

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RONALDO FRANKLIN FLORESTA

**MANUFATURA ADITIVA DE UMA ÓRTESE SURO PODÁLICA
APÓS O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA**

SÃO CARLOS
2024

RONALDO FRANKLIN FLORESTA

**MANUFATURA ADITIVA DE UMA ÓRTESE SURO PODÁLICA
APÓS O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

SÃO CARLOS
2024



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 51/2023/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

RONALDO FRANKLIN FLORESTA

MANUFATURA ADITIVA DE UMA ÓRTESE SURO PODÁLICA APÓS O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 14 de novembro de 2023

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 1	Eduardo Costa Pulquerio
Membro da Banca 2	Gustavo Franco Barbosa



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 14/11/2023, às 17:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Franco Barbosa, Professor(a) do Ensino Superior**, em 14/11/2023, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1260920** e o código CRC **BD1674D5**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.040815/2023-64

SEI nº 1260920

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

Dedico este trabalho aos meu familiares e amigos queridos que estiveram junto a mim durante todo esse tempo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a toda minha família que me acompanhou e apoiou em todos esses anos de faculdade. Dito isso, não posso deixar de registrar um obrigado especial aos amigos que fiz em São Carlos desde 2017, com os quais tive a oportunidade de aprender e compartilhar momentos inesquecíveis. Por fim, agradeço também aos professores com os quais tive a chance de ter aula e a todo o conhecimento transmitido por eles.

Obrigado UFSCar!

A verdadeira motivação vem de realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento. - Frederick Herzberg

RESUMO

Com o avanço da tecnologia, a necessidade de evoluções e adaptações nos processos em geral tem exigido a fabricação de estruturas cada vez mais complexas de uma forma eficaz com consumo e tempo reduzidos. Nesse contexto, a manufatura aditiva tem ganhado bastante espaço no mercado, uma vez que, supre a necessidade de confecção de geometrias complexas que, outrora, seria de muito esforço ou até mesmo inviável para os processos de fabricação convencionais. Dito isso, estudos vêm sendo desenvolvidos no ramo da medicina assistiva com intuito de melhorar e viabilizar a confecção de órteses através da manufatura aditiva. A órtese AFO (*Ankle-Foot Orthosis*), ou órtese suropodálica, é um dispositivo médico responsável por garantir a estabilidade de pacientes que sofrem algum tipo de lesão ou que possuem dificuldade de movimentar o tornozelo. Por se tratar de um dispositivo externo, o conforto se torna um fator fundamental para o paciente que for usá-la. Dessa forma, conceitos de otimização topológica têm sido aplicados em órteses AFO visando a redução de massa do dispositivo sem que haja perda de suas propriedades mecânicas. Com a aplicação da otimização topológica, a AFO assume geometrias cada vez mais complexas e, mesmo para processo de manufatura aditiva, o tempo para fabricação desse dispositivo pode aumentar de forma significativa. Dessa forma, o presente trabalho busca estudar os conceitos e parâmetros de fabricação da manufatura aditiva visando a confecção de uma AFO após passar pelo processo de otimização topológica, com menores valores de matéria prima gasta, além do tempo de fabricação reduzido. Para isso, foram selecionados 5 parâmetros de impressão 3D, sendo eles: altura da camada, largura de extrusão, velocidade de impressão, orientação de fabricação e densidade de preenchimento. Com um modelo de AFO definido a partir de estudos anteriores, esses parâmetros foram inseridos no *software* de fatiamento *Ultimaker Cura*, juntamente com as propriedades da impressora 3D definida e a matéria prima de fabricação, no caso o PLA. Ao todo, foram realizadas 18 simulações, sendo metade para uma primeira orientação e a outra metade para a segunda orientação de impressão escolhida. Os resultados foram efetivos quando relacionados à redução de massa e tempo de fabricação da AFO.

Palavras-chave: manufatura aditiva; AFO; otimização topológica.

ABSTRACT

With the advance of technology, the need for developments and adaptations in processes in general has required the manufacture of increasingly complex structures in an efficient manner with reduced consumption and time. In this context, additive manufacturing has been gaining a lot of ground in the market, as it meets the need to make complex geometries that would once have been too much effort or even unfeasible for conventional manufacturing processes. That said, studies have been carried out in the field of assistive medicine with the aim of improving and making feasible the manufacture of orthoses through additive manufacturing. The AFO orthosis (*Ankle-Foot Orthosis*), or suropodal orthosis, is a medical device responsible for ensuring the stability of patients who suffer some kind of injury or have difficulty moving their ankle. As it is an external device, comfort becomes a fundamental factor for the patient wearing it. Therefore, topological optimization concepts have been applied to AFO orthoses in order to reduce the device's mass without losing its mechanical properties. With the application of topological optimization, the AFO takes on increasingly complex geometries and, even for the additive manufacturing process, the time taken to manufacture this device can increase significantly. Therefore, this study aims to study the concepts and manufacturing parameters of additive manufacturing in order to make an AFO after going through the topological optimization process, with lower raw material costs and reduced manufacturing time. To this end, five 3D printing parameters were selected: layer height, layer width, printing speed, manufacturing orientation and fill density. With an AFO model defined from previous studies, these parameters were entered into the slicing software *Ultimaker Cura*, along with the properties of the 3D printer defined and the raw material used for manufacturing, in this case PLA. A total of 18 simulations were carried out, half for the first orientation and half for the second chosen printing orientation. The results were effective when it came to reducing the mass and manufacturing time of the AFO.

Keywords: additive manufacturing; AFO; topological optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de órteses AFO.	13
Figura 2 – Exemplo de estrutura otimizada topologicamente.	16
Figura 3 – Esquema de processo de FDM.	18
Figura 4 – Representação gráfica da orientação de impressão.	19
Figura 5 – Representação gráfica da altura da camada e da largura de extrusão.	20
Figura 6 – Fluxograma do processo de otimização topológica.	22
Figura 7 – AFO antes e pós otimização topológica.	23
Figura 8 – Célula robotizada de manufatura aditiva	24
Figura 9 – Orientações de impressão.	25
Figura 10 – Suportes gerados para as orientações.	25
Figura 11 – Influência da densidade de preenchimento no tempo de impressão em horas.	28
Figura 12 – Influência da densidade de preenchimento no tempo de impressão em horas.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas comuns para os materiais usados em FDM.	18
Tabela 2 – Parâmetros de impressão.	26
Tabela 3 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 10mm/s; altura da camada 1,48mm e 4,62mm de largura de extrusão.	27
Tabela 4 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 30mm/s; altura da camada 1,29mm e 1,74mm de largura de extrusão.	27
Tabela 5 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 50 mm/s; altura da camada 1,15 mm e 1,21 mm de largura de extrusão.	28
Tabela 6 – AFO simulada com menor tempo de impressão e menor consumo de material para órtese deitada.	29
Tabela 7 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 10mm/s; altura da camada 1,48mm e 4,62mm de largura de extrusão.	29
Tabela 8 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 30mm/s; altura da camada 1,29mm e 1,74mm de largura de extrusão.	29
Tabela 9 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 50 mm/s; altura da camada 1,15 mm e 1,21 mm de largura de extrusão.	30
Tabela 10 – AFO simulada com menor tempo de impressão e menor consumo de material para órtese em pé.	31
Tabela 11 – Comparativo entre as duas orientações sem o uso de suportes.	31
Tabela 12 – Características da simulação da AFO em pé que apresentou melhores resultados	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
AFO	<i>Ankle foot orthosis</i>
AM	<i>Additive manufacturing</i>
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
FO	<i>Foot orthosis</i>
MEF	Método dos elementos finitos
PLA	Ácido polilático
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.2 Estrutura do Texto	15
2 – REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 Otimização topológica	16
2.2 Manufatura aditiva	17
2.3 Manufatura aditiva na confecção de órteses	19
2.4 Parâmetros de impressão 3D	19
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Modelo AFO	22
3.2 Impressora 3D	23
3.3 Parâmetros de impressão	24
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Órtese deitada	27
4.2 Órtese em pé	29
4.3 Comparativo entre as orientações	31
5 – CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial, conhecida como indústria 4.0, é um movimento recente baseado na tecnologia da automação inteligente. Nesse contexto, podemos citar a criação de novas tecnologias como a Internet das coisas, nuvens de armazenamento de dados, robôs autônomos e a manufatura aditiva, do inglês *additive manufacturing* (AM) (DILBEROGLU et al., 2017).

