

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA VICTOR CIVITA – FATEC TATUAPÉ

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM DESIGN DE PRODUTO
COM ÊNFASE EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO E
INDUSTRIALIZAÇÃO

Graziele Brito Da Silva

**DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA: UMA PROPOSTA
PARA MELHORIA DE CAPAS DE PRÓTESES
ORTOPÉDICAS**

São Paulo

2025

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA
SOUZA FACULDADE DE TECNOLOGIA VICTOR CIVITA – FATEC
TATUAPÉ**

**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM DESIGN DE PRODUTO
COM ÊNFASE EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO E
INDUSTRIALIZAÇÃO**

Graziele Brito Da Silva

**DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA: UMA PROPOSTA
PARA MELHORIA DE CAPAS DE PRÓTESES
ORTOPÉDICAS**

Trabalho de Graduação apresentado por Grazielle Brito da Silva como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Design de Produtos com ênfase em processos de produção e industrialização, da Faculdade Tecnologia do Victor Civita - Tatuapé, elaborado sob a orientação da Profa. Esp. Arisol Simone Sayuri Tsuda Yamamoto e Coorientação do Prof. Me. Edney Eboli dos Santos.

São Paulo

2025

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA VICTOR CIVITA – FATEC TATUAPÉ

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM DESIGN DE PRODUTO
COM ÊNFASE EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO E
INDUSTRIALIZAÇÃO

Graziele Brito da Silva

**DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA: UMA PROPOSTA PARA MELHORIA DE
CAPAS DE PRÓTESES ORTOPÉDICAS**

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. José Vicente Azzi Grecco – Fatec Tatuapé

Prof. Dr. Paulo Henrique Ogata – Fatec Tatuapé

Prof. Esp. Arisol Simone Sayuri Tsuda Yamamoto – Fatec Tatuapé

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que contribuíram diretamente para a minha formação acadêmica e pessoal, oferecendo apoio, confiança e incentivo ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu gato, pelo suporte emocional inconsciente que me ofereceu. Nos momentos em que tudo o que eu queria era surtar, sua barriguinha peluda e suas patinhas fofinhas foram suficientes para me fazer respirar fundo e voltar ao eixo.

À minha família, pelo apoio constante e pela compreensão nos dias difíceis, mesmo quando o cansaço parecia superar a vontade.

Ao meu namorado, por todo carinho, paciência e apoio, mesmo travando suas próprias batalhas. Sua presença, ainda que discreta, foi essencial para que eu permanecesse firme.

À minha orientadora, Profa. Esp. Arisol Simone Sayuri Tsuda Yamamoto, e ao meu coorientador, Prof. Me. Edney Eboli dos Santos, pela dedicação, disponibilidade e pelas orientações valiosas ao longo deste projeto.

Aos amigos e colegas de curso, especialmente Ana Caroline Pereira Clepardi e Barbara Daniella Cavalcante Costa, que compartilharam dúvidas, aprendizados, angústias e risadas, tornando essa jornada mais leve e significativa.

E a mim mesma, pela coragem, pela disciplina e pela determinação que me trouxeram até aqui.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste Trabalho de Graduação, registro meu profundo e sincero agradecimento.

RESUMO

O trabalho apresentado tem como objetivo aplicar os princípios do Design para Manufatura Aditiva (DfAM) no desenvolvimento de uma capa para prótese ortopédica modular, visando melhorar a estética, funcionalidade e conforto dos usuários. A metodologia utilizada seguiu um fluxo de trabalho baseado em DfAM, incluindo planejamento, otimização de design, seleção de materiais e tecnologias de impressão, prototipagem e validação dos resultados. Foram considerados requisitos funcionais, como estrutura robusta, sistema de fixação integrado e compatibilidade com próteses modulares, além de requisitos não funcionais, como redução de peso, ergonomia e durabilidade, atendidos por meio de otimização geométrica e escolha adequada de materiais. A análise de dados foi realizada por meio de simulações computacionais e testes físicos, confirmando a viabilidade do projeto. As conclusões indicam que a aplicação do DfAM possibilitou a criação de uma capa adaptável, personalizável, com menor desperdício de material e maior conforto para o usuário, demonstrando potencial para inovação e sustentabilidade na área de próteses ortopédicas.

Palavras-chave: DfAM; prótese ortopédica; manufatura aditiva.

ABSTRACT

This work aims to apply the principles of Design for Additive Manufacturing (DfAM) to the development of a modular orthopedic prosthesis cover, aiming to improve the aesthetics, functionality, and comfort of users. The methodology used followed a DfAM-based workflow, including planning, design optimization, material and printing technology selection, prototyping, and validation of results. Functional requirements, such as robust structure, integrated fixation system, and compatibility with modular prostheses, were considered, as well as non-functional requirements, such as weight reduction, ergonomics, and durability, met through geometric optimization and appropriate material selection. Data analysis was performed through computer simulations and physical tests, confirming the project's feasibility. The conclusions indicate that the application of DfAM enabled the creation of an adaptable, customizable cover with less material waste and greater user comfort, demonstrating potential for innovation and sustainability in the field of orthopedic prostheses.

Keywords: DfAM; orthopedic prosthesis; additive manufacturing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras

Figura 1 – Principais Componentes de um Sistema de Jateamento de Aglutinante..	17
Figura 2 – Principais Componentes de um Sistema de DED.....	17
Figura 3 – Principais Componentes de um Sistema de FDM.....	18
Figura 4 – Principais Componentes de um Sistema de MJT.....	18
Figura 5 – Principais Componentes de um Sistema de SLS.....	19
Figura 6 – Principais Componentes de um Sistema de SLM.....	19
Figura 7 – Principais Componentes de um Sistema de SLM.....	20
Figura 8 – Principais Componentes de um Sistema de VPP.....	20
Figura 9 – Nomenclatura de Tipos de Próteses para Membros Inferiores.....	35
Figura 10 – Prótese Escaneada – Modelo 3D.....	43
Figura 11 – Esboço de Prótese Modular.....	44
Figura 12 – Esboço da Capa da Prótese Modular.....	45
Figura 13 – Capa para Prótese Transtibial Confetti.....	46
Figura 14 – Capa Para Prótese Transfemoral – Amputação Acima do Joelho/encaixe magnético.....	46
Figura 15 – Capa Para Prótese Transfemoral - Amputação Acima Do Joelho encaixe parafuso.....	47
Figura 16 – Esboços da fixação.....	47
Figura 17 – Projeto 3D com medidas.....	48
Figura 18 – Projeto aproximado da parte inferior de prótese modular.....	49
Figura 19 – Esboços de criação digital da parte frontal da capa.....	50
Figura 20 – Capa Frontal digital.....	50
Figura 21 – Capa Frontal Digital – Aplicada à Prótese.....	51
Figura 22 – Esboços de criação digital da parte posterior da capa.....	52
Figura 23 – Capa Posterior Digital.....	52
Figura 24 – Capa Posterior Digital – Aplicada à Prótese.....	53
Figura 25 – Visualização dos Encaixes da Parte Frontal da Capa.....	53
Figura 26 – Visualização dos Encaixes da Parte Posterior da Capa.....	54
Figura 27 – Visualização dos Encaixes da Parte Frontal e posterior da Capa.....	54
Figura 28 – Análise Topológica da Parte Posterior da Capa.....	55
Figura 29 – Análise Topológica da Parte Frontal da Capa.....	56
Figura 30 – Parâmetros para Impressão em PLA.....	57
Figura 31 – Esboços de criação digital.....	57
Figura 32 – Esboços de criação digital.....	58

