



CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA LIGA Ti-6Al-4V FABRICADA POR MANUFATURA ADITIVA PELO PROCESSO EBM VIA ENSAIO DE FADIGA PARA APLICAÇÃO EM PRÓTESES PERSONALIZADAS.

Guardiola, P.C. - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – paulo.guardiola@aluno.ifsp.edu.br

Souza, C.M.P. - Universidade Presbiteriana Mackenzie - caiquemovio@gmail.com

Oliveira, R.R. – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - rolivier@ipen.br

Dantas, R.D. - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – rogenginf@gmail.com

Seriacopi, V. - Instituto Mauá de Tecnologia - vanessa.seriacopi@maua.br

Junior, W.S. - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - wilsoncarlos@ifsp.edu.br – Av. Salgado Filho, 3501 – Centro – Guarulhos – SP, 07115-000

RESUMO

A evolução da manufatura aditiva ao longo dos anos tem revolucionado a indústria de materiais e processos da engenharia, proporcionando novas oportunidades para a criação de peças de geometria complexa. O processo de manufatura aditiva *Electron Beam Melting* (EBM) é o mais utilizado na área médica e por isso será objeto do estudo desse trabalho, sendo avaliadas as propriedades de fadiga uniaxial em corpos de prova da liga Ti-6Al-4V fabricadas por EBM. Os corpos de prova foram confeccionadas com camadas de 30 µm sendo a estratégia de varredura unidirecional sem mudança entre as camadas. Caracterizações mecânicas e microestruturais dos corpos de provas foram realizadas por uma série de análises e ensaios mecânicos tais como ensaios de fadiga, rugosidade, microscopia eletrônica de varredura, microscopia ótica e difração de raios X. Os resultados obtidos mostraram resistência à fadiga sob cargas compressivas superiores a corpos de provas fabricadas por processos convencionais.

Palavras chaves: Manufatura Aditiva, resistência à fadiga, microestrutura, Ti-6Al-4V.

INTRODUÇÃO

Desde a década de 1980, as técnicas de construção de peças camadas por camadas vêm sendo desenvolvidas (1). A utilização da manufatura aditiva (MA) possibilita a construção de formas geométricas complexas por meio de um arquivo CAD, o modelamento virtual é fatiado transversalmente por meio de software, o que proporciona diversas camadas, cada camada apresenta coordenadas bidirecionais (2). Essas coordenadas possibilitam a construção de objetos tridimensionais camada por camada, uma sobre a outra, até a finalização da peça (3).

As técnicas de sobreposição da manufatura aditiva vêm sendo aplicadas na área biomédica principalmente em implantes ortopédicos, as ligas metálicas ganham uma notoriedade, pois devem possuir propriedades biológicas favoráveis à interação com complexas mudanças e reações do corpo humano (4).

As ligas de titânio são as preferidas da indústria biomédica, na divisão de implantes, devido às suas boas propriedades mecânicas, sua biocompatibilidade e resistência à corrosão (5). A área biomédica utiliza-se da manufatura aditiva em uma ampla gama de aplicações (6), visto que cada paciente possui uma anatomia e necessidade específica, sendo assim, a MA produz o implante personalizado que deve corresponder a anatomia do paciente visando a redução do tempo de pós-operatório (7) e a redução do tempo de cicatrização (8). Com tudo que foi apresentado, fica nítida a importância da caracterização das propriedades de fadiga destes materiais, por meio da realização de ensaios laboratoriais, visto que ainda tem-se poucas informações sobre as propriedades desta liga produzida por Manufatura Aditiva.

Este trabalho tem como objetivo estudar a resistência a fadiga da liga Ti-6Al-4V fabricada por meio de manufatura aditiva, por meio da técnica de *Electron Beam Melting* (EBM), visando a aplicação em próteses.

