

ANÁLISE DE FADIGA EM UM DISPOSITIVO DE FUSÃO LOMBAR TRANSFORAMINAL (TLIF) EB-PBF TI6AL4V

Leandro Cardoso da Silva, Leandro.cardoso@sp.senai.br¹

Gilmar Ferreira Batalha, gfbatalh@usp.br¹

¹Universidade de São Paulo – Escola Politécnica - EPUSP-PMR, São Paulo – SP, Brasil.

Resumo: Na Manufatura Aditiva por fusão de feixe de elétrons (EBM-PBF), as próteses de fusão lombar têm sido a escolha dos fabricantes, pois o processo de Manufatura Aditiva EBM-PBF possibilita a construção de geometrias complexas e otimizadas para aplicação em produção de larga escala. As normas relevantes para a validação mecânica deste produto são ensaios estáticos e dinâmicos em constante evolução, regidos de forma homologadora com requisitos a serem atendidos para comprovar a validação estrutural e garantir a erradicação de problemas. A grande área da mecânica estrutural vem trabalhando preventivamente em cálculos estruturais para antecipar problemas decorrentes de cargas especificadas em projetos, em relação à geometria e materiais concebidos pelos projetistas e idealizadores de próteses por meio de simulações computacionais. Esta pesquisa tem como objetivo aplicar o estudo da fadiga computacional em um Dispositivo de Fusão Lombar Transforaminal (TLIF) utilizando dados de teste de fadiga de alto ciclo (HCF), através do Método de Análise de Elementos Finitos (MEF) para representar os danos mecânicos ocorridos no teste físico. Dadas as propriedades mecânicas do material (módulo de elasticidade, resistência ao escoamento, resistência à tração e densidade), os corpos de prova de de fadiga (HCF) foram testados para avaliação da vida em fadiga entre 10^7 para melhorar a duração do teste em comparação com os métodos tradicionais. Essas análises preventivas e preditivas trazem uma possibilidade futura de desenvolvimento de modelos geométricos de próteses lombares capazes de atender aos ensaios físico-mecânicos solicitados pela norma ASTM F2077-18, que utilizam procedimentos que ainda aplicam os métodos tradicionais, caros e extremamente demorados. Os resultados obtidos através do MEF foram eficazes, mostrando que este método preditivo pode auxiliar no desenvolvimento de novos produtos fabricados por Manufatura Aditiva por fusão de feixe de elétrons aplicados a liga de Titânio grau 5.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Feixe de Elétrons, Fadiga, Titânio Ti-6Al-4V, Dispositivo de Fusão Lombar.

1. INTRODUÇÃO

Toda a sustentação do corpo humano depende da coluna vertebral, cuja função é transmitir as cargas geradas pelo tronco e cabeça para os membros inferiores, ela também tem ligação com os músculos do pescoço e costelas em sua estrutura curva e flexível. Avaliando a medida total do corpo humano temos (MARIEB; WILHELM; MALLATT, 2017):

- 22% representado pela coluna cervical;
- 36% representado pela coluna torácica;
- 15% representado pela coluna lombar;
- 27% através da coluna sacrococcígea.

Todas as vértebras têm várias características comuns, muitas das quais são evidentes após o exame de diferentes pontos de vista de uma coluna torácica vertebral (MARIEB; WILHELM; MALLATT, 2017). O corpo de uma vértebra é a grande massa cilíndrica de osso que serve como o principal suporte de peso em toda a estrutura da coluna vertebral. O disco intervertebral é o anel espesso de fibrocartilagem cheio de fluido que serve como um amortecedor em toda a coluna vertebral. A junta intersomática é formada pela junção de dois corpos vertebrais e o disco intervertebral interposto (MOBBS et al., 2015; TALIA et al., 2015; VACCARO, 2002):

- Cervical – 7 vértebras cervicais;
- Torácica – 12 vértebras torácicas;
- Lombar – 5 vértebras lombares;
- Sacrococcígeas – 5 vértebras sacrais e 4 coccígeas.

A Fusão Lombar Transforaminal (TLIF) é uma técnica popular para o tratamento de doenças lombares degenerativas. A segurança e eficácia desta técnica foram demonstradas em muitos estudos clínicos. O TLIF resulta em menos destruição dos elementos posteriores, e menos desestabilização da coluna, o que maximiza a estabilidade da fusão. Além disso, permite melhor acesso ao neuroforame e reduz a necessidade de manipulação das raízes nervosas espinhais. Devido ao

procedimento simplificado e à técnica unilateral, o tempo operatório, a perda potencial de sangue e o risco às estruturas neurais são reduzidos (WANG et al., 2015).

Os mais comuns estão ilustrados na Figura 1. De acordo com esses três principais tipos de dispositivos lombares, esta pesquisa foi orientada pelo tipo caixa aberta, conforme mostra a Figura 1 (d).

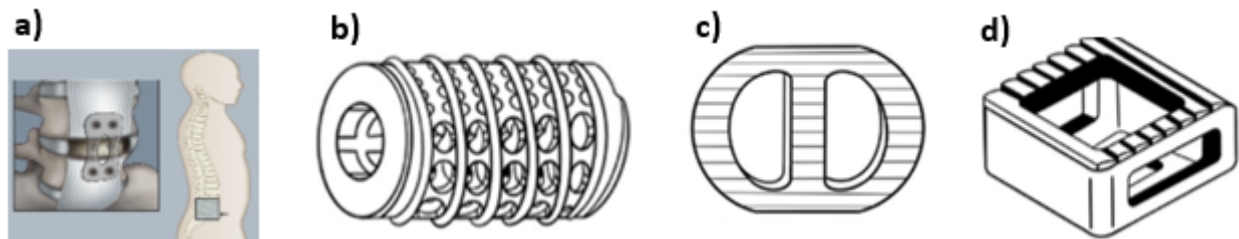


Figura 1. (a) Região de introdução do dispositivo de fusão lombar – principais tipos de dispositivos: (b) Cilíndrico; (c) Anel (d) Caixa aberta (HUANG et al., 2021).

