

Estudo comparativo de guias fabricadas via Manufatura Aditiva por SLS/PA-12 e EBM/Ti-6Al-4V: um estudo de caso

Gabriella Colussi Ferreira^{1,2}, Thiago Nunes Palhares¹, Deise Mara Gouvea¹, Denize Vilela Novais¹, Marcelo F. Oliveira¹, Marcello V. Mergulhão¹

{gcolussi, tpalhares, deise.gouvea, denize.novais,
marcelo.oliveira, mvmergulhao}@cti.org.br

¹Laboratório Aberto de Impressão 3D/Divisão de Tecnologia para
Produção e Saúde - LAprint/DITPS
CTI Renato Archer/MCTI – Campinas/SP

²Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia (CEATEC)
Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas) –
Campinas/SP

Abstract. Ever more the Additive Manufacturing (AM) has shown itself present in Medicine, making possible that instruments such as surgical guides be fastly fabricated, attending different and customized requirements. The purpose of this research is to compare guides from a surgical case that were printed by two distinct powder bed fusion technologies: laser (with polyamide) and electron beam (with titanium alloy). After the surgical guides were made, both different process planning and final parts characteristics were analyzed. Finally it was verified that the guides fabricated by the two technologies, despite having distinct characteristics such as finishing quality and resistance, are relevant for surgical planning.

Resumo. Cada vez mais a Manufatura Aditiva tem se mostrando presente na Medicina, possibilitando que instrumentos tais como as guias cirúrgicas sejam fabricados de forma rápida, atendendo requisitos personalizados. O propósito dessa pesquisa é comparar guias de um caso cirúrgico que foram impressas por duas tecnologias distintas de fusão em leito de pó: laser (com poliamida) e feixe de elétrons (com liga de titânio). Depois de modeladas foram analisados os diferentes planejamentos de processo como também as características de suas peças finais. Por fim foi constatado que as guias impressas por ambas tecnologias, apesar de apresentarem características distintas como qualidade de acabamento e resistência, são relevantes para o planejamento cirúrgico.

1. Introdução

Ao englobar outras ciências, a Engenharia é uma das áreas que mais tem apresentado evolução com o passar dos anos, e que, a partir disso, elabora soluções para diversos dos problemas levantados pela sociedade atual. Dentre essas abrangências, a fusão da Ciências Exatas com a Ciências da Saúde é cada vez mais requisitada, corroborando para que novos ramos se especializem e tragam profissionais capacitados para lidar com as demandas solicitadas. A Engenharia Biomédica é um exemplo disso, abordando

otimizações de hospitais, novas tecnologias para instrumentação, equipamentos médicos, novas abordagens para a ortopedia, entre outros [1, 2].

Dentro desse contexto, uma das técnicas de engenharia que possibilita esse avanço é a Manufatura Aditiva (MA), que provê à indústria médica um maior acesso a produções mais ágeis e personalizadas, além de contribuir para as pesquisas e estudos nesse âmbito. Esse tipo de fabricação é bem diversificado quanto aos seus processos e tecnologias, possibilitando que os produtos finais possuam características variadas quanto a, por exemplo, materiais, dureza, resolução e flexibilidade. Dentre algumas dessas tecnologias, tem-se Modelagem por Deposição Fundida (FDM, do inglês Fused Deposition Modeling), cujo processo constitui na deposição de material camada a camada, Sinterização Seletiva a Laser (SLS, do inglês Selective Laser Sintering), Fusão Seletiva a Laser (SLM, do inglês Selective Laser Melting) e Fusão por Feixe de Elétron (EBM, do inglês Electron Beam Melting), sendo essas três últimas por fusão em leito de pó (PBF, do inglês Powder Bed Fusion) [3]. A respeito do planejamento de manufatura, as peças são produzidas a partir da obtenção de um modelo digital 3D que é fatiado pelo software do sistema da máquina, para em seguida ser feita a impressão.

Embora antigamente tenha sido muito utilizada apenas para elaborar protótipos e moldes, nos dias atuais a MA também tem sido muito aplicada na fabricação de peças para uso final [4]. Dessa forma essa técnica contribui com diversos procedimentos como, por exemplo, o cirúrgico, já que além de dar forma rapidamente aos objetos solicitados, traz também a possibilidade de personalização durante a sua modelagem [5].



