

# CAPA PROTÉTICA: projeto e manufatura aditiva via fabricação por filamento fundido

*PROSTHETIC COVER: design and additive manufacturing via fused filament fabrication*

PISTORELLO, Roberto Angelo; Mestre; Instituto Federal de Santa Catarina

roberto.pistorello@ifsc.edu.br

SABINO NETTO, Aurélio da Costa; Doutor; Instituto Federal de Santa Catarina

asabino@ifsc.edu.br

SOUSA, André Roberto de; Doutor; Instituto Federal de Santa Catarina

asousa@ifsc.edu.br

PAULI, João Antônio; Graduado; Instituto Federal de Santa Catarina

joaoantoniopauli@hotmail.com

SILVEIRA, Alesson da; Graduado; Instituto Federal de Santa Catarina

alessonffc@hotmail.com

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma capa para próteses de membros inferiores, com utilizando tecnologias digitais como digitalização tridimensional e Manufatura Aditiva. Inicialmente foi realizado o escaneamento do membro inferior e a partir da superfície obtida realizou-se o projeto da capa. Seus componentes foram impressos e testados. A pesquisa mostrou que os preços das capas comercialmente disponíveis podem ser proibitivos e este projeto pode ser uma alternativa de menor custo, disponibilizando-se o projeto online para o usuário fabricar conforme suas especificações, futuramente. Entretanto, ainda é necessário investigar a redução da massa do produto assim como alternativas para fixação da capa na prótese.

**Palavras Chave:** capa para prótese; digitalização tridimensional; manufatura aditiva.

## Abstract

*This work presents the development of a cover for lower limb prostheses using digital technologies such as three-dimensional scanning and Additive Manufacturing. Initially, the lower limb was scanned, and based on the obtained surface, the cover was designed. The components were then printed and tested. The research indicated that the prices of commercially available covers can be prohibitive, and this project offers a lower-cost alternative by making the design available online for users to fabricate according to their specifications in the future. However, further investigation is still necessary to reduce the product's mass and explore alternatives for fastening the cover to the prosthesis.*

**Keywords:** *prosthesis cover; three-dimensional scanning; additive manufacturing.*

## 1 Introdução

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como Impressão 3D, tem o potencial de produzir objetos sólidos por meio de arquivos digitais, que podem ser obtidos de diferentes formas, entre elas a modelagem CAD (“Computer Aided Design”) 3D e equipamentos de obtenção de formas, conhecida como digitalização tridimensional.

As tecnologias de MA têm se destacado como essenciais para reduzir o tempo de desenvolvimento de produtos por meio da fabricação mais ágil de protótipos. Possibilita a fabricação de geometrias complexas, sem desperdício de material e produção de peças personalizadas, sob demanda. Além disso, com o avanço nas tecnologias dos processos envolvidos, as peças fabricadas têm resultado em produtos com melhores propriedades mecânicas sendo utilizadas, em muitos casos, na fabricação de produtos para utilização final do usuário (VOLPATO et al, 2017).

Com a evolução dos processos, outros atributos vêm sendo otimizados. De acordo com Campbell, Bourell e Gibson (2012) a MA pode ser utilizada como um grande diferencial no projeto de produtos, por meio do aprimoramento da estética, adicionando ao produto elementos que aumentarão seu valor percebido pelo consumidor.

A estética pode ser entendida como harmonia de formas e/ou cores, resultante da percepção sensorial (BACK et al, 2008), e é amplamente influenciada pelos materiais e processos de fabricação utilizados (ASHBY e JOHNSON, 2011). Esta percepção é especialmente importante quando um produto possui atributos técnicos e funcionais semelhantes. Neste caso, a estética torna-se um diferencial, pois leva o consumidor a escolher o produto mais atrativo visualmente (BACK et al, 2008; ASHBY e JOHNSON, 2011). Isto acontece devido ao sentido sensorial da visão ser o predominante entre os demais e, portanto, a atratividade de um produto em um primeiro momento depende basicamente de seu aspecto visual (BAXTER, 1998).

Assim, buscou-se aplicar as tecnologias de MA em um projeto de caráter inclusivo. As capas para próteses de membros inferiores são produtos relativamente novos em um mercado ainda em expansão. Esses produtos podem fornecer proteção adicional às próteses, além de possuir um significativo potencial estético. Devido à capacidade da manufatura aditiva de criar formas complexas, essas capas podem ser instrumentos capazes de restaurar a geometria, o volume e a simetria do membro amputado, contribuindo para a melhoria da autoestima desses pacientes.

Portanto, este trabalho objetiva apresentar o desenvolvimento para obtenção de uma capa para próteses de membros inferiores, utilizando tecnologias digitais como digitalização tridimensional e manufatura aditiva. Em um primeiro momento, este artigo apresenta uma revisão da literatura e introduz o leitor ao conceito de capas para próteses por meio de um breve estado da arte. Após, são apresentados o método e na sequência, os resultados obtidos, e as considerações finais e indicações de trabalhos futuros.

As capas para próteses têm o potencial de melhorar a autoestima do indivíduo amputado, por meio da devolução da simetria e geometria próxima à do mesmo amputado. Pode também fornecer uma proteção adicional à prótese, que são personalizadas e possuem custos elevados. Assim, esta pesquisa se torna relevante tanto do ponto de vista social quanto de usabilidade, podendo trazer benefícios ao público amputado, tanto no sentido estético quanto em autoestima.

## 2 Revisão da literatura

### 2.1 Amputação e próteses para membros inferiores

Atualmente existe uma razoável quantidade de fabricantes de próteses disponíveis no mercado e internacional. São produtos cujos componentes são padronizados, mas o conjunto é realizado sob medida, de acordo com as características de cada paciente e o tipo de amputação.

Uma das duas principais categorias de amputação é a “amputação traumática”. No sentido amplo do termo, todas as amputações são traumáticas, contudo, a categoria amputação traumática é relacionada a forma de como ocorreu o acidente, ou seja, inesperado, que causou a perda dos membros da pessoa. Por outro lado, a “amputação cirúrgica” que ocorre a muito tempo na medicina, é uma tarefa executada por cirurgiões e com o avanço da medicina, assim como o passar dos anos, tem diminuído. Trata-se da amputação decorrente de complicações nos vasos sanguíneos e ocorre quando o sangue para o membro é perdido e causa um sintoma chamado de necrose, decorrente da morte prematura das células do tecido vivo (SERIOUS INJURY LAW, 2021).

Independentemente do tipo de amputação, estas são classificadas de acordo com diferentes níveis. As amputações podem ser categorizadas em dois grupos principais: amputações de membros superiores e amputações de membros inferiores (Figura 1). Essa segmentação é essencial para determinar os procedimentos médicos e as adaptações protéticas mais adequadas, garantindo uma abordagem personalizada para cada paciente.

Figura 1 - Esquema que aponta os níveis de amputação.



Fonte: adaptado de Amputei, e Agora? (2024).

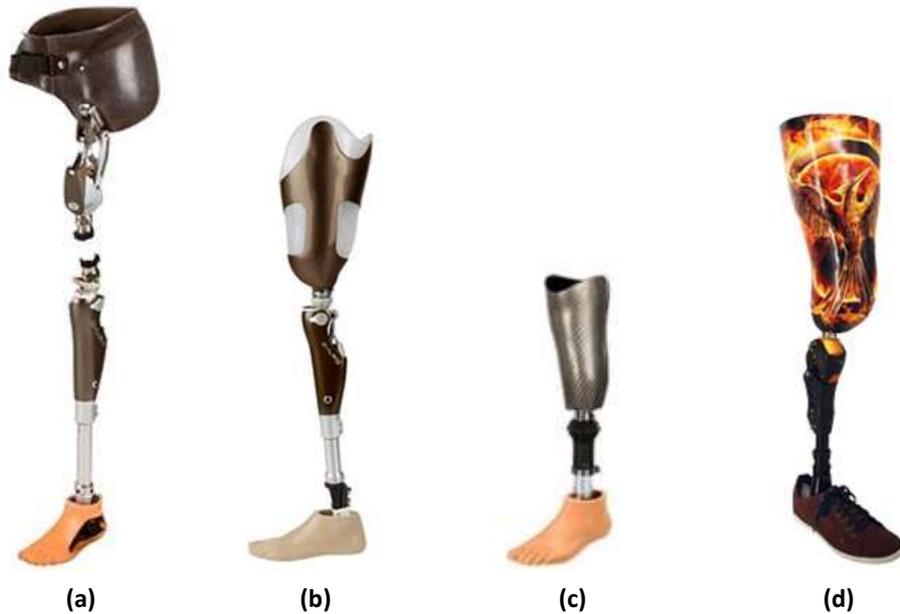
Dependendo do nível e local da amputação são utilizadas diferentes próteses para auxiliar na retomada das rotinas diárias. Os tipos de próteses existentes para membro inferior, excetuando-se quadril e pés, são as próteses para desarticulação do quadril (Figura 2a), prótese transfemoral (Figura 2b), prótese transtibial (Figura 2c) e prótese para desarticulação do joelho (Figura 2d).