1.1 Processo de Manufatura Aditiva PBF-EBM

No processo de manufatura aditiva PBF-EBM, o feixe de elétrons é usado como fonte de calor para derreter o pó. Normalmente, o feixe de elétrons funciona nominalmente com uma tensão de aceleração de 60 kV para fornecer uma densidade de energia no feixe focalizado superior a 106 kW/m^2 (100 kW/cm^2). Na Figura 2 é ilustrado um diagrama esquemático do processo PBF-EBM (100 kW/cm^2) (MELTING et al., 2022; MOHAMMADHOSSEINI, 2015; SOUNDARAPANDIYAN et al., 2021).

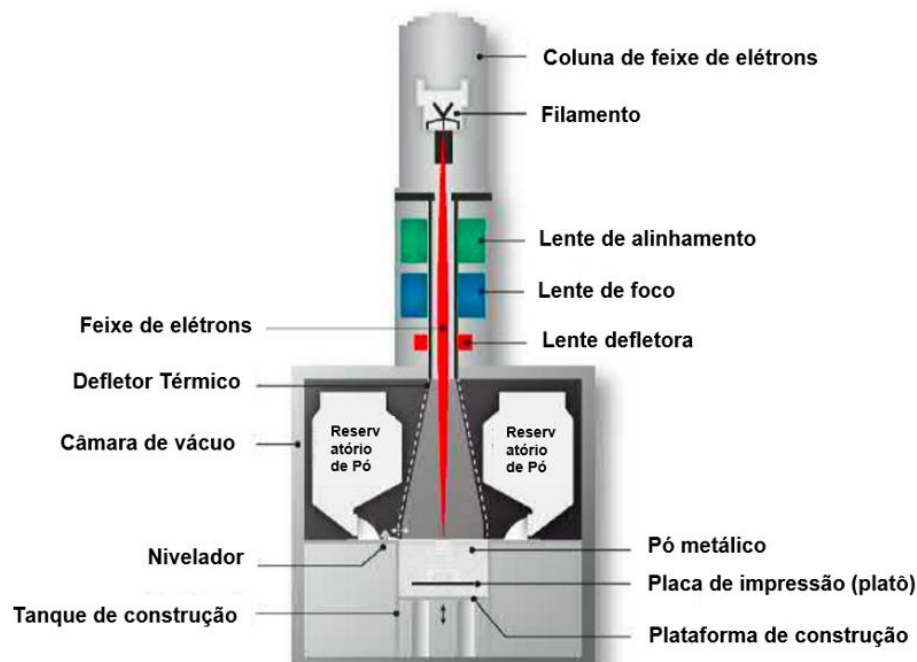


Fig 2. Impressora PBF-EBM ARCAM Q10 (MOHAMMADHOSSEINI, 2015)

As micrografias dos pós virgens e reciclados são mostradas na figura 3 (a) e 3 (b), respectivamente. Em ampliação menor (figura 3 a), ambos os pós parecem semelhantes. A maioria das partículas é esférica com algumas características comuns geralmente encontradas em pós tipo satélite, com alongamentos e partículas de formato irregular, aglomerados e partículas com poros abertos, conforme indicado pelas setas amarelas. No entanto, uma diferença distinta na morfologia da superfície do pó pode ser vista em alta ampliação.

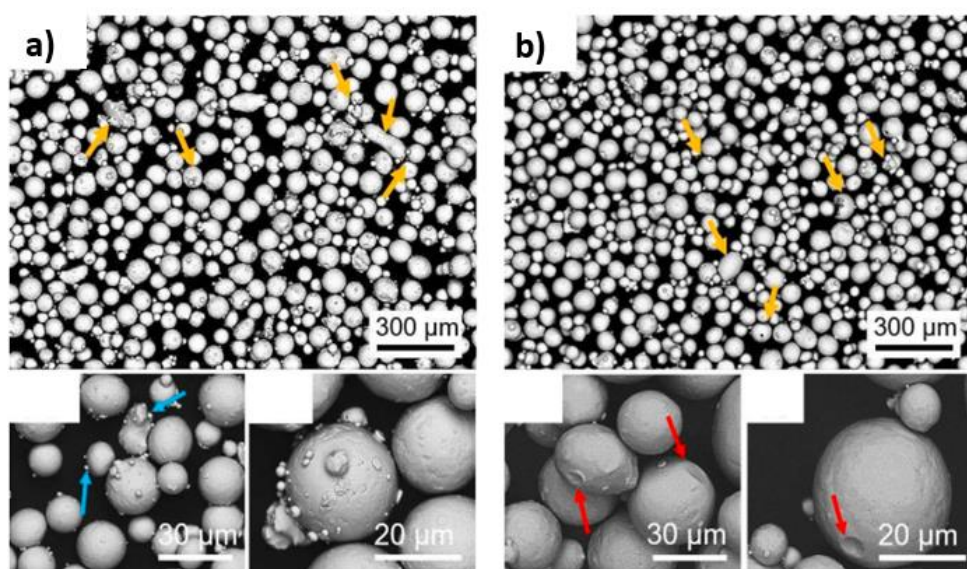


Fig 3. (a) Pó virgem, (b) Pó reciclado. (SOUNDARAPANDIYAN et al., 2021)

O pó virgem, figura 3 (a), contém um número significativo de partículas finas (indicadas por setas azuis) ligadas a partículas mais grossas. Em comparação, o pó reciclado mostra crateras (depressões rasas) e concavidades (depressões mais profundas) na superfície do pó, conforme indicado pelas setas vermelhas na Figura 3 (b) (SOUNDARAPANDIYAN et al., 2021). A Figura 4 mostra as diferentes interações entre o feixe de elétrons e a matéria-prima em pó virgem e reciclado (COLE et al., 2009; MEENA et al., 2021; MELTING et al., 2022; MOHAMMADHOSSEINI, 2015; PALANIVEL et al., 2016; PECK et al., 2018; PETROVIC; NIÑEROLA, 2015).