Figura 1. Exemplo de peças fabricadas por MA

Um exemplo de aplicação nessa área é a fabricação de guias cirúrgicas cujos modelos são prototipados a partir das imagens de Tomografia Computadorizada (TC) do próprio paciente. Essas guias vêm sendo muito utilizadas tanto nas áreas de ortodontia quanto, mais atualmente, nas ortopédicas [6], a fim de gerar um objeto personalizável que possa se adaptar à necessidade do caso. Para aprimorar o procedimento cirúrgico e tornar os cortes mais precisos, diferentes tipos dessa peça passaram a ser desenvolvidos ao longo dos anos, sendo as melhores opções fabricadas por manufatura aditiva. Os

resultados positivos vêm sendo registrados em inúmeros trabalhos como o de MORESCHI et al (2011), que comparam o uso de guias fabricadas por estereolitografia com as modeladas manualmente com resina acrílica, e da CABEZON et al (2023), que descrevem uma cirurgia em mandíbulas de porcos orientada por guias de *open-frame structure*, impressas em cobalto-cromo.

O presente trabalho estuda as impressões de guias para uma cirurgia mandibulofacial cujo paciente apresentava diagnóstico de osteonecrose do corpo mandibular de forma bilateral, além de sínfise mandibular e fratura patológica da mandíbula. Para realizar essa pesquisa foi seguida uma metodologia de duas etapas: fabricação dos objetos em duas tecnologias, SLS com poliamida-12 e EBM com liga de titânio Ti-6Al-4V, e análise dos diferentes processos e materiais envolvidos nas impressões. Dessa forma a MA otimiza a produção de modelos que contribuem de forma extremamente positiva para o paciente e médico, possibilitando variedade de produção, material e, conseqüentemente, de performance.

2. Objetivo

2.1 Objetivo geral

Analisar a aplicação dos processos SLS e EBM para a confecção de guias customizadas.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar as tecnologias SLS e EBM e compará-las quanto aos planejamentos de processo de impressão 3D;
- Analisar os processos SLS e EBM quanto aos seus parâmetros para fabricação de peças;
- Comparar de forma dimensional e qualitativa as guias impressas pelas técnicas SLS e EBM com os seus respectivos materiais.

3. Materiais e métodos

3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo de caso consistem nas matérias primas dos processos SLS (3D Systems, EUA) [9] e EBM (Arcam/GE Additive Group, Sweden) [10] dispostas na infraestrutura do Laboratório Aberto de Impressão 3D (LAprint). Para fabricação das guias pela tecnologia SLS foi utilizado o pó de poliamida PA12 (DuraForm® PA Plastic, 3D Systems) [11]. Já as guias impressas por EBM foi consumida a liga em pó de Ti-6Al-4V Grade 23 (AP&C, GE Additive Company) [12]. Ambas partículas têm de 45 a 106 µm e são esterilizáveis em autoclave.

3.2 Métodos

3.2.1 Modelagem

Esta pesquisa foi realizada em cima de um estudo de caso de ressecção mandibular que chegou ao LAprint por meio do Sistema Único de Saúde (SUS). A modelagem das guias foi realizada em três passos:

1. Aquisição de imagens (TC) da anatomia em estudo do paciente;

2. Tratamento de imagens e segmentação da área de interesse com o auxílio do software InVesalius 3 [13], desenvolvido no CTI Renato Archer;
3. Modelagem através de Desenho Assistido por Computador (CAD, do inglês Computer Aided Design) 3D pelos softwares Meshmixer para contorno [14] e Fusion 360 [15] para rasgo e furo das guias personalizadas.

