



EMPREGO DE SOFTWARE LIVRE PARA MODELAGEM, ANÁLISE, CORREÇÃO DE MALHA E PLANEJAMENTO DE PROCESSO PARA MANUFATURA ADITIVA

Laureana Stelmastchuk Benassi Fontolan^[0000-0003-3063-6475], CTI Renato Archer, lfontolan@cti.gov.br
Danilo Polly^[0000-0003-1814-5980], CTI Renato Archer, dpolly@cti.gov.br
Leonardo Mendes Ribeiro Machado^[0000-0002-3531-9471], CTI Renato Archer, lmachado@cti.gov.br
Marcelo Fernandes de Oliveira^[0000-0003-0695-6188], CTI Renato Archer, marcelo.oliveira@cti.gov.br
Pedro Yoshito Noritomi^[0000-0001-7333-3445], CTI Renato Archer, pedro.noritomi@cti.gov.br

Resumo. A rotina de trabalho no Laboratório Aberto de Impressão 3D (LAprint) envolve a manipulação de modelos tridimensionais, operação das máquinas, pós-processamento e análise das peças fabricadas. Nesse contexto, a padronização de um software para múltiplas operações tem o intuito de otimizar o processo de produção. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade do programa Blender em diferentes etapas da fabricação de peças por manufatura aditiva: redução e correção de malhas geradas por BioCAD e criação de perfis com os parâmetros das máquinas de MA por SLS disponíveis no laboratório. Os protocolos experimentais desenvolvidos foram capazes de otimizar parte do processo de produção e necessitam de poucos ajustes para a implementação final. Apesar de muito difundido, o Blender não é software de escolha no contexto industrial, mas possui grande potencial reduzindo os custos em aquisição de licenças de softwares e contribuindo com a comunidade de software livre.

Palavras chave: manufatura aditiva, biomodelo, software livre

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) é uma técnica de fabricação com crescimento médio mundial de 26,6% nos últimos 29 anos e tem feito grande progresso na produção de peças em série, sendo que US\$918,6 milhões foram gastos em partes produzidas por MA na incorporação em produtos finais em 2017 (Wohlers, 2018). Apesar de ser utilizada predominantemente na produção de peças em pequena escala, customização ou produção de peças únicas, protagonizando como prototipagem rápida (PR), existem exemplos bem sucedidos de substituição das técnicas convencionais de produção por MA, como na indústria médica, aeroespacial (Baumers e Holweg, 2019; Leach e Carmignato 2020) e mais recentemente durante o início da pandemia de COVID-19, quando a MA foi amplamente utilizada para produção em maior escala de aparatos médicos conforme a demanda aumentava (Longhitano et al., 2020; Arantes, 2020). O processo de fabricação de peças por MA segue um *pipeline* de operações desde o processamento do modelo tridimensional virtual até a obtenção de um objeto tangível finalizado que pode ainda passar por processos de funcionalização (de Souza et al. 2016; de Souza et al. 2017; Bandeira et al. 2017; de Campos et al., 2014; Setti et al., 2014; de Campos et al., 2011; de Souza, 2021; de Souza et al., 2018).

O Laboratório Aberto de Impressão 3D (LAprint) do CTI Renato Archer dispõe de diferentes tecnologias e materiais para MA e tem grande importância na produção de demandas médicas, de pesquisa e industriais. A diversidade de tecnologias já estabelecidas e em desenvolvimento é um grande desafio para o estabelecimento de protocolos para otimização de processos, uma vez que cada uma possui suas particularidades com vantagens e desvantagens a serem levadas em consideração na modelagem 3D e no planejamento do processo. A variedade do maquinário em termos de técnicas e marcas também se traduz em uma grande quantidade de softwares empregados em diferentes etapas do processo.

