

Manufatura de órtese de punho por impressora 3D e análise por simulação com elementos finitos

Santos, Paulo Victor Ferreira^{*1}; Silva, Jonas Leonardo Medeiros Gomes²; Silva, Nadège Sophie Bouchonneau³; Merino, Eugenio Andrés Díaz⁴; Costa, Diogo⁵; Giracca, Cesar Nunes⁶; Merino, Giselle Schmidt Alves Díaz⁷; Cabral, Ana Karina Pessoa da Silva⁸

1 – Departamento de Engenharia Mecânica, UFPE, paulo.vfsantos@ufpe.br

2 – Departamento de Engenharia Mecânica, UFPE, jonas.medeiros@ufpe.br

3 – Departamento de Engenharia Mecânica, i-LITPEG, UFPE, nadege.bouchonneau@ufpe.br

4 – Departamento de Gestão, Mídias e Tecnologia, UFSC; POSDESIGN UFSC; PPGEP UFSC, eugenio.merino@ufsc.br

5 – Departamento de Desenho Industrial, UFRJ; POSDESIGN UFSC, diogoportes102@gmail.com.br

6 – Departamento de Engenharia de Produção, UFSC, eng.giracca@gmail.com

7 – Departamento de Design, UDESC; PPGDesing, UDESC; POSDESIGN, UFSC, giselle.merino@udesc.br

8 – Departamento de Terapia Ocupacional, UFPE; PPGERO UFPE; PPERGO UFPE; anakarina.cabral@ufpe.br

*-Correspondência: Av. da Arquitetura, LITPEG-UFPE, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil, 50740-540.

DOI 10.52050/9788579177149-07

RESUMO

A produção de órteses por impressão 3D é tendência global devido a customização e baixo custo. Para conhecer o processo e garantir confiabilidade, faz-se necessário o estudo com ferramentas computacionais e experimentais. Foi realizado o estudo por elementos finitos no modelo computacional (CAD) de uma órtese para punho e um processo de conformação manual a quente. Concluiu-se que a simulação computacional previu as regiões de falha observadas no modelo experimental. Estudos futuros podem aprofundar a análise, aprimorando o modelo de simulação, considerando diferentes parâmetros de impressão e com melhorias no processo de conformação a quente para melhores resultados.

Palavras-chave: Órtese, Impressão 3D, Simulação por elementos finitos.

ABSTRACT

The production of orthoses using 3D printing is a global trend due to customization and low cost. To understand the process and ensure reliability, it is necessary to study it with computational and experimental tools. A finite element study was

carried out on the computational model (CAD) of a wrist orthosis and a manual Hot working process. It was concluded that the computational simulation predicted the failure regions observed in the experimental model. Future studies can deepen the analysis by improving the simulation model, considering different printing parameters, and with improvements in the Hot working process for better results.

Keywords: Orthoses, 3D printing, finite element analysis.

1. INTRODUÇÃO

No contexto médico, as órteses de punho desempenham papel crucial na reabilitação motora, oferecendo suporte e correção funcional (ASSUMPÇÃO et al., 2006). Tradicionalmente, estas são confeccionadas de forma artesanal com materiais como termoplásticos moldados a temperaturas relativamente baixas e sua forma, qualitativamente, depende da experiência e habilidade do profissional da saúde à moldá-la. Com a impressão 3D e o escaneamento digital, torna-se viável produzir órteses personalizadas, com melhor adaptação anatômica, conforto e menores custos, além de facilitar ajustes conforme a evolução do tratamento (MORIMOTO et al., 2021).

A manufatura aditiva, especificamente modelagem por deposição fundida ou impressão 3D, é uma tecnologia que constrói objetos por deposição sucessiva de material com base em modelos digitais, permitindo geometrias complexas, alta personalização e redução de desperdício em comparação aos métodos convencionais (DELBART et al., 2023). Sua aplicação destaca-se em áreas como saúde, engenharia e design, devido à rapidez na prototipagem, produção sob demanda e economia de recursos.