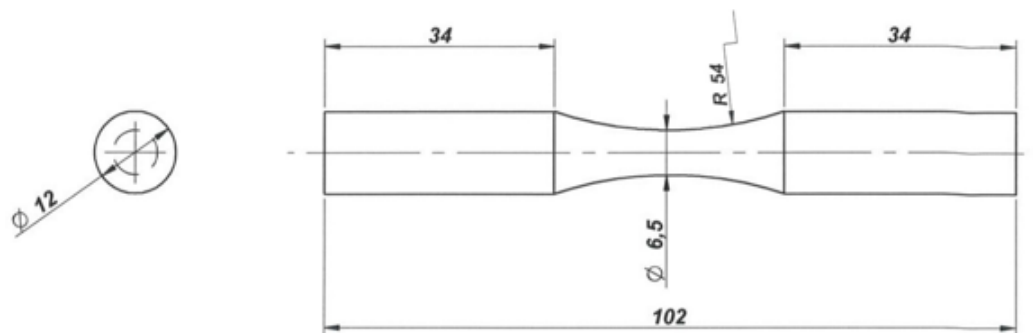
MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria prima utilizada na fabricação das amostras é uma da liga de titânio, tecnicamente conhecida como Ti-6Al-4V na condição de pó. A empresa fornecedora do pó Ti6Al4V - Grade 23 é a fabricante AP&C da GE Additive Company. Este pó é obtido por meio de atomização a plasma com distribuições de tamanho de partícula de 15 a 45 µm, 15 a 63 µm, 45 a 106 µm, 45 a 150 µm e de 106 a 180 µm. Esses pós, por serem atomizados a plasma, possuem geometria altamente esférica, praticamente não

possuem porosidades e eles possuem quantidade de satélite mínima, implicando em fluidez e densidade de empacotamento muito boas.

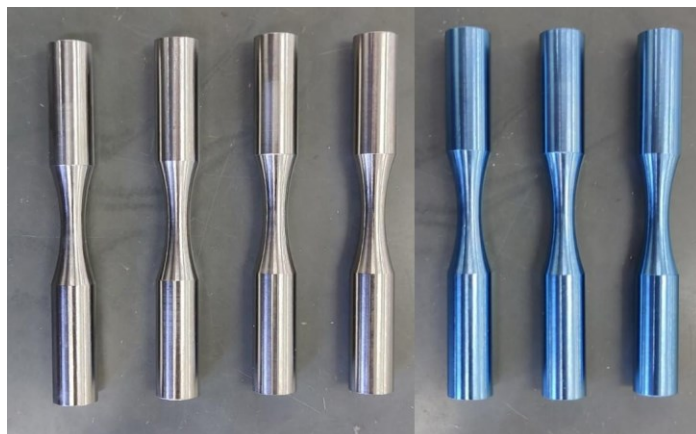
Nos ensaios de fadiga foram utilizados 7 corpos de provas fabricados por manufatura aditiva, processo EBM da liga Ti-6Al-4V, sendo que 4 corpos de prova possuem tratamento superficial de anodização e 3 corpos de prova sem anodização. Os corpos de prova possuem as dimensões mostradas na Figura 1.

Figura 1 – Dimensões do corpo de prova de fadiga uniaxial (em mm).



Os ensaios de fadiga foram realizados na máquina de ensaios Instron - 8801 conforme a norma ASTM E466. Os ensaios foram realizados no IFSP campus São João da Boa Vista. Os três primeiros ensaios utilizaram um fator de carga $r = 0,1$, pois o intuito do estudo é direcionado para próteses que prioritariamente recebem tensões compressivas, como a resistência à fadiga da liga Ti-6Al-4V é de aproximadamente 460MPa, quando fabricada por processos convencionais (9), o primeiro ensaio foi feito com 500MPa e posteriormente dois corpos de prova com 727,35MPa, um anodizado e outro sem tratamento superficial para efeito de comparação. Os corpos de prova foram submetidos até 10^7 ciclos. Os 4 últimos CPs foram ensaiados com razão $r = -1$, com o intuito de provocar uma faixa de tensão $\Delta\sigma$ maior com as tensões de 200,250,300 e 600 MPa. A figura 2 ilustra os corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga.

Figura 2 – Corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga.



A medição da rugosidade antes do ensaio de fadiga foi realizada utilizando a máquina Formtracer SV-C3000 da Mitutoyo, com um valor de cutoff de 0,8 mm e um filtro gaussiano aplicado. Foram realizados 4 medições ao longo do eixo em cada corpo de prova a cada 90° de rotação.