Dentre as tecnologias de MA disponíveis no LAprint, a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), foi eleita para os testes no presente trabalho por ser uma das técnicas de MA mais versáteis (Kruth et al., 2007), também é a mais frequentemente utilizada no laboratório e, portanto, um alvo importante para otimização de processo. Ambas as máquinas de SLS disponíveis no laboratório, Sinterstion 2000 e Sintertation HiQ (3D Systems), produzem peças por meio da sinterização da matéria-prima por aquecimento via laser de CO₂ (Pham e Gault, 1998) e possuem grande variedade de polímeros termoplásticos disponíveis, como as poliamidas (Goodridge et al., 2012) e poliésteres de interesse biomédico (Saska et al., 2018; Pereira et al., 2012). Para fabricar peças com esse maquinário, os modelos são obtidos a partir dos programas ProMed, ProExp e ProInd da Divisão de Tecnologias para Produção e Saúde (DITPS) do CTI Renato Archer. Tanto a análise dos modelos obtidos, quanto o planejamento do processo (construção do *build*) são feitos em *software* proprietário. Apesar da eficiência e robustez do *software* empregado, MAGICS 22 (Materialise, Bélgica), o valor de aquisição da licença é um fator que pode inviabilizar a ampla difusão das práticas do laboratório no âmbito de difusão do conhecimento, daí a

importância de uma alternativa economicamente mais viável para o desempenho das funções na fabricação por MA no LAp rint.

Enquanto a obtenção do modelo tridimensional é versátil, podendo ser gerado a partir de técnicas de varredura, imagens, modelagem 3D a até mesmo a aquisição de modelos prontos disponíveis em bases de dados, o planejamento do processo e a subdivisão do modelo em camadas são processos mais restritos por depender dos parâmetros de cada equipamento. Tecnologias livres como as do projeto RepRap (Sells et al., 2007) também possuem as mesmas restrições, sendo comum utilizar programas conhecidos como fatiadores, Cura (ULTIMAKER CURA, 2022) e Slicer (PRUSA SLICER, 2022), com perfis específicos para máquinas e materiais diferentes, além disso a disponibilidade de *softwares* para essa finalidade não é muito abundante, a vantagem neste cenário é a possibilidade de modificação e redistribuição dada a característica das licenças GNU GPL sob as quais alguns destes *softwares* estão descritos. No contexto de tecnologias livres para MA, o *software* Blender (Blender Foundation, Holanda) tem grande destaque por ser utilizado em diversos projetos, para aplicações comerciais, industriais, acadêmicas ou até mesmo pessoais. Possui uma interface gráfica (GUI) robusta, completa, muito versátil e multiplataforma, além da grande comunidade de desenvolvimento e geração de *plugins* e *add-ons*.

Desta forma, o presente trabalho descreve o estabelecimento de um protocolo de análise de modelos tridimensionais e planejamento de processo para fabricação em MA por SLS validando o *software* Blender em relação ao Materialise Magics já utilizado no laboratório.

2. MÉTODOS

O *software* Blender foi eleito para avaliação de desempenho nas funções da produção em MA por SLS[®], nas máquinas Sinterstion[®] 2000[™] e Sintertation[®] HiQ[™] (3D Systems) para produção de peças em poliamida (Duraform PA, 3D Systems). Para validação, foram utilizados os programas Materialise Magics e Build Setup 3.42 (3D Systems). Os *add-ons* do Blender empregados foram STL (Blender STL, 2022), Bool Tool (Blender Bool Tool, 2022) e 3D Print Toolbox (Blender 3D print toolbox, 2022). O biomodelo foi gerado no McNeel Rhinoceros[®] 7 empregando o protocolo BioCAD desenvolvido pela equipe de Bioengenharia do LAp rint (Kem moku et al., 2010), este protocolo desvincula os dados de pacientes criando um modelo que representa uma anatomia genérica e pode ser usada sem conflitos éticos. Foram geradas as seguintes variações e exportadas em formato STL: poucos triângulos (r1), muitos triângulos exportada como STL binário (r2), muitos triângulos exportada como STL malha ASCII (r3) e malha alterada previamente (tentativa de revisão e correção de malha no Altair[®] HyperMesh[®]).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelagem 3D

3.2 Análise e correção de malhas

Todas as variações do biomodelo foram analisadas nos programas Materialise Magics e Blender (Fig. 1). No primeiro caso, r1 a malha demasiadamente reduzida prejudica a fabricação de uma peça que seja fiel aos dados médicos e a perda de detalhes neste modelo não pode ser corrigida, trata-se de um exemplo no qual a redução de geometria exagerada afetou os detalhes do modelo irreversivelmente (Fig. 2). Já os modelos r2, r3 e r4 possuem malhas mais complexas e foram submetidos ao processo de redução de malha no Blender. Este processo substitui o *Triangle Reduction* utilizado no Magics e é executado empregando-se o modificador *Decimate* com opção *Collapse* na razão 0,4, reduzindo o número de triângulos em 60% e unindo-os de maneira progressiva. Em seguida foi feita a remoção de elementos flutuantes caso existissem.