Quadros

Quadro 1 – Manufatura Aditiva (continua).....	21
Quadro 2 – Materiais X Processo de Manufatura Aditiva.....	22
Quadro 3 – Questionamentos para o Planejamento do Produto.....	38
Quadro 4 – Tecnologia x Níveis de Qualidade.....	40
Quadro 5 – Materiais, Características e Indicação de uso.....	41

LISTA DE SIGLAS

3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> ou Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJT	<i>Binder jetting</i> ou Jato de Aglutinante
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> ou Projeto Assistido por Computador
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i> ou Engenharia Assistida por Computador
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> ou Fabricação Assistida por Computador
CAX	<i>Computer-Aided Technologies</i> ou Tecnologias Assistida por Computador
DED	<i>Direct energy deposition</i> ou Deposição por Energia Direcionada
DfAM	<i>Design for Additive Manufacturing</i> ou Design para Manufatura Aditiva
DFM	<i>Design for Manufacturing</i> ou Design para Manufatura
DFMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i> ou Design Para Manufatura e Montagem
DLP	<i>Digital Light Processing</i> ou Processamento de Luz Digital
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> Ou Modelagem por Deposição Fundida
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> ou Análise de Elementos Finitos
FEM	<i>Finite Element Method</i> ou Métodos de Elementos Finitos
ISO	Organização Internacional de Normalização
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i> ou Deposição Metálica a Laser
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> ou Manufatura de Objetos Laminados
MA	Manufatura Aditiva
MEX	<i>Material Extrusion</i> ou Extrusão de Material
MJT	<i>Material jetting</i> ou Jateamento de material
NBR	Norma Brasileira
PA12	Poliamida 12
PA6	Poliamida 6
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i> ou Fusão em Leito de Pó
PE	Polietileno

PEBA	Poliéter-Bloco-Amida
PPSF	Polyphenylsulfone ou Polifenilsulfona
SHL	<i>Sheet Lamination</i> ou Laminação de Folha
SLA	Stereolithography Ou Estereolitografia
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> ou Fusão Seletiva a Laser
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> ou sinterização seletiva a laser
TO	<i>Topology Optimization</i> Ou Otimização de Topologia
VPP	<i>Vat Photopolimerization</i> ou Fotopolimerização em Cuba

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
m	Metro
mm	Milímetro
US\$	Dólar americano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivos gerais.....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
1.2	Organização dos Capítulos.....	14
2	MANUFATURA ADITIVA.....	16
2.1	Conceitos.....	16
2.2	Classificações.....	16
2.3	Vantagens e Limitações.....	21
2.4	Materiais da MA.....	22
3	DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA (DFAM).....	23
3.1	Design e DFAM.....	23
3.2	Conceitos e Fundamentos.....	24
3.2.1	DfAM Restritivo.....	25
3.2.2	DfAM Oportunista.....	25
3.3	Diretrizes e Ferramentas.....	26
3.4	Otimização no Design para Manufatura Aditiva.....	27
3.5	Otimização de Tamanho.....	28
3.6	Otimização de Forma.....	28
3.7	Otimização de Topologia.....	29
3.7.1	Métodos de Otimização de Topologia.....	30
3.8	Design Generativo.....	31
3.9	Ferramentas e sua Integração no Fluxo de Trabalho DfAM.....	31
3.9.1	Ferramentas CAD.....	32
3.9.2	Ferramentas CAE.....	32
3.9.3	Ferramentas CAM.....	32
3.10	Fluxo de Trabalho DfAM.....	33
4	AMPUTAÇÕES E AS TECNOLOGIAS ASSISTIDAS.....	34
4.1	Usuários de Próteses.....	35
5	METODOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO COM DFAM.....	37
5.1	Desenvolvimento de Capa para Prótese Modular.....	39
5.1.1	Planejamento do Produto.....	39

5.1.2	Requisitos.....	39
5.1.3	Análise de Materiais e Tecnologias de Impressão.....	40
5.1.4	Levantamento de Restrições de Design para AM.....	41
5.1.5	Ideação e Geração de Conceitos.....	42
5.1.6	Otimização de Projeto com Foco em DfAM.....	55
5.1.7	Validação Virtual.....	56
5.1.8	Prototipagem e Testes Físicos.....	57
6	ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICE A – PROJETO DA CAPA DE PRÓTESE ORTOPÉDICA.....	64

1 INTRODUÇÃO

A manufatura de produtos, que se originou na produção ainda com métodos artesanais evoluiu, e continua evoluindo, a partir da introdução de novas tecnologias, permitindo o aumento de produtividade, melhoria de qualidade e redução de custos. Pode-se afirmar que o objetivo da manufatura atualmente é produzir bens de forma eficiente, com qualidade e custos adequados, atendendo às demandas do mercado e às necessidades dos consumidores.

Nas últimas quatro décadas, a manufatura aditiva (MA) se desenvolveu de forma impressionante, ampliando o número de tecnologias disponíveis no mercado. A MA demonstrou um crescimento significativo, partindo de uma tecnologia promissora em 1980 e evoluindo para um mercado que valia mais de US\$ 4 bilhões em 2014 (Thompson *et al.*, 2016). A integração entre manufatura aditiva e design para manufaturabilidade (DFM) simboliza uma evolução dos conceitos. O DFM tradicional adapta projetos aos que os processos de manufatura subtrativa podem fazer, em contrapartida, a manufatura aditiva necessitou de estratégias mais específicas (Raeder, 2009). Surge, então, o *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), que foca em geometrias complexas, projetos personalizados e busca extrair a maior eficiência do material. Esse trabalho em conjunto possibilita que a impressão 3D seja bem explorada, dessa forma, pode-se criar estruturas leves, mais otimizadas, com maior integração entre os componentes e inclusive customização em massa. Esses são fatores que impulsionam o seu crescimento no mercado (Hinchy, 2019).

Como uma maneira de verificar a forma de se trabalhar com esses pontos, o cerne deste estudo é o apresentado nos objetivos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem a proposta de verificar como a aplicação de conceitos do *Design* para manufatura aditiva pode melhorar a estética de capas de próteses ortopédicas, aprimorando assim a experiência do usuário e a qualidade de vida dos pacientes que fazem uso desses dispositivos diariamente.

1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar a literatura sobre manufatura aditiva e DfAM, identificando princípios, metodologias e aplicações relacionadas à personalização de produtos.
- Aplicar o DfAM no desenvolvimento de uma capa personalizada de prótese modular, aplicando as diretrizes de *Design for additive manufacturing* (DfAM), explorando as potencialidades de manufatura aditiva na criação de soluções funcionais e adaptadas as necessidades do usuário.
- Projetar e modelar digitalmente um produto aplicando as diretrizes de DfAM.