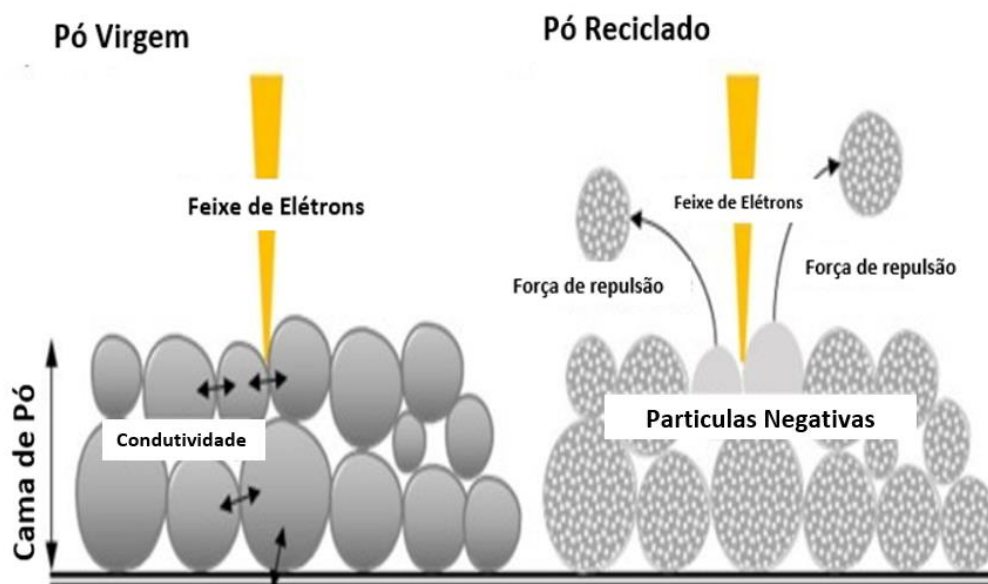


Fig 4. Diferentes interações entre o feixe de elétrons e a matéria-prima em pó virgem e reciclado (MELTING et al., 2022).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O método computacional é baseado nos resultados experimentais obtidos no ensaio de fadiga de flexão rotativa de alto ciclo com uma frequência de 2880 ciclos por minuto, realizado em nove corpos de prova cilíndricos conforme mostrado na figura 5 (a). O corpo de prova é fixado de um lado por um mandril de pinça e guiado do outro lado por um mancal flutuante. Uma carga concentrada é aplicada em uma extremidade do corpo de prova usando uma balança de mola e o mancal flutuante, conforme figura 5 (b). Os corpos de prova foram produzidos por manufatura aditiva EBM-PBF, na impressora ARCAM Q10 e depois finalizados pelo processo de usinagem (MOHAMMADHOSSEINI, 2015).