A microscopia ótica foi feita com o microscópio de modelo Olympus BX51M, equipada com a câmera Olympus UC30, seguindo a norma ASTM E-11 (2017). A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no SENAI Nadir Dias de Figueredo, sendo o equipamento utilizado da marca Hitachi modelo TM 3000.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos ensaios de fadiga, para os corpos de prova submetidos a tensões compressivas e com razão de 0,1 não houve alterações superficiais e nem o rompimento dos corpos de prova. Sendo possível notar que os corpos de prova (CP) suportaram tensões superiores ao limite de fadiga da liga Ti-6Al-4V de corpos de provas fabricados por processos convencionais. Conforme estudos anteriores, a liga Ti-6Al-4V suportou tensões compressivas para $R=0,1$ com cargas entre 0,3kN e 3kN, sem apresentar nenhuma deformação, fratura, ou mudança no aspecto visual ⁽¹⁰⁾. A tabela 1 apresenta os dados dos ensaios.

Tabela 1 – Dados ensaio de fadiga com razão de 0,1.

CP	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Ciclos	Tratamento Superficial
1	500	10^7	N/A
2	727	10^7	N/A
3	727	10^7	Anodização

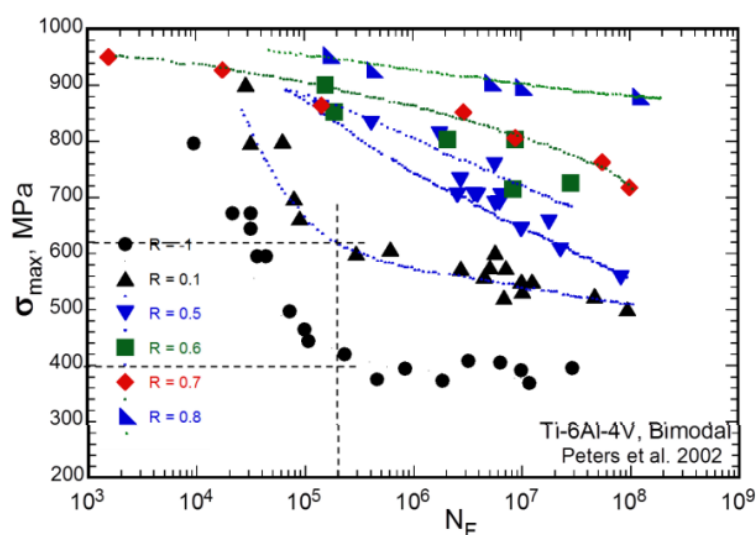
Para os corpos de provas submetidos a tensões tração e compressão com razão de $r = -1$, foram notados que os corpos de provas sofreram rupturas com valores menores se comparados com os corpos de provas submetidos a compressão-compressão, o melhor resultado foi no corpo de prova 7 submetido a 200 MPa por mais de 10^7 ciclos, a tabela 2 apresenta as informações destes ensaios.

Tabela 2 – Dados ensaio de fadiga com razão de -1.

CP	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Ciclos	Tratamento Superficial	Rompimento
4	600	48.713	N/A	Sim
5	300	3.046.377	N/A	Sim
6	250	8.015.314	Anodização	Sim
7	200	10^7	Anodização	Não

A figura 3 apresenta a curva S-N para a liga Ti-6Al-4V fabricada por processo convencionais para diferentes . Essa relação direta entre a tensão e a vida em fadiga reflete o comportamento típico dos metais sob carregamentos cíclicos, onde tensões mais altas aceleram o processo de nucleação e propagação de trincas. Segundo a literatura, o limite de fadiga da liga Ti-6Al-4V fabricada por métodos convencionais é de 460MPa, quando $r = 0,1$; portanto, o limite de fadiga da liga fabricada por EBM é maior, indicando qual será o seu desempenho em utilização de próteses, visto que as próteses não costumam receber a carga trativa como foi feito no ensaio com o $r = -1$.

Figura 3 – Curva S-N para a liga Ti-6Al-4V (11).



Foram realizado ensaio de líquido penetrante nos corpos de provas que não sofreram fratura analisando se eles apresentavam indícios de fratura subsuperficial, que pudesse ser detectado por ensaio não destrutivo. A figura 4 apresenta o procedimento.

Figura 4 – Corpos de prova a) antes do ensaio, b) com aplicação do líquido penetrante, c) aplicação do revelador e d) preparada para inspeção final.



a)



b)



c)



d)

Nas análises por microscopia ótica, notou-se que no corpo de prova 4 na superfície de fratura houve a nucleação de duas trincas, uma central e outra em um local periférico, próximo da superfície externa do corpo de prova, enquanto os corpos de prova 5 e 6 tiveram a sua nucleação apenas nessa região mais periférica da secção transversal.