A impressão 3D, apesar dos benefícios anteriormente citados, enfrenta desafios técnicos significativos em sua aplicação. A personalização das órteses requer escaneamentos precisos da anatomia do usuário e o uso de softwares especializados para adequação funcional e ergonômica (ARCE et al., 2017). Além disso, deve-se buscar os materiais adequados para impressão, como o polímero PLA (Poliácido láctico), e os parâmetros de impressão que resultem em uma impressão com propriedades mecânicas e a durabilidade necessárias para suportar o uso contínuo e as exigências biomecânicas específicas desses dispositivos (ABIDIN et al., 2021). A fim de melhor prever o comportamento e propriedades mecânicas destes dispositivos para garantir confiabilidade e segurança aos usuários em sua função, a simulação por elementos finitos (FEA) é uma ferramenta crucial (AHMADI et al., 2024). Esse tipo de estudo prevê o comportamento mecânico dos dispositivos antes da fabricação, considerando as características anisotrópicas e estruturais da impressão 3D, como porosidade

e orientação das camadas. Essa abordagem reduz custos com protótipos físicos e possibilita personalizações mais eficazes.

A presente pesquisa é conduzida por uma rede de pesquisadores das áreas de Engenharia, Terapia Ocupacional e Design vinculados ao Laboratório de Simulação Computacional (SIMULAB/INTM) e ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV/i-LITPEG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), o Laboratório de Tecnologia Assistiva e Terapia Ocupacional (LabTATO) da UFPE e o Núcleo de Gestão de Design/Laboratório de Design e Usabilidade (NGD/LDU) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que fazem parte da rede SisAssistiva do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do Projeto TECLABORAL – “Tecnologia Assistiva para autonomia cotidiana / laboral de pessoas com deficiência e formação de recursos humanos” (Ref. Projeto Finep n. 2163/22), no qual estão sendo desenvolvidas órteses 3D para serem concedidas a pessoas com deficiência visando a inclusão laboral. O objetivo desta pesquisa é analisar a deformação de modelos computacional e experimental de uma órtese ventral para posicionamento de punho impressa em 3D, garantindo a confiabilidade do produto para sua aplicação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Simulação por FEA

A simulação numérica por Elementos Finitos ou Finite element analysis (FEA) é uma ferramenta computacional crucial no desenvolvimento de produtos, permitindo a análise virtual do comportamento de sistemas complexos e a solução de equações diferenciais parciais que regem fenômenos físicos diversos (OLIVEIRA, 2023). Sua aplicação estratégica possibilita a otimização de projetos, a redução de custos e do tempo de lançamento no mercado ao minimizar a necessidade de protótipos físicos, como visto na otimização de processos em manufatura aditiva (SONI et al, 2024) e no aprimoramento da segurança veicular (NHSJS, 2024).

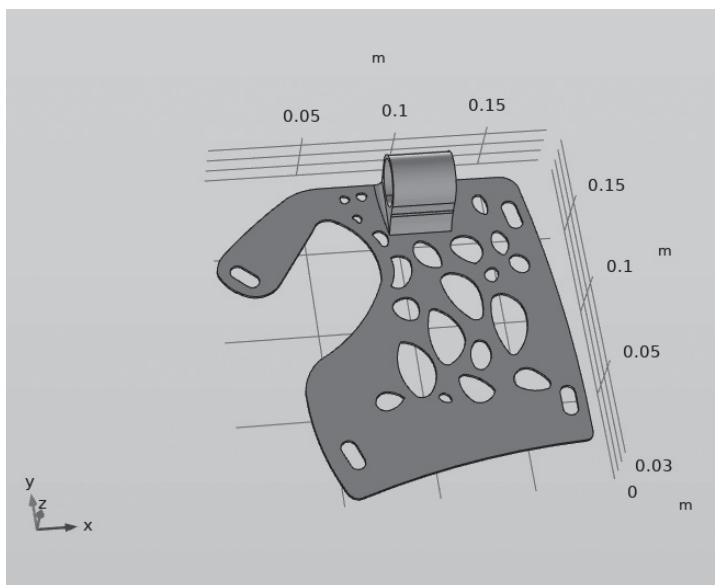
Para os estudos FEA, foi utilizado o software comercial Comsol Multiphysics, que é capaz de realizar a simulação de diferentes físicas integradas e acopladas. Os estudos foram realizados com o módulo “Solid Mechanics” para aplicação das cargas mecânicas e análise da resposta em tensão e deformação.