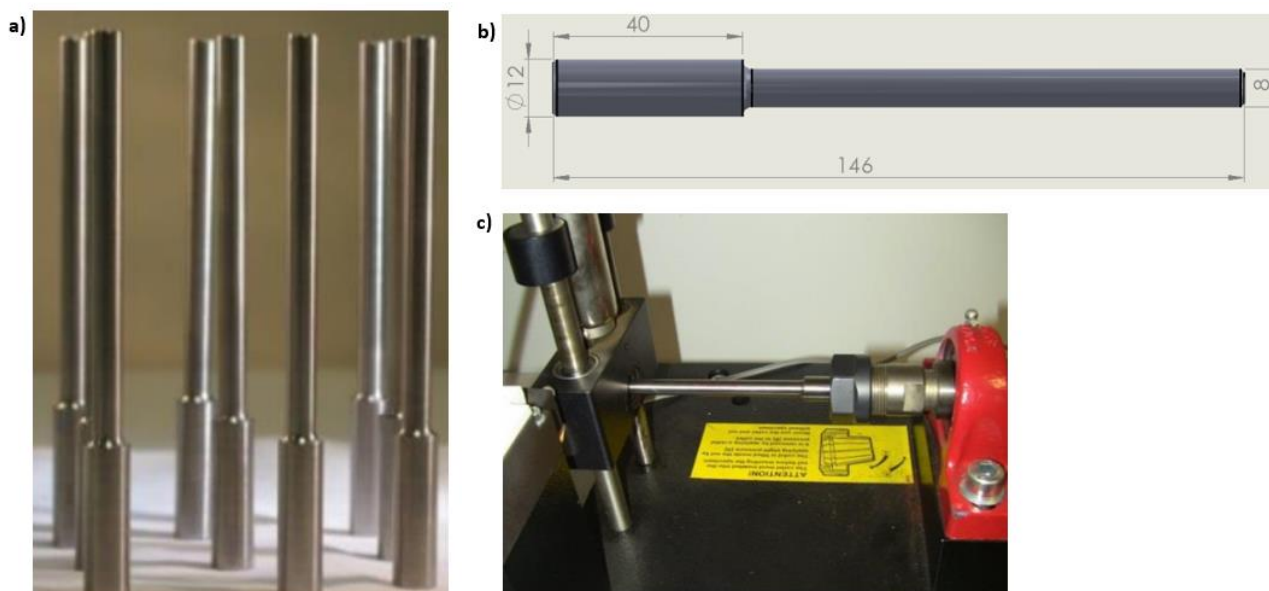


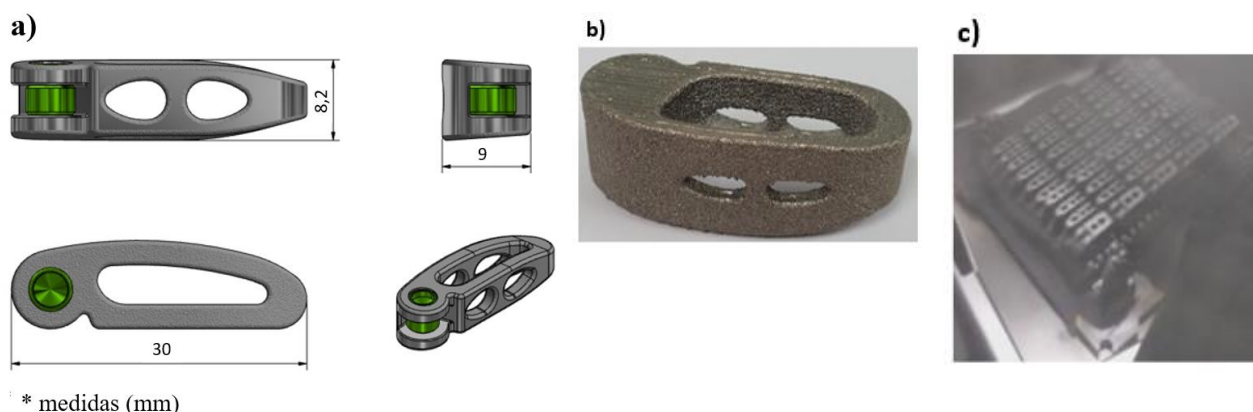
Figura 5. (a) Amostras de fadiga de flexão rotativa ; (b) Dimensões das amostras (mm); (c) Teste dos corpos de prova por flexão rotativa (MOHAMMADHOSSEINI, 2015).

A fabricação do Dispositivo de Fusão Lombar TLIF foi realizado pela tecnologia de Manufatura Aditiva EBM - PBF em uma máquina ARCAM Q10, seguindo o processo de fluxo de trabalho conforme tabela 1.

Tabela 1. Fluxo de trabalho usado para o desenvolvimento de gaiola de espinélio fabricada aditiva personalizada (COLE et al., 2009).

GEOMETRIA	PREPARAÇÃO	MANUFATURA
- Dados do desenho bruto TC/RM. - Análise e refinamento de projeto de acordo com a necessidade do caso específico. - Estudo FEA para determinar sua estabilidade e vida útil estimada em fadiga.	- Geração de suporte para impressão. - Simulação do processo de impressão para verificar a printabilidade e evitar desperdício de material. - Atribuição de parâmetros de impressão PBF-EBM e geração de caminho de digitalização.	- Impressão em ambiente neutro. - Pós-processamento como tratamento térmico, jateamento etc. - Inspeção – certificação.

Neste trabalho, foi testado e analisado um Dispositivo de Fusão Lombar TLIF (Transforaminal Lombar Interbody Fusion) usando um modelo MEF para carregamento de fadiga de alto ciclo (HCF). Na figura 6 (a), demonstra-se as dimensões geométricas das peças de estudo, bem como as imagens dos componentes impressos (figura 6 b e 6 c).



* medidas (mm)

Figura 6. (a) Geometria do Dispositivo de Fusão TLIF; (b) Dispositivo de Fusão TLIF Ti-6Al-4V; (c) Impressão por Manufatura aditiva do Dispositivo de Fusão TLIF na ARCAM Q10.

Existe um processo a ser seguido para a introdução de um Dispositivo de Fusão Lombar TLIF. Um dispositivo de tamanho apropriado foi inserido no espaço do disco intervertebral e posicionado na orientação transversal, auxiliada por uma ferramenta de inserção. O passo a passo do procedimento cirúrgico está ilustrado na figura 7 (WANG et al., 2015).

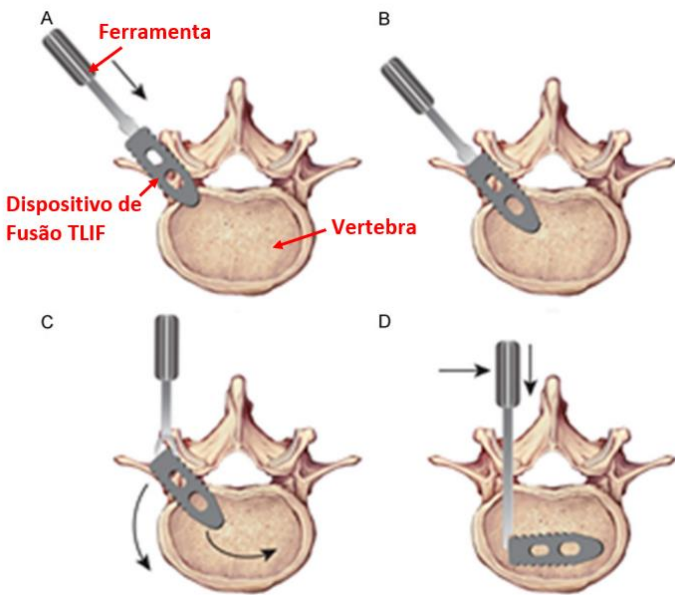


Figura. 7. (a -d) sequência realizada para introdução do Dispositivo de Fusão Lombar (TLIF) entre duas vértebras após a remoção do disco degenerado (WANG et al., 2015).