As fábricas têm se tornado cada vez mais inteligentes, demandando processos mais ágeis, dado que os processos de manufatura atuais apresentam dificuldades para fabricar produtos customizados e objetos sofisticados com atributos avançados. Dessa forma, essa dificuldade torna a AM um dos componentes vitais da indústria 4.0 (DILBEROGLU et al., 2017).

A AM é o termo formal para se referir a prototipagem rápida ou popularmente conhecida como impressão 3D. O princípio de funcionamento da AM é que as partes são criadas pela adição de material em camadas, em que cada camada é uma fina seção da parte derivada do modelo CAD original (GIBSON et al., 2021).

Com o avanço na qualidade dos produtos, a AM já está sendo usada em diversas indústrias, como a aeroespacial, a manufatura e a biomedicina (DILBEROGLU et al., 2017). Dito isso, estudos recentes vêm sendo publicados envolvendo a manufatura aditiva e a confecção de órteses que passaram pelo processo de otimização topológica.

As órteses são dispositivos da medicina assistiva utilizados para melhorar o padrão anatômico e funcional de membros com limitações devido a enfermidades ou acidentes (FERNANDES; FOGGIATTO; POIER, 2015). Para este trabalho, o foco será dado em um tipo específico de órtese chamada de órtese suro podálica ou *Ankle-Foot Orthosis* (AFO). A AFO é um dispositivo médico externo que auxilia o paciente a manter o tornozelo na posição correta provendo suporte mecânico externo uma vez que o sistema muscular sozinho não é suficiente (MASO; COSMI, 2019). Na Figura 1, é possível ver alguns exemplos de órteses AFO.

Figura 1 – Exemplos de órteses AFO.



Fonte: Maso e Cosmi (2019).

Tradicionalmente, a AFO é produzida de forma artesanal através da modelagem do gesso direto no membro afetado (JIN et al., 2015). Com esse método, a aplicação em excesso de gesso pode gerar desconforto para o paciente devido ao peso final da órtese. Dito isso, o uso otimização topológica vem crescendo cada vez mais em aplicações de órteses, visando a melhor distribuição de material conforme a anatomia do paciente e, somada a manufatura aditiva, providenciar um método ideal de fabricação de órteses customizadas.

Estudos direcionados para otimização topológica de órteses têm mostrado resultados de tempo de impressão significativamente altos utilizando a AM. No trabalho de Maso e Cosmi (2019), a impressão 3D de um AFO otimizada topologicamente levou cerca de 41 horas para ser finalizada. No trabalho de Furtado (2022), o tempo de impressão 3D do modelo de AFO otimizado topologicamente levou cerca de 25 horas.

Segundo Jin et al. (2015), o tempo para fabricação de uma órtese se torna viável uma vez que o material é otimizado topologicamente e técnicas avançadas de *Fused Deposition Modeling* (FDM) com uma alta relação de deposição de material. Os autores ainda acreditam que o tempo de impressão para a órtese de pé ou *Foot Orthosis* (FO) do trabalho, usando técnicas avançadas de FDM, poderia ser reduzido para menos de 60 minutos.

Segundo Vayre, Vignat e Villeneuve (2012), a velocidade de deposição de material e altura de deposição de material depende principalmente da velocidade do bico de impressão e da taxa de deposição de material.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo obter um modelo 3D de uma geometria de AFO otimizada topologicamente de estudos anteriores e a partir disso, aplicar técnicas de AM visando a redução do tempo de impressão da órtese. Para isso, será utilizado o *software* gratuito de fatiamento *Ultimaker Cura* em que nele, serão testadas diferentes combinações de 5 parâmetros escolhidos de impressão 3D, sendo eles: velocidade de impressão, altura da camada, largura de extrusão, densidade de preenchimento e a orientação de construção. Com essa combinação de parâmetros é esperado que o tempo final de impressão da órtese de referência seja reduzido e viável para fabricação.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é viabilizar a confecção de uma AFO após otimização topológica, por meio da manufatura aditiva, em tempo reduzido e com menor consumo de material.

Para que esse objetivo seja atingido, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Entender a influência que os parâmetros configurados no software ocasionam no tempo final de impressão;

- Produzir geometrias complexas de órteses via manufatura aditiva;
- Estudo da bibliografia publicada para entender os conceitos de manufatura aditiva e aplicação no *software* de fatiamento.

1.2 Estrutura do Texto

Esta monografia está organizada da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre otimização topológica, manufatura aditiva no geral e manufatura aditiva voltada especificamente para a confecção de órteses. Apresenta também uma revisão sobre parâmetros de impressão 3D e quais variáveis são significantes no processo;
- O capítulo 3 descreve o métodos utilizado durante todo o projeto de monografia;
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as discussões relacionadas;
- O capítulo 5 contém as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

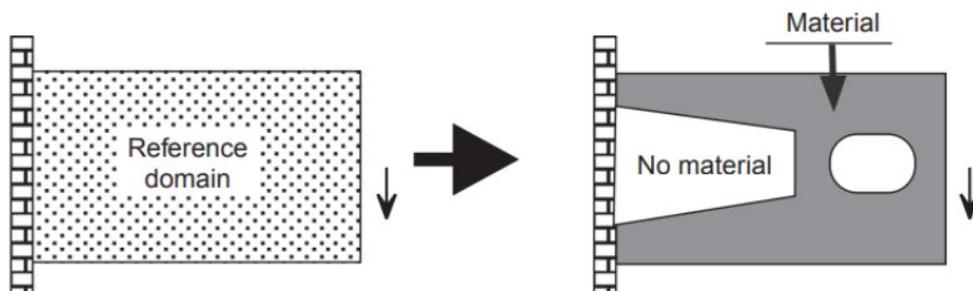
No presente capítulo capítulo, será abordado o conceito de otimização topológica e de manufatura aditiva. Além disso, foram revisados estudos que envolveram a aplicação da otimização topológica e da manufatura aditiva para a confecção de órteses otimizadas. Por fim, foram revisados estudos que relacionam a influência dos parâmetros de impressão 3D no tempo final de impressão.