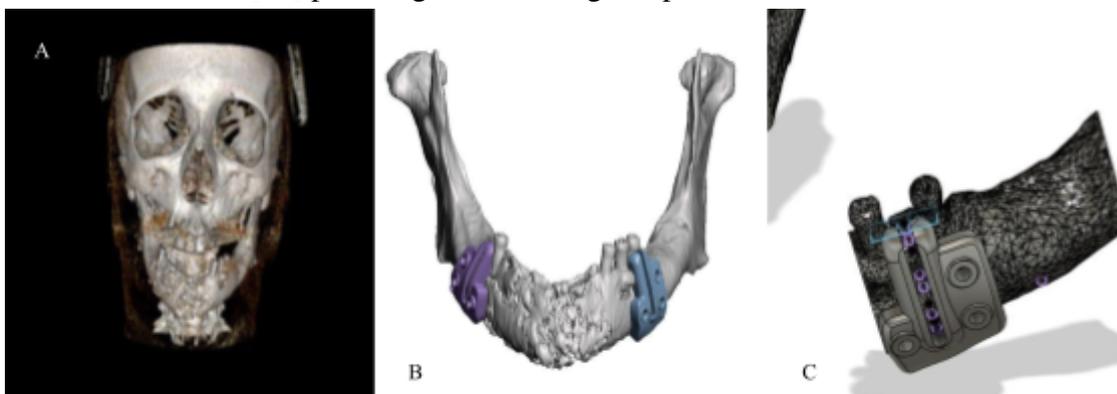


Figura 2. a) Reconstrução de imagens de TC no software InVesalius, b) modelo CAD 3D no Meshmixer e c) modelo CAD no Fusion 360.

Foram feitos dois modelos de diferentes espessuras denominados de: E1, igual a 2 mm, e E2 igual a 4 mm.

3.2.2 Fabricação

O planejamento de impressão das guias, tanto em SLS quanto em EBM, foi iniciado na ferramenta de software Materialise Magics 22.20 [16] para correção de modelos e preparação de arquivos para uso em MA. Para a fabricação em poliamida as peças foram posicionadas em uma rotação de 30° nos eixos X e Y, de acordo como a Figura 3, a fim de proporcionar uma estabilidade térmica no processo, evitando empenamento da camada de processamento, e garantir uma estruturação adequada e bom acabamento. Após esse primeiro posicionamento, para ambas as tecnologias são aplicados os recursos do software Magics tais como *out of bondage* e *collision detection*, que respectivamente vão checar se as peças estão dentro dos limites de impressão da máquina e conferir se elas não estão chocando entre si. Depois disso, aplica-se o recurso *FIX* em todas as peças para garantir que não há problemas na malha, como pontos abertos, para só então, quando tudo verificado positivamente, exportar o arquivo em STL e enviá-lo para o computador da máquina.

Essas guias foram fabricadas com a tecnologia SLS na impressora de modelo Sinterstation HiQ (3D Systems) [17] com a matéria-prima em pó DuraForm® PA Plastic. Os parâmetros de impressão utilizados estão representados na Tabela 1. Além disso, os estágios de pré-aquecimento e pós-resfriamento seguiram critérios estabelecidos pelo padrão da máquina, ocorrendo sob atmosfera inerte de nitrogênio com concentração de O₂ abaixo de 5,5%.

Tabela 1. Parâmetros de impressão na HiQ Sinterstation.

Temperatura da área de construção (<i>Part Bed</i>)	176 °C
-------------------------------------------------------	--------

Temperatura da área de alimentação do pó (<i>Left/Right feeder</i>)	136 °C
Velocidade de varredura do laser	10 m/s
Distância entre varreduras do feixe laser	0,15 mm
Potência do laser de preenchimento	12 W
Potência do laser de contorno	6 W
Diâmetro focal do laser	500 µm
Espessura da camada de pó	0,1 mm