A prótese para desarticulação do quadril é utilizada para o caso de uma amputação onde é necessário remover toda a perna e o encaixe é realizado por cesto pélvico. No caso de uma amputação acima do joelho, entre a articulação do joelho e a articulação do quadril, utiliza-se a prótese transfemoral e possui três classificações: proximal, medial ou distal. Uma prótese transtibial é indicada para amputações que ocorrem entre a articulação do tornozelo e a articulação do joelho, o encaixe pode ser do tipo pressão em silicone ou poliuretano. Por fim, a prótese para

desarticulação de joelho é indicada para amputação onde o paciente não possui a parte da articulação do joelho para baixo, sendo que a patela pode ser preservada ou não (ORTOLIFE, 2022).

As próteses apresentadas na Figura 2 são todas confeccionadas sob medida, em materiais como fibra de carbono, resina acrílica, silicone ou poliuretano para os encaixes, e componentes dos mecanismos de articulação em aço, titânio ou alumínio (ORTOLIFE, 2022).

Figura 2 - Prótese destinadas a membros inferiores: a) prótese para desarticulação de quadril; b) prótese transfemoral; c) prótese transtibial; d) prótese para desarticulação do joelho.



Fonte: Ortolife (2022).

### 2.1.1 Soluções estéticas para próteses de membros inferiores

Além do seu apelo mercadológico, a harmonia e atratividade proporcionada pela estética de um produto tem um papel importante na significação entre um produto e utilizador, fazendo com que este crie laços afetivos com ele. No caso de amputações, este fato pode ser ainda mais relevante, pois uma prótese vem a “substituir” um membro perdido e, desta forma, pode contribuir com a autoestima do usuário. Nestes casos, perde-se a naturalidade estética e a geometria original do membro afetado, assim como a simetria com o membro natural (Figura 3).

Figura 3 - Diferenças estéticas entre a prótese transfemoral e o membro natural, em termos de cor, forma, volume e simetria.



Fonte: ADPOSTURAL (2016).

As próteses normalmente não possuem adereços, sendo esteticamente definidas pelas características dos materiais que as compõem, como a fibra de carbono, o aço, o alumínio e o titânio, como apresentado na Figura 3. Em alguns casos são realizadas pinturas especiais na parte do cesto (parte superior da prótese onde se encaixa o membro) como o exemplo da Figura 2d.

Por outro lado, existem empresas especializadas em contribuir com a componente estética e proteção de próteses de membros inferiores. Uma das empresas pioneiras nesta área foi a *Bespoke Innovations*, realizando o projeto personalizado e a fabricação destes produtos por meio de diferentes tecnologias de impressão 3D (Figura 4).

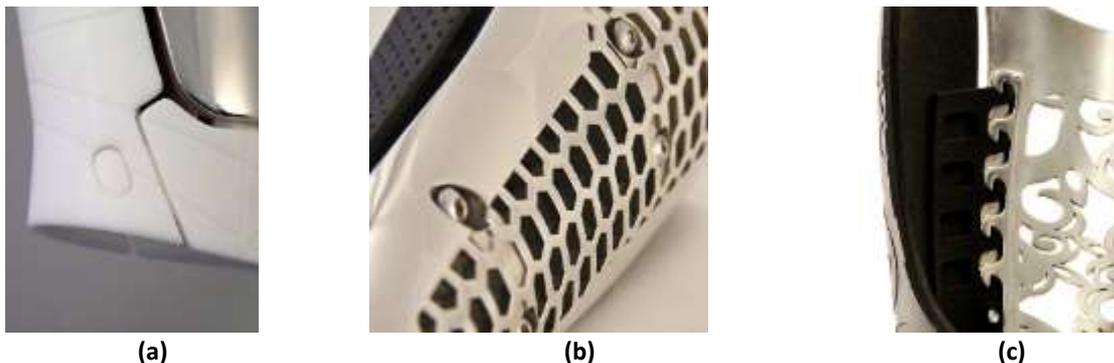
Figura 4 - Capa protética desenvolvida pela Bespoke Innovations.



Fonte: PEGN (2014).

A *Bespoke Innovation* utilizava tecnologias de impressão 3D para a fabricação de componentes em polímeros e metais, empregando processos de sinterização. Em seus projetos, a empresa desenvolveu inúmeras formas e projetos diferenciados, além de otimizar os sistemas de encaixe (Figura 5).

Figura 5 - Sistemas de união por: a) engate rápido polímero-polímero; b) com parafusos; c) por gravidade.



Fonte: BESPOKE INNOVATIONS (2021).

Um grupo que destaca atualmente é a *Alleles™*, com foco em capa para próteses transfemorais e próteses transtibiais. Os produtos são fabricados em polímero ABS (Acrilonitrila-Butadieno-Estireno) e, que inicialmente em forma de chapas, são posteriormente decorados e moldados por temperatura. A empresa possui um extenso catálogo de padrões e cores, cujos produtos têm um preço inicial de aproximadamente R\$ 2.300,00<sup>1</sup> (ALLELES, 2024). Existem modelos inclusive com detalhes em ouro 14 quilates e prata, conforme exemplos da Figura 6.

<sup>1</sup> Preço de \$600 dólares canadenses na cotação atual (07/06/2024).

Figura 6 – Capas protéticas da empresa Alleles no material ABS, sendo as duas primeiras da esquerda com detalhes em ouro 14 quilates.



Fonte: ALLELES (2024).

Está disponível em seu portfólio uma gama de produtos metálicos (Figura 7), que podem receber acabamentos diversos em sua superfície, como diferentes metais ou recobrimentos, resultando em 32 tonalidades diferentes, entre eles, prata, outro 14 K, ouro rosê, cobre, entre outros. A empresa fabrica uma quantidade limitada de peças que variam entre R\$ 3.600,00 e R\$ 4.600,00<sup>2</sup> (ALLELES, 2024).

Figura 7 - Capas protéticas da empresa Alleles em material metálico.

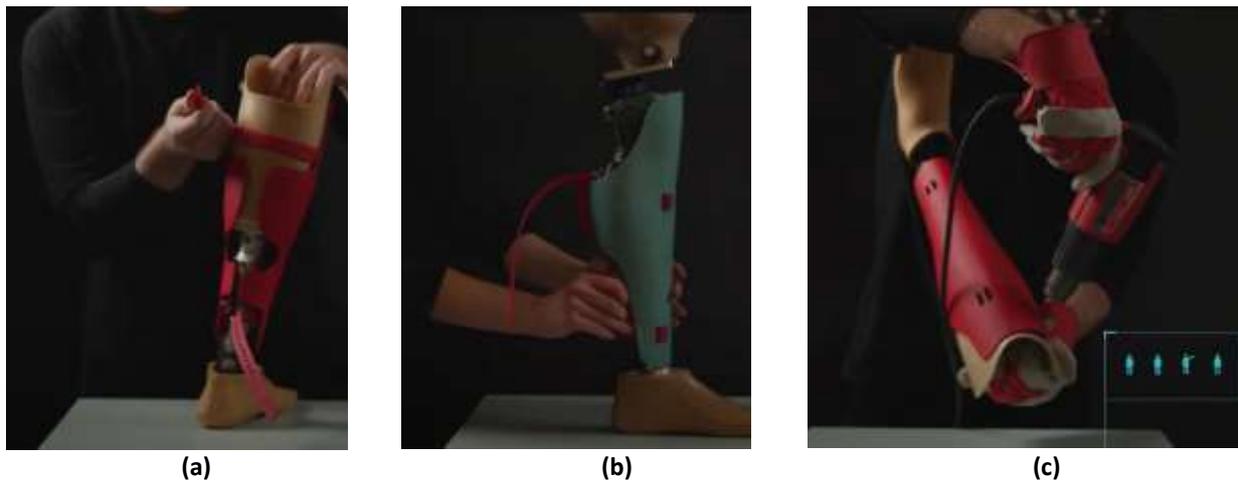


Fonte: ALLELES (2024).

As capas são fixadas às próteses com o auxílio de duas tiras de poliuretano que possuem ganchos de metal (Figura 8a e b). Para melhor ajuste da capa na prótese, é possível realizar pequenas modificações na geometria, aquecendo o material e moldando uma parte do produto (Figura 8c) (ALLELES, 2024).

<sup>2</sup> Preço de \$950.00 – \$1,200.00, respectivamente, em dólares canadenses, na cotação atual (07/06/2024).

Figura 8 – Sistema das capas protéticas da empresa Alleles: a) e b) ajuste; c).



Fonte: ALLELES (2024).

Outra empresa que está no mercado de capas protéticas é a Unyq e apresenta em seu portfólio dois produtos diferentes. O produto “CustomFit” (Figura 9a) é uma coleção exclusiva de capas personalizadas e projetadas para a anatomia única de pessoa e sua prótese. Já o produto “QuickFit” (Figura 9b) é uma capa semipersonalizada, disponível apenas para amputados acima do joelho e para uma lista de joelhos específicos (UNYQ, 2024).

Figura 9 – Capas protéticas da empresa Unyq: a) modelo CustomFit; b) modelo QuickFit.



Fonte: UNYQ (2024).

Os produtos da Unyq são fabricados com tecnologias de impressão 3D e os modelos estão disponíveis para a maior parte das próteses de membros inferiores, não sendo necessárias fotos ou outras tecnologias para obtenção da forma, apenas as dimensões da prótese para se ajustar a um indivíduo específico (UNYQ, 2024). A Figura 10 exemplifica a utilização das capas Unyq em próteses de membros inferiores.