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho está estruturado em capítulos que seguem uma sequência lógica, desde a fundamentação teórica até a aplicação prática e análise dos resultados. A seguir, apresenta-se uma breve descrição de cada capítulo:

Capítulo 1 – Introdução: Apresenta o contexto do estudo, os objetivos gerais e específicos, a justificativa e a metodologia utilizada, além de uma síntese da organização do trabalho.

Capítulo 2 – Manufatura Aditiva: Aborda os conceitos, classificações, vantagens e limitações das tecnologias de manufatura aditiva, com ênfase nos processos e materiais aplicáveis ao design de produtos.

Capítulo 3 – Design para Manufatura Aditiva (DfAM): Discute os princípios, fundamentos e diretrizes do DfAM, incluindo otimizações de tamanho, forma e topologia, além das ferramentas e fluxos de trabalho utilizados.

Capítulo 4 – Amputações e Tecnologias Assistidas: Explora o perfil dos usuários de próteses, as necessidades funcionais e não funcionais, e o impacto das tecnologias assistidas na qualidade de vida.

Capítulo 5 – Metodologia do Desenvolvimento de Produto com DfAM: Detalha o processo de desenvolvimento da capa para prótese modular, desde o planejamento, análise de materiais e tecnologias, ideia e geração de conceitos, até a otimização, validação virtual e prototipagem.

Capítulo 6 – Análises e Considerações Finais: Apresenta uma reflexão sobre os resultados obtidos, sintetiza as principais descobertas e reforça a relevância do uso do DfAM no desenvolvimento de capas para próteses ortopédicas, destacando os benefícios em termos de funcionalidade, estética e sustentabilidade.

2 MANUFATURA ADITIVA

Para a indústria, do ponto de vista geométrico é possível separar as tecnologias em três grupos, sendo eles manufatura subtrativa que retira material de forma definida para criar o objeto, a manufatura formativa que altera a geometria do objeto através da aplicação de forças externas ou calor e temos a manufatura aditiva que cria geometrias através da deposição de material camada por camada (Gebhardt; Hötter, 2016). A manufatura aditiva tornou-se viável com o advento da impressão 3D, desenvolvida em 1980 (VEMAX, 2020).

2.1 CONCEITOS

Manufatura Aditiva (MA) é um termo genérico comumente utilizado na indústria para se referir a tecnologias que produzem objetos físicos utilizando de técnicas de junção de elementos sobrepostos, outras terminologias utilizadas atualmente são, Prototipagem Rápida e Impressão 3D (Muthu; Savalani, 2016; Gebhardt; Hötter, 2016).

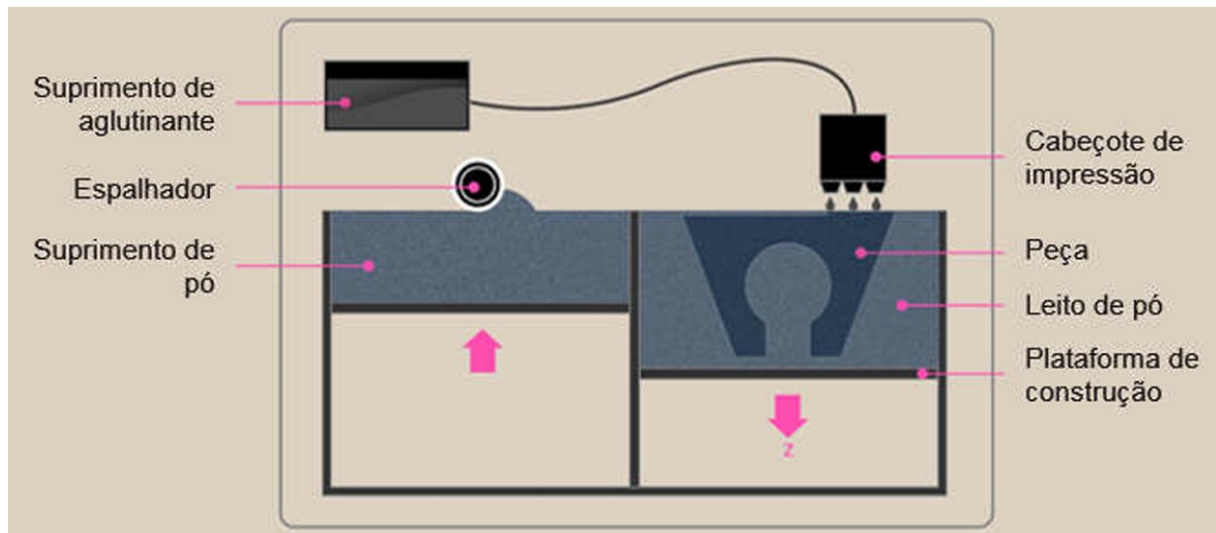
A Manufatura Aditiva (MA) caracteriza se como um processo de fabricação digital e automatizado, fundamentado na sobreposição em sequência de material para cria geometrias tridimensionais (Gebhardt; Hötter, 2016). Nos processos de MA a matéria-prima é organizada e consolidada em pequenas unidades volumétricas (primitivas ou *voxels*) para formar a peça (Thompson *et al.*, 2016). Para construção com a tecnologia de manufatura aditiva são necessárias as informações digitais da peça (projeto 3d) que gerará simultaneamente a geometria do objeto e as propriedades da geometria de cada *voxel*, as características físicas da peça são determinadas pelos materiais utilizados (matéria prima), pelo equipamento (máquina de impressão 3d), e pelos parâmetros utilizados no processo de impressão (Gebhardt; Hötter, 2016).

2.2 CLASSIFICAÇÕES

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua norma técnica ABNT NBR ISO/ASTM (2025) apresenta a classificação dos principais processos de manufatura aditiva que são divididos em sete diferentes tipos. Posser (2019) explica como cada tecnologia funciona.

- **Jato de aglutinante** ou *Binder jetting* (BJT) é um processo de fabricação aditiva que utiliza de um líquido aglutinante para unir partículas de matéria-prima em pó (ABNT, 2025) com mostra a Figura 1. Quando concluído o processo, e todo material em pó é removido, então no pós-processamento é feita uma infiltração para que a peça obtenha resistência planejada a infiltração vai depender do material utilizado (Loy; Canning; Haskell, 2016; Posser, 2019).