2.1 Otimização topológica

O campo de estudo da otimização topológica é relativamente novo, mas tem se expandido significativamente rápido. A otimização topológica tem implicações teóricas na matemática, na mecânica, na física e na ciência da computação, mas também, têm importantes aplicações práticas, principalmente, nas indústrias da manufatura (ROZVANY, 2009).

Segundo Sigmund e Maute (2013) a otimização topológica responde à pergunta fundamental da engenharia relacionada a como distribuir material em um domínio definido de forma a obter a melhor performance estrutural. A descrição do problema, ainda segundo os autores, seria encontrar a distribuição de material que minimiza a função objetivo do problema, atendendo a uma restrição de volume e, possivelmente, a outras condições de contorno. A distribuição de material é descrita pela variável de densidade, que pode assumir valores vazios e cheios em qualquer ponto do domínio. Para resolução dos problemas de otimização topológica, Sigmund e Maute (2013), propõem a repartição do domínio a ser otimizado em elementos finitos, distribuindo a densidade em cada um desses N elementos. Na Figura 2, podemos ver um exemplo de Bendsoe e Sigmund (1999) de um domínio inicial que passa pelo processo de otimização topológica e alguns elementos que fazem parte dele, assumem densidade igual a zero, criando um espaço vazio na estrutura.

Figura 2 – Exemplo de estrutura otimizada topologicamente.



Fonte: Bendsoe e Sigmund (1999).

A aplicação da otimização topológica é facilitada com o uso de um *software* de Método dos Elementos Finitos (MEF). Dentro do *software* o usuário será responsável por definir todos os passos, esforços e condições de contorno necessários para definição do problema.

A função objetivo é um parâmetro que pode ser maximizado ou minimizado em uma determinada grandeza. Segundo os autores Sigmund e Maute (2013), em problemas de otimização topológica que se deseja maximizar a rigidez de uma estrutura, a função objetivo que deve ser minimizada é a energia de deformação.

Para que a função objetivo possa ser maximizada ou minimizada, condições de contorno ou esforços podem ou não serem aplicados. As condições de contorno são aplicadas em determinadas partes da estrutura para limitar o problema. Por exemplo, regiões em que a densidade não poderá assumir valores vazios, ou até mesmo, regiões em que deslocamentos não são permitidos. Outro parâmetro que poderá ser utilizado no problema são os esforços ou carregamentos. Em determinadas regiões do domínio podem existir esforços mecânicos como pressão ou força e isso deverá ser considerado no problema. No exemplo da Figura 6, podemos ver que temos uma condição de engaste da estrutura do lado esquerdo e um esforço mecânico vertical no sentido para baixo do lado direito.

2.2 Manufatura aditiva

Descoberta nos anos de 1980, a AM conhecida como prototipagem rápida é conhecida como o processo de unir material para criar objetos a partir de um modelo 3D, usualmente camada por camada, sendo o oposto dos processos convencionais de remoção de material (CALIGNANO et al., 2017).

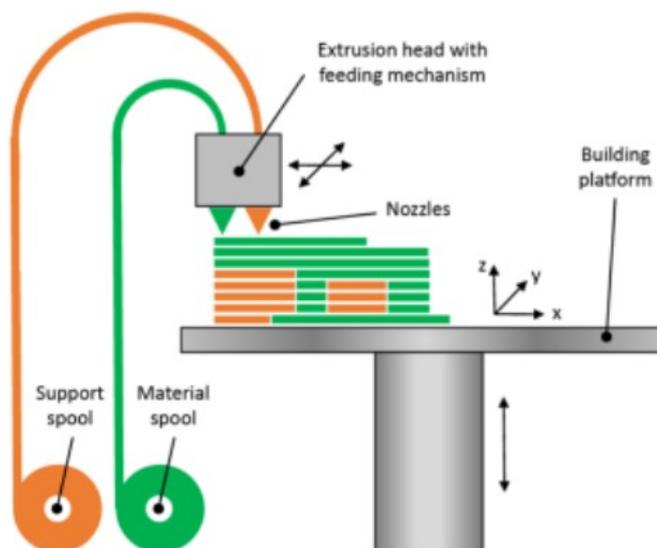
Ao contrário dos processos de fresamento e torneamento em que cilindros e planos são as entidades mais fáceis de serem fabricadas, a AM é capaz de produzir qualquer tipo de estrutura geométrica devido ao seu diferente princípio de fabricação. O fatiamento do objeto em partes e a deposição de material camada por camada faz com que a fabricação de uma geometria complexa seja mais fácil (VAYRE; VIGNAT; VILLENEUVE, 2012).

As tecnologias da AM podem ser classificadas em grupos diferentes, no entanto, para este trabalho o foco foi dado na modelagem por fusão de deposição ou do inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM).

A FDM é a técnica mais econômica da AM. Esta técnica funciona de forma a extrudar um material, geralmente um termoplástico fundido, a partir de um extrusor e depositá-lo em uma mesa aquecida (AGUILAR-DUQUE et al., 2019). Esse termoplástico, geralmente na forma de filamentos, é alimentado no sistema da cabeça de impressão através de um motor elétrico ou hidráulico. Na cabeça de impressão, esse filamento é esquentado até atingir estado líquido e é depositado na mesa formando camadas de deposição. Repetidamente, cada camada é depositada uma em cima da outra formando o objeto tridimensional conforme as especificações do modelo (DAMINABO et al., 2020).

Na Figura 3, é possível ver um modelo de impressora 3D utilizando a técnica de FDM, com a alimentação do filamento de plástico, a cabeça extrusora e a mesa.

Figura 3 – Esquema de processo de FDM.



Fonte: Calignano et al. (2017).

Segundo Calignano et al. (2017), os materiais mais comuns utilizados nas máquinas de FDM são o Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) e o PLA ácido polilático (PLA). O ABS é um termoplástico que tem boa aderência, dessa forma, velocidades altas de impressão são possíveis de serem usadas. Da mesma forma que o ABS, o PLA também possui boa aderência e pode ser impresso em altas velocidades. Além disso, o PLA é um material mais duro que o ABS. Na Tabela 1, é possível ver uma relação entre a temperatura de extrusão e a temperatura da mesa para o ABS e o PLA no processo de FDM.

Tabela 1 – Temperaturas comuns para os materiais usados em FDM.

Material	Temperatura de extrusão [°C]	Temperatura da mesa [°C]
ABS	230 – 260	80 – 100
PLA	175 – 220	60 – 90

Fonte: Adaptado de Calignano et al. (2017).

A FDM tem uma série de vantagens e limitações. O custo da simplicidade do processo e altas velocidades de impressão são considerados os mais benéficos fatores, enquanto a complexidade de parâmetros que afetam diretamente a construção do componente é considerado a maior limitação, dado que, na literatura não há muitos trabalhos disponíveis para ter uma análise compreensiva da influência de todos os parâmetros (SOLOMON; SEVVEL; GUNASEKARAN, 2021).

2.3 Manufatura aditiva na confecção de órteses

Maso e Cosmi (2019) desenvolveram um método para fabricação de uma AFO customizada para uma mulher de 21 anos com dificuldade em andar utilizando uma órtese convencional. Para isso, os autores utilizaram técnicas avançadas de escaneamento 3D e impressão 3D. Cha et al. (2017), desenvolveram um programa automatizado de software para modelos de órteses e manufatura de órteses através de técnicas de impressão 3D. Descreveram ainda, o processo de manufatura e os resultados clínicos depois da aplicação da AFO para o paciente com enfermidade no pé. Buonamici et al. (2020), propuseram uma metodologia prática para produzir, por impressão 3D, órteses para imobilização do pulso.