Figura 10 – Exemplos de utilização das capas protéticas Unyq.



Fonte: UNYQ (2024).

No modelo “QuickFit” a parte frontal da capa é presa à prótese por meio de uma abraçadeira e parafusos, para assegurar a fixação. Adicionalmente são utilizados ímãs de neodímio para fixar a parte traseira na parte frontal (Figura 11). No modelo CustomFit há duas opções: a abraçadeira com parafusos ou uma abraçadeira de pressão, com ímãs (UNYQ, 2024).

Figura 11 – Fixação por ímã da parte traseira da capa Unyq.



Fonte: UNYQ (2024).

A capa protética “Confetti” é um produto desenvolvido pela empresa Brasileira Idethnos™, produzida em material polimérico de espuma e fabricada em larga escala. Assim, de acordo com a empresa, devido a produção em massa, foi possível atingir um valor mais baixo para a comercialização do produto (IDETHNOS, 2021). Esta capa para próteses possui quatro modelos disponíveis, conforme Figura 12. O encaixe entre as partes da capa é realizado por meio de ímãs.

Figura 12 – Capas protéticas da IdEthnos: a) modelo Confetti; b) modelo Confetti II Canvas; c) modelo Confetti TT.



(a)



(b)



(c)

Fonte: IDETHNOS (2021).

Outro projeto em desenvolvimento da IdEthnos, é o “LEGS TO FLY”, que buscou ídolos do esporte como Marta Vieira e Gabriel Medina para que estes tivessem suas pernas digitalizadas e, a partir da superfície resultante, dois modelos de próteses foram criados (Figura 13). As ranhuras na parte inferior do produto indicam os locais onde as peças podem ser aparadas, assegurando um melhor ajuste a diferentes próteses. Isso é viabilizado pelo fato do material ser uma espuma. Entretanto, o diâmetro permanece o mesmo, independente da altura do paciente.

Figura 13 – Capas Legs to Fly: a) modelo Marta Vieira; b) modelo Gabriel Medina.



Fonte: LEGS TO FLY (2024).

Produtos como capas para as próteses são artifícios capazes de proporcionar novamente a forma, o volume e a simetria perdidos pela amputação. E, além de proporcionar maior proteção para a prótese (que é um produto de alto custo), é possível personalizar esteticamente a prótese, com grafismos, texturas, cores e materiais que façam parte da personalidade e estilo de vida daquele consumidor, ou seja, são personalizáveis.

Assim, capas para próteses podem ser descritas como produtos vestíveis, altamente personalizáveis, assim como os produtos de moda, pois fazem parte da composição estética do indivíduo. Neste sentido, as tecnologias digitais, como a MA e a digitalização tridimensional, podem contribuir no desenvolvimento de novos conceitos de produtos estéticos para este público.

## 2.2 Manufatura aditiva

A Prototipagem Rápida na engenharia e design foi amplamente utilizada com a finalidade de avaliar o projeto do produto antes do seu lançamento ou comercialização (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010), por meio da fabricação de protótipos, de forma rápida (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012; CAMPBELL et al, 2003).

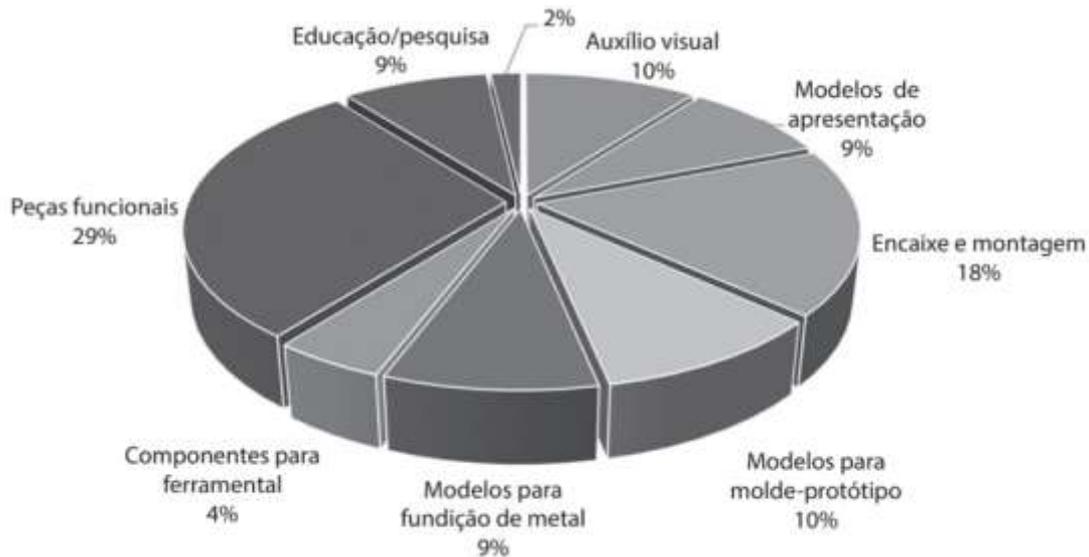
A evolução das tecnologias de Prototipagem Rápida, como aumento da velocidade de construção, da precisão e das propriedades dos materiais, possibilitou a fabricação de peças com características muito próximas às de um produto final, abrindo novas possibilidades de aplicações em relação aos processos de fabricação tradicionais (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012). Assim, o termo “prototipagem” deixou de ser aplicado nestes casos e foi substituído por Manufatura Aditiva para indicar a forma como este produto é fabricado (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010; CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012).

A MA, portanto, é atualmente o termo utilizado para definir as tecnologias de união de

materiais para criar objetos físicos. Ao contrário dos métodos tradicionais de manufatura subtrativos e formativos (moldagem), na MA diferentes processos são utilizados para unir materiais, camada sobre camada, para fabricar componentes a partir de um modelo 3D (ASTM, 2021). Com a utilização destas tecnologias, é viável produzir componentes de maneira automatizada, empregando diversos materiais e princípios físicos (VOLPATO et al, 2017).

A aplicação destas tecnologias, que inicialmente começou a ser utilizada na engenharia, evoluiu para diferentes áreas da sociedade, conforme é apresentado na Figura 14. Atualmente 29% das aplicações já são destinadas à fabricação de peças funcionais (VOLPATO et al, 2017).

Figura 14 - Áreas de aplicação da Manufatura Aditiva.



Fonte: Volpato et al (2017, p.28).

De maneira geral, caso o produto possua geometrias complexas, personalizadas, baixo volume de produção, ou necessite de uma combinação especial de características ou propriedades, então ele é um possível candidato a ser fabricado por MA. Por outro lado, se um produto pode ser fabricado por um processo convencional, então provavelmente a MA não será a melhor opção (ROSEN, 2014).

A MA está sendo amplamente adotada com o objetivo de aprimorar a qualidade dos produtos, acelerar os processos de fabricação e otimizar as operações. Setores como o espacial, médico, automobilístico e industrial estão entre os que têm adotado essa tecnologia de forma mais intensa (SILVA et al, 2023). Na área da saúde, por exemplo, em alguns casos há a necessidade de projetar produtos de acordo com as características individuais dos pacientes. Em outras áreas, é possível a redução da matéria-prima virgem utilizada e do consumo de energia, fornecimento de produtos sob pedido e de forma rápida, com menos recursos (há redução dos custos de preparação de máquina) (HUANG et al, 2013).

O setor aeroespacial frequentemente requer componentes com geometrias complexas (Figura 15a) e materiais de alto desempenho, que são difíceis de fabricar, possuem alto custo e demandam tempo para a manufatura. Além disso, os lotes de produção são pequenos (GUO e LEU, 2013), fatores que contribuem para a utilização da MA nestes casos.

Na indústria automotiva a MA está sendo aplicada na fabricação de pequenas quantidades de peças funcionais e estruturais, especialmente para carros de luxo e carros de corrida, que exigem

baixos volumes de produção (Figura 15b) (GUO e LEU, 2013).

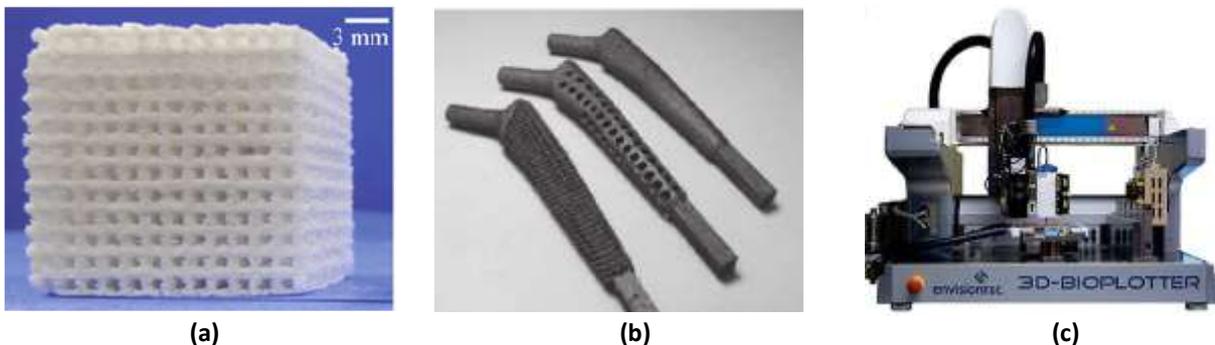
Figura 15 – (a) lâminas de turbinas fabricadas por SLM (Selective Laser Melting); (b) sistema automotivo de veículo de corrida da fórmula SAE fabricado em FDM (Fused Deposition Modeling) e recoberto com compósito.