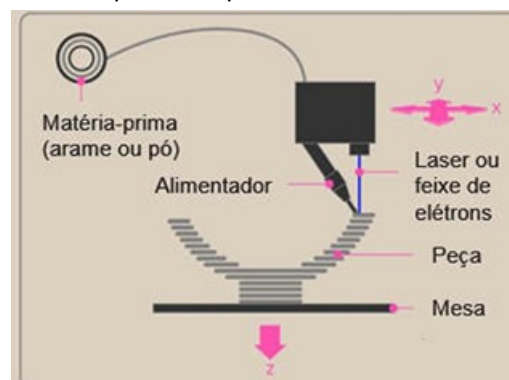
Figura 1 – Principais Componentes de um Sistema de Jateamento de Aglutinante



Fonte: Posser (2019, p. 31)

- **Deposição por Energia Direcionada** ou *Direct Energy Deposition* (DED) é o processo de manufatura que utiliza a energia térmica concentrada para fazer a fusão de materiais por meio do derretimento conforme são depositados (ABNT, 2025). Um exemplo desse funcionamento está ilustrado na Figura 2. O DED e uma variação dele, a *Laser Metal Deposition* (LMD) – Deposição Metálica a Laser, são processos em que o fluxo de material (podendo ser em pó ou em arame) passam por fusão através de laser ou feixe de elétrons (Posser, 2019).

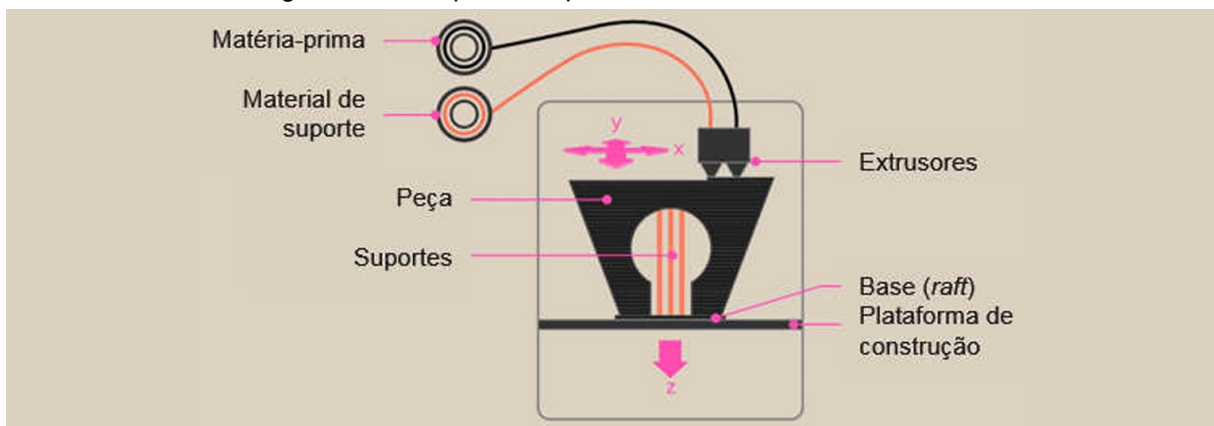
Figura 2 – Principais Componentes de um Sistema de DED



Fonte: Posser (2019, p. 22)

- **Extrusão de material** ou *Material Extrusion* (MEX) é um processo de fabricação aditiva em que a matéria-prima é expelida através de um bico ou orifício (ABNT, 2025). a Figura 3 ilustra essa tecnologia que é comumente chamada de Modelagem por Deposição Fundida (FDM), na qual material termoplástico é fundido por aquecimento e expelido através de um bico que se desloca por uma mesa aquecida reproduzindo o desenho previamente estabelecido pelo *software* (Almeida; Correia, 2016).

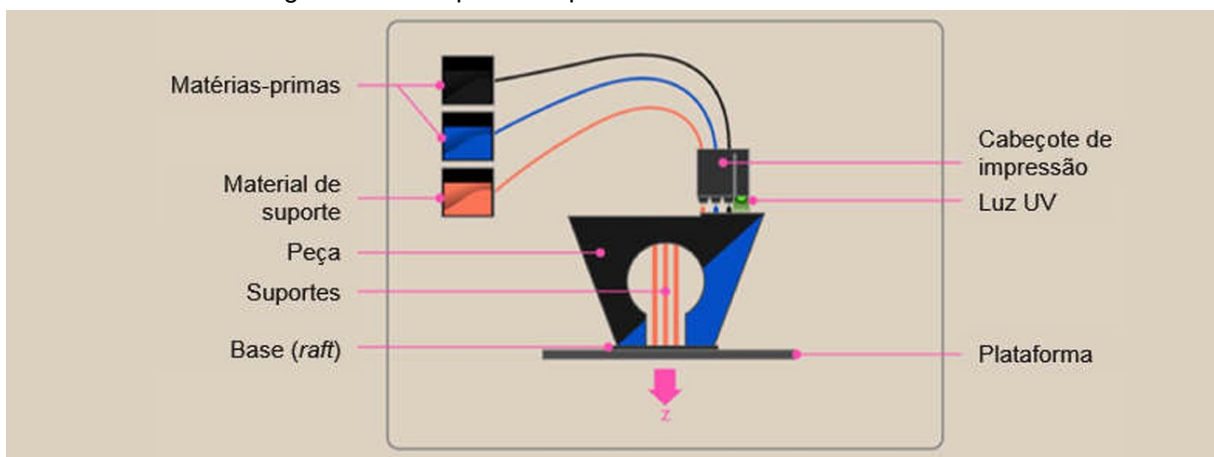
Figura 3 – Principais Componentes de um Sistema de FDM



Fonte: Posser (2019, p. 23)

- **Jateamento de material** ou *Material jetting* (MJT) é um processo de fabricação aditiva em que a deposição e cura de gotículas de matéria-prima é realizada camada por camada para formar a geometria (ABNT, 2025). Segundo Posser (2019) os componentes criados por essa técnica podem ser coloridos desde sua fabricação, ter suas propriedades de rigidez e flexibilidade variando ao longo da geometria a Figura 4 nos mostra o funcionamento dessa tecnologia.

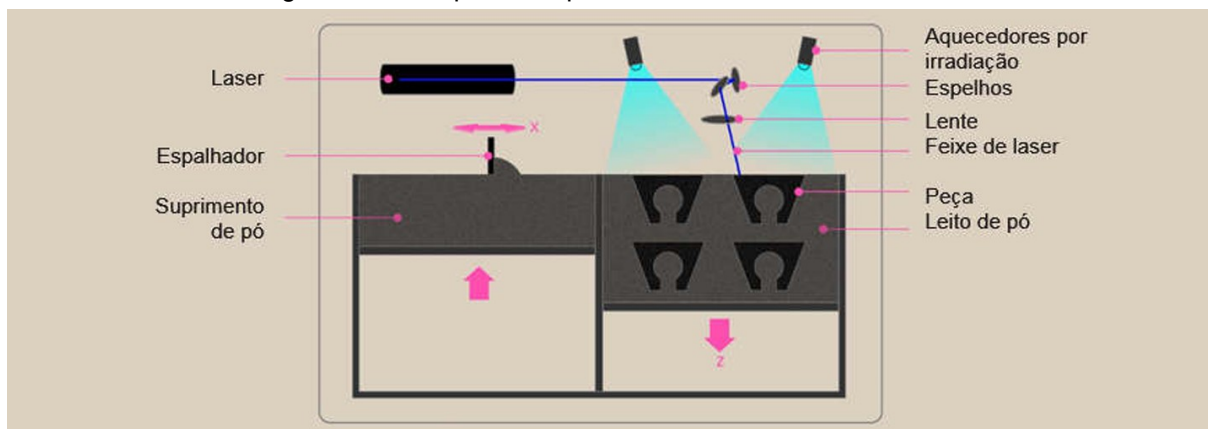
Figura 4 – Principais Componentes de um Sistema de MJT