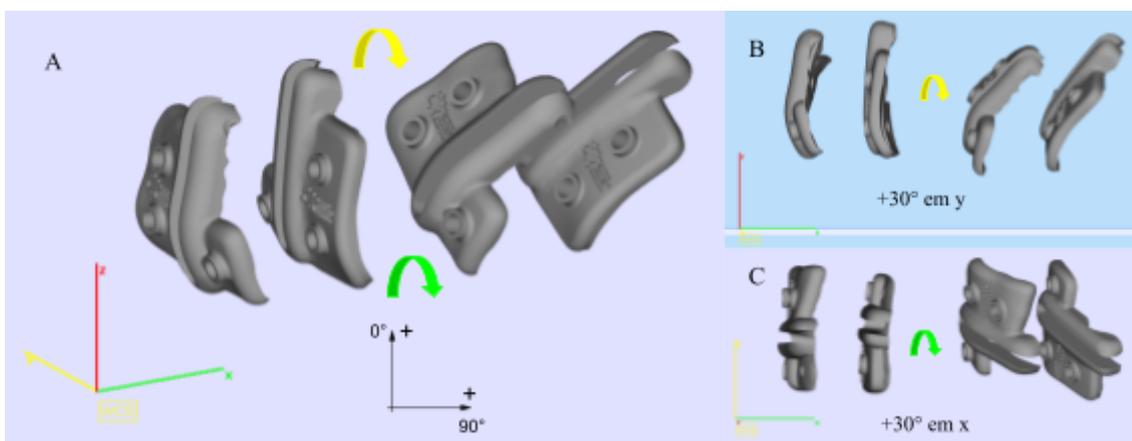


Figura 3. Imagens de diferentes visualizações (a - *vista isométrica*, b - *vista frontal* e c - *vista de topo*) do posicionamento das guias impressas em SLS, sendo o par da esquerda a referência, alinhado no eixo Z.

Por EBM foram impressos no modelo Arcam Q10 Plus (Ge Additive Company) [18] quatro pares de guias separados em grupos de acordo com a sua modelagem, E1 e E2. Os dois grupos seguiram o mesmo planejamento de impressão, cada um com seus dois pares posicionados em duas orientações diferentes: O1 na horizontal e O2 em uma angulação de 26° em X e Y (vide Figura 4). Isso para que houvesse possibilidade de escolha do melhor modelo, já que um posicionamento mais plano garante melhor acabamento e fidelidade quanto às dimensões dos furos, enquanto o rotacionado prioriza a estruturação do objeto. Tanto alguns dos parâmetros de impressão quanto o padrão de varredura utilizados foram os estabelecidos pelo fabricante e estão especificados abaixo na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de impressão na Q10 Plus.

Foco	3073 mA
Offset de foco	36 mA

Espessura da camada de pó	50 μm
Distância entre varreduras do feixe	0,2 mm
Profundidade de varredura	0,05 mm
Velocidade de varredura	4530 m/s
Potência de feixe	3000 W
Diâmetro focal do feixe	500 μm
Atmosfera de trabalho de alto vácuo sob pressão parcial de hélio	1×10^{-3} mbar
Temperatura de pré-aquecimento de construção	$< 495^{\circ}\text{C}$

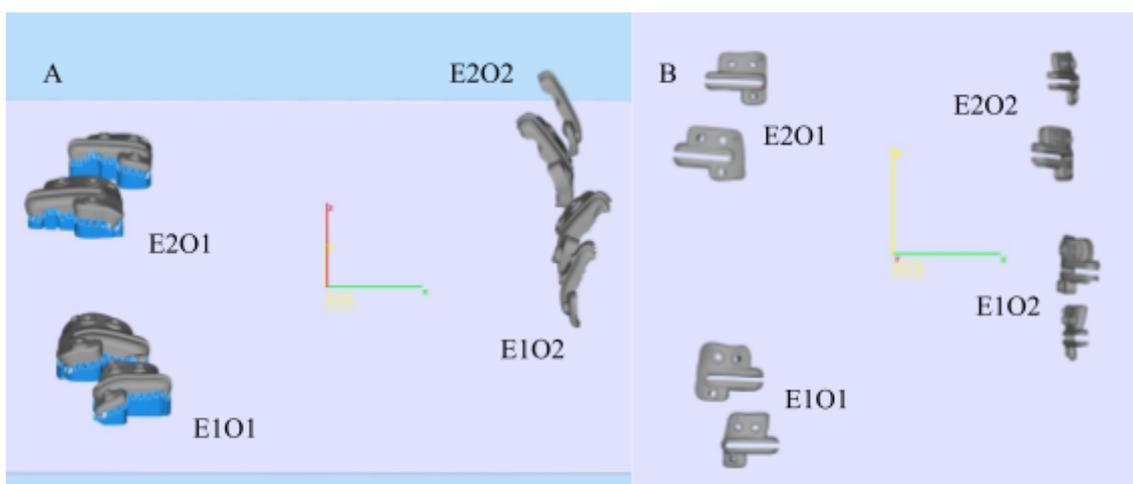


Figura 4. Imagens de diferentes visualizações do posicionamento das guias impressas em EBM (a - *vista frontal* e b - *vista de topo*). E1 e E2 correspondem ao tipo de modelo e O1 e O2 às orientações, de acordo com denominação prévia.