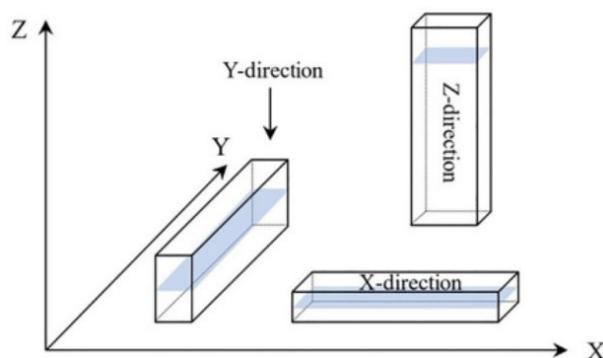
Dombroski, Balsdon e Froats (2014) desenvolveram uma metodologia de fabricação de uma FO usando um modelo de escâner e de impressora 3D de baixo custo para comparar os parâmetros cinemáticos da órtese fabricada pela manufatura aditiva com uma órtese fabricada pelos métodos convencionais de confecção de órteses. Pallari et al. (2010) desenvolveram novas abordagens para criar modelos de FO e AFO customizados que fossem fabricados pelas técnicas de manufatura aditiva. Jin et al. (2015), fizeram um estudo comparativo entre os métodos convencionais de fabricação de FO e AFO com as técnicas de manufatura aditiva. Os autores concluíram que a manufatura aditiva tem se demonstrado capaz de fabricar FO e AFO com qualidade e resistência.

2.4 Parâmetros de impressão 3D

Na FDM vários parâmetros podem ter influência significativa na construção e qualidade do objeto a ser criado. Alguns deles são: nível de preenchimento, velocidade de impressão, altura da camada e orientação de construção do objeto.

A orientação de construção se refere ao modo como o material será depositado na mesa de impressão seguindo os eixos coordenados X, Y e Z da máquina. Na Figura 4, pode-se observar um exemplo de diferentes formas de fabricação de um objeto conforme as orientações dos eixos.

Figura 4 – Representação gráfica da orientação de impressão.

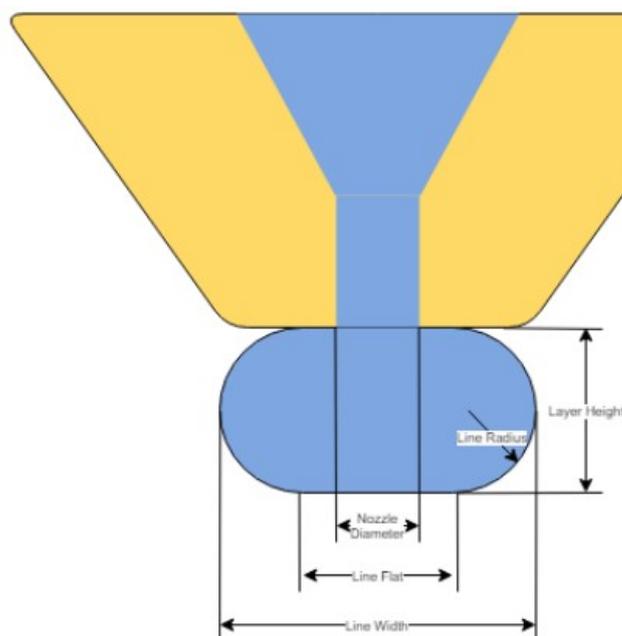


Fonte: Solomon, Sevel e Gunasekaran (2021).

A altura da camada se refere a quantidade de material depositada ao longo do eixo vertical da máquina de FDM em um passo único (SOLOMON; SEVELL; GUNASEKARAN, 2021). De acordo com Wasserfall, Hendrich e Zhang (2017), computação adaptável das alturas de camada para peças impressas 3D tem grandes potenciais de atingir excelentes resultados de qualidade enquanto mantém um tempo razoavelmente curto de impressão.

A largura de extrusão se refere a quantidade de material depositada no eixo horizontal pelo bico de extrusão. Na Figura 5, é possível ver a representação gráfica da altura da camada (*Layer height*) e da largura de extrusão (*Line width*) a partir do bico de extrusão.

Figura 5 – Representação gráfica da altura da camada e da largura de extrusão.



Fonte: (DYZEDESIGN, 2023).

Segundo Sammaiah et al. (2020), o parâmetro de densidade de preenchimento tem grande influência na qualidade final da impressão no processo de FDM. O nível de preenchimento se refere ao volume de material que é depositado para construção do objeto. Essa densidade de preenchimento está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas do objeto a ser impresso (SOLOMON; SEVELL; GUNASEKARAN, 2021).

A velocidade de impressão pode ser citada como a distância percorrida pelo bico extrusor ao longo do plano XY por unidade de tempo enquanto deposita material. O tempo de impressão de uma peça depende diretamente da velocidade de impressão que é medida em mm/s (DEY; YODO, 2019).

Dey e Yodo (2019) fizeram uma revisão da bibliografia publicada e conseguiram concluir que, para tempos mais curtos de impressão 3D de um objeto, o objeto não poderia estar com uma orientação angulada, a altura das camadas de deposição deveria ser maior e a densidade de preenchimento deveria ser menor.

Srivastava et al. (2018) combinaram a metodologia de superfície de resposta ou *Response Surface Methodology* (RSM) com a lógica Fuzzy para otimizar o tempo de impressão e o suporte de volume de material simultaneamente. No trabalho, os autores puderam concluir o efeito dos parâmetros de processo no tempo final de impressão. Dentre eles, o espaço vazio entre filamentos, a orientação de impressão e a altura da camada foram os que apresentaram maiores contribuições na mudança do tempo de impressão. (PENG; XIAO; YUE, 2014) também utilizaram da RSM e da lógica Fuzzy para otimizar variáveis, entre elas, o tempo de impressão. Os autores concluíram que dada a orientação de impressão, o tempo de impressão dependia da altura da camada e da velocidade de preenchimento.

Dessa forma, é possível notar que, atualmente, diversos estudos já foram publicados visando a fabricação de órteses através da manufatura aditiva. Embora a abordagem e metodologia sejam diferentes, todos possuem como objetivo comum entender o efeito dos parâmetros de impressão no tempo final de manufatura. Dessa forma, o conteúdo expressado pela literatura agrega para este trabalho como base teórica para explicação dos parâmetros e em uma primeira análise, identificar aqueles que possuem a maior influência no tempo de fabricação.

