidro, reforçando a influência das condições de processamento na estrutura e nas propriedades do material (Marques *et al.*, 2020; Jing *et al.*, 2021).

Micrografias de MEV apresentadas na Figura 1(a) mostram grãos poligonais da fase cristalina austenítica na superfície do aço ASTM F138 na condição *como recebido*, com um tamanho médio de grão estimado em aproximadamente 9 micrômetros (Tabela 1). Em contraste, a morfologia superficial do aço ASTM F138 após tratamento com *shot peening*, conforme ilustrado na Figura 1(b), revela marcas de deformação plástica causadas pelo impacto das microesferas de vidro (Marques *et al.*, 2020; Jing *et al.*, 2021). Embora a fase martensita  $\alpha'$  não tenha sido visualizada na micrografia da Figura 1(b), sua presença foi detectada por meio

da técnica cristalográfica de difração de raios X, que forneceu informações detalhadas sobre a fase na superfície jateada.

Figura 1 - Micrografia da superfície: (a) *como recebido* e (b) *shot peening*.



Fonte: dados dos autores (2024).

Tabela 1 - Tamanho médio de grão ASTM das amostras do aço AISI 316L grau ASTM F138 *como recebido*.

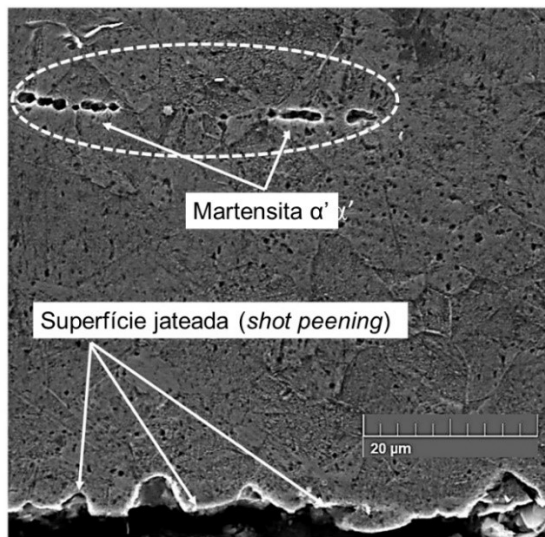
Amostra	Tamanho médio de grão ASTM (G)	Diâmetro médio do grão (µm)
<i>como recebido</i>	10,5	9,4

Fonte: dados dos autores (2024).

A Figura 2 apresenta detalhes sobre o aço ASTM F138 após o tratamento com *shot peening* utilizando microesferas de vidro. Este processo de conformação plástica a frio alterou significativamente a microestrutura do material, resultando na formação da fase martensita  $\alpha'$ , associada ao efeito TRIP (transformação de fase induzida pela plasticidade) da austenita. A presença desta fase ferromagnética é de particular importância para aplicações biomédicas, uma vez que pode afetar a resposta magnética do material, um aspecto crítico para contextos médicos que demandam propriedades magnéticas específicas, como no caso do aço ASTM F138 (Teixeira; Silva, 2024; ASTM, 2020). Segundo Teixeira et al. (2023), a introdução da martensita  $\alpha'$  pode impactar significativamente a resposta magnética, sendo essencial para

assegurar a compatibilidade magnética e a integridade estrutural em dispositivos médicos. A morfologia da martensita  $\alpha'$  foi identificada na micrografia de perfil da amostra jateada, conforme ilustrado na Figura 2, a aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  da superfície jateada. Embora a fase martensita  $\alpha'$  não tenha sido visível na micrografia da superfície jateada, sua presença foi confirmada por meio da técnica cristalográfica de difração de raios X.