Segundo PECK et al. (2018), que aplicou as normas ASTM F2077-18 (2015) e ASTM F2267-04 (2018) em suas pesquisas, a carga de fadiga medida e considerada para os critérios de aceitação para o Dispositivo de Fusão Lombar TLIF é de 3 kN. Seguindo alguns resultados anteriores obtidos por MOHAMMADHOSSEINI (2015), e o fluxo de trabalho proposto por COLE et al. (2009), DERIMOW et al. (2022), MEENA et al. (2021); MELTING et al. (2022), PALANIVEL et al. (2016), PETROVIC et al. (2015) e SOUNDARAPANDIYAN et al. (2021), foi possível caracterizar e comparar amostras fabricadas por manufatura aditiva EBM-PBF usando o Titânio Ti-6Al-4V grau 5, em duas condições de pós: a primeira com pó virgem e a segunda com pó reciclado; os resultados obtidos são mostrados na figura 8. Neste trabalho, o método computacional foi empregado para plotar a tensão máxima versus o número de ciclos até a falha, de acordo com os dados tabulados na Figura 8. Para construir a curva S-N para a liga Ti- 6Al-4V foi utilizando o software Ansys 2021/R22, pode-se afirmar que para uma tensão de 600 MPa haverá uma falha funcional do Dispositivo de Fusão Lombar TLIF (reciclado) entre 13.000 a 19.000 ciclos, e para uma tensão de 400 MPa (reciclado) entre 29.000 a 79.000 ciclos e assim por diante. A medição ocorrerá até atingir uma tensão menor ou igual a 275 MPa, onde o componente atingirá 10^7 ciclos, tendo sua vida em fadiga considerada como infinita. O método também é aplicado ao pó virgem de Ti-6Al-4V.

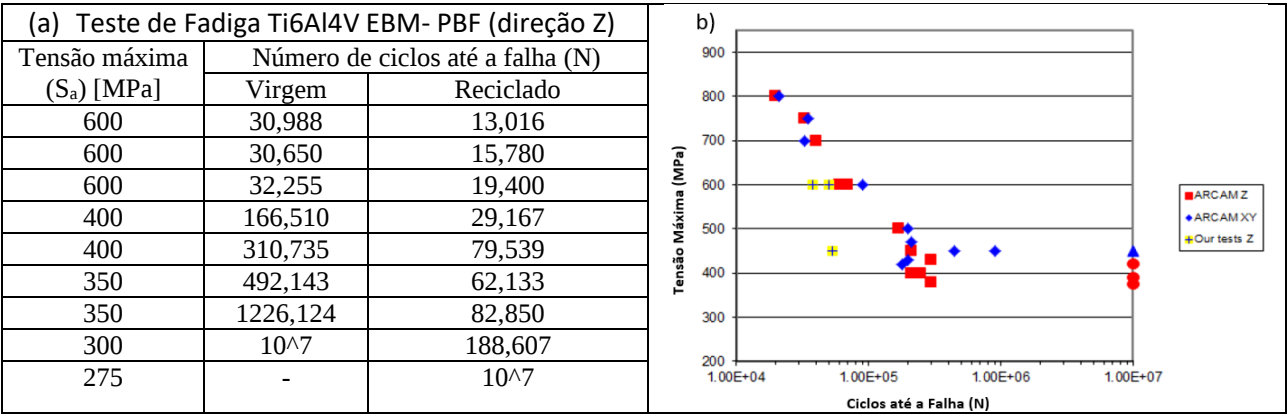


Figura 8. Resultados experimentais de um teste de fadiga de flexão rotativa em amostras EBM-PBF: (a) tabela com tensão máxima (S_a^{max}) versus ciclos até a falha (N_f) e (b) gráfico de resistência à fadiga para amostras de EBM-PBF (MOHAMMADHOSSEINI, 2015).

A liga Ti-6Al-4V impressa pelo processo EBM-PBF possui propriedades específicas e para otimizar a confiabilidade da simulação numérica, foram realizados ensaios mecânicos utilizando as amostras fabricadas pela tecnologia de Manufatura Aditiva. Os detalhes da curva tensão-deformação obtidos, foram imputados no software Ansys 2021/R2, conforme tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas das amostras fabricadas pela tecnologia de Manufatura Aditiva EBM-PBF para o Ti-6Al-4V.

Densidade	Módulo de Young's	Tensão de escoamento	Tensão de Ruptura	Alongamento	Dureza - Rockwell B
4,4 Kg/m ³	118 GPa	851 MPa	982 MPa	10-15%	30-35 HRB

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após criar as novas variáveis do material no software Ansys 2021/R22 denominadas Ti-6Al-4V (virgem) e Ti-6Al-4V (reciclado), as principais condições de contorno para realizar o cálculo computacional pelo método dos elementos finitos (MEF) foram selecionados, de acordo com a figura 7:

- Malha FEM: Tetraédrica usando um tamanho de malha de 0,5 mm e um fator de escala de 1;
- Simulação: Tipo baseado em zero;
- Os dispositivos de fusão lombar sofrem carga compressiva após a substituição do disco espinhal conforme padrão ASTM F2077-18 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015);
- Teoria da tensão média: Goodman;
- Componente de tensão: tensão equivalente (Von-Misses).

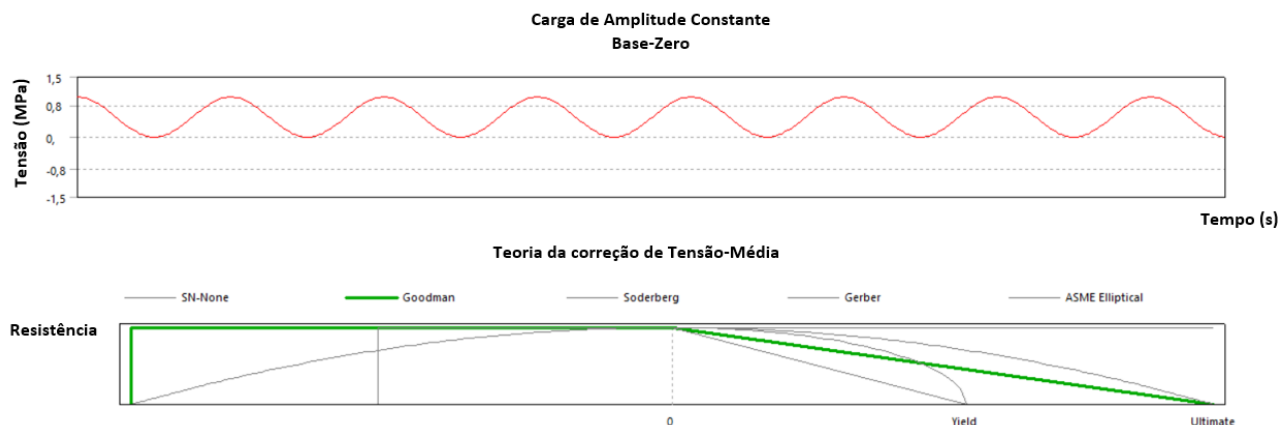


Figura 9. Exemplo gráfico da simulação base-zero aplicando a tensão média de Goodman.