Fonte: Guo e Leu (2013).

A MA adentrou também na área biomédica auxiliando na produção de “scaffolds” para crescimento de tecidos ou cultura de células (Figura 16a), dispositivos médicos e de implantes ortopédicos (Figura 16b), de engenharia de tecidos e órgãos artificiais por meio de “bioimpressoras” (Figura 16c).

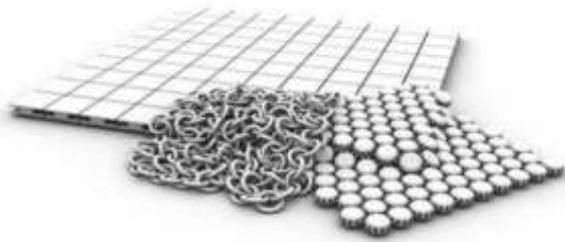
Figura 16 – (a) “scaffold” para ossos fabricados por SLS; (b) implante para quadril fabricado em EBM; (c) bioimpressora de tecidos.



Fonte: a) e b) Guo e Leu (2013); c) Dababneh e Ozbolat (2014).

Na área de acessórios de uso pessoal, existem também estudos realizados para a criação de materiais têxteis. Bingham e Hague (2013) iniciou estudos na fabricação de produtos têxteis por meio da MA (Figura 17a), enquanto Johnson, Bingham e Wimpenny (2013) desenvolveram um colete resistente à perfuração por material cortante, fabricado com a tecnologia de Sinterização a Laser (Figura 17b).

Figura 17 – (a) têxteis fabricados por Manufatura Aditiva; e (b) amostra de coleite de segurança para teste de penetração.



(a)



(b)

Fonte: a) Bingham e Hague (2013); b) e Johnson, Bingham e Wimpenny (2013)

Um dos motivos porque as tecnologias de MA vêm ganhando espaço são restrições de manufatura e custos. Isto porque a MA possui recursos únicos como a possibilidade de construir formas diferentes e complexas, com otimização da funcionalidade do componente e a utilização de diferentes materiais e características próprias (como baixa densidade e flexibilidade). Estes recursos possibilitam que formas que eram impensáveis nos processos de fabricação convencionais, agora são possíveis (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012).

Entretanto, principalmente devido ao custo e ao tempo de fabricação, a MA é viável apenas em pequenos e médios lotes de produção (GUO e LEU, 2013; HUANG et al, 2013) e nos casos onde: é necessária a adaptação do produto ao usuário, personalizando o produto; para a melhoria da funcionalidade do produto por meio da adoção de formas complexas, externa e internamente; para a consolidação de peças, reduzindo a quantidade total de peças pela produção de um número menor de peças mais complexas (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012).

A evolução das tecnologias de MA possibilitou a fabricação de peças funcionais com formas complexas, cujas características podem trazer benefícios significativos para produtos personalizados, como, por exemplo, acessórios pessoais que podem ser adaptados aos usuários (VOLPATO et al, 2017). Neste sentido, a Manufatura Direta (“Direct Manufacturing”) de produtos funcionais destinados ao consumidor final é uma das principais tendências atuais do uso da MA (GUO e LEU, 2013; CAMPBELL, BOURELL e GIBSON, 2012).

### 2.2.1 *Fabricação por filamento fundido*

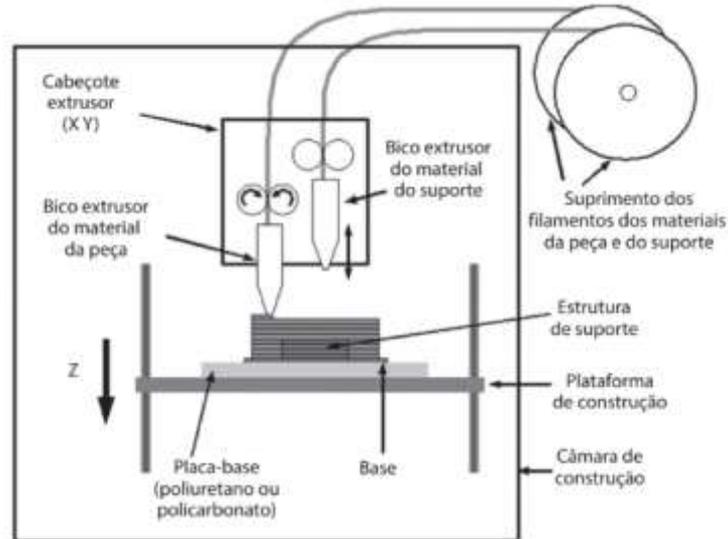
Um dos processos de Manufatura Aditiva mais difundidos atualmente é a Extrusão de Material (“Material Extrusion” - MEX). É um processo que consiste em depositar material, seletivamente, por meio de um bico ou orifício (ASTM, 2021).

Na extrusão de material podem ser utilizados diversos materiais, Segundo Volpato et al (2017, p.46), desde que este “[...] possa ser levado ao estado pastoso e depois endurecido [...]” e que este material “[...] se solidifique e adira rapidamente ao material sobre a plataforma de construção, e também aos filamentos previamente depositados”.

Um dos materiais mais utilizados na extrusão de material são polímeros termoplásticos e a tecnologia pioneira é conhecida como Modelagem por Fusão e Deposição (“Fused Deposition Modeling” – FDM) (VOLPATO et al, 2017; RELVAS, 2018). Silva et al (2023) explicam que “O processo FDM utiliza um filamento de material que alimenta uma cabeça de extrusão. O material é aquecido

no interior da cabeça de extrusão e é expelido através de um bico de extrusão que o deposita em locais pré-determinados formando uma camada”. Após a construção da camada na direção XY, a plataforma ou a cabeça se move na direção Z e uma nova camada é depositada sobre a anterior (Figura 18).

Figura 18 – Descrição do processo FDM.



Fonte: Volpato et al (2017, p.150).

O processo FDM também é conhecido como Fabricação por Filamento Fundido (FFF) quando são utilizados equipamentos de pequeno porte que também são chamados de “desktop”. Teoricamente, todo material termoplástico pode ser utilizado (RELVAS, 2018; SILVA et al, 2023). Entretanto, os materiais mais utilizados no processo FFF são o PLA, ABS e PETG.

O ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno) é um termoplástico com aspecto fosco, resistente ao atrito, ao impacto e a altas temperatura. É bastante utilizado em modelos que requerem boa aparência e funcionalidade. Sua temperatura de processamento ocorre entre 220 e 250°C, e em virtude do aquecimento, libera vapores tóxicos (RELVAS, 2018; SILVA et al, 2023).

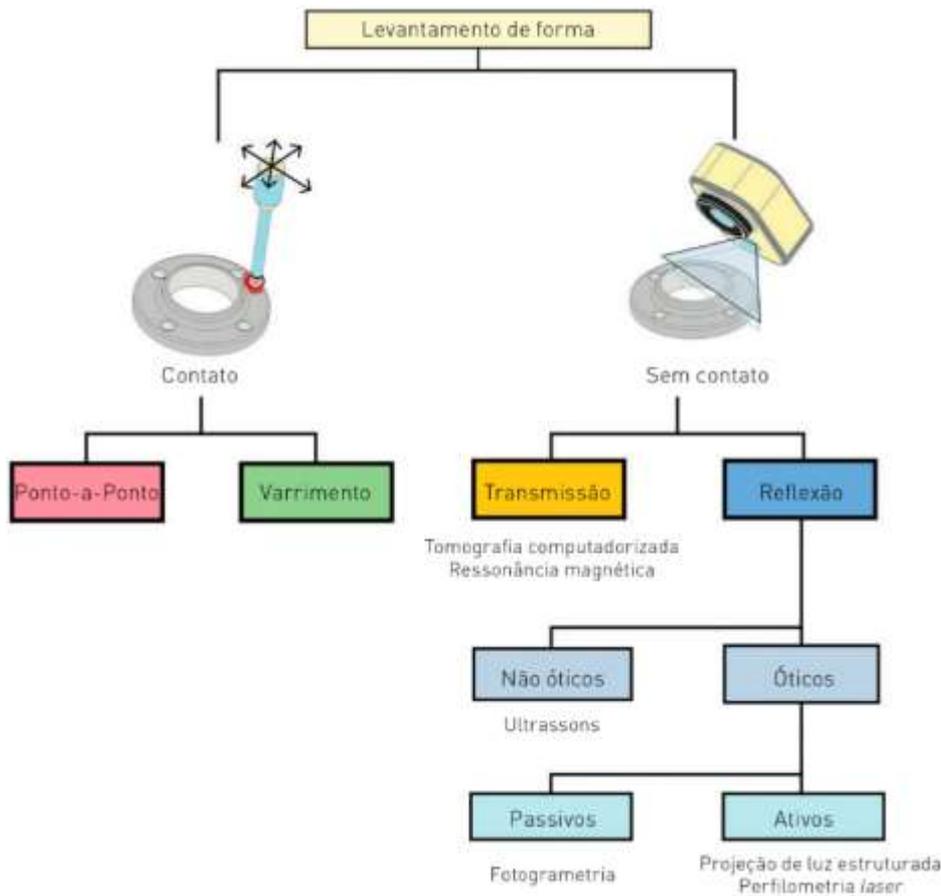
O PLA (poliácido láctico) é um material amplamente utilizado pela facilidade de processamento (temperatura de fusão 160°C), devido à alta fluidez do polímero fundido durante a extrusão e sua baixa contração, o que permite a obtenção de peças com facilidade e com precisão dimensional. Os modelos são mais rígidos (que ABS) e resistentes, entretanto, por ser biodegradável, tende-se a degradar rapidamente e são menos duráveis do que outros termoplásticos (RELVAS, 2018; SILVA et al, 2023).