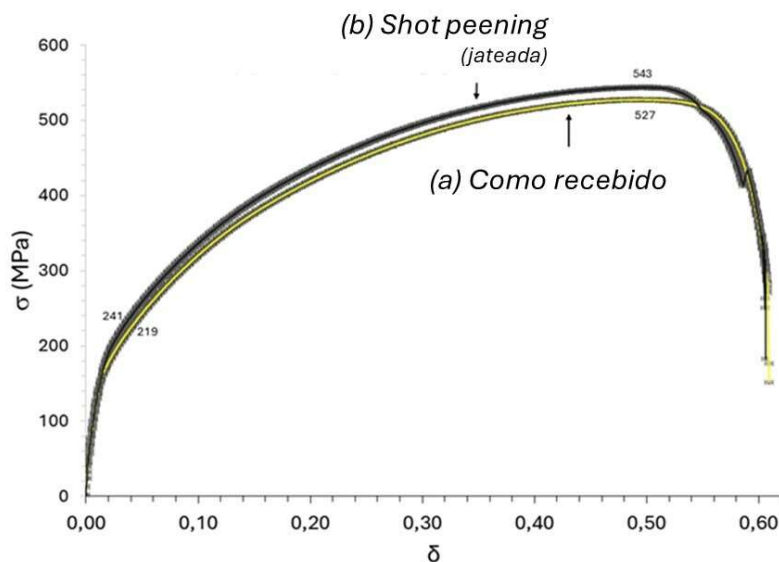
Figura 2 - Micrografia do perfil transversal do aço AISI 316L grau ASTM F138 na condição *shot peening* com microesferas de vidro.



Fonte: dados dos autores (2024).

Os resultados do ensaio de tração no Gráfico 2 mostram propriedades mecânicas ligeiramente elevadas no aço ASTM F138 para a condição de *shot peening* em comparação com a condição *como recebido*. Essa elevação das propriedades mecânicas no ensaio de tração está em conformidade com estudos anteriores de He *et al.* (2020). O impacto do *shot peening* nas propriedades mecânicas é limitado, potencialmente devido às modificações estarem confinadas ao lado da superfície do aço ASTM F138 que sofreu jateamento, podendo gerar resultados inconclusivos em alguns casos (Jing *et al.*,2021).

Gráfico 2 – Curva do ensaio de tensão versus deformação do ensaio de tração uniaxial para o aço AISI 316L grau ASTM F138: (a) *como recebido* e (b) *shot peening*.



Fonte: dados dos autores (2024).

Os resultados da análise das amostras, conforme apresentados na Tabela 2, evidenciam diferenças significativas nas propriedades mecânicas do material com e sem o tratamento de *shot peening*. A amostra no estado *como recebido* apresentou um módulo de elasticidade de  $194 \pm 10$  GPa, tensões de escoamento ( $\sigma_{0,2\%}$  de compensação) de  $219 \pm 25$  MPa e tensão máxima ( $\sigma_{\text{máximo}}$ ) de  $527 \pm 16$  MPa, com uma elongação na ruptura (E) de  $61 \pm 1\%$ .

Após o *shot peening*, conforme resultados na Tabela 2, houve um aumento no módulo de elasticidade para  $202 \pm 10$  GPa, e as tensões de escoamento e máxima subiram para  $241 \pm 10$  MPa e  $543 \pm 12$  MPa, respectivamente, enquanto a elongação na ruptura se manteve praticamente estável em  $61 \pm 3\%$ , dentro da faixa de elongação da condição como recebido de  $61 \pm 1\%$ .



Tabela 2 - Resultados do ensaio de tração para AISI 316L grau ASTM F138: (a) *como recebido* e (b) *shot peening*.

Amostra	Modulo de elasticidade (GPa)	$\sigma$ (0,2% de compensação) (MPa)	$\sigma$ -máximo (MPa)	E (%)
<i>como recebido</i>	194±10	219 ± 25	527 ± 16	61 ± 1
<i>shot peening</i>	202±10	241 ± 10	543 ± 12	61 ± 3

Fonte: dados dos autores (2024).

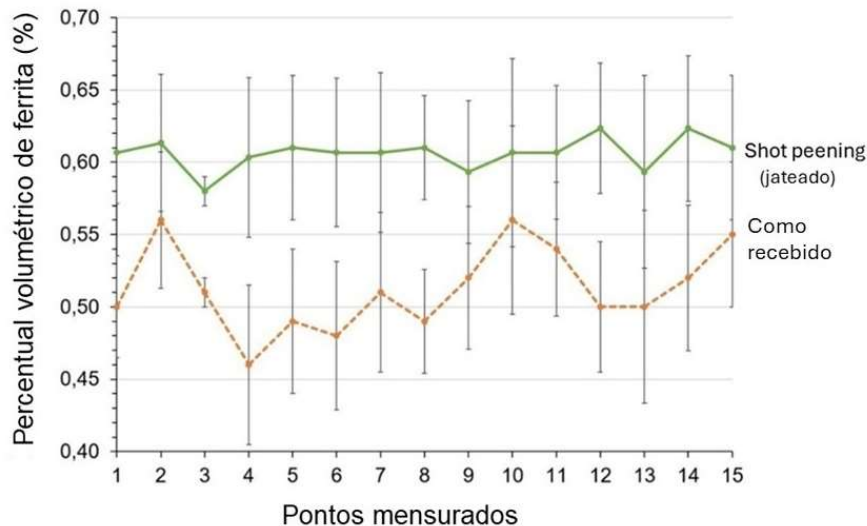
Os resultados obtidos mostrados no Gráfico 2 e na Tabela 2 indicam que o *shot peening* eleva a resistência mecânica do aço ASTM F138 em relação à condição *como recebido*, aumentando as tensões de escoamento e máxima, além do módulo de elasticidade, sem afetar, de forma significativa, a ductilidade do aço em relação à condição *como recebido*, como mostrado pelo valor obtido de alongação da condição *shot peening* até a ruptura nas condições de ensaio de tração uniaxial.