Além de possuir o posicionamento das peças, na Figura 4 também é possível observar a necessidade de suporte para os pares que foram impressos na horizontal. Após impressas, todas as peças, tanto em SLS quanto em EBM, passaram por um pós-processo que envolveu sua limpeza e jateamento.

4. Resultados e discussões

Ao se analisar os planejamentos de processos verifica-se que ambas técnicas (SLS e EBM) são semelhantes por pertencerem a um mesmo tipo de processo: PBF. São técnicas que exigem atenção quanto ao posicionamento das peças, muito parecido para as duas, como também aos parâmetros de impressão utilizados nas máquinas. Para o primeiro fator, acerca do posicionamento, é importante que seja utilizada uma rotação

que diminua o tamanho da área de impressão por camada como também a quantidade de calor imposta à região. Assim, respectivamente, diminui-se o suporte que a peça necessita para uma boa estruturação e evita o efeito de empenamento devido ao calor excessivo.

A respeito dos parâmetros, sabe-se que imprimir em metal é um processo mais difícil em relação a um polímero devido às altas temperaturas que demanda para fusão, além de, o próprio processo de impressão das máquinas EBM ser mais complexo ao utilizarem um feixe de elétrons e diferentes dispositivos para movimentar e convergir o feixe ao invés de um laser e um espelho, como é nas impressoras de SLS para o processamento do material na camada.

Na Figura 5 estão representadas as guias impressas em SLS, ambas confeccionadas em uma mesma orientação. O par em A corresponde ao modelo E1, com 2 mm de espessura, e em B ao modelo E2, com 4 mm. Em ambos pares nota-se um bom acabamento referente a forma e textura, porém o par mais fino é mais maleável e frágil em relação ao outro.

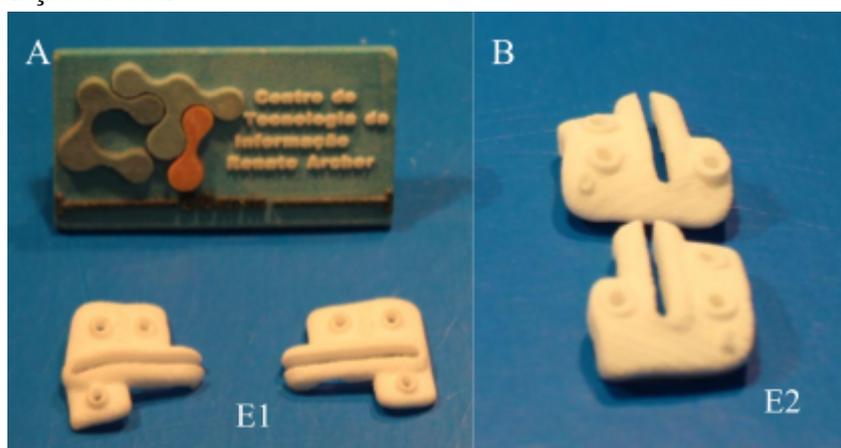


Figura 5. Guias impressas em SLS em diferentes espessuras: a) par de guias E1 e b) par de guias E2.

Na Figura 6 estão as guias impressas em EBM. Os pares de número 1 e 2 correspondem aos modelos E2, enquanto os pares de 3 e 4 são referentes ao modelo E1. Além disso, 1 e 3 foram impressas com orientação O1, horizontal, e 2 e 4 com O2, rotacionadas em 26° em ambos eixos X e Y. Quanto aos pares 1 e 3 nota-se a necessidade de suporte em sua estrutura por conta da inclinação excessiva (*overhang*) dos modelos em relação ao eixo vertical, que é menor que 45° [19]. É possível observar a influência desses posicionamentos na fabricação das peças quando, ao visualizar esses pares, percebe-se algumas deformações na estrutura do suporte, apontadas pelos círculos amarelos na Figura 6B. Essas alterações, como a dos furos no par de número 3 e a na sessão do corte no par de número 1, se dá por diversos fatores como a falta de suporte durante a incidência do feixe de elétrons e o acúmulo de energia devido a extensa camada de fusão [19]. Por consequência, esses defeitos podem ter ocasionado alguma alteração na superfície do objeto. Outra desvantagem relacionada ao uso de suporte está no pós-processo que, durante a sua retirada, pode ocorrer a permanência de ressaltos do material na sessão interna, possivelmente nocivos para o tecido anatômico