Já a correção de malha *Fix Wizard* do Magics foi substituída pelo *add-on* 3D Print Toolbox do Blender, sendo capaz de verificar se o modelo é sólido e que possui parte interior e exterior válidas (*manifold*) bem como correção das normais, intersecções, geometria degenerada (faces com área ou arestas de comprimento muito próximas de 0, foi usada a tolerância de 1 μ m) e funcionalidades que podem ser usadas para outras tecnologias como a verificação de partes com *overhang* importantes para MA por FDM.

Conforme a necessidade, a malha também foi corrigida manualmente empregando o modo de edição do Blender, desta forma a malha pode ser ajustada pela interação direta com os vértices, arestas e faces. Em nenhum dos modelos testados a correção manual exigiu muito tempo de edição, foram ajustes pontuais com a finalidade de refinamento e que não seriam expressamente necessárias para a fabricação das peças.

Os três modelos que passaram por redução de malha e correção (r2, r3 e r4) foram validados no *Fix Wizard* do Magics e não necessitaram de novas correções, portanto poderiam ser submetidos ao processo de fabricação (Fig. 3). As estatísticas dos modelos antes e depois dos processos de redução e correção de malha encontram-se na Tab. (1).

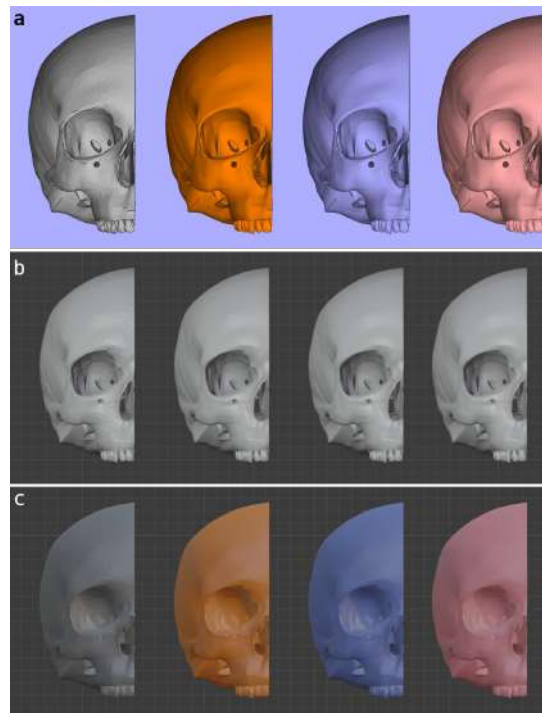


Figura 1: Visualização dos quatro biomodelos, da esquerda para direita: r1, r2, r3 e r4 no *software* a) Materialize Magics; b) Blender com modo de visualização *Solid*; c) Blender com modo de visualização *Material Preview*.

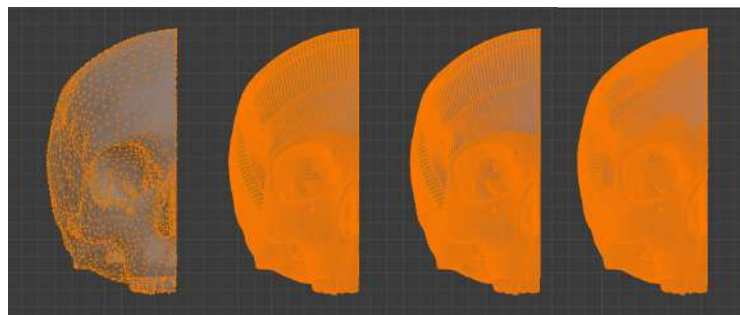


Figura 2: Visualização dos quatro biomodelos, da esquerda para direita: r1, r2, r3 e r4 no Blender no modo de edição, mostrando a seleção de todos os vértices de cada modelo.