Os resultados do teste de ferritoscopia, mostrado na Figura 5, revelam um aumento na porcentagem volumétrica magnética em ASTM F138 após o *shot peening*, atribuído à produção de martensita  $\alpha'$  através do efeito TRIP (Teixeira *et al.*, 2023). A martensita  $\alpha'$  tem característica ferromagnética, enquanto a fase austenítica tem característica paramagnética. Espera-se que um aumento de martensita  $\alpha'$  no aço ASTM F138 na condição *shot peening* eleve os valores de percentual de ferromagnetismo volumétrico por ferritoscopia quando comparado com a condição *como recebido*.

Pelo resultado mostrado no Gráfico 3 para o teste de ferritoscopia, a fração magnética volumétrica inicial do ASTM F138 está dentro da faixa de (0,5%± 0,05), como esperado pelas informações do centro de pesquisa da APERAM (2024) e obtido por Moraes *et al.* (2011). Pelos resultados obtidos pelo Gráfico 3. A fração volumétrica magnética do aço ASTM F138 *shot peening* sofreu uma significativa elevação da fração volumétrica ferromagnética para (0,58 ± 0,02) %. Essa elevação da fração ferromagnética indica um maior volume de martensita  $\alpha'$  na condição *shot peening*.



Gráfico 3 - Ensaio de ferritoscopia em superfícies das amostras AISI 316L grau ASTM F138.

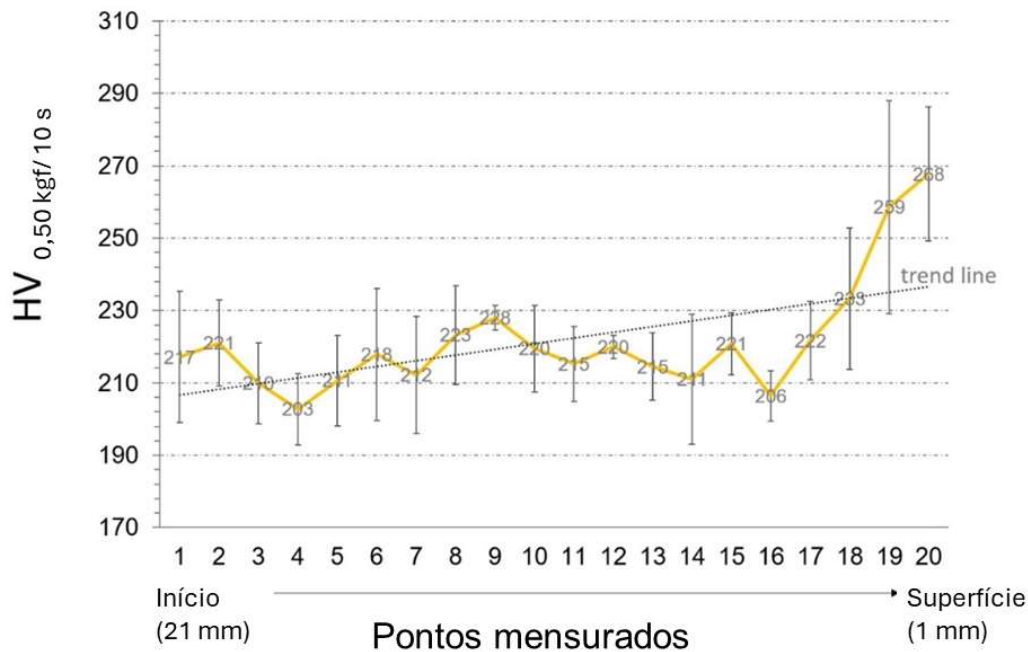


Fonte: dados dos autores (2024).