As curvas S-N imputadas no software Ansys 2021/R22 FEM são mostradas na Figura 10(a) e 10(b).

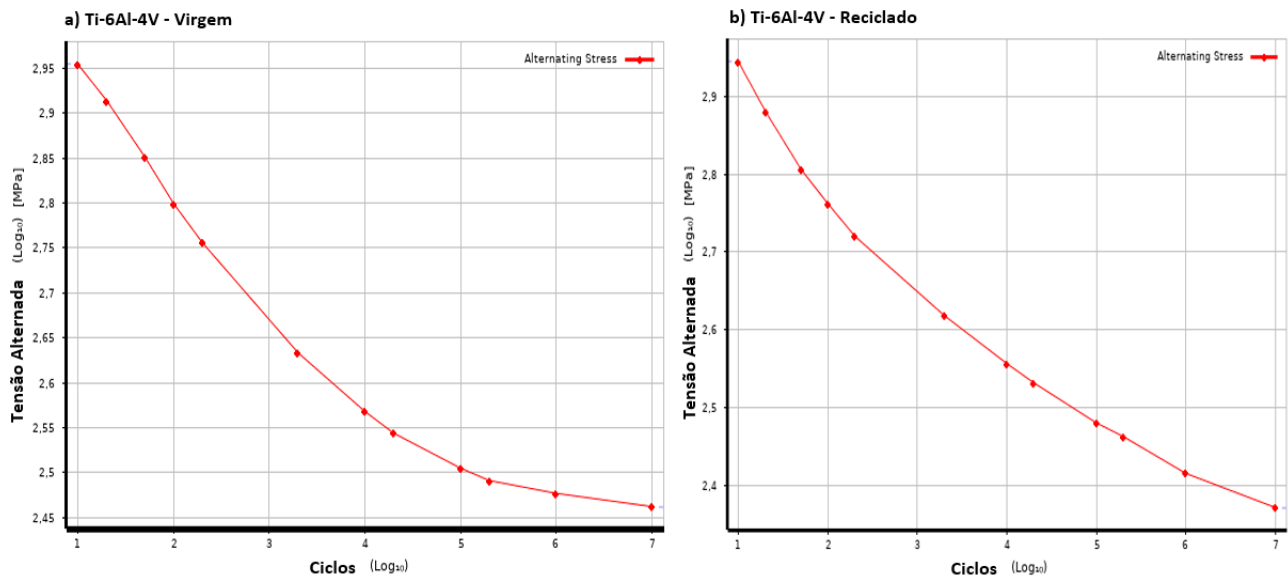


Figure 10. Curvas de fadiga S-N Ti-6Al-4V MA EBM-PBF pelo MEF - Ansys 2021/R22 (a) virgem (b) reciclado.

Em relação à curva tensão-deformação, para a análise estática por elementos finitos: foi realizada considerando uma carga de 10.799N, conforme mostrado na figura 11, com representação esquemática da carga.

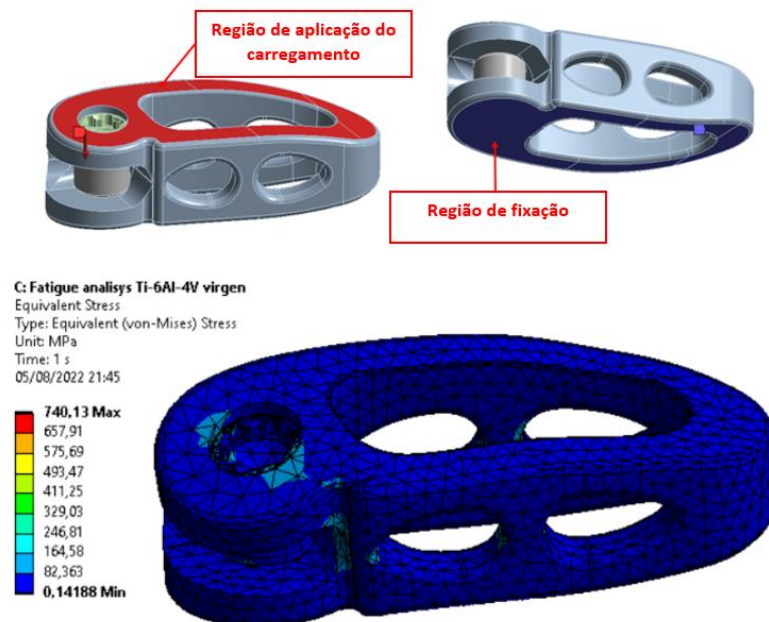


Figura 11. Resultado da análise estática (MEF) sobre o Dispositivo de Fusão Lombar TLIF.

A análise estática mostra um resultado satisfatório visto que a tensão máxima encontrada foi de 740 MPa e a tensão de escoamento do Ti-6Al-4V MA EBM-PBF é de 852 MPa. Ao aplicar a análise de fadiga por elementos finitos foram selecionados três variáveis de análise na curva S-N de alto ciclo:

- Vida em Fadiga;
- Danos por fadiga;
- Fator de segurança.

Os resultados de vida em fadiga para o Ti-6Al-4V usando pós virgens e reciclados mostram para o Dispositivo de Fusão Lombar TLIF o resultado de 10^7 ciclos, que representa a vida infinita em fadiga sobre a carga de 3.000 N em

compressão, e validando de forma preditiva as condições estabelecidas pela ASTM F2077-18, conforme mostrado na figura 12.