Os resultados do ensaio de rugosidade são mostrados na tabela 3. Os corpos de prova 1 e 2 tinham uma média Ra de 0,949 μm e 0,916 μm respectivamente e depois do ensaio apresentaram uma média Ra de 1,36 μm e 1,35 μm , apresentando um aumento na rugosidade após o ensaio.

Os corpos de prova 3 e 7 são anodizados e tiveram a sua média Ra de 1,23 μm e 1,24 μm respectivamente, sofrendo menor alteração na sua rugosidade, indicando,

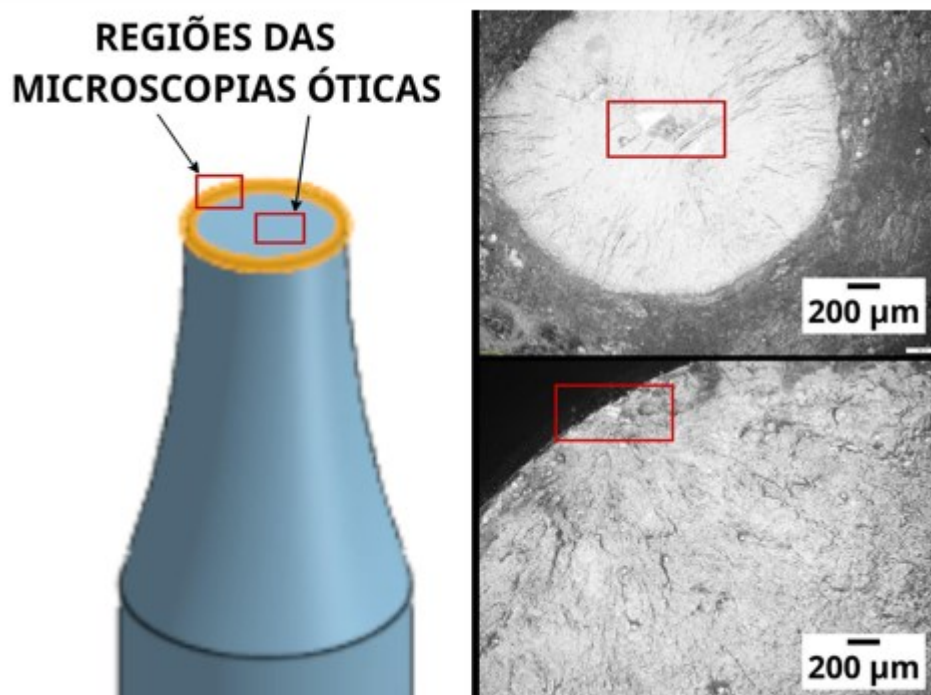
o aumento na rugosidade pode criar locais preferenciais para a nucleação de trincas, potencialmente reduzindo a vida em fadiga do material. No entanto, a anodização também introduz uma camada de óxido na superfície, que pode atuar como uma barreira protetora contra a corrosão, algo especialmente relevante em ambientes fisiológicos. Apesar disso, não houve evidência da principal trinca ter interagido com a rugosidade superficial e nucleado a partir da superfície do corpo de prova.

Tabela 3 – Dados ensaio de fadiga com razão de -1.

CP	Rugosidade média antes do ensaio de fadiga (μm)	Rugosidade média antes do ensaio de fadiga (μm)
1	0,949	1,36
2	0,916	1,35
3	Não realizado	1,23
4	Não realizado	1,24

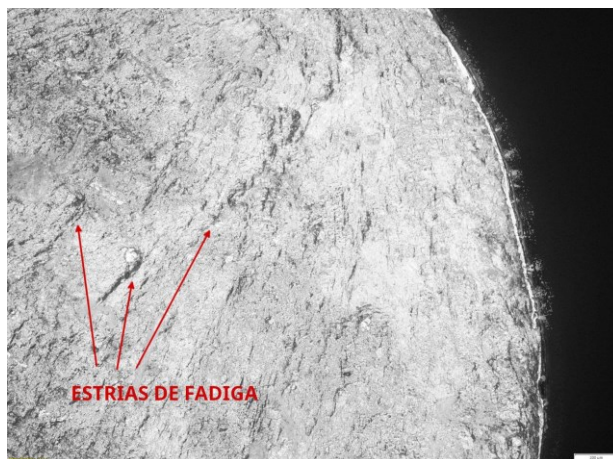
As micrografias óticas apontaram que a nucleação no interior do corpo de prova 4 se propagou através de uma faceta lisa conforme a figura 4, enquanto a segunda trinca crescia em direção ao interior do corpo de prova. Esse comportamento evidencia a propagação da trinca radialmente até que a trinca atinja a borda do corpo de prova.