Fonte: Posser (2019, p. 32)

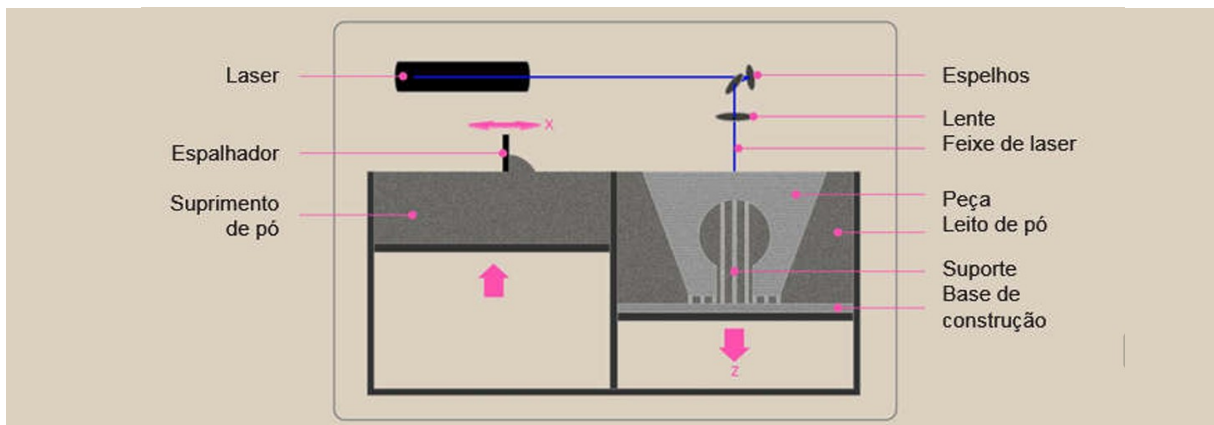
- Fusão em Leito de Pó** ou *Powder Bed Fusion (PBF)* é um processo de fabricação que utiliza de energia térmica para fundir seletivamente as partículas de pó da matéria-prima (ABNT, 2025). Algumas das tecnologias que utilizam esse processo são a *Selective Laser Sintering (SLS)* – Sinterização Seletiva a Laser, que aceita materiais poliméricos e compósitos de base polimérica. A Figura 5 apresenta os elementos que compõem essa tecnologia. No entanto, para a fabricação de peças metálicas desenvolveu-se outra tecnologia a *Selective Laser Melting (SLM)* – Fusão Seletiva a Laser, onde a diferença entre elas está no controle de temperatura. Para a SLM é necessário uma capacidade térmica maior e um controle térmico mais refinado (Posser, 2019). Além disso, a câmara de construção deve ser um ambiente inerte e a vácuo para evitar oxidação do metal (Almeida; Correia, 2016) observa-se na Figura 6 os componentes presentes nessa tecnologia.

Figura 5 – Principais Componentes de um Sistema de SLS



Fonte: Posser (2019, p. 26)

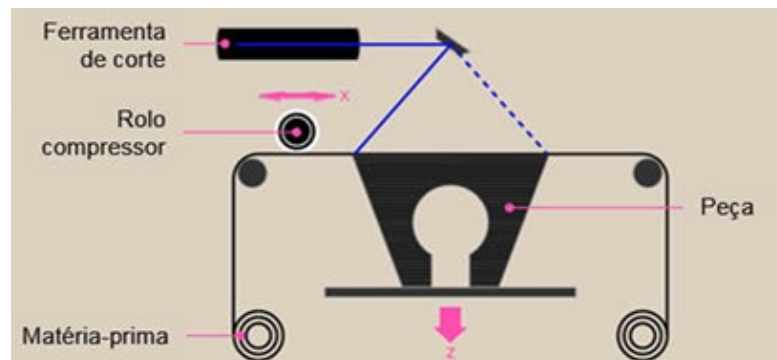
Figura 6 – Principais Componentes de um Sistema de SLM



Fonte: Posser (2019, p. 28)

- **Laminação de folha** ou *Sheet lamination* (SHL) é um processo de fabricação aditiva que une folhas de material para criar a geometria desejada (ABNT, 2025). No mercado esse processo surgiu com a nomenclatura de *Laminated Object Manufacturing* (LOM) – Manufatura de Objetos Laminados, em 1985 pela empresa americana Helisys (Posser, 2019). A Figura 7 ilustra como o processo funciona, onde folhas de material são cortadas de acordo com a necessidade de cada camada.

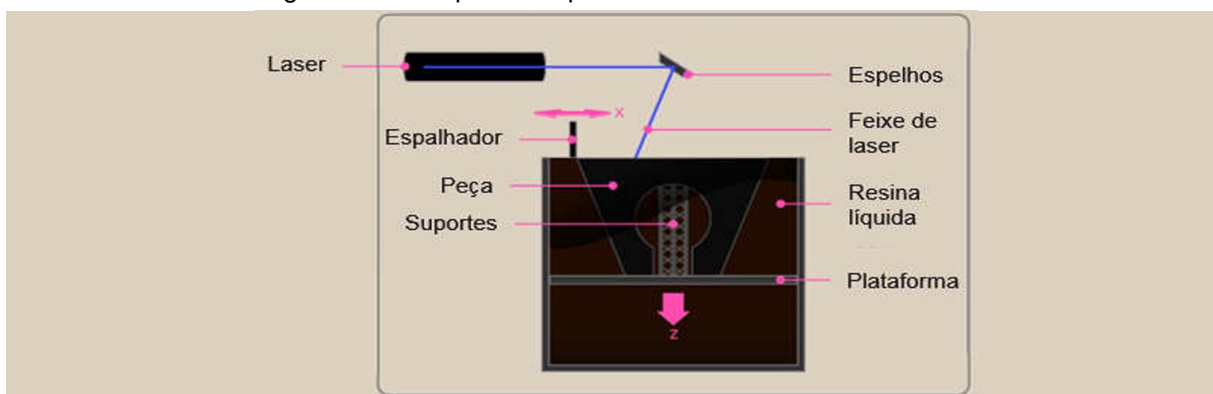
Figura 7 – Principais Componentes de um Sistema de SLM



Fonte: Posser (2019, p. 21)

- **Fotopolimerização em Cuba** ou *VAt Photopolymerization* (VPP) é um processo de fabricação aditiva, em que um polímero foto sensível em uma cuba é curado de forma seletiva, com aplicação de luz (ABNT, 2025). Algumas das tecnologias que apresentam esse processo são a Estereolitografia (SLA) apresentada na Figura 8, que por meio de um laser de alta precisão faz o traçado de cada camada, possibilitando alta resolução e qualidade da superfície (Badotti, 2003), o Processamento Digital de Luz (DLP) que utiliza um projetor de luz para realizar a cura do desenho todo de uma vez, tornando o processo mais rápido se comparado com a tecnologia de SLA (Posser, 2019).