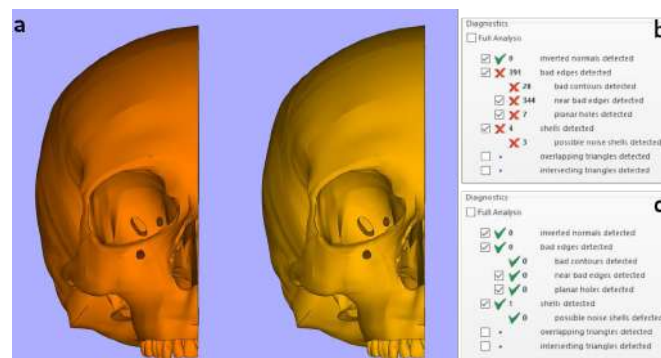


Figura 3: Etapas da validação do método de redução e correção de malhas utilizando o *Fix Wizard* do Magics. a) Modelo r2 original em laranja e r2 processado no Blender em laranja claro. Resultados da análise do *Fix Wizard* antes (b) e depois (c) do processamento com Blender.

Tabela 1: Análise das quatro variações do biomodelo quanto à complexidade e problemas encontrados pelo plugin 3D Print Toolbox do Blender.

	r1	r2	r3	r4
Triângulos	12.405	356.585	356.581	294.892
Tamanho (Mb)	0,62	17,8	95,2	78,9
Non Manifold Edge	55	443	431	370
Bad Contig Edge			280	
Intersections	70	413	408	275
Distorted	8	12	12	4

3.3 Planejamento de processo

O planejamento de processo envolve a composição de um arquivo stl com diversos modelos de forma a otimizar a fabricação das peças, tempo de processo e consumo de material. Para tanto, os modelos devem ser transladados e rotacionados para que sejam acomodados dentro do volume de construção da máquina (Sinterstation HiQ x=336,0 mm; y=280,0 mm; z=440,0 mm e Sinterstation 2000 x/y=254 mm; z=300 mm), também levando em consideração fatores inerentes da técnica, como o risco de empenamento pela concentração de calor. No Magics, essas informações são armazenadas em perfis criados para cada máquina e podem ser carregados ao início do planejamento de cada processo. Este programa também possui duas ferramentas muito utilizadas que monitoram a colisão entre modelos (*Collision Detection*) e o posicionamento de modelos ou partes de modelos fora da área de construção (*Out of Bounds*). Ambas as ferramentas foram simuladas com o uso de modificadores booleanos no Blender, para *Collision Detection* pode-se empregar a opção de interseção e verificar se o resultado apresenta algum sólido, caso contrário, não há colisões. Da mesma forma, o volume de construção de cada máquina foi reproduzido com um sólido no Blender, sendo um paralelepípedo para a Sinterstation HiQ e um cilindro para a Sinterstation 2000. Portanto, para a ferramenta *Out of Bounds* seria utilizada uma operação booleana na opção de diferença e a malha que continua visível após a operação representa o pedaço que está fora da área de impressão. A desvantagem desse método é o alto custo computacional dessas verificações por operações booleanas e deve ser otimizado futuramente.

4. CONCLUSÃO

Para o desempenho de funções da rotina de produção do LAprint, o *software* Blender se mostrou uma opção viável para modelagem 3D, correção e redução de malhas. Desta forma, o *software* pode ser empregado de maneira satisfatória na análise de modelos complexos como os provenientes de casos ProMed, nos quais o arquivo stl é gerado a partir de imagens médicas no InVesalius (Amorim et al., 2015) e geralmente necessitam passar por correção e redução de malha para viabilizar a fabricação de peças e também diminuir o custo computacional, principalmente no processo de divisão do modelo em camadas. Os processos de redução e correção de malha já em uso no Magics foram reproduzidos no Blender com sucesso. Esses modelos quando submetidos ao Build Setup já na Sinterstation HiQ não geraram quaisquer erros e poderiam ser submetidos ao processo de fabricação.