Figura 4 – Microestrutura corpo de prova 4.



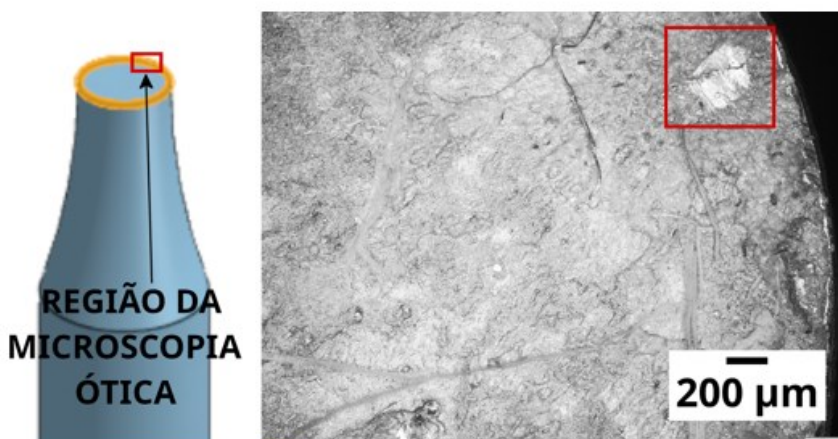
A trinca do corpo de prova 5 nucleou na borda, com as suas estrias de fadiga indicando a direção da propagação da trinca, isso é mostrado na figura 5. A análise das superfícies de fratura mostrou que as trincas se propagaram de maneira diferente entre o corpo de prova 4 e os corpos de prova 5 e 6. O corpo de prova com a maior tensão trativa aplicada teve a nucleação em dois pontos diferentes, enquanto os corpos de prova ensaiados ≤ 300 MPa, exibiram características de fratura típicas de uma propagação de trinca mais controlada.

Figura 5 – Microestrutura corpo de prova 5.



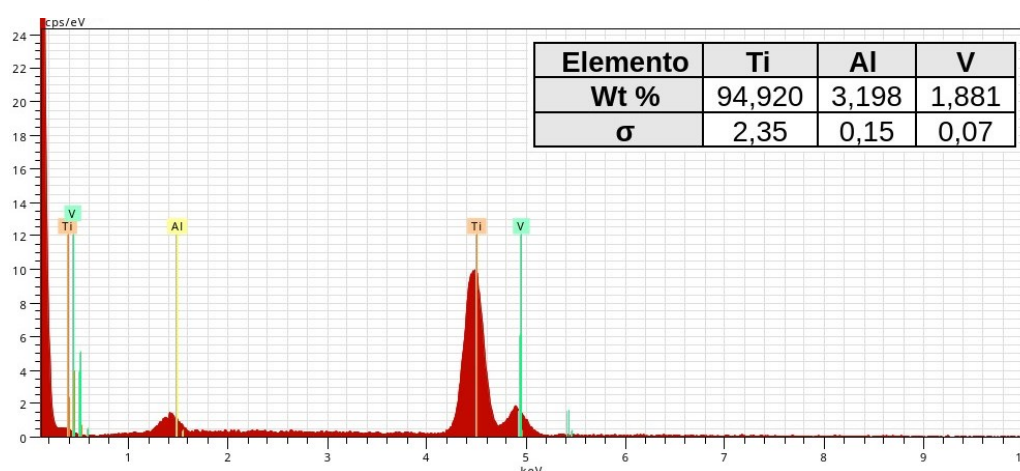
O início da trinca de todos os corpos de prova foi localizado em defeitos internos, essa região promove uma alta concentração de tensão e consequentemente a redução na resistência à fadiga, essa região está evidenciada na figura 6, e ao longo da fratura o corpo de prova apresentou outra faceta lisa, linhas de fratura e *dimples*. O restante da região de fratura não apresenta qualquer defeito residual ou inerente do processo de fabricação que poderia influenciar na propagação da trinca desse material.