Figura 8 – Principais Componentes de um Sistema de VPP



Fonte: Posser (2019, p. 25)

2.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

A manufatura aditiva se desenvolveu de forma a se tornar potencialmente benéfica para os designers e ainda possui a capacidade de contribuir na sustentabilidade dos produtos. Os benefícios estão visíveis na capacidade de personalização dos produtos de acordo com as preferências do usuário, o que gera valor agregado gerando longevidade para o produto. As tecnologias de MA eliminaram muitas restrições de fabricação, já que, com a construção camada por camada, amplia-se a gama de possibilidades de criação do designer pode expandir outra vez. Com a evolução das tecnologias empregadas na manufatura aditiva, tornou-se possível desenvolver métodos para a redução de pesos com o uso de otimização de topologia assim como o desenvolvimento de materiais que antes não era possível (Diegel *et al.*, 2016).

Apesar das vantagens claras, a manufatura aditiva possui limitações, relacionados a deformação, ao acabamento superficial, ao tempo de processamento e às restrições volumétricas. Conforme novos materiais e métodos se tornam disponíveis os custos se tornam um diferencial limitante, assim como os próprios materiais utilizados, já que se está preso na utilização de um material por vez, não sendo possível criar uma geometria com dois materiais diferentes simultaneamente (Hoskins, 2018).

A empresa 3DLAB (2018), referência nacional em tecnologia de manufatura aditiva, explica as vantagens e desvantagens para a utilização de cada tecnologia de manufatura aditiva, conforme Quadro 1:

Quadro 1 – Manufatura Aditiva (continua)

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens	Indicação
Jateamento de Aglutinante (BJT)	Alta velocidade, produção em cores, baixo custo operacional	Peças menos resistentes, necessidade de infiltração pós-impressão, acabamento médio	Protótipos coloridos, peças decorativas, modelos conceituais
Deposição de Energia Direcionada (DED)	Alta taxa de deposição, ideal para reparos e grandes peças, pode ser usada em campo	Baixa precisão, acabamento ruim, alto custo de equipamento, necessita de pós-processamento	Reparos industriais, peças grandes, manutenção de equipamentos
Extrusão de Material (MEX)	Baixo custo, fácil operação, ampla disponibilidade de materiais	Baixa precisão, linhas de camada visíveis, limitações em geometrias complexas	Protótipos funcionais, peças de baixo custo, uso educacional
Jateamento de Material (MJT)	Excelente acabamento, alta precisão, peças coloridas e detalhadas	Custo elevado, materiais limitados, peças menos resistentes	Protótipos de alta precisão, peças médicas, modelos detalhados

Quadro 01 (conclusão)

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens	Indicação
Fusão de Leito de Pó (PBF)	Alta resistência mecânica, boa precisão, peças funcionais, geometrias complexas	Custo elevado, necessidade de pós-processamento, tempo de produção longo	Peças funcionais, componentes industriais, peças de alta resistência
Laminação de Chapas (SHL)	Baixo custo, materiais variados, boa velocidade	Baixa resistência mecânica, acabamento médio, limitações em geometrias complexas	Protótipos rápidos, modelos de baixo custo, peças não estruturais
Fotopolimerização em cuba (VPP)	Excelente acabamento, alta precisão, detalhes finos	Materiais limitados, peças menos resistentes, custo elevado	Protótipos de alta precisão, peças médicas, modelos detalhados

Fonte: 3DLAB (2018)

2.4 MATERIAIS DA MA

Os processos de manufatura aditiva permitem o uso de uma variedade de materiais. Cada tecnologia desenvolvida utiliza de uma porção específica de matéria-prima. Thompson *et al.* (2016) apresentam, no Quadro 2, uma análise dos tipos de matérias-primas que podem ser aplicadas em cada processo de manufatura aditiva.

Quadro 2 – Materiais X Processo de Manufatura Aditiva

Material	Exemplo de material	Categorias de processos						
		VPP	BJT	DED	MEX	MJT	PBF	SHL
Polímeros termofixos	Epóxis e acrilatos	X				X		
Polímeros termoplásticos	Poliamida, ABS, PPSF		X		X	X	X	x
Madeira	Papel							X
Metais	Aço, titânio, cobalto, liga, cromo		X	X			X	X
Materiais cerâmicos industriais	Alumina, Zirconia, Silicone, nitride	X	X				X	X
Materiais cerâmicos estruturais	Cimento, areia de fundição		X		X		X	
Nota: combinações das classes de materiais acima, por exemplo um compósito, são possíveis.								

Fonte: Adaptado de Thompson *et al.* (2016)

3 DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA (DFAM)

3.1 DESIGN E DFAM

Estuda-se que a ideia de design surgiu muito antes da Revolução Industrial, sendo inicialmente um termo associado a desenho ou esquema - algo desenvolvido para possibilitar a replicação de um objeto pelo homem. O conceito de design industrial nasceu com esse mesmo pensamento, sendo atribuído a quem trabalhava com design na indústria (Bürdek, 2010). Entretanto, foi apenas em 1979, em Berlim, que foram apresentadas características consideradas essenciais para um **bom design**. Desde então, diversos conceitos de design foram propostos. Na virada do século, Bürdek (2010) propôs um pensamento diferente: não buscar uma definição mais precisa, mas sim atribuir função ao design, ou seja, estabelecer problemas que o design precisa atender para ser considerado efetivo.

Para Cardoso (2016), as definições de design são múltiplas, porém, a mais recorrente é a etimologia da palavra, muitas vezes estabelecendo um paralelo com sua equivalente na língua inglesa (*design*) e sua origem no latim (*designare*). No inglês, o termo pode ser interpretado como plano, designação, configuração ou arranjo, não se limitando apenas a elementos criados pelo homem, mas podendo extrapolar para aspectos grandiosos, como o cosmos e o universo, ou minúsculos, como o arranjo celular ou molecular. Já em sua origem latina, o termo é apresentado como uma versão que abrange ambos os sentidos: o de designar/indicar algo e o de desenhar/representar algo. De forma resumida, etimologicamente, *design* é, além de projetar, conceber e atribuir (atos abstratos) também registrar, formatar e configurar (atos concretos) (Cardoso, 2016).

Para Lobach (2001), o processo de design envolve tanto a criação quanto a resolução de problemas. O autor estabelece alguns pontos fundamentais: os problemas a serem solucionados precisam ser devidamente definidos, pois quanto maior a clareza, melhor serão desenvolvidas as etapas seguintes. É necessário adquirir o maior número possível de informações sobre o problema, que devem ser analisadas e relacionadas entre si da forma mais criativa possível. Em seguida, são definidos critérios a serem seguidos e, então, gerado o maior número de ideias possíveis que solucionem o problema sem fugir do que já foi estabelecido. A ideia com maior viabilidade é transformada em um produto, modelo ou *mockup*. Todo esse processo é cíclico e interligado de forma não linear.