2.1.1. Modelo CAD 3D e Material

O modelo CAD, apresentado na Figura 1, foi importado para o ambiente de trabalho do software no formato “.STEP”. Em seguida, definiu-se o material a partir da biblioteca de materiais do próprio software. Foram atribuídas

propriedades mecânicas como o módulo de young de 3 GPa, a densidade de 1250 Kg/m^3 e o coeficiente de Poisson de 0.36 com base em dados da literatura (CARRASCO et al., 2010), sendo informações essenciais para a análise dos elementos finitos realizados posteriormente.

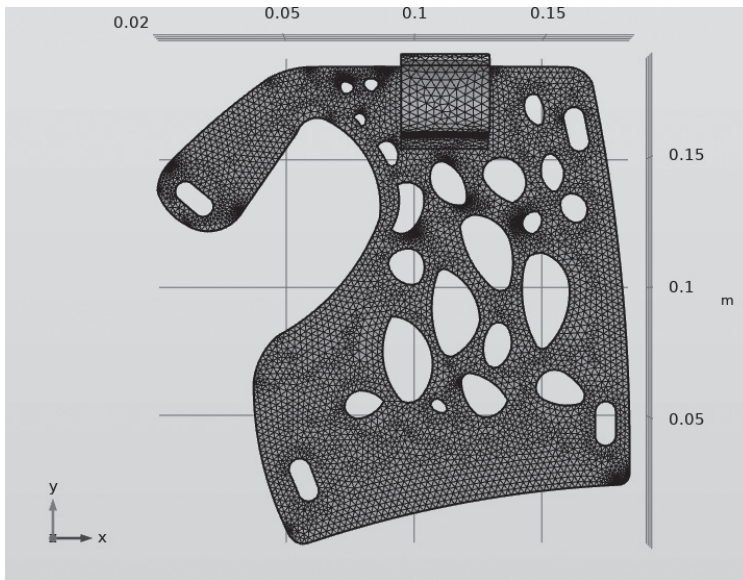
Figura 01 - Modelo CAD da órtese no software Comsol Multiphysics.



O material escolhido para a impressão da órtese foi o Políácido Láctico (PLA), devido ao mesmo ser biocompatível, biodegradável, reciclável e produzido a partir de fontes renováveis. Este polímero termoplástico apresenta estruturas semicristalina ou amorfa e suas propriedades variam de acordo com a distribuição, massa molar e composição química. A sua temperatura de fusão na faixa de 170 a 180°C quando for semicristalino, sua temperatura de transição vítrea na faixa de 55 a 65°C e seu módulo de elasticidade variando entre 3 a 4 MPa , sendo este material de baixo custo e da facilidade de conformação (SANTANA et al., 2018).

2.1.2. Malha e condições de contorno

Figura 02 - Malha de elementos finitos



Foi gerada uma malha extra fina de elementos triangulares, conforme podemos observar na figura 2, consistindo de 144423 elementos.

Como condições de contorno, foram definidas: Restrição fixa ou “Fixed constraint” de deslocamento zero nas direções dos eixos “X, Y, Z” orientados, nas regiões destacadas na figura 3, do suporte cilíndrico vazado e nas paredes internas das seis curvas fechadas centralizadas geometricamente no modelo. As restrições foram definidas em função da conformação a quente da órtese posterior a impressão, que apresenta deslocamentos mínimos do modelo experimental nas regiões selecionadas.

Para as cargas, são selecionadas as seções das paredes nos quatro rasgos localizados nos cantos extremos da órtese (figura 4). Nessas paredes, é aplicada o parâmetro variável a representar o carregamento F [kN], na direção negativa do eixo de coordenadas “Z”.

Figura 03 - Condição de fixação.