As medições de dureza Vickers em baixa carga, realizadas em múltiplos pontos para as condições *como recebido* e *shot peening*, revelaram diferenças significativas entre as diferentes condições. Os resultados indicaram um aumento substancial na dureza Vickers de baixa carga após *shot peening*, passando de  $(167 \pm 11)$  HV 0,5 kgf/10s na condição *como recebido* para  $(505 \pm 104)$  HV 0,5 kgf/10s (*shot peening*). Esse aumento é atribuído às tensões residuais decorrentes da ‘compressão superficial’ causada pelo jateamento (Marques *et al.*, 2020; Jing *et al.*, 2021).

Conforme apresentado no Gráfico 4, a análise do perfil transversal da variação de dureza Vickers de baixa carga após o tratamento por *shot peening* evidenciou um aumento significativo da dureza nas proximidades da superfície jateada, com o pico máximo registrado a aproximadamente 1 mm de profundidade. Esse aumento substancial da dureza é atribuído tanto às tensões residuais geradas pela compressão superficial, cuja tendência de elevação é demonstrada pela *trend-line*, quanto à formação da fase martensítica  $\alpha'$ , cuja variação é mais acentuada próximo à superfície (cerca de 1 mm). A martensita  $\alpha'$ , uma fase consideravelmente mais dura e resistente do que a austenita, é induzida pelo *shot peening*, conforme previsto pelo efeito TRIP, resultando em um aumento mais expressivo da dureza na superfície jateada, como ilustrado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Dureza transversal Vickers de baixa carga (HV) para o AISI 316L grau ASTM F138 jateado, *shot peening*.



Fonte: dados dos autores (2024).

Pela Tabela 3, tem-se que os resultados, para a condição *shot peening*, da rugosidade superficial média ( $R_a$ ) medida que foi de  $(2,6 \pm 0,1) \mu\text{m}$ , enquanto o desvio quadrático da rugosidade ( $R_q$ ) foi de  $(3,2 \pm 0,1) \mu\text{m}$  e a soma dos maiores picos e vales mais profundos ( $R_z$ ) foi de  $(18 \pm 2) \mu\text{m}$ . A rugosidade superficial média ( $R_a$ ) fornecida pela APERAM para a condição *como recebido* foi de  $(0,5 \pm 0,1) \mu\text{m}$  (APERAM, 2024). Estes resultados indicam que o processo de *shot peening* com microesferas de vidro aumentou a rugosidade média da superfície do aço ASTM F138 de  $(0,5 \pm 0,1) \mu\text{m}$ , para a condição *como recebido*, para  $(2,6 \pm 0,1) \mu\text{m}$  após o jateamento. Espera-se, com a elevação da rugosidade na condição *shot peening*, um aumento da atividade química e biológica na superfície do aço ASTM F138, face a maior quantidade de ligações químicas insaturadas na superfície (Teixeira *et al.*, 2021; Teixeira; Godoy; Pereira, 2004). Essa maior atividade química também pode facilitar a produção de

recobrimentos biomiméticos pelo método de Kokubo, conforme Teixeira; Godoy; Pereira (2004).

Tabela 3 - Resultado da rugosidade superficial do *shot peening* AISI 316L grau ASTM F138.

Amostras	Rugosidade		
	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rq ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
1	2,498	3,06	15,73
2	2,54	3,22	17,61
3	2,77	3,48	19,53
Valor médio aritmético	2.6	3,2	18
Desvio padrão da média	0,1	0,1	2

Fonte: dados dos autores (2024).