Do mesmo jeito que já está estabelecido nos processos de fabricação formativo e subtrativa, em que *Design for Manufacturing and Assembly* – Design para Manufatura e Montagem (DFMA) é fortemente utilizado na resolução de problemas na construção de novos produtos, mantendo a qualidade, porém mais leve, a manufatura aditiva empregada no Design para Manufatura Aditiva – *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) para extrair o máximo que essas tecnologias podem oferecer (Posser, 2019). O trabalho conjunto dessas diretrizes possibilita que a impressão 3D seja explorada de forma eficiente, permitindo a criação de estruturas leves, otimizadas, com maior integração entre os componentes e, inclusive, customização em massa (Hinchy, 2019).

3.2 CONCEITOS E FUNDAMENTOS

Posser (2019) apresenta algumas observações que norteiam um projeto pautado nos princípios de Design for Additive Manufacturing (DfAM). São elas:

- Ao contrário de trabalhar com as restrições tradicionais de um projeto mecânico, se atentar para as limitações que o processo de manufatura escolhido e os materiais disponíveis possui, tendo sempre em mente características específicas de cada tecnologia e de cada material (Posser, 2019).
- Não se prender à geometria, a MA possibilita uma liberdade geométrica muito maior que as manufaturas tradicionais, utilizar dessa liberdade para agregar valor (Posser, 2019).
- Por ser possível produzir uma gama maior de formas, uma coisa a se considerar em um projeto pensado com DfAM é a redução do número de componentes, eliminar ou reduzir o número de peças para montagem integrando funções (Posser, 2019).
- Otimizar a topologia, uma peça topologicamente otimizada é projetada para usar o mínimo de matéria-prima em regiões específicas para garantir a resistência desejada (Posser, 2019).
- Quando projetar com base nos processos de manufatura aditiva levar em consideração a orientação durante a impressão do componente buscando garantir a precisão das dimensões e o acabamento que o método utilizado entrega (Posser, 2019).

3.2.1 DfAM Restritivo

O Design for Additive Manufacturing (DfAM) restritivo se refere a projeto que buscam adaptar a produção de produtos já existentes para que possam ser fabricados por meio da manufatura aditiva (MA). Em vez de explorar das liberdades geométricas e funcionais proporcionadas pelas tecnologias aditivas, o DfAM restritivo limita-se a respeitar e gerenciar as limitações do processo, assegurando que a peça seja manufaturável, confiável e economicamente viável (Thompson, *et al.* 2016; Hinchy, 2019).

De acordo com Thompson *et al.* (2016), o Design for Additive Manufacturing (DfAM) restritivo consiste em reprojeter componentes originalmente concebidos para processos convencionais, de forma que possam ser produzidos com sucesso pelas tecnologias aditivas. Essa adaptação envolve considerações como orientação da peça, necessidade e posicionamento de suportes, limites de volume de construção, acabamento superficial, tolerâncias geométricas e condições de pós-processamento. Assim, o foco principal recai sobre a otimização do processo de fabricação, e não sobre a reinvenção do produto.

Essa abordagem está intimamente relacionada à filosofia do *Design for Manufacturing* (DfM), na qual o designer ajusta o projeto de acordo com as restrições impostas pela tecnologia disponível. Segundo Hinchy (2019), essa forma de pensar ainda predomina entre projetistas que migram de métodos tradicionais para a manufatura aditiva, buscando minimizar falhas, reduzir custos e garantir a reprodutibilidade. O resultado é uma inovação de caráter incremental, na qual o produto mantém sua função e aparência originais, mas é adaptado às condições específicas da MA.

3.2.2 DfAM Oportunista

O *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) oportunista, por outro lado, representa uma abordagem exploratória e inovadora dentro do design para manufatura aditiva. Em vez de adaptar projetos existentes, parte-se do princípio de que o produto deve ser concebido desde o início considerando as possibilidades únicas das tecnologias aditivas. Assim, o *designer* busca aproveitar as liberdades geométricas, materiais e funcionais que a MA oferece, criando formas, estruturas e

soluções impossíveis de serem produzidas por métodos convencionais (Thompson *et al.*, 2016).

Ainda segundo Thompson *et al.* (2016), o Design for Additive Manufacturing (DfAM) oportunista visa maximizar os benefícios da manufatura aditiva, explorando novas geometrias, estruturas internas leves, consolidação de múltiplas peças em um único componente, gradientes de material e integração funcional. Essa abordagem estimula o uso de ferramentas como otimização topológica, *design* generativo e simulação avançada, permitindo que o *designer* busque alto desempenho estrutural, redução de peso, personalização e sustentabilidade.

Conforme destaca Hinchy (2019), esse tipo de projeto rompe com as diretrizes tradicionais do *Design for Manufacturing (DfM)*, pois reconhece que a geometria não é mais um fator limitante na manufatura aditiva (MA). Dessa forma, o *Design for Additive Manufacturing (DfAM)* oportunista substitui a mentalidade de *fazer caber no processo* por uma abordagem voltada à inovação e à exploração do potencial criativo.

3.3 DIRETRIZES E FERRAMENTAS

Para o desenvolvimento de projetos que esteja de acordo com o DfAM é necessário seguir algumas diretrizes com o apoio de ferramentas. Entre as principais diretrizes apresentadas por Hinchy (2019) e Posser (2019), destacam-se:

- Ângulo crítico: de forma geral os autores recomendam que para evitar a necessidade de colocação de suporte, os ângulos críticos não ultrapassem 45° a partir do plano horizontal (Hynchey, 2019; Posser, 2019).
- Diâmetro para furos sem adição de suporte: variando de acordo com o material utilizado e o processo de MA usado, os autores recomendam que o diâmetro para furos fique entre 5 mm e 10 mm (Hynchey, 2019; Posser, 2019).
- Espessura mínima de parede: a resolução do equipamento combinado com o material Para polímeros, varia entre 0,5 mm e 1 mm; para metais, entre 1 mm e 2 mm (Hynchey, 2019; Posser, 2019).

- Orientação de impressão: deve ser escolhida de modo a equilibrar qualidade superficial, tempo de fabricação e resistência mecânica (Hynchey, 2019; Posser, 2019).

Além das diretrizes geométricas, Muthu e Savalani (2016) destacam que o DfAM também se apoia em ferramentas metodológicas e de suporte ao *design*, tais como:

- *Checklists* de verificação de projetabilidade, para garantir que os parâmetros críticos sejam atendidos (Muthu; Savalani, 2016).
- Análise de estudos de caso e *benchmark*, com base em projetos previamente otimizados (Muthu; Savalani, 2016).
- Sessões de *brainstorming* e simulações computacionais, que auxiliam na exploração de novas configurações estruturais e funcionais (Muthu; Savalani, 2016).
- *Softwares* específicos, como *Magics*, *Simplify3D*, *Ansys* e *Creo Parametric*, empregados para otimização topológica, análise de tensões e geração de suportes (Muthu; Savalani, 2016).

De acordo com Muthu; Savalani, (2016), o uso da DfAM contribui não apenas para a eficiência do processo, mas também para a sustentabilidade ambiental.