do paciente. Além de que, o lixamento desses resquícios podem ocasionar no desgaste e alteração da forma da seção interna da guia. Os modelos que foram rotacionados (2 e 4) não apresentaram defeitos significativos em sua estrutura.

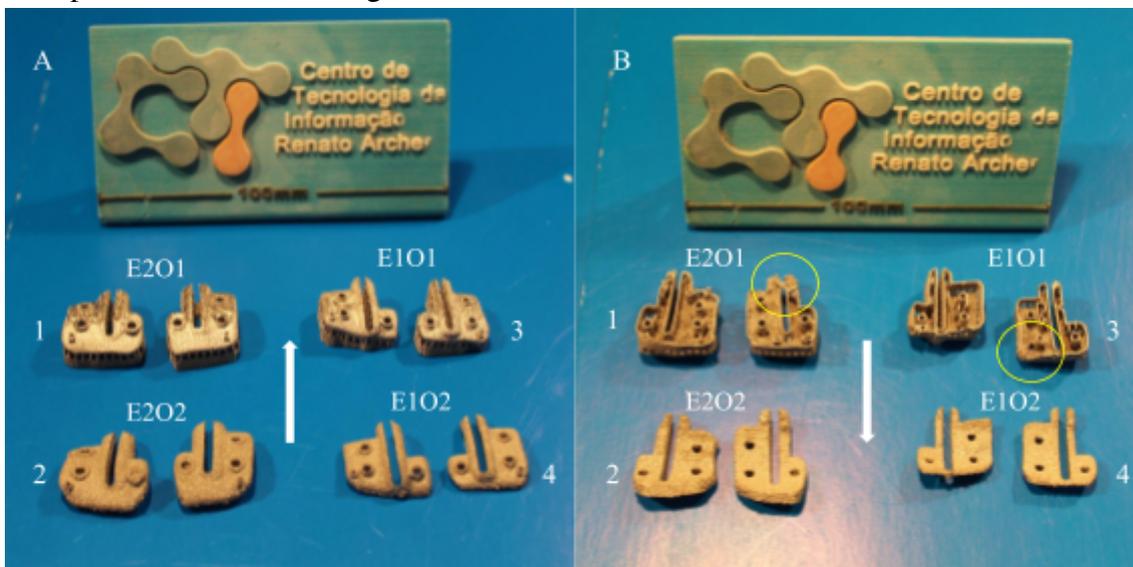


Figura 6. Pares de guias impressas em EBM numeradas de 1 a 4. Foram nomeadas de acordo com nomenclaturas previamente estabelecidas para os diferentes modelos (E1 e E2) e orientações (O1 e O2).

Em relação às características gerais, ao comparar as guias impressas em SLS e em EBM nota-se que as fabricadas com poliamida-12 apresentaram um melhor acabamento em relação às manufaturadas com liga de titânio. Essas guias sinterizadas a laser apresentaram uma superfície com menos defeitos e dimensões preservadas. Entretanto, mesmo com esses diferenciais, ao se planejar uma cirurgia é importante considerar e avaliar fatores como, principalmente, resistência e encaixe da peça, já que durante o procedimento o objeto deve suportar o torque imposto pela ação da broca. A partir disso, quando comparados em relação a fragilidade, ambos pares impressos em SLS foram descartados dado que todos os modelos impressos pela tecnologia EBM, original e mais espesso, demonstraram maior rigidez e resistência.

Na Figura 7 é possível visualizar o correto encaixe dessas guias com o biomodelo impresso em poliamida, o que corroborou para a escolha final. Considerando os apontamentos e discussões realizadas a respeito das peças, para envio foram escolhidas as guias impressas com rotação (orientação O2), ambos modelos E1 e E2. O feedback positivo da equipe médica acerca do par escolhido incluiu ressalvas como assertividade a respeito do posicionamento e boa adaptação em relação à broca de perfuração, que não levou à quebra do modelo.