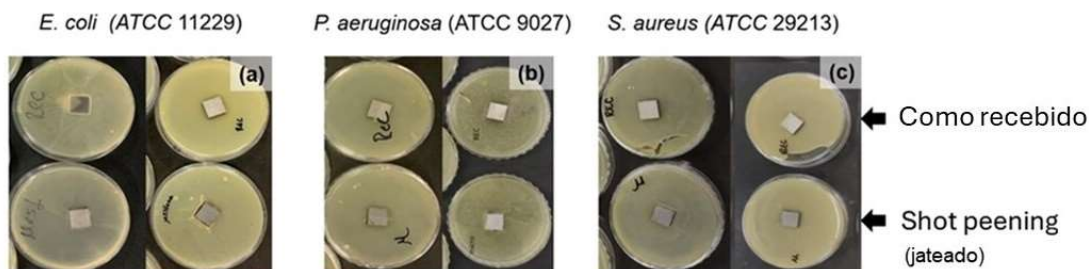
Para avaliação da diminuição da fase ferromagnética do aço ASTM F138 na condição *shot peening*, fez-se um tratamento térmico de reversão a 750°C por 5 minutos. Esse tratamento visa tornar o aço ASTM F138 *shot peening* em totalmente austenítico (Teixeira *et al.*, 2023; Järvenpää *et al.*, 2022). As amostras para a análise do tratamento de reversão foram produzidas em triplicata a partir da placa ASTM F138 na condição *shot peening*. A placa foi cortada por eletroerosão a fio nas dimensões de 10 mm x 10 mm, com espessura aproximada de 4,5 mm. Após o corte, fez-se o tratamento térmico de reversão a 750°C por 5 minutos em forno tipo Mufla de todas as amostras cortadas do aço ASTM F138 na condição *shot peening*.

O ensaio de dureza Vickers em baixa carga realizado antes e após o tratamento de reversão em amostras de ASTM F138 apresentou decréscimo na dureza de (505  $\pm$  104) HV 0,5 kgf/10s para (482  $\pm$  95) HV 0,5 kgf/10s após o tratamento, indicando propriedades mecânicas obtidas pelo *shot peening* foram mantidas. Adicionalmente, observou-se pela ferritoscopia que a fração volumétrica magnética do aço ASTM F138 *shot peening* que sofreu reversão diminuiu a fração volumétrica ferromagnética de (0,58  $\pm$  0,01) % para (0,23  $\pm$  0,03) %. Estes resultados implicam que o tratamento de reversão pode melhorar as propriedades mecânicas do aço ASTM F138 após *shot peening* reduzindo a quantidade de martensita  $\alpha'$ . Pesquisas complementares

são necessárias para determinar completamente a extensão dessas melhorias e sua aplicabilidade a diferentes aplicações biomédicas (Järvenpää *et al.*,2022).

Os resultados mostrados na Figura 3, para o crescimento microbiano nas amostras do aço ASTM F138 nas condições *como recebido* e após *shot peening*, indicam que não há atividade antimicrobiana na superfície do aço contra *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Staphylococcus aureus*. Como não houve decrescimento bacteriano, pode-se considerar que ambas as condições de superfície do aço ASTM F138 promovem uma superfície não citotóxica, resultados de acordo com Mendonça *et al.* (2017). No entanto, é necessário realizar estudos adicionais para avaliar o impacto no crescimento e proliferação bacteriana em longo prazo e outros potenciais efeitos adversos, conforme Mendonça *et al.* (2017).

Figura 3 - Crescimento bacteriano no AISI 316L grau ASTM F138: (a) *Escherichia coli* ATCC11229; b) *Pseudomonas aeruginosa* ATCC9027; c), *Staphylococcus aureus* ATCC29213.



Fonte: dados dos autores (2024).

Os resultados obtidos nesta pesquisa enriquecem a compreensão do biomaterial em questão, abordando não apenas suas propriedades técnicas, mas também sua viabilidade sustentável. Este estudo tem um impacto positivo na economia e no bem-estar social do Brasil, ao evidenciar a relevância tecnológica do aço inoxidável austenítico AISI 316L, grau ASTM F138. É importante ressaltar que o aço utilizado fornecido pela APERAM foi produzido através de um processo ecoeficiente, conhecido como ‘aço verde’, reforçando o compromisso com práticas ambientalmente responsáveis (Calegari; Teixeira; Silva, 2023; Barbosa; Silva; Teixeira, 2022).

### Considerações Finais

As transformações microestruturais no aço AISI 316L grau ASTM F138 (ASTM F138), que incluem a formação de martensita  $\alpha'$  e as mudanças na morfologia dos grãos após o *shot peening* com microesferas de vidro, são fundamentais para entender o comportamento mecânico do material e sua adequação como biomaterial metálico, em conformidade com as normas ISO 5832-1 e ASTM F138.