O PETG (Politereftalato de etileno glicol) é um material translúcido e brilhante, produz modelos resistentes ao impacto e superfícies com menos atrito e com menos rigidez que os materiais ABS e PLA. Possui excelente resistência química a diversos solventes, é seguro para utilização em alimento e às intempéries climáticas (RELVAS, 2018; SILVA et al, 2023). Seu processamento é mais fácil que o ABS e mais difícil do que o PLA.

### 2.3 Digitalização de formas tridimensionais

A digitalização tridimensional, também conhecida como escaneamento 3D ou levantamento de forma, possibilita a obtenção das superfícies externas de objetos por meio de equipamentos que utilizam variados princípios tecnológicos e fenômenos físicos. Esses dispositivos são capazes a capturar a geometria de um objeto físico, a qual, após processamento, é convertida em um arquivo de superfícies. Este processo pode ser realizado por contato físico ou sem contato (VOLPATO et al, 2017; SILVA et al, 2023). A Figura 19 apresenta uma classificação das tecnologias de levantamento de forma.

Figura 19 – Classificação das tecnologias de levantamento de forma.



Fonte: Silva et al (2023, p.182).

As tecnologias mais amplamente difundidas para o levantamento de formas são as sem contato e utilizam laser ou luz estruturada e fotogrametria digital, onde o modelo 3D é reconstruído a partir de imagens capturadas de diferentes ângulos do objeto (AHRENS et al, 2013). Por outro lado, podem ser utilizados sistemas de medição de coordenadas ou apalpamento. Contudo, o processo é lento e apresenta dificuldades significativas em algumas regiões (VOLPATO et al, 2017).

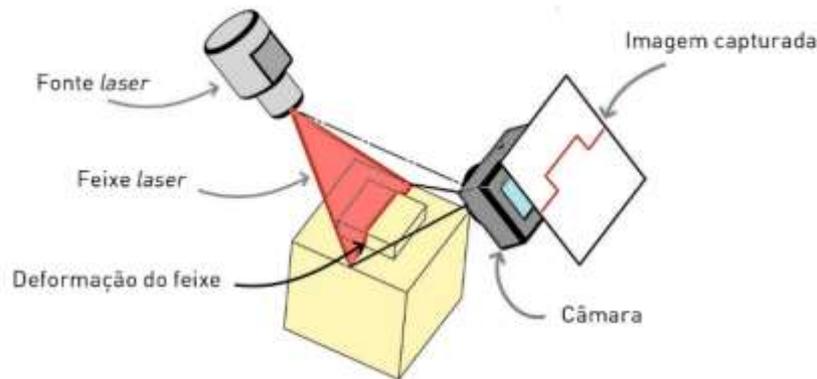
Entre as técnicas de levantamento de forma sem contato, a perfilometria “laser” tem sido bastante utilizada. Este método baseia-se no princípio óptico ativo, sendo suas principais configurações de sistemas: scanner laser terrestre, aéreo e móvel. “Destacam-se duas técnicas para o processamento das informações e a obtenção das geometrias do objeto: a triangulação e a metodologia time-of-light” (SILVA et al, 2023, p.182).

A arquitetura mais comum de um “scanner laser” por triangulação é formada por dois

elementos: a unidade de projeção do feixe de “laser” e o conjunto de captação de imagens, este último composto por câmeras CCD (dispositivo de carga acoplada). O processo consiste em fazer incidir, a partir do sistema “laser”, um padrão – o qual pode ser um ponto, uma linha, um conjunto de linhas ou uma grelha – sobre as superfícies do elemento em digitalização e, com o dispositivo de visão, capturar a reflexão destas referências para determinar os perfis geométricos gerados pela interação (SILVA et al, 2023, p.183).

A Figura 20 apresenta uma representação esquemática do processo de perfilometria “laser” por triangulação.

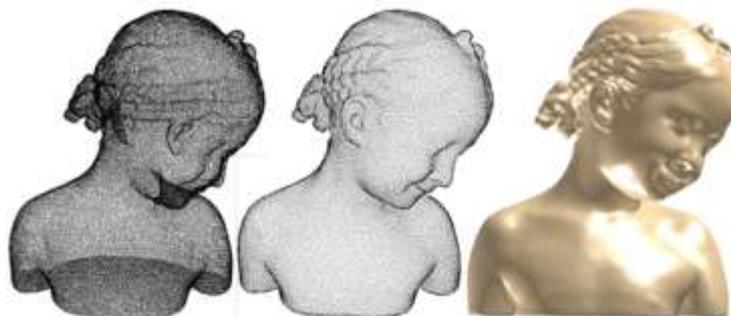
Figura 20 – Esquema de representação do processo de perfilometria “laser”.



Fonte: Silva et al (2023, p. 183)

O processo de escaneamento resulta, inicialmente, em uma nuvem de pontos que são obtidos pela medição da superfície do objeto, que podem ser transformados em um arquivo CAD contendo a superfície obtida. De acordo com Volpato et al (2017, p. 73), “Esse processamento da nuvem de pontos é feito por uma classe de sistemas de softwares especializados, gerando, em geral, superfícies NURBS (*non-uniform rational b-spline*), que reproduzem com fidelidade a geometria digitalizada”. A Figura 21 apresenta um exemplo da conversão de uma nuvem de pontos em uma superfície 3D.

Figura 21 – Exemplo do resultado obtido a) nuvem de pontos obtida em determinado ponto de vista; b) otimização dos pontos visíveis; c) geração de uma superfície em arquivo CAD<sup>3</sup>.



Fonte: Berger et al (2016)

<sup>3</sup> Neste exemplo, Berger et al (2016) demonstram a possibilidade de selecionar determinados pontos da nuvem para gerar uma modificação na superfície final. No caso da figura, o resultado é uma rotação da cabeça na superfície final. No presente artigo, o importante aqui foi mostrar o processo de transformação da nuvem de pontos em superfície.

A obtenção da nuvem de pontos possibilita a representação de objetos e estruturas a partir de uma grande união destes pontos, que quando são processados por um programa específico, é possível utilizá-los como base para o desenho ou modelo 3D (THÓRUS ENGENHARIA, 2020). Além de componentes e produtos, é possível utilizar estas tecnologias para levantamento topográfico, mapeamentos geológicos, captação de estruturas para registro de patrimônio histórico, entre outros.

### 3 Método

A pesquisa teve início com o planejamento das atividades necessárias para a execução do trabalho, acompanhado de uma revisão bibliográfica abrangente sobre os temas pertinentes, visando fornecer o embasamento teórico adequado para sua realização. A partir deste, a pesquisa foi estruturada forma como é apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Representação esquemática do método utilizado no trabalho.



Fonte: elaborado pelos autores.

Para iniciar o projeto da capa para próteses, idealizou-se a digitalização de um membro inferior de um paciente amputado unilateralmente. A aquisição da geometria do membro abaixo do joelho permitiria utilizá-la de forma espelhada para criar a capa com o formato do membro amputado, possibilitando ao paciente reestabelecer a simetria, a forma e o volume do membro ausente. No entanto, este estudo foi conduzido durante o período de isolamento social devido à COVID-19. Naquele momento de isolamento social, optou-se por realizar o estudo utilizando um membro da própria equipe do projeto, com a finalidade de validar a metodologia.

O equipamento a ser utilizado, neste trabalho, para a realização deste processo de digitalização é o Hexagon Romer Absolute Arm modelo RA-7520SEI-3 e módulo laser modelo RS2. Trata-se de um sistema de medição tridimensional conhecido como braço de medição, empregado em diversas aplicações. Este sistema tem a capacidade de localizar pontos no espaço sobre uma superfície, podendo ser empregada apalpação mecânica e também a laser. Para aplicações onde se requer grande quantidade de pontos a apalpação por triangulação laser é preferencialmente empregada. O módulo com apalpação laser permite a digitalização por meio de um feixe de laser (perfilometria laser) projetado sobre a superfície do objeto e o reflexo é registrado por meio de uma câmera de vídeo.

Figura 23 – Equipamentos utilizados na digitalização tridimensional: a) Hexagon Romer Absolute Arm; b) módulo escâner laser .



(a)



(b)

Fonte: Hexagon (2024).

Com a aquisição da superfície é criada uma nuvem de pontos. Para a realização da engenharia reversa da geometria e tratamento da nuvem de pontos, foram utilizados os módulos Inspector e Modeler do programa Polyworks™.

Após o processo de escaneamento e tratamento da nuvem de pontos, uma superfície tridimensional no formato STL foi gerada e pode ser editada no programa Autodesk Mexmixer™. Neste aplicativo é possível fazer correções na malha de triângulos que poderiam interferir negativamente no projeto devido a erros na superfície. A partir da superfície corrigida, deu-se início ao desenvolvimento de diferentes conceitos estéticos para o projeto da capa utilizando para isso o programa Solidworks Educacional 2022™.