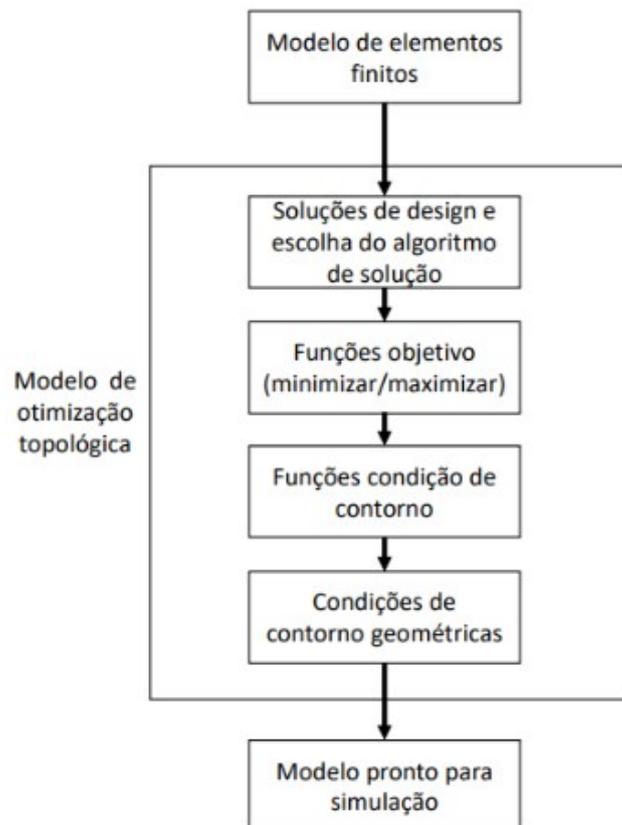
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo está dividido em três diferentes partes. A primeira delas, é a definição do modelo de AFO otimizada topologicamente. Em seguida, será apresentada as características da impressora 3D tal como, o material no qual será utilizado para impressão 3D da órtese. Por fim, o *software* de fatiamento Cura e os parâmetros de impressão definidos.

3.1 Modelo AFO

No trabalho de Furtado (2022) foi feita uma otimização topológica de uma AFO. Para que chegasse no resultado de seu trabalho, o autor teve que seguir algumas etapas. Primeiramente, foi definido o design e material que seria utilizado para compor a órtese. Feito isso, o autor utilizou o *software* *Abaqus* para realizar as simulações através do método de elementos finitos. No *software*, foi considerado o design da órtese com as condições de contorno e os esforços mecânicos. Definido a malha do modelo de elementos finitos, o autor partiu para etapa de otimização topológica definindo os parâmetros necessários. Na Figura 6 é possível ver o fluxograma de trabalho definido pelo autor.

Figura 6 – Fluxograma do processo de otimização topológica.

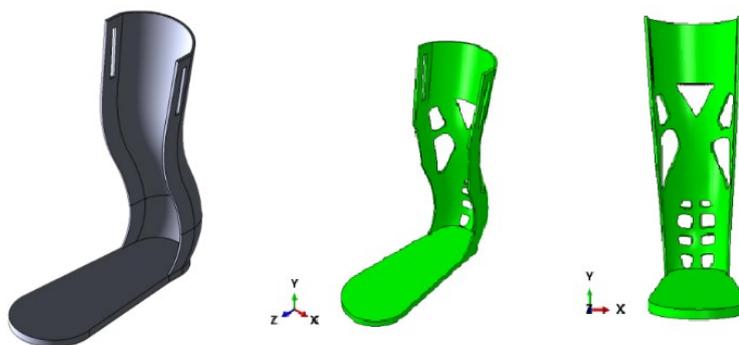


Fonte: Furtado (2022)

O autor simulou 3 modelos diferentes de órtese, sendo eles com 30% do volume inicial, 50% do volume inicial e 70% do volume inicial. O design final escolhido pelo autor foi o 70% do volume inicial devido a dois fatores. O primeiro, por apresentar propriedades mecânicas mais próximas a órtese inicial. E o segundo, se deve ao tempo de impressão 3D, que com auxílio do *software Slic3r*, a órtese com 70% apresentou um tempo de impressão inferior aos outros modelos.

Na Figura 7, é possível ver um comparativo entre o modelo inicial da órtese e a versão otimizada topologicamente com 70% do volume inicial. A versão inicial se encontra a esquerda em cinza e a versão otimizada topologicamente se encontra nas duas vistas a direita em verde.

Figura 7 – AFO antes e pós otimização topológica.



Fonte: Adaptado de Furtado (2022)

A partir da Figura7, é possível notar que a órtese otimizada possui regiões que foram removidas do modelo inicial. Isso acontece, pois, dado as condições de contorno e carregamentos definidos, o *software*, pelo MEF, com a função objetivo de minimizar a energia de deformação, remove da geometria inicial, atendendo a uma restrição de volume imposta, as regiões do modelo que maximizaram a rigidez da estrutura.

Para este trabalho, será utilizado o modelo AFO otimizada topologicamente com 70% do volume inicial e a partir dela, com auxílio da bibliografia e do *software Ultimaker Cura*, otimizar o tempo de impressão 3D, que segundo Furtado (2022), levaria 1d 0h 39m para impressão completa do modelo.

3.2 Impressora 3D

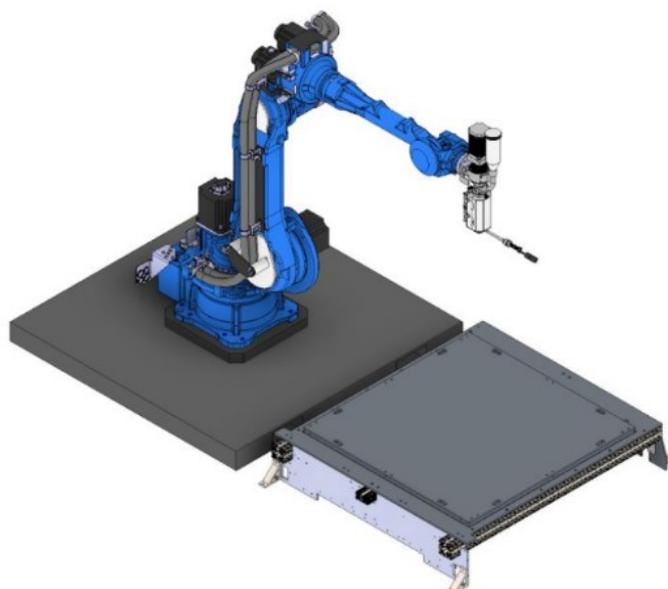
Atualmente, existem vários modelos diferentes de impressoras 3D. Para este trabalho foi usado um sistema de impressão composto, basicamente, por 4 elementos listados abaixo:

- Robô Yaskawa Motoman® GP88;
- Extrusora monorosca AX Plásticos®;

- Mesa térmica para impressão 3D;
- Sensores (temperatura e vibração).

Esse sistema visa a impressão de peças de até 1 m³ de volume, com taxa de deposição de material em torno de 0,5 kg/h, utilizando como matéria-prima grãos de vários tipos (grades) de polímeros (BARBOSA et al., 2023). Na Figura 8 é possível ver a representação do sistema de manufatura aditiva.

Figura 8 – Célula robotizada de manufatura aditiva



Fonte: Barbosa et al. (2023)

Esse sistema possui um bico de extrusão de 1,75mm e foi testado para impressão de 3 diferentes materiais em formatos de grãos: ABS MG94; PLA4043D; PCL CAPA 6400 (BARBOSA et al., 2023).