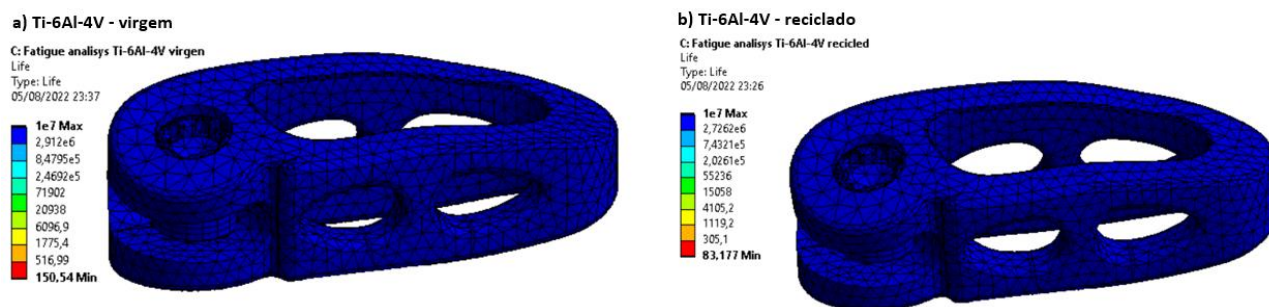


Figura 12. Resultado MEF da vida em fadiga do Dispositivo de Fusão Lombar TLIF; (a) Pó virgem; (b) Pó reciclado.

O dano por fadiga é definido como a vida útil do projeto e valores maiores que 100 indicam falha antes que a vida útil do projeto seja atingida. Os resultados mostrados na figura 13 demonstram um resultado satisfatório para esta geometria.

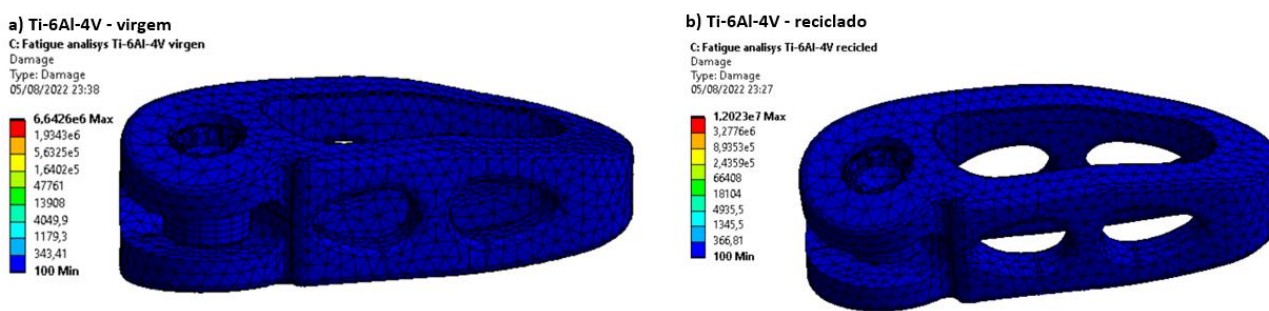


Figura 13. Resultado da análise de Dano (MEF) sobre o Dispositivo de Fusão Lombar TLIF; (a) Pó virgem; (b) Pó reciclado.

A análise do fator de segurança representa a relação de uma falha por fadiga ao longo de uma determinada vida de projeto. O fator de segurança máximo é 15. Nesta análise, valores menores que 1 indicam falha antes que a vida útil do projeto seja atingida. Conforme mostrado na figura 14, o dispositivo de fusão apresenta valores maiores que 1.

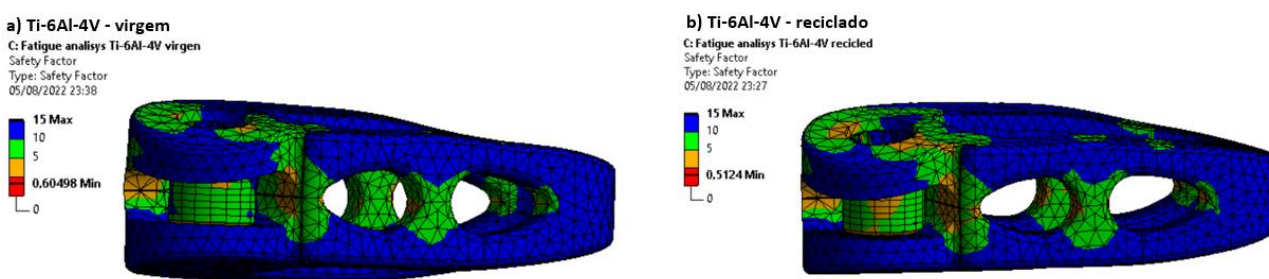


Figura 14. Resultado da análise MEF sobre o fator de segurança aplicado no Dispositivo de Fusão Lombar TLIF; (a) Pó virgem; (b) Pó reciclado.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho possibilitaram correlacionar resultados experimentais para a construção da curva S-N computacional no software ANSYS 2021/R2, mensurando os resultados através da análise de fadiga de alto ciclo pelo MEF, obtendo grande redução de custo e tempo no desenvolvimento de propostas geométricas para o Dispositivo de Fusão Lombar TLIF fabricado pela Tecnologia de Manufatura Aditiva EBM-PBF para o Ti-6Al-4V grau 5.

Os Dispositivos de Fusão Lombar TLIF foram testados conforme ASTM F2077-18, resistindo satisfatoriamente ao teste físico de fadiga, mas por questões de confidencialidade da empresa que apoiou a pesquisa, os resultados não puderam ser compartilhados neste estudo, mas confirmam a eficácia do teste computacional e o método executado neste estudo.