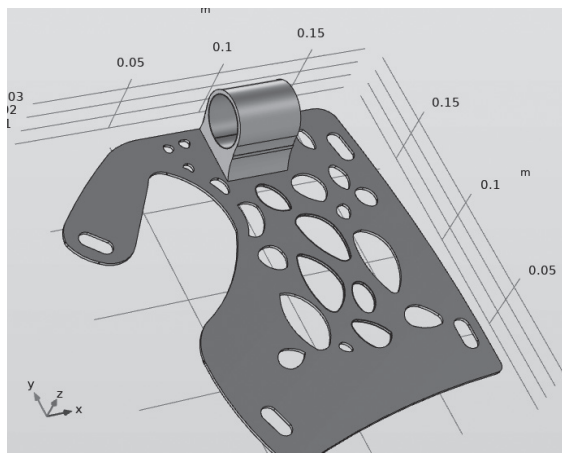
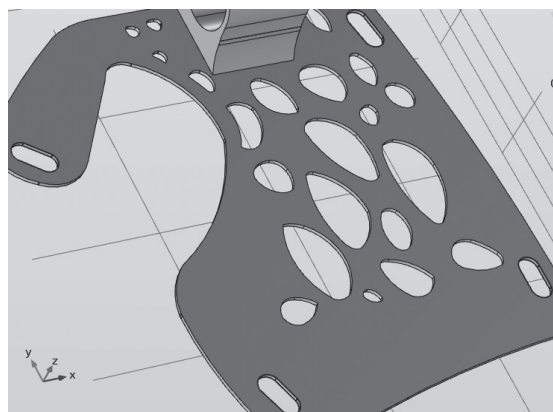


Figura 04 - Condição de carregamento.



2.1.3. Pós-processamento

A carga selecionada para a simulação estacionária iniciou de 0 N, crescendo até a carga de 10 N com incremento de 1 N. As figuras 5 e 6 ilustram a distribuição das deformações na peça após aplicação do carregamento. Foi obtido como valor de máxima tensão de Von Mises 9,57 MPa na região destacada na Figura 7, ou seja, abaixo da tensão de escoamento do PLA que se situa entre 50 e 70 MPa.

Figura 05 - Vista superior (X,Y) da distribuição das deformações.

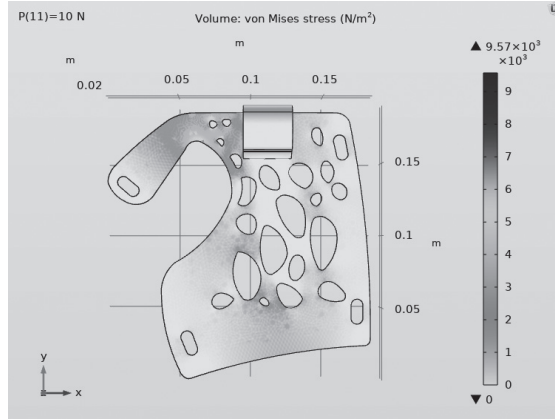
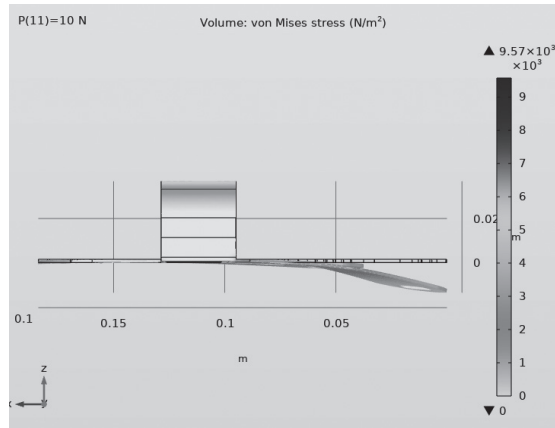


Figura 06 - vista frontal (X,Z) da distribuição das deformações.

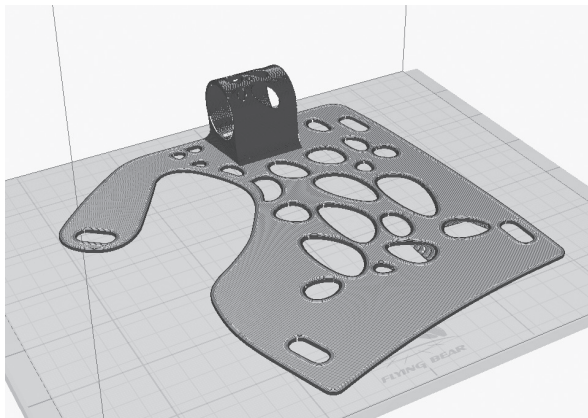


2.2. Impressão 3D

A impressora 3D disponível para este projeto é o modelo Flying Bear 4S, com filamento de “PLA velvet”, da Voolt3D de temperatura da saída do extrusor de 215 °C e temperatura na mesa de impressão de 65 °C.