Para este trabalho foi utilizado o PLA como matéria prima para confecção da AFO

3.3 Parâmetros de impressão

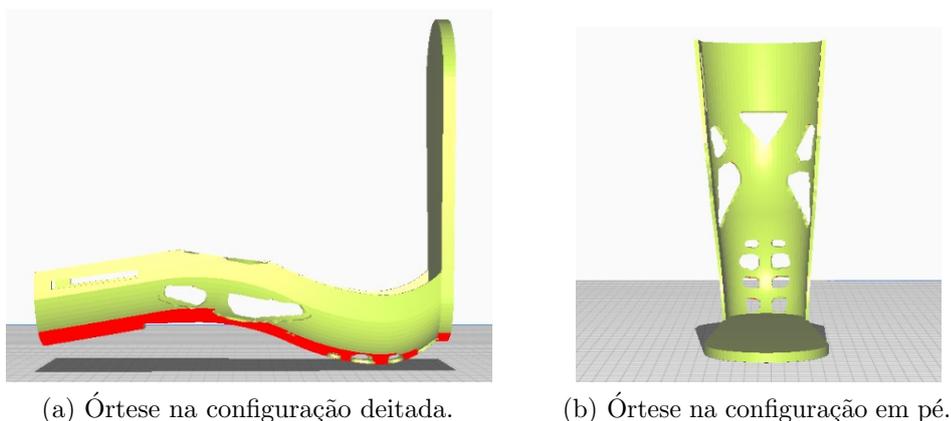
Muitos são os parâmetros que apresentam impacto significativo no tempo de impressão 3D de um objeto. No entanto, para este trabalho, os seguintes parâmetros serão analisados no *software* de fatiamento *Ultimaker Cura*:

- Densidade de preenchimento;
- Altura da camada;
- Largura de extrusão;

- Velocidade de impressão;
- Orientação de impressão.

Os parâmetros disponíveis no *Ultimaker Cura* e não citados no trabalho serão adotados os valores padrões do *software*. Para a orientação de impressão da AFO, 2 maneiras diferentes foram testadas conforme Figura 9.

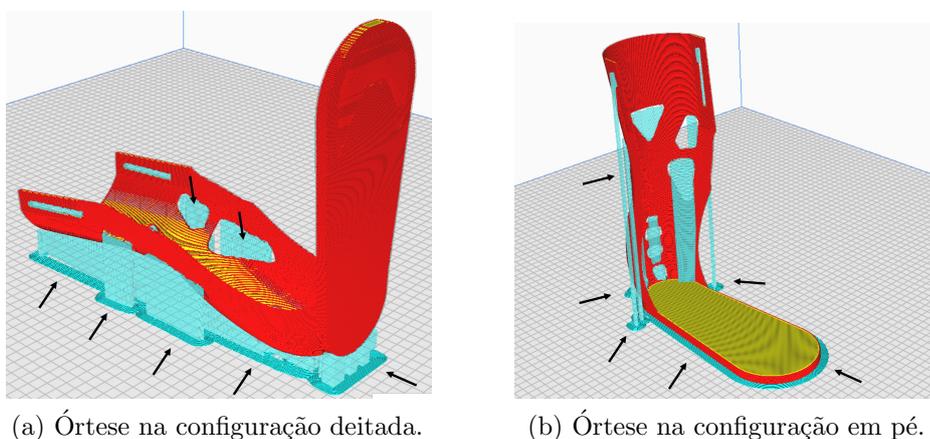
Figura 9 – Orientações de impressão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em ambas as figuras, é possível notar certas regiões do modelo com detalhes vermelhos. O *software* destaca essas regiões em vermelho, pois entende que elas gerarão algum erro durante a impressão por estarem sendo depositado material no ar sem um apoio. Dessa forma, para ambas as orientações foi necessário a implementação de suportes. Na Figura 10, é possível ver os suportes gerados pelo *software* para cada uma das orientações. Os suportes estão representados pela cor azul nas figuras e demarcados com as setas pretas.

Figura 10 – Suportes gerados para as orientações.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os valores dos parâmetros de impressão foram obtidos experimentalmente a partir da variação da velocidade de impressão, dado uma rotação fixa da monorosca extrusora de 30RPM. Para cada velocidade atribuída na impressora, um respectivo valor de altura da camada e largura de extrusão foram obtidos. Na Tabela 2 é possível ver esses valores.

Tabela 2 – Parâmetros de impressão.

Velocidade de impressão [mm/s]	Altura da camada [mm]	Largura de extrusão [mm]
10	1,48	4,62
30	1,29	1,74
50	1,15	1,21

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para este trabalho, foi utilizado como referência os valores dos parâmetros da Tabela 3 juntamente com a variação da densidade de preenchimento que, para cada uma das linhas, foi simulado no *software* os seguintes valores: 10%, 40% e 70% de densidade de preenchimento.

Além disso, esses parâmetros foram testados para as duas configurações de orientação de impressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados e separados de 3 maneiras. A primeira se refere aos resultados obtidos para a orientação de impressão com a órtese deitada e a segunda para a orientação com a órtese em pé. Em um terceiro momento, será discutido o comparativo dos resultados de ambas as orientações.

4.1 Órtese deitada

Dado o valor de 10mm/s da velocidade de impressão, 1,48mm de altura da camada e 4,62mm de largura de extrusão, foi realizado a variação da densidade de preenchimento e os resultados obtidos estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 10mm/s; altura da camada 1,48mm e 4,62mm de largura de extrusão.

Densidade de preenchimento [%]	Tempo de impressão	Massa de PLA [g]	Comprimento de filamento [m]
10	4h45min	871	291,99
40	4h44min	871	291,98
70	4h44min	871	291,97

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Fazendo o mesmo processo para as outras 2 iterações de velocidade de impressão, altura da camada e largura de extrusão, os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 30mm/s; altura da camada 1,29mm e 1,74mm de largura de extrusão.

Densidade de preenchimento [%]	Tempo de impressão	Massa de PLA [g]	Comprimento de filamento [m]
10	3h13min	492	164,91
40	3h26min	530	177,79
70	3h37min	567	190,08

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

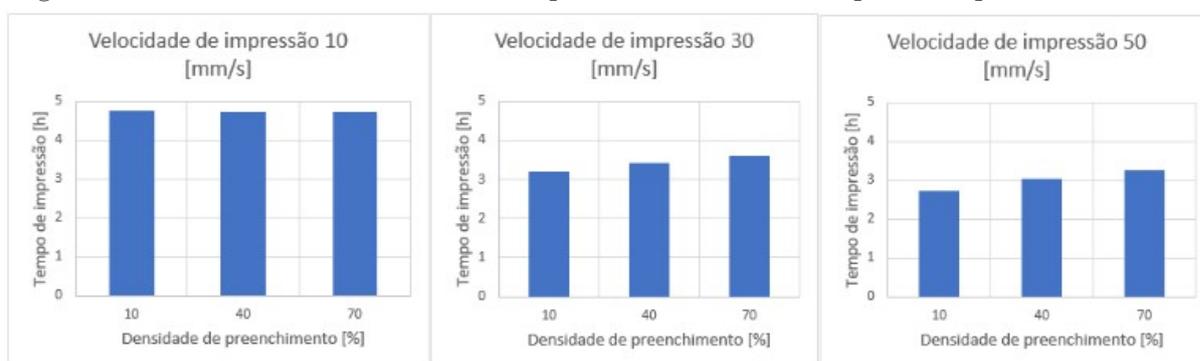
Tabela 5 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 50 mm/s; altura da camada 1,15 mm e 1,21 mm de largura de extrusão.

Densidade de preenchimento [%]	Tempo de impressão	Massa de PLA [g]	Comprimento de filamento [m]
10	2h44min	401	134,43
40	3h02min	444	148,74
70	3h16min	486	162,89

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 11 está representado graficamente a variação do tempo de impressão baseada na variação da densidade de preenchimento para cada uma das combinações de velocidade de impressão.