Figura 7. Encaixe das guias rotacionadas no biomodelo.

5. Conclusão

Conclui-se que ambos os processos de MA, SLS e EBM, são adequados e contribuem significativamente para fins de planejamento cirúrgico, com adequações e finalidades distintas. No caso de SLS foi visto que, devido a ser a laser e ter menor grau de complexidade de impressão em relação a EBM, a tecnologia apresenta maior definição e facilidade de manufatura das peças. Contudo é contraindicada para fins de parafusamento ou outros que venham a impor algum tipo de força na peça por causa da sua baixa resistência a esforços mecânicos. Com isso, o processo SLS faz-se mais recomendado para fabricação de biomodelos e outras peças que demandem maior fidelidade às dimensões e melhor acabamento, enquanto a impressão por EBM é mais requisitada para modelos que necessitam de propriedades mecânicas melhores. Como para a cirurgia foi solicitada uma guia que fosse personalizável à anatomia do paciente e que não quebrasse diante a ação da broca, a tecnologia que melhor atendeu ao pedido foi a EBM.

Referências

- [1] De Paula, M., Grilo, A. e Ávila, M. (2023) “Engenharia Biomédica: Escolhas Profissionais nas Trajetórias Docentes”, Em *Internacional de Educação Superior*, páginas 1-18.
- [2] Saltzman, W. M. (2015) “Biomedical Engineering: Bridging Medicine and Technology”, Cambridge University Press, 2nd edition.
- [3] Volpato, N. (2017) “Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D”, Edgard Blucher, 2^a edição.
- [4] Rodrigues, V. et al. (2017) “Manufatura Aditiva: estado da arte e framework de aplicações”, Em *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, páginas 1-34.

- [5] Melo, H. e Peddinghaus, W. (2019) “Aplicação da tecnologia de impressão 3D no planejamento cirúrgico: um estudo de caso”, https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/24019/1/CT_DAMEC_2019_2s_62.pdf
- [6] Pires, M. et al. (2023) “Impressão 3D na ortopedia: onde estamos e aonde podemos chegar”, Em *Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, páginas 951-965.
- [7] Moreschi, E. et al. (2011) “Cirurgia guiada por computador associada à função imediata: análise de um ano de acompanhamento clínico”, Em *ImplantNews*, páginas 20-24.
- [8] Cabezon, C. et al. (2023) “3D-Printed Metal Surgical Guide for Endodontic Microsurgery (a Proof of Concept)”, In *Applied Sciences*, páginas 1-9.
- [9] 3D Systems. “Sinterização a laser seletivo (SLS)”, <https://br.3dsystems.com/selective-laser-sintering>.
- [10] GE Additive. “Electron Beam Melting (EBM)”, <https://www.ge.com/additive/ebm>.
- [11] 3D Systems. “DuraFormR PA Plastic – Material Datasheet.” (2010), www.3dsystems.com/sites/default/files/2017-03/3D-Systems.
- [12] AP&C, GE Additive Company. “Ti-6Al-4V grade 23”, <https://www.advancedpowders.com/powders/titanium/ti-6al-4v-23>.
- [13] CTI Renato Archer. “InVesalius”, <https://github.com/invesalius/invesalius3>.
- [14] Autodesk®. “Meshmixer”, <https://meshmixer.com/download.html>.
- [15] Autodesk®. “Fusion 360™”, <https://www.autodesk.com.br/products/fusion-360>.
- [16] Materialize. “Materialize Magics”, <https://www.materialise.com/en/industrial/software/magics-data-build-preparation>.
- [17] 3D Systems. “Sinterstation HiQ”, <https://www.3dsystems.com/3d-printers/plastic>.
- [18] GE Additive. “Arcam EBM Q10 Plus”, <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm-machines/arcam-ebm-q10plus>.
- [19] Tounsi, R. e Vignat, F. (2017) “New concept of support structures in Electron Beam Melting manufacturing to reduce geometric defects”, https://aip-primeca2017.sciencesconf.org/133128/AIP_Colloque_2017_RT_FV.pdf