O projeto levou em consideração o diâmetro do tubo inferior de uma prótese transfemoral (35mm), porém, não foi possível obter acesso a uma prótese real devido às restrições de convívio social durante o período de pandemia. O conceito selecionado foi então detalhado dando prosseguimento à pesquisa.

A etapa seguinte foi a de planejamento do processo de manufatura aditiva das partes da capa, popularmente conhecido como “fatiamento”. Foi utilizado o programa Ultimaker Cura®, gerando ao final do processo um código (algoritmo) no formato GCode, para ser lido pelo equipamento de FFF.

Nas opções de configuração do programa foram utilizados os materiais PLA e PETG genéricos. A Tabela 1 apresenta detalhes dos parâmetros de impressão utilizados na fabricação dos modelos que compõe a capa e que foram inseridos no programa de fatiamento.

Em seguida foram realizadas as impressões no equipamento FFF e pós-processamento. Foram utilizados os filamentos PLA e PETG do fabricante 3D Fila, com diâmetro de 1,75 mm, nas cores prata e dourado, respectivamente.

Tabela 1 – parâmetros de impressão utilizados na fabricação das capas.

parâmetro	PLA	PETG
impressora	Creality CR10S Pro V2	Two Trees Sapphire Plus
Bico	0,4 mm	0,4 mm
altura de camada	0,3 mm	0,3 mm
espessura de parede	1,2 mm	1,2 mm
preenchimento	12%	15%
temperatura de extrusão	200°C	235°C
temperatura da mesa	60°C	85°C
velocidade de impressão	50mm/s	50mm/s

Fonte: elaborado pelos autores.

#### 4 Descrição e análise dos resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos ao longo do estudo, juntamente com uma análise detalhada e uma discussão. Inicialmente, serão descritos os métodos utilizados para a coleta de dados e sua análise. Em seguida, serão expostos os resultados, organizados de maneira clara e sistemática, permitindo uma compreensão abrangente das descobertas realizadas pela análise dos resultados obtidos.

Inicialmente, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica exploratória por meio de livros, artigos de revistas, anais de congressos e sites especializados, com o objetivo de compreender novas metodologias para a aquisição de formas complexas utilizando digitalização tridimensional, bem como programas de modelagem tridimensional para auxiliar na modificação das superfícies obtidas. Adicionalmente, foi realizado um estudo focado na Manufatura Aditiva e na Fabricação por Filamento Fundido (FFF), além de uma análise do estado da arte em relação a dispositivos estéticos associados a próteses de membros inferiores. Os resultados foram apresentados na seção de revisão da literatura.

Para a realização do levantamento da forma do membro inferior, o indivíduo a ser escaneado precisou utilizar uma meia fina com o objetivo de evitar interferências dos pelos corporais na aquisição da superfície, garantindo assim a precisão geométrica proporcionada pelo equipamento de metrologia. Adicionalmente, foi necessário que o indivíduo permanecesse completamente imóvel durante o processo de escaneamento, a fim de evitar erros na aquisição da geometria.

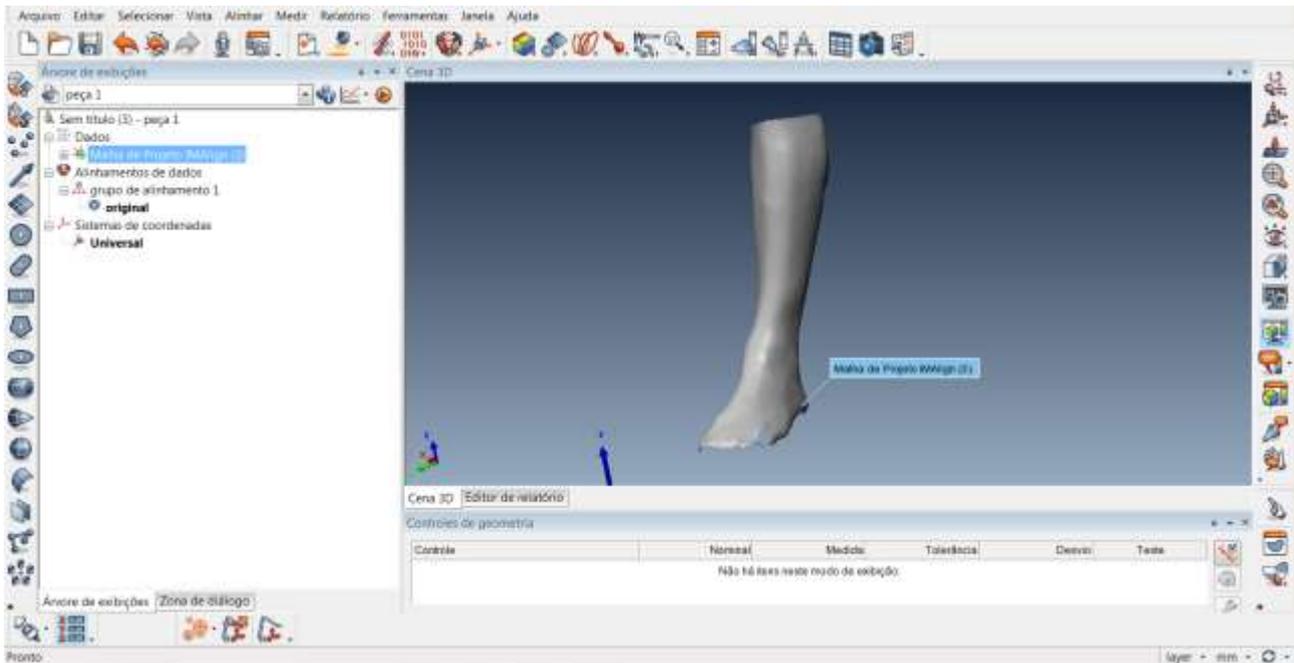
Após a aquisição da nuvem de pontos o programa Polyworks™ realiza a criação da malha tridimensional, resultando na superfície escaneada, realizando então o processo de engenharia reversa da geometria.

Figura 24 – Aquisição da nuvem de pontos utilizando equipamento Romer Absolut Arm com módulo laser.



Fonte: elaborado pelos autores.

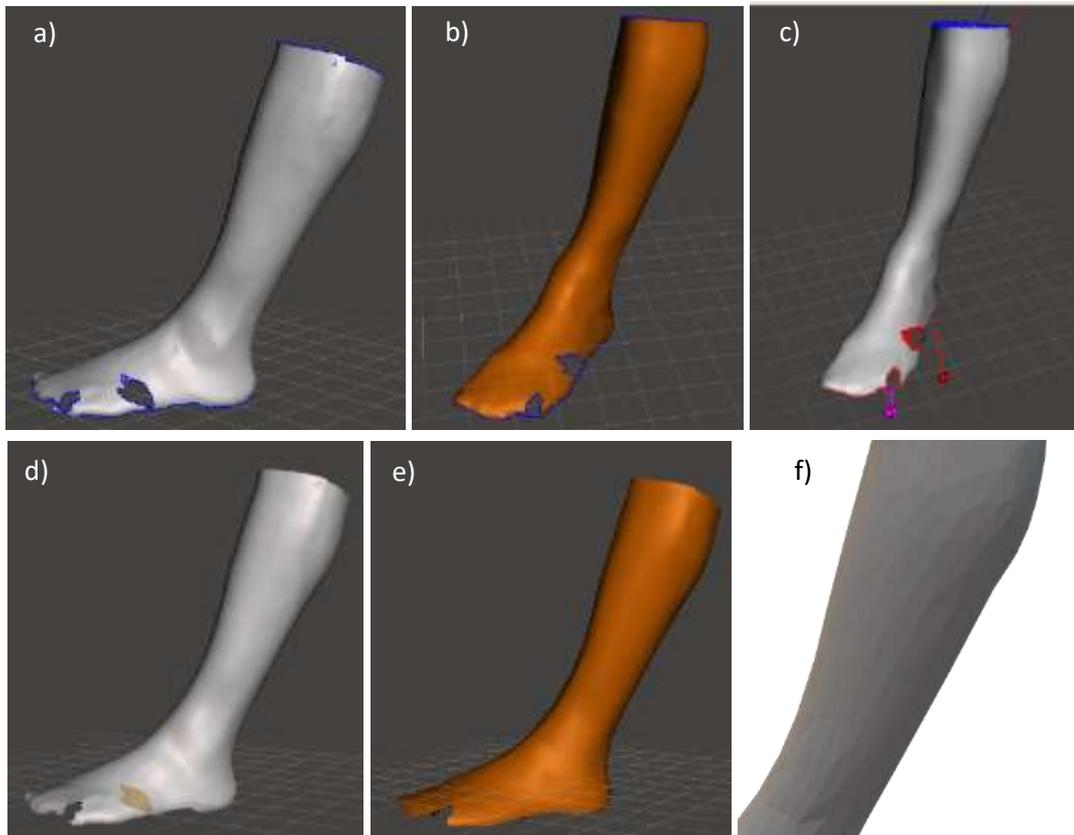
Figura 25 – Malha originada pela nuvem de pontos utilizando o programa Polyworks™.