Figura 11 – Influência da densidade de preenchimento no tempo de impressão em horas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

De acordo com os dados obtidos pelas tabelas e gráficos é possível notar que a influência da densidade de preenchimento no tempo final de impressão da órtese não é significativa. A variação da densidade de preenchimento começa a ter influência visível uma vez que a velocidade de impressão assume valores mais altos e a altura da camada e a largura de extrusão assumem valores mais baixos. Isso se deve, pois, a órtese como um todo é uma peça com a espessura fina, dessa forma, a densidade de preenchimento, que afeta a parte interna da órtese, não faz tanto efeito no tempo de fabricação dado que, no software, o fatiamento da estrutura possui poucas regiões de preenchimento interno.

Em relação a massa de PLA e ao comprimento de filamento consumido tendem a diminuir conforme a redução da densidade de preenchimento, altura da camada e largura de extrusão e com o aumento da velocidade de impressão. Visando a impressão no menor tempo possível e com o menor consumo de matéria prima, a simulação que apresentou o melhor resultado para orientação em questão está representada na Tabela 6.

Tabela 6 – AFO simulada com menor tempo de impressão e menor consumo de material para órtese deitada.

Densidade de preenchimento [%]	Velocidade de impressão [mm/s]	Altura da camada [mm]	Largura de extrusão [mm]	Tempo de impressão	Massa de PL [g]	Comprimento de filamento [m]
10	50	1,15	1,21	2h44min	401	134,43

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2 Órtese em pé

Da mesma forma que a orientação anterior, para este caso os resultados foram expressos em tabelas conforme a combinação de velocidade de impressão, altura da camada e largura de extrusão com a variação da densidade de preenchimento. Na Tabela 7 estão expressos os resultados do fatiamento para a velocidade de impressão 10mm/s, 1,48mm de altura da camada e 4,62mm de largura de extrusão.

Tabela 7 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 10mm/s; altura da camada 1,48mm e 4,62mm de largura de extrusão.

Densidade de preenchimento [%]	Tempo de impressão	Massa de PLA [g]	Comprimento de filamento [m]
10	3h26min	577	193,41
40	3h35min	616	206,52
70	3h43min	653	218,82

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nas Tabelas 8 e 9, estão apresentados os resultados das duas próximas combinações de velocidade de impressão, altura da camada e largura de extrusão com a variação da densidade de preenchimento.

Tabela 8 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 30mm/s; altura da camada 1,29mm e 1,74mm de largura de extrusão.

Densidade de preenchimento [%]	Tempo de impressão	Massa de PLA [g]	Comprimento de filamento [m]
10	2h43min	340	114,13
40	2h53min	386	129,34
70	3h03min	431	144,53

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

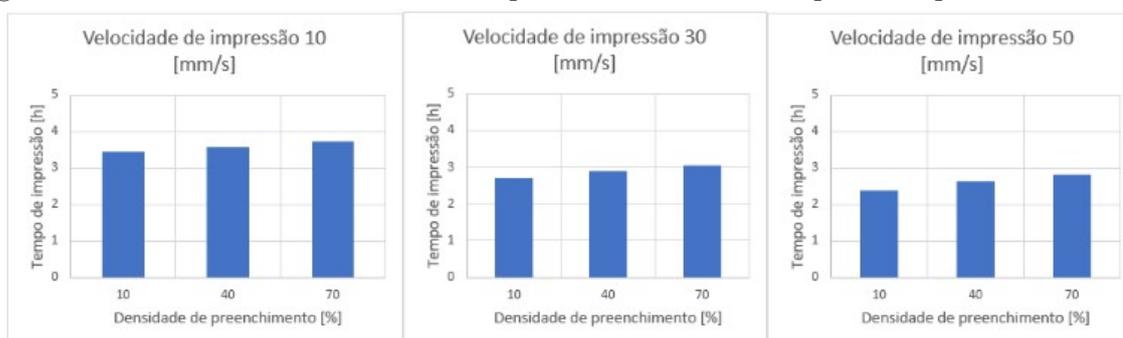
Tabela 9 – Resultados obtidos para velocidade de impressão de 50 mm/s; altura da camada 1,15 mm e 1,21 mm de largura de extrusão.

Densidade de preenchimento [%]	Tempo de impressão	Massa de PLA [g]	Comprimento de filamento [m]
10	2h23min	294	98,60
40	2h37min	345	115,51
70	3h49min	395	132,31

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 12 é possível ver um gráfico da influência da variação da densidade de preenchimento no tempo final de impressão, para cada uma das combinações de velocidade de impressão, altura da camada e largura de extrusão.

Figura 12 – Influência da densidade de preenchimento no tempo de impressão em horas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Graficamente, é possível notar que os valores de tempo de impressão sofrem um aumento não tão significativo conforme o aumento da densidade de preenchimento para as combinações de velocidade de impressão. Outro ponto a ser ressaltado é que conforme a densidade de preenchimento aumenta mais material é consumido. Para velocidades de impressão menores, em que, a altura da camada e largura de extrusão assumem valores maiores, a densidade de preenchimento causou impacto significativo no consumo de PLA e no tempo final de impressão. Baseado nos resultados apresentados, visando a manufatura aditiva no menor tempo de impressão e com menor consumo de matéria prima, a combinação que melhor satisfaz essas condições estão expressas na Tabela 10.

Tabela 10 – AFO simulada com menor tempo de impressão e menor consumo de material para órtese em pé.

Densidade de preenchimento [%]	Velocidade de impressão [mm/s]	Altura da camada [mm]	Largura de extrusão [mm]	Tempo de impressão	Massa de PL [g]	Comprimento de filamento [m]
10	50	1,15	1,21	2h23min	294	98,60

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.3 Comparativo entre as orientações

De forma geral, as duas orientações tiveram um comportamento parecido com relação aos resultados apresentados. No entanto, algumas diferenças podem ser notadas e serão discutidas nesta seção.

Em primeiro lugar, é possível dizer que a densidade de preenchimento não foi um parâmetro que apresentou grande impacto, tanto no tempo, quanto na massa de PLA consumida. Esse fato pode ser explicado devido a AFO escolhida ser uma estrutura com pouca espessura, logo o preenchimento interno no fatiamento não se tornou um fator fundamental na impressão do objeto.

Em relação ao tempo de impressão e consumo de matéria prima, a órtese deitada apresentou valores maiores que a órtese em pé. Isso se deve, principalmente, devido aos suportes gerados para cada uma das condições. Isso pode ser provado, uma vez que, simulado as duas orientações, com os mesmos parâmetros, porém, sem a implementação de suportes, o tempo final de impressão e o consumo de PLA são, praticamente, os mesmos. Na Tabela 11, é possível ver o comparativo do tempo de impressão e massa de PLA consumida entre as duas orientações, em uma mesma condição de parâmetros, porém, simulando o fatiamento sem suportes.

Tabela 11 – Comparativo entre as duas orientações sem o uso de suportes.

Orientação	Tempo de impressão	Massa de PLA [g]	Comprimento de filamento [m]
Deitada	1h49min	232	77,95
Em pé	1h49min	223	74,62

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para ambos os casos, o fator principal que contribuiu para a redução do tempo foi a velocidade de impressão. Dessa forma, a configuração que apresentou os menores valores de tempo de impressão e consumo de PLA foram as que tiveram a maior velocidade.