Os resultados preliminares da utilização do Blender como programa de planejamento de processo são promissores, mas ainda são necessários novos testes e validações para que o método seja aperfeiçoado e finalmente utilizado na rotina de fabricação de peças em MA por SLS. As vantagens do Blender, em comparação com outros programas em uso no laboratório, são o custo e o acesso fácil ao código fonte para criação de versões, *plugins*, *add-ons* e para um melhor entendimento das funcionalidades do programa, o que justifica a continuidade das investigações para emprego do Blender no LAprint. Adicionalmente, estudos da aplicação deste *software* para fabricação com outras das tecnologias disponíveis no laboratório também estão em curso.

Como perspectivas tem-se a aplicação do processo de redução e correção de malhas para outras tecnologias como Electron Beam Melting (EBM) também disponível no laboratório e que necessita de verificações mais rigorosas nas malhas. Com novos testes de planejamento de processo usando Blender, pretende-se finalizar a criação de perfis de máquina para SLS e para as demais tecnologias disponíveis no laboratório: FDM (Stratasys Vantage e Fortus), EBM (Arcam Q10) e PolyJet (Connex 350). O presente trabalho mostra que o processo de fabricação por manufatura aditiva com maquinário industrial para diferentes técnicas pode ter parte da rotina de trabalho otimizada com software livre, reduzindo os custos com aquisição de licenças de *software*, garantindo a agilidade no processamento de demandas.

5. REFERÊNCIAS

- AMORIM, P.H.; MORAES, T.F.; DA SILVA, J.V.L.; PEDRINI, H. In Vesalius. An interactive framework for health care support. **Advances in Visual Computing**, p. 45-54, 2015.
- ARANTES, J. T. Face shield developed by the University of São Paulo is produced by industrial firms. **Agência FAPESP**, 2020. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/modelo-de-viseira-de-protecao-desenvolvido-pela-usp-estando-produzido-por-industrias/32925/>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- BANDEIRA, L. C.; DE CAMPOS, B. M.; CIUFFI, K. J.; NASSAR, E. J.; DA SILVA, J. V.L.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A. Calcium phosphate coatings by Sol-Gel on acrylonitrile-butadiene-styrene substrate. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 28, n. 6, p. 943-949, 2017.
- BAUMERS, M.; HOLWEG, M. On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. **Journal of Operations Management**, v. 65, n. 8, p. 794-809, 2019.
- BLENDER. Disponível em: <https://www.blender.org/>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- BLENDER STL. Disponível em: https://docs.blender.org/manual/en/latest/addons/import_export/mesh_stl.html. Acesso em: 11 de abril de 2022.
- BLENDER BOOL TOOL. Disponível em: https://docs.blender.org/manual/en/latest/addons/mesh/3d_print_toolbox.html. Acesso em: 11 de abril de 2022.
- BLENDER 3D PRINT TOOLBOX. Disponível em: https://docs.blender.org/manual/en/latest/addons/mesh/3d_print_toolbox.html. Acesso em: 11 de abril de 2022.
- DE CAMPOS, B. M.; BANDEIRA, L. C.; CALEFI, P. S.; CIUFFI, K. J.; NASSAR, E. J.; DA SILVA, J. V.L.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A. Protective coating materials on nylon substrate by sol-gel: The sol-gel process can be used to coat a nylon substrate, changing the properties of the material and the interaction between the coating and the substrate takes place through the NH groups of nylon. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 6, n. 1, p. 33-39, 2011.
- DE CAMPOS, B. M.; CALEFI, P. S.; CIUFFI, K. J.; DE FARIA, E. H.; ROCHA, L. A.; NASSAR, E. J.; DA SILVA, J. V.L.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A. Coating of polyamide 12 by sol-gel methodology. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 115, n. 2, p. 1029-1035, 2014.
- DE SOUZA, É. A.; DE CAMPOS, B. M.; ROCHA, L. A.; DE FARIA, E. H.; CIUFFI, K. J.; NASSAR, E. J.; DA SILVA, J.V.L.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A. Modificação de membrana de poliamida via sol-gel e incorporação de composto de európio (III) luminescente. **Química Nova**, v. 39, n. 9, p. 1044-1050, 2016.
- DE SOUZA, É. A.; ROCHA, L. A.; DE FARIA, E. H.; CIUFFI, K. J.; NASSAR, E. J.; DA SILVA, J.V.L.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A. Incorporation of the chemotherapy medication cisplatin into polyamide membrane. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v. 180, n. November 2017, p. 171-178, 2018.
- DE SOUZA, K. Z. R.; DE FARIA, E. H.; MARÇAL, L.; CIUFFI, K. J.; RICCI, E. G.; ROCHA, L. A.; NASSAR, E. J.; DA SILVA, J. V.L.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A. Incorporação de rodamina B em membrana de poliamida pelo método da adsorção. **Química Nova**, v. 44, n. 2, p. 154-160, 2021.
- DE SOUZA, M. L.; MOSCARDINI, S. B.; DE FARIA, E. H.; CIUFFI, K. J.; ROCHA, L. A.; NASSAR, E. J.; DA SILVA, J. V.L.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A. Óxido de Ítrio e alumínio dopado com Yb³⁺ e Er³⁺ incorporado em membrana de poliamida. **Química Nova**, v. 41, n. 5, p. 519-527, 2018.
- GOODRIDGE, R. D.; TUCK, C. J.; HAGUE, R. J. M. Laser sintering of polyamides and other polymers. **Progress in Materials Science**, v. 57, n. 2, p. 229-267, 2012.
- KEMMOKU, D. T.; NORITOMI, P. Y.; ROLAND, F. G.; DA SILVA, J. V. L. Use of BioCAD in the development of a growth compliant prosthetic device for cranioplasty of growing patients. **Innovative Developments in Design and Manufacturing**, p. 145-148, 2010.
- KRUTH, J. P.; LEVY, G.; KLOCKE, F.; CHILDS, T. H. C. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 2, p. 730-759, 2007.
- LEACH, R.; CARMIGNATO, S. Precision metal additive manufacturing. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- LONGHITANO, G. A.; CANDIDO, G.; MACHADO, Leonardo M. R.; NETO, P. I.; DE OLIVEIRA, M. F.; NORITOMI, P. Y.; MAIS, F. G.; Souza, V. L. DE P.; DA SILVA, J. V. L. **Journal of 3D Printing in Medicine**, v. 4, n. 4, p. 193-202, 2020.
- PEREIRA, T. F.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A.; DA SILVA, J. V.L.; COSTA, M. F.; THIRÉ, R. M. S. M. 3D printing of poly(3-hydroxybutyrate) porous structures using selective laser sintering. **Macromolecular Symposia**, v. 319, n. 1, p. 64-73, 2012.