O fenômeno conhecido como transformação de fase induzida pela plasticidade (TRIP), evidenciado pela formação de martensita  $\alpha'$  durante o *shot peening*, é um fator crucial para a elevação das propriedades mecânicas do aço ASTM F138, refletido no aumento da dureza e da resistência mecânica à tração.

O tratamento de reversão no aço ASTM F138, que visa converter a estrutura martensítica em austenítica para a aplicação do aço como biomaterial, conseguiu manter, em parte, a elevação das propriedades mecânicas obtidas por *shot peening*. Este resultado ressalta a importância do controle microestrutural para adaptar o desempenho do material às necessidades específicas de sua aplicação como biomaterial pelas normas ISO 5832-1 e ASTM.

Os resultados deste estudo oferecem *insights* valiosos sobre o comportamento do aço ASTM F138 quando submetido ao *shot peening*, contribuindo para a otimização de sua manufatura e aplicação em diferentes áreas da engenharia médica. A compreensão da relação entre as alterações microestruturais e as propriedades mecânicas produzidas por deformação plástica é essencial para otimizar o *design* e o processamento de materiais biomédicos, como o aço ASTM F138, assegurando sua eficácia em aplicações específicas e melhorando a performance e a confiabilidade do produto desenvolvido.

Futuras pesquisas poderiam expandir a compreensão dos efeitos do *shot peening* em outras propriedades do aço ASTM F138, como a resistência à corrosão e a durabilidade *in vivo*. Seria igualmente relevante examinar como variados parâmetros de *shot peening* afetam as características e o desempenho do aço ASTM F138 *in vitro* e *in vivo*.



## Referências

ABNT NBR ISO 4287:2002. **Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions, and surface texture parameters**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2002. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=UGNiYlByRDZmbWRhRVMvL05uRDJtRkFRZC80d0tmR1FZeE5pd1h2Q2wzND0=> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

ABNT. **ABNT NBR ISO 6507-2:2019. Metallic materials - Vickers hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=cVNqNncxLzdGcklaY0M2aW9SNctJUmk4VHp2aGc2L2UzU1VXWERRV09wWT0> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

APARICIO, C. et al. Corrosion behavior of commercially pure titanium shot blasted with different materials and sizes of shot particles for dental implant applications. **Biomaterials**, Amsterdã, v. 24, p. 263-273, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(02\)00314-9](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(02)00314-9) . Acesso em: 04 de abril de 2024.

APERAM. **TT-0012-11. Especificações técnicas para aço inoxidável**. Aperam. Timóteo. 2024. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/A%C3%A7o-inox-especifica%C3%A7%C3%B5es-t%C3%A9cnicas.pdf> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

ASTM. **ASTM E8/E8M-22. Standard test methods for tension testing of metallic materials**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. ASTM Internacional. West Conshohocken. 2022. Disponível em: <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astme8e8m22> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

ASTM. **ASTM E92-17. Standard test methods for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. ASTM Internacional. West Conshohocken. 2017. Disponível em: <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astme8e8m22> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

ASTM. **ASTM F138-19. Standard specification for wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum stainless steel bar and wire for surgical implants (UNS S31673)**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials ASTM Internacional. West Conshohocken. 2020. Disponível em: <https://www.astm.org/f0138-19.html> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

ASTM. **ASTM F139-12. Standard specification for wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum stainless steel sheet and strip for surgical implants (UNS S31673)**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials ASTM Internacional. West Conshohocken. 2012. Disponível em: <https://www.astm.org/f0139-12.html> . Acesso em: 04 de abril de 2024.



ATCC. **American Type Culture Collection - em modo de busca**. Manassas. 2024.  
Disponível em: <https://www.atcc.org/>, 2024 . Acesso em: 04 de abril de 2024.

BARBOSA, M.O.; SILVA, P.C.D.; TEIXEIRA, R.L.P. Aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 9, p. e022018, 2022. Disponível em:  
<https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/720> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

CALEGARI, C.L.; TEIXEIRA, R.L.P.; SILVA, P.C.D. Produção de alumínio secundário: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 10, p. e023013, 2023. Disponível em:  
<https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/825> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

CHEN, X. et al. Investigating the TRIP Effect in Shot-Peened ASTM F138-19 Stainless Steel: Implications for Biomedical Implants. **Surface and Coatings Technology**, Amesterdã, v. 456, p. 123-134, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.123456> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

GARCÍA, A. et al. Enhancing the Mechanical Properties of ASTM F138-19 Stainless Steel via Shot Peening: Insights from Microstructural Analysis. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, Nova Jersey, v. 112, n. 5, p. 789-798, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34912> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

GUNDGIRE, T. et al. Comparative study of additively manufactured and reference 316 L stainless steel samples—Effect of severe shot peening on microstructure and residual stresses. **Materials Characterization**, Amesterdã, v. 191, p. 112162, 2022. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112162>. Acesso em: 04 de abril de 2024.