Fonte: elaborado pelos autores.

A superfície obtida no formato STL foi posteriormente editada no programa Autodesk Mexmixer™ para realizar as correções na malha de triângulos e fechamento de vazios provenientes da inconsistência da cobertura do laser durante o processo de escaneamento. Apesar da parte de interesse (região da tíbia e fíbula) estarem com aspecto adequado para continuidade do trabalho sem correções, optou-se em realizar as correções possíveis. A Figura 26 demonstra o processo de tratamento da malha. Por fim, a malha foi modificada (Figura 26f) ajustando-se os tamanhos dos triângulos que a compõem, aumentando-os com o objetivo de conferir um aspecto “facetado” à geometria.

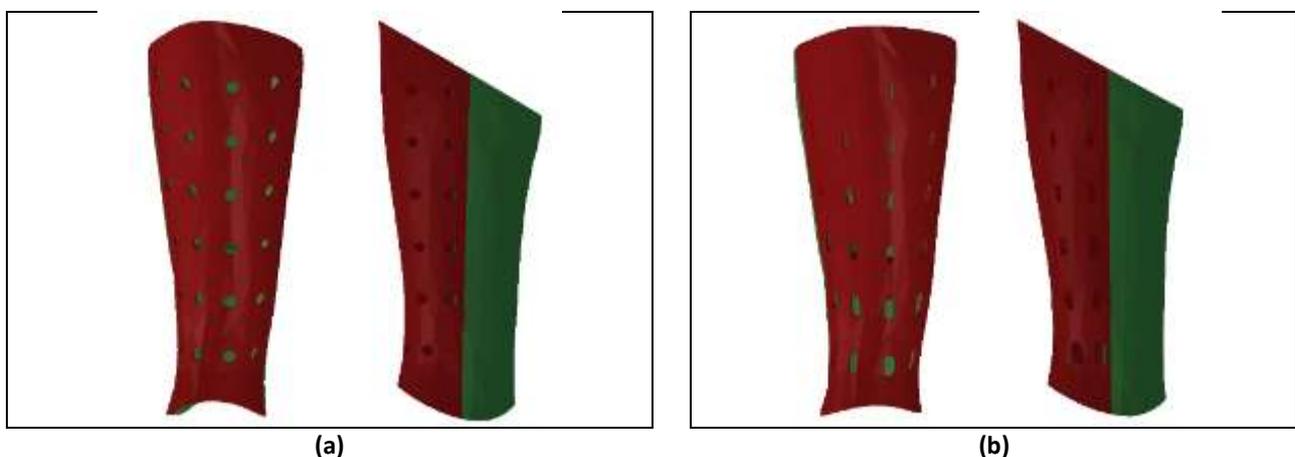
Figura 25 – Processo de tratamento da malha de triângulos: a) superfície obtida no escaneamento; b) comando “remesh mode”; c) comando “hole fill mode”; d) resultado do comando anterior com o fechamento do vazio; e) geometria resultante.



Fonte: elaborado pelos autores.

Após o tratamento da malha, iniciou-se o desenvolvimento dos conceitos das capas para próteses. Inicialmente, a superfície foi segmentada de forma a manter apenas as partes necessárias para compor a capa, excluindo-se as seções inferior e superior. Os primeiros conceitos desenvolvidos incluíam furos com padrões geométricos circulares (Figura 27a) e cortes longitudinais (Figura 27b).

Figura 27 – Conceitos gerados com padrões geométricos: a) circulares; b) em rasgo longitudinal.



Fonte: elaborado pelos autores.

Para o terceiro conceito, decidiu-se segmentar a geometria seguindo a estética do padrão geométrico facetado. Nesse conceito, tanto o corte facetado quanto a diferença de cores entre as partes contribuem para a composição estética do produto (Figura 28). Os furos foram excluídos para evitar problemas durante a fabricação da capa pelo processo de Fabricação por Filamento Fundido (FFF). Este conceito foi escolhido para a sequência do trabalho.

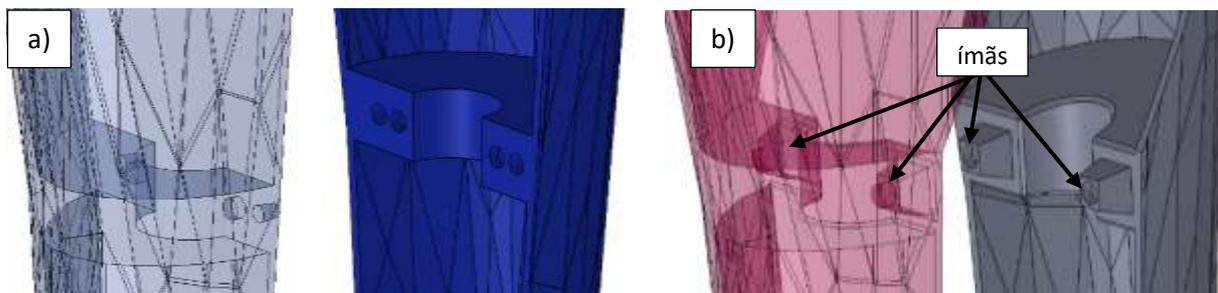
Figura 28 – Conceito gerado com linha de divisão facetada.



Fonte: elaborado pelos autores.

Após a definição do conceito, procedeu-se ao detalhamento do sistema de fixação das duas partes da capa na prótese. Inicialmente, foi desenvolvido um projeto utilizando parafusos (Figura 29a) para proporcionar maior segurança. Como alternativa, foi elaborado um sistema de fixação com ímãs, visando facilitar a utilização (Figura 29b).

Figura 29 – Alternativas de formas de fixação: a) por parafusos; b) por ímãs; c) vista lateral do sistema com ímãs.

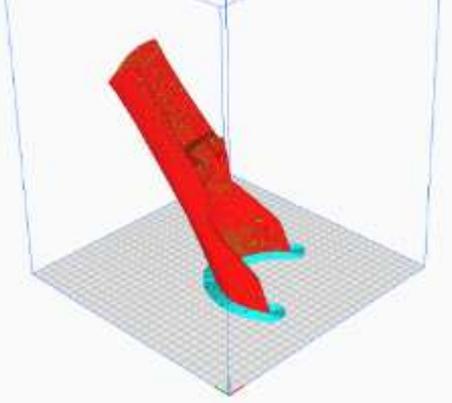
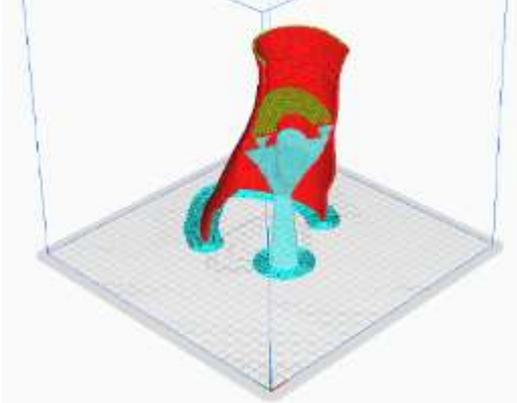


Fonte: elaborado pelos autores.

É importante salientar que tanto no desenvolvimento da estrutura externa quanto na concepção dos componentes de fixação, buscou-se empregar os princípios do *Design for Additive Manufacturing* (DfAM). Em outras palavras, houve a intenção de antecipar as restrições e propriedades inerentes ao processo de fabricação empregando a tecnologia FFF. Uma das características primordiais consistiu na minimização de inclinações superiores a 45° em relação à superfície normal, visando assim mitigar a necessidade de emprego de estruturas de suporte.

Após a escolha do conceito a final ser impresso foi iniciado o processo de planejamento para a impressão. No Quadro 1 é apresentado o processo de planejamento de impressão realizado para o material PLA na impressora CR10S Pro V2 (Esquerda) e para o material PETG (Direita), correspondentes a parte da frente e de trás da capa, respectivamente. Os tempos de impressão resultaram em valores similares. A maior quantidade de utilização de PETG ocorreu devido à presença de estrutura de suporte, o que não foi necessário para o componente em PLA.

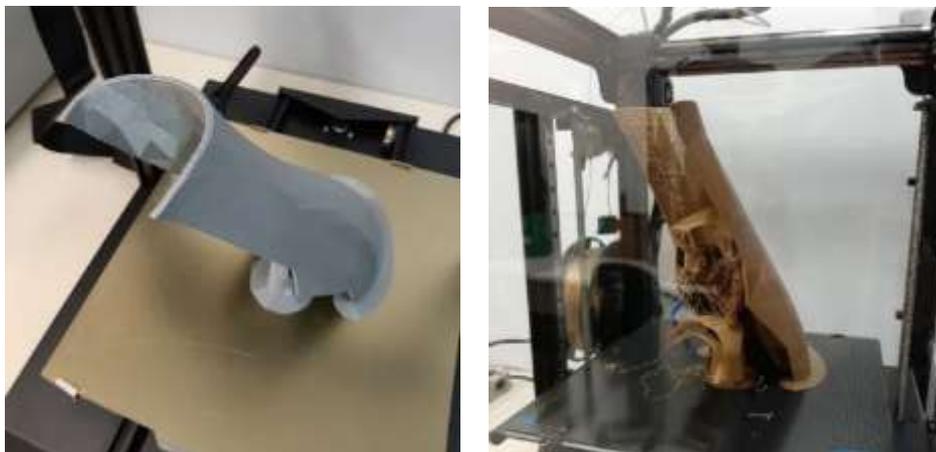
Quadro 1 – Planejamento de impressão das partes da capa e respectivas estimativas de tempos de impressão e quantidade de material.