- PEREIRA, T. F.; SILVA, M. A. C.; OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A.; DA SILVA, J. V.L.; COSTA, M. F.; THIRÉ, R. M. S. M. Effect of process parameters on the properties of selective laser sintered Poly(3-hydroxybutyrate) scaffolds for bone tissue engineering: This paper analyzes how laser scan spacing and powder layer thickness affect the morphology and mechanical properties. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 7, n. 4, p. 275-285, 2012.
- PHAM, D. T.; GAULT, R. S. A comparison of rapid prototyping technologies. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 38, n. 10-11, p. 1257-1287, 1998.
- PRUSA SLICER. Disponível em: https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- SASKA, S.; PIRES, L. C.; COMINOTTE, M. A.; MENDES, L. S.; DE OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A.; DA SILVA, J. V. L.; RIBEIRO, S. J. L.; CIRELLI, J. A. Three-dimensional printing and in vitro evaluation of poly(3-hydroxybutyrate) scaffolds functionalized with osteogenic growth peptide for tissue engineering. **Materials Science and Engineering C**, v. 89, n. 1, p. 265-273, 2018.
- SELLS, E.; SMITH, Z.; BAILARD, S.; BOWYER, A. Reprap: the replicating rapid prototyper: maximizing customizability by breeding the means of production. **World Conference on Mass Customization on Mass Customization and Personalization Proceedings**, p. 1-9, 2007.
- SETTI, G. de O.; DE OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A.; DA SILVA, J. V. L.; JOANNI, E. Functionalization of SLS parts for application as SERS substrates in chemical analysis: Preliminary results. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 4, p. 280-284, 2014.
- ULTIMAKER CURA. Disponível em: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- WOHLERS, T. Wohlers Report. Fort Collins, CO: Wohlers Associates Inc, 2019.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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