HAN, W.; FANG, F. Electropolishing of 316L stainless steel using sulfuric acid-free electrolyte. **Journal of manufacturing science and engineering**, Nova Iorque, v. 141, n. 10, 2019, 101015. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4044518> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

HELMUT FISHER. **Helmut Fisher user manual: Ferritscope® FMP30 measurement of the ferrite content in austenitic and duplex steel**. NDT Supply.com. Lenexa. 2024. Disponível em: <https://content.ndtupply.com/assets/Uploads/Fischer-FMP30-Feritscope-User-Manual.pdf?clientId=639792014.1674687240> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

ICCD. **International Centre for Diffraction Data, Powder Diffraction File (PDF) - Phase Search**. Newtown Township. 2022. Disponível em: <https://www.icdd.com/pdfsearch/>, 2024. Acesso em: 04 de abril de 2024.

ISO. **ISO 10993-5:2009. Avaliação biológica de dispositivos médicos - Parte 5: Testes para citotoxicidade in vitro.** Genebra: Organização Internacional para Padronização. Genebra. 2009. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/36406.html> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

ISO. **ISO 5832-1:2016. Implantes para cirurgia - Materiais metálicos - Parte 1: Aço inoxidável laminado.** Genebra: Organização Internacional de Normalização. Genebra 2016. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/66636.html> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

JÄRVENPÄÄ, A.; JASKARI, M.; KISKO, A.; Karjalainen, P. Processing and properties of reversion-treated austenitic stainless steels. **Metals**, Basel, v. 10, n. 2, 2020, p. 281. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met10020281>. Acesso em: 04 de abril de 2024.

JING, Y.; FANG, X.; XI, N.; FENG, X.; HUANG, K. Investigation of microstructure and mechanical properties evolution in 7050 aluminum alloy and 316L stainless steel treated by laser shock peening. **Materials Characterization**, Amesterdã, v. 182, 2021, p. 111571. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111571> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

LACERDA, J.C. DE; PEREIRA, I.R.; COSTA, J.M.C.; PINTO, J.S.; SOUZA, H.F.M.; FONSECA, M.A. Effect of Shot Peening with Glass Microspheres on the Fatigue Behavior of a Low Carbon Steel. **Archives of Metallurgy and Materials**, Varsóvia, v. 64, n. 4, 2019, p. 1513-1518. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.24425/amm.2019.130120> .Acesso em: 04 de abril de 2024.

LINJEE, S. et al. On the severe shot peening effect to generate nanocrystalline surface towards enhancing fatigue life of injection-moulded Ti-6Al-4V alloy. **Journal of Materials Science**, Berlim, v. 58, p. 15513-15528, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08978-3> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

MALEKI, E.; UNAL, O.; KASHYZADEH, K.R. Effects of conventional, severe, over, and re-shot peening processes on the fatigue behavior of mild carbon steel. **Surface and Coatings Technology**, Amesterdã, v. 344, 2018, p. 62-74. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.081> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

MALVERN PANANALYTICAL. **X-ray diffractometers: Benchtop & floorstanding XRD solutions - X'Pert3.** Malvern. 2024. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/en>, 2024 . Acesso em: 04 de abril de 2024.

MARQUES, A.V.M.; CARMO, K.M.D.; LAGE, W.C.; TEIXEIRA, R.L.P.; LACERDA, J.C.; TEIXEIRA, C.H.S.B.; SHITSUKA, R. Avaliação do efeito de deformação plástica na dureza, microestrutura e propriedades magnéticas de um aço inoxidável AISI 316L. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, 2020, e-12611. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1011> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

MENDONÇA, C.S.P.; DE OLIVEIRA, V.D.; RIBEIRO, V.A.S.; OLIVEIRA, A.F.; DA SILVA, M.R.; RODRIGUES, C.A.; MELO, M.L.N.M. Characterization of cold rolled UNS S31803 duplex stainless steel. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 29, n. 2, p. 22-27, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2016.03.006> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

MITUTOYO CORPORATION. **SJ-210 Surface Roughness Tester [Medidor de rugosidade digital]**. Kawasaki, Japão: Mitutoyo Corporation. Kawasaki. 2010.