		
<i>Tempo</i>	13 horas (estimativa)	12 horas
<i>Material</i>	135g (estimativa)	161g

Fonte: elaborado pelos autores.

A impressão em PLA ocorreu em impressora aberta (Figura 30, à esquerda) pela facilidade de processamento do material. Já para o PETG foi realizada a impressão em impressora fechada a fim de evitar problemas devido à contração do material. Durante a impressão em PETG ocorreu um problema com a construção dos suportes, porém, não interferindo na construção final da peça, apenas gerando um excesso de fios na parte interior, que não iriam interferir no resultado (Figura 30, à direita).

Figura 30 - Exemplo de imagem



Fonte: elaborado pelos autores.

O procedimento de pós-processamento envolveu a utilização de alicates de corte e alicates de bico e estiletes. Após, foram fixados ímãs de neodímio com dimensões de 6 mm de diâmetro e 4 mm de espessura, nos locais conforme indicado na Figura 29b. O resultado do desenvolvimento e fabricação da capa para prótese é apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Capa para prótese desenvolvida em PLA cinza (frente) e PETG dourado (trás).



Fonte: elaborado pelos autores.

Os resultados deste estudo demonstraram a viabilidade de desenvolver uma capa personalizada para próteses utilizando tecnologias digitais. No entanto, o processo requer um número considerável de horas de trabalho e uma equipe multidisciplinar. Por outro lado, caso o projeto fosse disponibilizado online de forma gratuita, o usuário poderia imprimir a capa para sua prótese. Com base na quantidade de material estimada durante o processo de fatiamento e no custo dos materiais<sup>4</sup>, o custo de impressão dessa capa seria aproximadamente R\$ 34,43. Em relação aos meios de impressão, os Institutos Federais do Brasil possuem laboratórios IFMaker integrantes da Rede Maker federal, para a popularização de tecnologias digitais. Nestes espaços é permitido à comunidade externa a utilização para realizar sua impressão.

Por fim, no projeto ainda foram identificadas áreas para melhoria. A primeira é o desenvolvimento de alternativas para a redução da massa total do produto, seja por meio de ajustes no projeto ou na fabricação. Outro ponto crítico é o aprimoramento do sistema de fixação da capa à prótese, pois o dimensionamento dos ímãs não foi suficiente para garantir o funcionamento adequado do produto. A utilização de um sistema combinado, envolvendo abraçadeiras (fixas ou móveis) juntamente com o sistema magnético, pode ser uma solução viável.

<sup>4</sup> Considerando o preço aproximado para 1kg de PLA da marca 3DFila igual a R\$ 100,00 e de PETG R\$ 130,00.

## 5 Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma capa para próteses de membros inferiores, utilizando tecnologias digitais como digitalização tridimensional e manufatura aditiva.

A revisão da literatura e a pesquisa do estado da arte mostra que o mercado de capas de próteses ainda é incipiente devido a poucas empresas estarem focadas neste segmento. Porém, observou-se que os preços destes produtos são proibitivos a alguns usuários e, portanto, está destinado a um público seletivo de indivíduos. Alguns dos motivos do alto custo são os materiais utilizados, mas também o nível de tecnologia e conhecimentos necessários para desenvolver um projeto personalizado.

Na tentativa de mitigar o projeto altamente personalizado e de alto custo, as empresas oferecem produtos em tamanhos pré-definidos, reduzindo o custo final para o usuário. Neste sentido, o desenvolvimento deste trabalho pode contribuir para a difusão do projeto de capas, tanto por sua divulgação, quanto ao seu compartilhamento. Como trabalhos futuros, pretende-se futuramente desenvolver uma sistemática que permita ao usuário final fazer o download da capa e ajustá-la de acordo com a sua prótese. Após, seria possível imprimi-la no material e cores que combinem com sua respectiva estética e estilo de vida.

Foi possível neste trabalho chegar à fabricação de uma capa para prótese com a estética aprimorada. Entretanto, ainda é necessário estudo para a redução da massa total, que pode ser demasiada para a utilização na prótese. Não obstante, é preciso ainda investigar formas melhores de fixação da capa na prótese, seja por parafusos, ímãs mais fortes ou uma combinação de ambos.

## 6 Referências

ADPOSTURAL. **Ortopedia clínica**. 2016. Disponível em: <https://adpostural.com.br/> . Acesso em: junho de 2024.

AMPUTEI, E AGORA?. Disponível em: <https://www.instagram.com/amputeieagoraoficial/> . Acesso em: junho de 2024.

ALLELES. **Prosthetic covers with meaning attached**. Disponível em: <https://alleles.ca/> . Acesso em: junho de 2024.

AHRENS, Carlos Henrique; VELLWOCK, André Eccel; PFEIFER, Diogo Coletto; PISTORELLO, Roberto Angelo. Engenharia reversa por meio de fotogrametria: estudo comparativo da técnica de digitalização tridimensional visando aplicação na manufatura aditiva. **Anais: 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. 2013. Penedo, Itatiaia, RJ.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. **Materiais e design: arte e ciência da seleção de materiais no design de produto**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

ASTM. **ISO/ASTM 52900:2021(E): Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary**. 2021. 14 p.

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. da. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. SP: Manole, 2008.

BAXTER, Mike. **Projeto de produtos: guia prático para o design de novos produtos**. 2ed. São Paulo:

Blucher, 1998.

BERGER, et al. A survey of surface reconstruction from point clouds. **Computer graphics forum**. v.0, n.0, p.1-27, 2016.

BESPOKE INNOVATIONS. **Bespoke Innovations**. Disponível em: <<https://www.facebook.com/Bespoke-Innovations-209851012376206> . Acesso em: 2021.

BINGHAM, Guy A.; HAGUE, Richard. Efficient three dimensional modelling of additive manufactured textiles. **Rapid Prototyping Journal**. Vol. 19. N 4. p. 269 – 281. 2013.

CAMPBELL, Ian; HAGUE, Richard J.; SENER, Bahar; WORMALD, Paul W. The potential for the bespoke industrial designer. **The design journal**. V 6. N 3. P 24-34. 2003.

CAMPBELL; Ian; BOURELL, David; GIBSON, Ian. **Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age**. Rapid Prototyping Journal. v 18. n 4. p. 255–258. 2012.

DABABNEH, Amer B. e OZBOLAT, Ibrahim T. Bioprinting Technology: A Current State-of-the-Art Review. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. V136. 2014

GIBSON, I.; ROSEN, D. W. STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer. 2010.

GUO, Nannan; LEU, Ming C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. **Front. Mech. Eng**. v8. n3. p 215–243. 2013.

HEXAGON. **Products. Products by Division. Metrology hardware. Portable measuring arms**. Disponível em: <https://hexagon.com/products/product-groups/measurement-inspection-hardware/portable-measuring-arms> . Acesso em: junho de 2024.

HUANG, Samuel H.; LIU, Peng; MOKASDAR, Abhiram; HOU, Liang. Additive manufacturing and its societal impact. **International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**. v67. p.1191-1203. 2013.

IDETHNOS. Disponível em: <https://www.idethnos.com/> . Acesso em: abril de 2021.

JOHNSON, Andrew; BINGHAM, Guy A.; WIMPENNY, David I. Additive manufactured textiles for high-performance stab resistant applications. **Rapid Prototyping Journal**, Vol. 19 N 3, p. 199 – 207. 2013.

LEGS TO FLY. Disponível em: <https://www.idethnos.com/legstofly/#> . Acesso em: junho de 2024.

ORTOLIFE. **Produtos. Próteses inferiores**. 2022. Disponível em: <https://www.ortolifego.com.br/categoria-produto/proteses-inferiores/> . Acesso em: junho de 2024.

PEGN. **Startup americana leva design para próteses de pernas**. 2014. Disponível em: <https://revistapegn.globo.com/Noticias/noticia/2014/02/startup-americana-leva-design-para-proteses-de-pernas.html> . Acesso em: junho de 2024.

RELVAS, Carlos. **O mundo da impressão 3D e o fabrico digital**. Porto: Quântica, 2018.

ROSEN, David W. Research supporting principles for design for additive manufacturing. **Virtual and physical prototyping**, 2014. V. 9, N. 4, p.225–232.

SERIOUS INJURY LAW. **Types of amputation**. Disponível em: <https://www.seriousinjurylaw.co.uk/other-serious-claims/amputation/types-of-amputation/>. Acesso em: 17 mar. 2021.

SILVA, Francisco (coord) et al. **Impressão 3D: tecnologias, materiais e aplicações**. Porto: Engebook,

2023

TORUS ENGENHARIA. **Nuvem de pontos:** o que é e como funciona?. 2020. Disponível em: <https://thorusengenharia.com.br/nuvem-de-pontos-o-que-e-e-como-funciona/>. Acesso em: 01 abr. 2021.

UNYQ. 2024. Disponível em: <https://unyq.com/> . Acesso em: junho de 2024.

VOLPATO, N. (org.) et al. **Manufatura aditiva:** tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017.