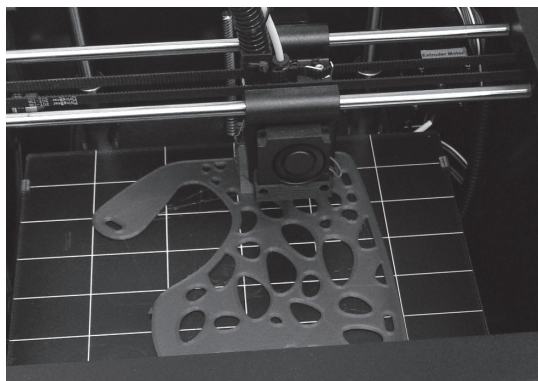
Foi utilizado o software livre Ultimaker Cura versão 5.9.0, para realizar o fatiamento do modelo CAD nas camadas a serem impressas.

Figura 07 - Modelo em formato STL após fatiamento no Ultimaker Cura.



As peças foram impressas com 247 camadas, com os seguintes parâmetros de impressão: preenchimento: 30%; altura de camada: 0.16 mm; velocidade de impressão: 40 mm/s; temperatura de extrusão: 215 °C; temperatura de mesa: 65 °C; formato do preenchimento: Giróide; 3 camadas de paredes; 3 camadas superior e inferior. O tempo de impressão foi de 6 horas e 47 minutos. A figura 8 apresenta a órtese obtida por impressão 3D.

Figura 08 - Órtese impressa.



Após a impressão 3D, a órtese planificada é submetida a um processo manual e personalizado de conformação a quente, utilizando-se de um banho imerso em água aquecida no aparato da figura 09 e/ou utilização de um soprador térmico. Com a conformação, a órtese adquire, de um modelo, a forma específica do punho ao antebraço do paciente.

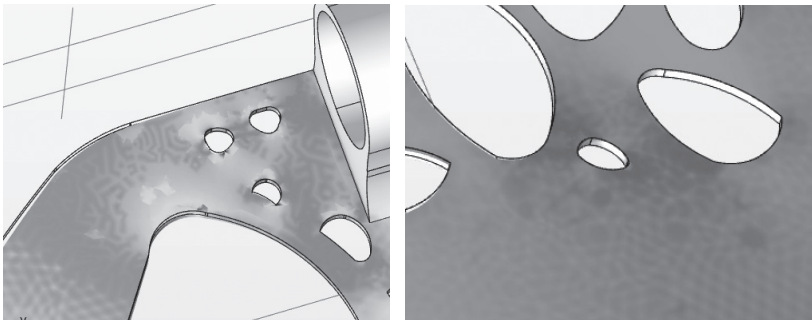
Figura 09 - Aparato para conformação a quente manual.



3. RESULTADOS

As regiões em destaque apresentaram as maiores tensões e deformações na simulação. Observa-se maior concentração nas curvas mais acentuadas da geometria.

Figura 10 e 11 - Regiões de maiores tensões de Von Mises.



As órteses de punho impressas em PLA, após um processo de conformação a quente realizado a fim de obter a geometria final, apresentaram falhas e ruptura nas duas regiões indicadas nas figuras 8 e 9.

A órtese foi trabalhada com o processo de conformação a quente imersa em água aquecida no aparato da figura 09, de modo a torná-la maleável para adquirir a geometria de interesse (molde da mão de um dos pesquisadores).

A peça, após retirada do banho e iniciado o processo de conformação, rapidamente retornava a sua rigidez original e por consequente não deformou tanto quanto o desejado antes de apresentar falhas e ruptura do material, tomando a geometria vista nas figuras 11 e 12.

Figura 11 - Órtese impressa em PLA com falhas e ruptura.



Figura 12 - Órtese impressa em PLA com falhas e ruptura



4. DISCUSSÃO

A simulação qualitativamente traz orientação quanto a localizações de interesse. As órteses impressas apresentaram falhas e ruptura nas duas regiões indicadas pela simulação numérica como regiões de maior tensão e deformação. Observa-se também que as maiores tensões concentram-se na região de menor largura e também estão presentes nos furos próximos à mesma, o que é um indicativo para futura melhoria de projeto em termos de geometria (NORTON, R. L., 2004).