Figura 6 – Microestrutura corpo de prova 6.



No entanto, o corpo de prova 7 que foi submetido a uma tensão de 200 MPa não apresentou falha, mesmo após 10^7 ciclos, sugerindo a existência de um limite de fadiga perto de 200MPa. Os valores obtidos são muitos próximos ao limite de fadiga da liga Ti-6Al-4V fabricada por processo convencionais. Os corpos de prova 4, 5 e 6 foram submetidos a uma análise por EDS. Nas amostras analisadas, foram identificados picos de titânio, além da presença dos elementos alumínio e vanádio, conforme ilustrado na figura 7. Esses resultados confirmam a composição esperada da liga utilizada, descartando a presença de contaminantes nas amostras.

Figura 7 – EDS dos corpos de prova 4, 5 e 6.



CONCLUSÕES

A liga Ti-6Al-4V apresentou uma resistência à fadiga sob cargas compressivas superior à resistência sob cargas de tração-compressão, isso se dá pois o material tem menos chances de as trincas se propagarem, visto que a compressão tende a fechar as trincas existentes. Além disso as trincas sob cargas compressivas tendem a se formar paralelamente ao direção da tensão, como as linhas de fratura apresentadas no CP 6. Os corpos de prova apresentaram uma resistência à fadiga para cargas compressivas acima de 727,35 MPa para $r = 0, 1$, maior que o valor obtido por amostras de Ti-6Al-4V fabricadas por processo convencionais; para $r = -1$ o limite de resistência entre os dois tipos de processo de fabricação foi comparado, sendo o valor menor para as amostras fabricadas pelo processo EBM.

REFERÊNCIAS

1. BRANDLA, E. Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes. *Materials Science and Engineering*, v.26, p. 1-10, 2011.
2. FERNANDES, G. M. et al. Study of forces applied in maxillary prosthesis using finite element method. *Caleidoscópio*, v. 15, n. 1, p. 1-8, 2023.
3. HERZOG, D. et al. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, v. 117, p. 371–392, 2016.
4. WANG, Y. Biadaptability: An Innovative Concept for Biomaterials. *Journal of Materials Science and Technology*, v. 32, n. 9, p. 801–809, 2016.
5. PUEBLA, K. Advanced Metallic Materials: Technological Exploitation of Mechanical Properties. *Advanced Materials & Processes*, p. 29-31, 2011.
6. COX, S. C. et al. Adding functionality with additive manufacturing: Fabrication of titanium-based antibiotic eluting implants. *Materials Science and Engineering C*, v. 64, p. 407–415, 2016.
7. JOHNSON, G. R. et al. Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strain, high-strain rates, and high temperatures. Los Alamos National Laboratory, 1989.
8. SILVA Junior, W. C. et al. Obtaining the predicted number of cycles of femoral prosthesis manufactured with ASTM F138 and ASTM F75 alloys, applying the method of finite element. In: *Journal of physics: conference series*. IOP Publishing, 2021. p. 012026.
9. Souza, C. M. P. Characterization of Ti-6Al-4V titanium alloy applied in hydroxyapatite coated hip prostheses. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 8, p. e2211830629-e2211830629, 2022.
10. LIU, S. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, v. 164, p. 107552, 2019.
11. BARAGETTI, S. Notch Corrosion Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V. *Materials*, v.7, n.6, p. 4349–4366, 2014.

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF TI-6AL-4V ALLOY MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING USING THE EBM PROCESS THROUGH FATIGUE TESTING FOR APPLICATION IN CUSTOMIZED PROSTHETICS.

ABSTRACT

The evolution of additive manufacturing over the years has revolutionized the materials and engineering processes industry, providing new opportunities for creating complex geometries. The Electron Beam Melting (EBM) additive manufacturing process is the most widely used in the medical field and will therefore be the focus of this study, which evaluates the uniaxial fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy specimens manufactured by EBM. The specimens were produced with 30 μm layers using a unidirectional scanning strategy with no change between layers. Mechanical and microstructural characterizations of the specimens were conducted through a series of analyses and mechanical tests, such as fatigue tests, roughness measurements, scanning electron microscopy, optical microscopy, and X-ray diffraction. The results showed fatigue resistance under compressive loads superior to specimens manufactured by conventional processes.

Keywords: Additive Manufacturing, Fatigue Resistance, Microstructure, Ti-6Al-4V