Como resultado, visando a manufatura aditiva da AFO em um tempo reduzido com menor gasto de matéria prima a configuração que apresentou o melhor resultado está descrita na Tabela 12.

Tabela 12 – Características da simulação da AFO em pé que apresentou melhores resultados

Densidade de preenchimento [%]	Velocidade de impressão [mm/s]	Altura da camada [mm]	Largura de extrusão [mm]	Tempo de impressão	Massa de PLA [g]	Comprimento de filamento [m]
10	50	1,15	1,21	2h23min	294	98,60

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5 CONCLUSÃO

É possível dizer que, com base nos resultados apresentados, os objetivos propostos neste trabalho foram, em certa parte, concluídos. O objetivo principal de redução de tempo e massa de uma AFO após otimização topológica foi cumprido, no entanto, é necessário a impressão de um protótipo e aplicação em usuário para validação de sua função primária. Das dificuldades encontradas, é possível dizer que não há muitos estudos na área de manufatura aditiva de órteses, principalmente, no que tange a parametrização no software de fatiamento. A influência clara do efeito de cada um dos parâmetros disponíveis no software é algo que ainda precisa ser explorado.

Para os parâmetros estudados na bibliografia e com base nos resultados, é possível dizer que foi compreendido a influência deles no processo de manufatura aditiva. A orientação de impressão é um fator determinante na confecção de um objeto. A partir dela, é que será definido o uso ou não de suportes para criação da estrutura. Com visto nos resultados, a implementação de suportes faz com seja necessário um acréscimo na quantidade de material depositado, ocasionando um aumento no tempo de impressão do objeto.

Em relação a velocidade de impressão, foi possível concluir, que para o modelo AFO proposto, esse parâmetro foi o que se mostrou mais significativo na redução do tempo de impressão. Isso é possível dizer, a partir da literatura estudada e do conceito de altura da camada e largura de extrusão. Embora esses três parâmetros estejam associados diretamente, maiores valores de altura da camada e da largura de extrusão, significam que, maiores quantidades de material estão sendo depositadas de uma única vez conforme o bico extrusor passa pelo objeto. Ou seja, para o estudo proposto, mesmo com a redução da altura da camada e da largura de extrusão, o aumento da velocidade foi suficiente para reduzir o tempo de impressão, tornando-o, o parâmetro de maior influência no tempo final de impressão da AFO.

De modo a ampliar os conhecimentos aplicados neste trabalho e viabilizar a confecção da AFO via manufatura aditiva, são propostos os seguintes caminhos para trabalhos futuros:

- Aplicar o uso adicional de outros parâmetros disponíveis no software e analisar suas influências, tais como: temperatura de extrusão e manipulação da confecção dos suportes;
- Realizar estudos e ensaios mecânicos em um protótipo do modelo AFO impresso;
- Validar a impressão do modelo nos parâmetros propostos em um usuário.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR-DUQUE, J. I. et al. Additive manufacturing: fused deposition modeling advances. **Best practices in manufacturing processes: experiences from Latin America**, Springer, p. 347–366, 2019.
- BARBOSA, G. et al. Sistema de manufatura aditiva de material polimérico robotizada e peças assim obtidas. **INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial**, INPI, 2023.
- BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. Material interpolation schemes in topology optimization. **Archive of applied mechanics**, Springer, v. 69, p. 635–654, 1999.
- BUONAMICI, F. et al. A practical methodology for computer-aided design of custom 3d printable casts for wrist fractures. **The Visual Computer**, Springer, v. 36, p. 375–390, 2020.
- CALIGNANO, F. et al. Overview on additive manufacturing technologies. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 105, n. 4, p. 593–612, 2017.
- CHA, Y. H. et al. Ankle-foot orthosis made by 3d printing technique and automated design software. **Applied bionics and biomechanics**, Hindawi, v. 2017, 2017.
- DAMINABO, S. C. et al. Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3d printing): techniques for polymer material systems. **Materials today chemistry**, Elsevier, v. 16, p. 100248, 2020.
- DEY, A.; YODO, N. A systematic survey of fdm process parameter optimization and their influence on part characteristics. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, MDPI, v. 3, n. 3, p. 64, 2019.
- DILBEROGLU, U. M. et al. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. **Procedia manufacturing**, Elsevier, v. 11, p. 545–554, 2017.
- DOMBROSKI, C. E.; BALSDON, M. E.; FROATS, A. The use of a low cost 3d scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: a preliminary study. **BMC research notes**, BioMed Central, v. 7, n. 1, p. 1–4, 2014.
- DYZEDESIGN. **DyzeDesign**. 2023. Disponível em: <<https://dyzedesign.com/2018/07/3d-print-speed-calculation-find-optimal-speed/>>. Acesso em: 12 de out de 2023.
- FERNANDES, B. O.; FOGGIATTO, J. A.; POIER, P. H. Uso da impressão 3d na fabricação de Órteses—um estudo de caso. In: **Fourth International Conference on Integration of Design, Engineering and Management for innovation (IDEMI 2015)**. Florianópolis, SC, Brazil, October. [S.l.: s.n.], 2015. p. 07–10.
- FURTADO, N. M. Otimização topológica para obtenção de nova geometria de órtese suro podálica. Universidade Federal de São Carlos, 2022.
- GIBSON, I. et al. **Additive manufacturing technologies**. [S.l.]: Springer, 2021. v. 17.
- JIN, Y.-a. et al. Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses—a review. **Procedia Cirp**, Elsevier, v. 36, p. 199–204, 2015.

- MASO, A. D.; COSMI, F. 3d-printed ankle-foot orthosis: a design method. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 12, p. 252–261, 2019.
- PALLARI, J. et al. Design and additive fabrication of foot and ankle-foot orthoses. In: UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN. **2010 International Solid Freeform Fabrication Symposium**. [S.l.], 2010.
- PENG, A.; XIAO, X.; YUE, R. Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 73, p. 87–100, 2014.
- ROZVANY, G. I. A critical review of established methods of structural topology optimization. **Structural and multidisciplinary optimization**, Springer, v. 37, p. 217–237, 2009.
- SAMMAIAH, P. et al. The influence of process parameters on the surface roughness of the 3d printed part in fdm process. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2020. v. 981, n. 4, p. 042021.
- SIGMUND, O.; MAUTE, K. Topology optimization approaches: A comparative review. **Structural and multidisciplinary optimization**, Springer, v. 48, n. 6, p. 1031–1055, 2013.
- SOLOMON, I. J.; SEVVEL, P.; GUNASEKARAN, J. A review on the various processing parameters in fdm. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 37, p. 509–514, 2021.
- SRIVASTAVA, M. et al. Multi-objective optimisation of fused deposition modelling process parameters using rsm and fuzzy logic for build time and support material. **International Journal of Rapid Manufacturing**, Inderscience Publishers (IEL), v. 7, n. 1, p. 25–42, 2018.
- VAYRE, B.; VIGNAT, F.; VILLENEUVE, F. Designing for additive manufacturing. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 3, p. 632–637, 2012.
- WASSERFALL, F.; HENDRICH, N.; ZHANG, J. Adaptive slicing for the fdm process revisited. In: IEEE. **2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**. [S.l.], 2017. p. 49–54.