MITUTOYO. SurfTest SJ-210. Manual do Usuário [Internet]. Brasil: Mitutoyo, 2024. Disponível em:

[https://www.mitutoyo.pt/application/files/5515/5888/2585/BA138114\\_99MBB122P1\\_SJ-210.pdf](https://www.mitutoyo.pt/application/files/5515/5888/2585/BA138114_99MBB122P1_SJ-210.pdf) . Acesso em: 04 de abril de 2024.

MORAIS, N.W.S.; VIANA, N.F.; DE ABREU, H.F.G. Comparison of image segmentation technique, X-ray diffraction and ferritescope testing in the quantification of deformation-induced martensite in AISI 301L. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, p. 836-841, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762011000400005> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

PEREDA, M.D. et al. Impact of surface treatment on the corrosion resistance of ASTM F138-F139 stainless steel for biomedical applications. **Procedia Materials Science**, Amsterdã, v. 1, p. 446-453, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.060> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

RESNIK, M.; BENČINA, M.; LEVIČNIK, E.; Rawat, N.; Igljč, A.; Junkar, I. Strategies for improving antimicrobial properties of stainless steel. **Materials**, Basel, v. 13, n. 13, 2020, p. 2944. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13132944> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

SIEK, D.; ŚLÓŠARCZYK, A.; PRZEKORA, A.; BELCARZ, A.; ZIMA, A.; GINALSKA, G.; CZECHOWSKA, J. Evaluation of antibacterial activity and cytocompatibility of  $\alpha$ -TCP based bone cements with silver-doped hydroxyapatite and  $\text{CaCO}_3$ . **Ceramics International**, Roma, v. 43, n. 16, p. 13997-14007, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.131> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

SMITH, J. et al. Surface Treatment of ASTM F138-19 Stainless Steel Using Shot Peening: A Promising Approach for Biomedical Applications. **Materials Science and Engineering C**, Amsterdã, v. 123, p. 109876, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2024.109876> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

TALONEN, J.; ASPEGREN, P.; HÄNNINEN, H. Comparison of different methods for measuring strain induced?-martensite content in austenitic steels. **Materials Science and Technology**, Newbury Park, v. 20, n. 12, 2004, p. 1506-1512. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/026708304X4367> . Acesso em: 04 de abril de 2024.

TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez et al. The effects of niobium on the bioactivity of Ni-Ti-Al-Nb shape memory alloys. **Archives of Metallurgy and Materials**, Varsóvia, v. 66, n. 2, 2021. Disponível em: [https://www.imim.pl/files/archiwum/Vol2\\_2021/12.pdf](https://www.imim.pl/files/archiwum/Vol2_2021/12.pdf). Acesso em: 04 de abril de 2024.

TEIXEIRA, R. L. P.; SILVA, P. C. D. Advancing Metallic Biomaterials for Biomedical Implants: A Comprehensive Integrative Review. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, São Paulo, v. 18, n. 5, p. e05255, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n5-036. Disponível em: <https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/5255>. Acesso em: 04 de abril de 2024.

TEIXEIRA, R.L.P.; LACERDA, J.C. DE; FLORENCIO, K.C.; SILVA, S.N. DA; HENRIQUES, A.B. TRIP effect produced by cold rolling of austenitic stainless steel AISI 316L. **Journal of Materials Science**, Berlim, v. 58, p. 3334-3345, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08235-7>. Acesso em: 04 de abril de 2024.

TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez; GODOY, Geralda Cristina Durães de; PEREIRA, Marivalda de Magalhães. Calcium phosphate formation on alkali-treated titanium alloy and stainless steel. **Materials Research**, São Carlos, v. 7, p. 299-303, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392004000200013>. Acesso em: 04 de abril de 2024.

X'PERT QUANTIFY. **Quantitative phase analysis software for X-ray diffraction applications**. Leyweg. 2024. Disponível em: [https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/Quantify\\_brochure\\_tcm50-52027.pdf](https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/Quantify_brochure_tcm50-52027.pdf), 2024. Acesso em: 04 de abril de 2024.