Com este processo, foi possível estabelecer um método preditivo para o desenvolvimento de novos produtos que atendem a norma ASTM F2077-18, que regulamenta os testes de fadiga para Dispositivos de Fusão Lombar, contemplando possibilidades computacionais para outras soluções de análise de fadiga de alto ciclo, baseadas na medição de dados computacionais correlacionando-os com dados experimentais.

Os resultados mostraram que a peça produzida com pó de liga de Titânio reciclado apresenta perdas em suas propriedades de fadiga, e a reciclagem do pó para uso nos processos de fabricação pode ser estudada com mais detalhes, pois é possível reaproveitar o pó de liga de titânio na EBM-PBF para o processo de fabricação de peças mecânicas por mais de dez vezes, o que sugere uma perda progressiva das propriedades mecânicas.

Este método poderá ser aplicado futuramente em outros produtos desse segmento comercial, bem como em outros produtos que utilizam manufatura aditiva em sua concepção, permitindo ampliar os estudos sobre produtos fabricados por meio de manufatura tradicional (subtrativa).

5. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Intervertebral Body Fusion Devices. ASTM International. West Conshohocken, United States. ASTM F2077-18, , 2015.
- COLE, C. D. et al. Comparison of low back fusion techniques: Transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) or posterior lumbar interbody fusion (PLIF) approaches. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, v. 2, n. 2, p. 118–126, 2009.
- DERIMOW, N. et al. Surface chemistry in Ti-6Al-4V feedstock as influenced by powder reuse in electron beam additive manufacturing. *Applied Surface Science*, v. 602, n. June, p. 154280, 2022.
- HUANG, H. et al. A critical review on the biomechanical study of cervical interbody fusion cage. *Medicine in Novel Technology and Devices*, v. 11, p. 38, 2021.
- MARIEB, E. N.; WILHELM, P. B.; MALLATT, J. *Human Anatomy*. 8. ed. United States: Pearson Education, 2017.
- MEENA, V. K. et al. Additive manufacturing for metallic spinal implants: A systematic review. *Annals of 3D Printed Medicine*, v. 3, p. 100021, 2021.
- MELTING, E. et al. Rheological Behavior of Inconel 718 Powder for Electron-Beam Melting. *Metals*, 2022.
- MOBBS, R. J. et al. Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF. *Journal of spine surgery*, v. 1, n. 1, p. 2–18, 2015.
- MOHAMMADHOSSEINI, A. *Properties and Performance of Titanium alloy Processed by Electron Beam Melting Additive Manufacturing*. [s.l.] Swinburne University of Technology, 2015.
- PALANIVEL, S. et al. Spatially dependent properties in a laser additive manufactured Ti-6Al-4V component. *Materials Science and Engineering A*, v. 654, p. 39–52, 2016.
- PECK, J. H. et al. Mechanical performance of lumbar intervertebral body fusion devices: An analysis of data submitted to the Food and Drug Administration. *Journal of Biomechanics*, v. 78, p. 87–93, 2018.
- PETROVIC, V.; NIÑEROLA, R. Powder recyclability in electron beam melting for aeronautical use. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v. 87, n. 2, p. 147–155, 2015.
- SOUNDARAPANDIYAN, G. et al. The effects of powder reuse on the mechanical response of electron beam additively manufactured Ti6Al4V parts. *Elsevier*, p. 36, 2021.
- TALIA, A. J. et al. Comparison of the different surgical approaches for lumbar interbody fusion. *Journal of Clinical Neuroscience*, v. 22, n. 2, p. 243–251, 2015.
- VACCARO, A. R. *Fractures of the cervical, thoracic, and lumbar spine*. USA, New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- WANG, S. J. et al. Single transverse-orientation cage via MIS-TLIF approach for the treatment of degenerative lumbar disease: A technical note. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, v. 8, n. 8, p. 14154–14160, 2015.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

FATIGUE ANALYSIS IN TRANSFORAMINAL LUMBAR FUSION DEVICE (TLIF) EB-PBF TI6AL4V

Leandro Cardoso da Silva, Leandro.cardoso@sp.senai.br¹

Gilmar Ferreira Batalha, gfbatalh@usp.br¹

¹Universidade de São Paulo – Escola Politécnica - EPUSP-PMR, São Paulo – SP, Brasil.

Abstract. *In Electron Beam Fusion Additive Manufacturing (EBM-PBF), lumbar fusion prostheses have been the choice of manufacturers, as the EBM-PBF Additive Manufacturing process enables the construction of complex and optimized geometries for application in large-scale production. The relevant norms for the mechanical validation of this product are static and dynamic tests in constant evolution, governed in a homologating way with requirements to be met to prove the structural validation and guarantee the eradication of problems. The large area of structural mechanics has been working preventively in structural calculations to anticipate problems arising from loads specified in projects, in relation to the geometry and materials conceived by designers and creators of prostheses through computer simulations. This research aims to apply the study of computational fatigue in a Transforaminal Lumbar Fusion Device (TLIF) using high cycle fatigue test data (HCF), through the Finite Element Analysis Method (FEM) to represent the mechanical damages occurred in the physical test. Given the mechanical properties of the material (modulus of elasticity, yield strength, tensile strength and density), the fatigue life (HCF) specimens were tested for fatigue life ratings between 10^7 to improve test duration compared to with traditional methods. These preventive and predictive analyzes bring a future possibility of developing geometric models of lumbar prostheses capable of meeting the physical-mechanical tests required by the ASTM F2077-18 standard, which use procedures that still apply traditional, expensive and extremely time-consuming methods. The results obtained through the FEM were effective, showing that this predictive method can help in the development of new products manufactured by Additive Manufacturing by electron beam fusion applied to grade 5 Titanium alloy.*

Keywords: *Additive Manufacturing, Electron Beam, Fatigue, Ti-6Al-4V Titanium, Lumbar Fusion Device.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.