Apesar do processo de conformação com banho de água quente ser utilizado de maneira a modelar as órteses com utilização de termoplásticos, em nossa

aplicação de órtese impressa a conformação foi menor que a desejada, não atingindo a forma necessária a melhor acomodar geometria de referência (forma da mão). Melhorias no processo de conformação são cabíveis para melhor controle e previsibilidade, a exemplo de um modelo para monitoramento e controle de temperatura e tempo para garantir a transmissão de calor, no caso da imersão em água quente e utilização de soprador térmico para deformação localizada.

5. CONCLUSÕES

O presente artigo traz um estudo preliminar com o objetivo de analisar a deformação e falha no estudo de simulação computacional e experimental de órtese fabricada por impressão 3D. A análise preliminar dos resultados da simulação expõem qualitativamente tensão e deformação para as cargas aplicadas nas regiões esperadas, devido ao fator geométrico (região de menor largura) e com a presença de furos.

A órtese impressa, em processo manual de conformação a quente apresentou falhas e rupturas do material nas regiões indicadas pela simulação como tendo maiores tensões devido ao carregamento. Nas próximas etapas da pesquisa em andamento haverá o aprimoramento dessa análise ao aprofundar a complexidade nas etapas do processo, comparando os valores de tensão e deformação para modelos diferentes ao imprimir órteses com diferentes parâmetros de impressão, a exemplo de: preenchimento de material, número e altura de camadas. Também há de ser melhorado o processo de conformação e estudado, com a ferramenta de simulação, um modelo de órtese após a deformação a quente, já tensionado e deformado, cenário que melhor se aproxima a aplicação real diária da órtese de punho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às agências de fomento FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos e CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo financiamento da pesquisa em andamento (Ref. Projeto Finep n. 2163/22 - TECLABORAL) e contribuição para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS

ABIDIN, Zainal et al. Numerical investigation of the mechanical properties of 3D printed PLA scaffold. In: *5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)*. Atlantis Press, 2022. p. 83-89.

- AHMADI, Reza et al. Fatigue investigation of 3D-printed notched PLA specimens by Thermographic methods with FEM Simulation Integration. *Procedia Structural Integrity*, v. 53, p. 97-111, 2024.
- ARCE, Rodrigo Pulido; FOGGIATTO, José Aguiomar. Modelagem de órteses para fabricação por manufatura aditiva. In: *9º Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação*, Joinville. 2017.
- ASSUMPÇÃO, T. S. Órteses: princípios básicos. *PP Freitas. Reabilitação da mão*, p. 539-553, 2006.
- DELBART, Robin et al. An experimental and numerical study of the mechanical response of 3D printed PLA/CB polymers. *Composite Structures*, v. 319, p. 117156, 2023.
- CARRASCO, F. et al. Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, [S.l.], v. 95, n. 2, p. 116-125, 2010.
- MORIMOTO, Sandra Yoshie Uraga et al. Órteses e próteses de membro superior impressas em 3D: uma revisão integrativa. *Cadernos Brasileiros de Terapia Ocupacional*, v. 29, p. e 2078, 2021.
- NHSJS. Finite Element Method's Application in Vehicle Safety Design. *The National High School Journal of Science*, 25 fev. 2024. Disponível em: <https://nhsjs.com/2024/finite-element-methods-application-in-vehicle-safety-design/>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- NORTON, R. L., 2004, "*Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada*". 2ª ed. Porto Alegre: Bookman.
- OLIVEIRA, Talisson Silva et al. MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS MECÂNICOS: Modelagem, simulações e resultados. *REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA*, v. 15, n. 1, 2023.
- SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; SABINO NETTO, Aurélio da Costa; MERLINI, Claudia. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. *Matéria* (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 401-412, 2018. doi:10.1590/S1517-707620180004.0601. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/dpWDvBJzSXYtzbKn-JdQqHVg/>. Acesso em: 25 maio 2025.
- SONI, Neetesh; RENNA, Gilda; LEO, Paola. Advancements in Metal Processing Additive Technologies: Selective Laser Melting (SLM). *Metals*, Basel, v. 14, n. 9, p. 1081, 21 set. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/9/1081>. Acesso em: 12 jun. 2025.