3.4 OTIMIZAÇÃO NO DESIGN PARA MANUFATURA ADITIVA

A otimização constitui uma etapa muito importante do Design para Manufatura Aditiva (DfAM), sendo aplicada com o objetivo de melhorar o desempenho estrutural, reduzir o consumo de material e adaptar o produto às possibilidades e restrições dos processos aditivos. De acordo com Hinchey (2019), a manufatura aditiva oferece uma liberdade geométrica sem precedentes, o que amplia o papel da otimização na busca por estruturas mais eficientes e leves, compatíveis com as capacidades de impressão tridimensional.

Segundo Thompson *et al.* (2016), a aplicação de técnicas de otimização permite repensar o design de componentes, resultando em produtos com maior desempenho estrutural e menor massa, explorando a liberdade geométrica oferecida pelos processos aditivos. Assim, a otimização torna-se não apenas uma ferramenta

de engenharia, mas também um instrumento estratégico de inovação no *design*, permitindo desenvolver produtos antes inviáveis por métodos convencionais.

A literatura divide o processo de otimização em três categorias principais: otimização de tamanho, otimização de forma e otimização de topologia (Hinchy, 2019; Thompson *et al.*, 2016). Essas etapas representam níveis crescentes de complexidade computacional e liberdade de projeto, sendo aplicadas de forma complementar, conforme os objetivos e as restrições do produto.

3.5 OTIMIZAÇÃO DE TAMANHO

A otimização de tamanho (*size optimization*) refere-se ao ajuste das dimensões e espessuras de elementos estruturais já definidos, sem alterar a geometria global da peça. Segundo Posser (2019), esse tipo de otimização é aplicado no desenvolvimento do modelo, configurando espessuras, comprimentos e diâmetros de acordo com as solicitações mecânicas e os limites de fabricação.

Essa abordagem é particularmente útil em situações em que o projeto já possui um modelo geométrico consolidado e busca-se melhorar o desempenho estrutural sem alterar o formato da peça, reduzindo massa e custos de material. Como destaca Hinchy (2019), a otimização de tamanho é frequentemente o primeiro passo antes de técnicas mais complexas, sendo compatível com análises de elementos finitos (FEA) e softwares de simulação estrutural.

3.6 OTIMIZAÇÃO DE FORMA

A otimização de forma (*shape optimization*) vai além do ajuste dimensional, promovendo alterações controladas nas fronteiras e superfícies da geometria, com o intuito de melhorar a distribuição de tensões e reduzir concentrações de esforços. Segundo Thompson *et al.* (2016), a otimização de forma altera as fronteiras geométricas de um modelo, removendo material onde ele é menos eficiente estruturalmente e reforçando regiões críticas.

Essa técnica depende fortemente da integração entre o *software* de *design* e ferramentas de simulação. Em ambientes de DfAM, a otimização de forma é essencial para adequar o modelo às condições de impressão, ajustando espessuras

mínimas de parede, ângulos críticos e orientações que reduzam a necessidade de suportes, conforme as diretrizes indicadas por Hinchy (2019).

Dessa forma, a otimização de forma atua como uma ponte entre o projeto conceitual e a manufatura, permitindo refinar o produto com base em critérios funcionais e tecnológicos.

3.7 OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA

A otimização de topologia (*topology optimization*) é considerada a abordagem mais avançada e transformadora dentro do DfAM. Ela permite redefinir completamente a distribuição de material em um domínio de projeto, sem estar vinculada à geometria inicial. Segundo Thompson *et al.* (2016), a otimização topológica busca a melhor configuração possível de material dentro de um volume definido, atendendo a restrições de carga, deslocamento e massa.

Hinchy (2019) reforça que a otimização topológica é particularmente adequada à manufatura aditiva, uma vez que essa tecnologia possibilita fabricar estruturas complexas, contínuas e com geometrias orgânicas - resultados típicos desse tipo de otimização. Posser (2019) aplicou essa técnica na adaptação de um cilindro de motor para impressão 3D, obtendo redução de 29% da massa total e eliminação de componentes auxiliares de montagem, o que exemplifica a capacidade da otimização topológica de integrar funções e consolidar peças. Em síntese, enquanto a otimização de tamanho e forma aperfeiçoa modelos existentes, a otimização topológica redefine completamente o design, explorando o potencial máximo da manufatura aditiva para criar produtos mais leves, resistentes e eficientes.

A aplicação das técnicas de otimização no DfAM representa um salto conceitual e metodológico no desenvolvimento de produtos. Por meio da integração entre ferramentas computacionais e processos aditivos, é possível alcançar soluções inovadoras de projetos, que conciliam desempenho estrutural, sustentabilidade e liberdade de design. Conforme Thompson *et al.* (2016) ressaltam, a otimização em DfAM não é apenas uma etapa técnica, mas uma estratégia de inovação orientada pela eficiência e pela criatividade.

3.7.1 Métodos de Otimização de Topologia

A Otimização Topológica (TO) consiste em uma técnica computacional que busca distribuir o material de forma ideal dentro de um domínio de projeto, considerando restrições mecânicas, geométricas e de fabricação (Sotomayor; Caiazzo; Alfieri, 2021). Conforme descrevem Thompson *et al.* (2016) e Hinchy (2019), a otimização topológica permite identificar a configuração estrutural que oferece a melhor relação entre rigidez e massa, dentro de um volume ou espaço de projeto previamente definido.

Segundo Sotomayor, Caiazzo e Alfieri (2021), os métodos de otimização topológica (TO) podem ser classificados de acordo com a necessidade ou não de calcular as informações de gradiente das funções objetivas. Essa classificação os divide em duas categorias: os métodos determinísticos, que se baseiam no cálculo de gradiente, e os métodos estocásticos, de caráter heurístico.

A otimização topológica pode ser baseada em gradiente ou em heurísticas. Os métodos de gradiente utilizam derivadas para encontrar a solução ótima de forma determinística, enquanto os métodos heurísticos - como algoritmos genéticos e otimização por enxame de partículas - buscam soluções próximas do ótimo global por meio de técnicas inspiradas na natureza (Muthu; Savalani, 2016; Sotomayor; Caiazzo; Alfieri, 2021).

A otimização de estruturas por preenchimento utiliza redes internas para mitigar o problema de blindagem de tensão - situação em que a carga não é distribuída corretamente - e pode, inclusive, gerar maior compatibilidade com o corpo humano em projetos que têm como premissa a biocompatibilidade, como próteses. Entre suas vantagens, destacam-se a resistência aliada à leveza, a melhoria da rigidez estrutural (uma vez que o material é empregado apenas onde é necessário) e a capacidade de absorção de impacto decorrente da configuração vazada. Esses padrões podem ser criados de duas formas: como padrões regulares e repetitivos, que se distribuem uniformemente, ou de maneira controlada, conforme a necessidade do projeto (Sotomayor; Caiazzo; Alfieri, 2021).

De modo geral, a escolha do método depende do nível de complexidade geométrica, da disponibilidade computacional e das propriedades mecânicas

desejadas. Para Posser (2019), a integração entre essas abordagens e o DfAM tem o potencial de viabilizar o desenvolvimento de componentes otimizados que aliam leveza estrutural e eficiência mecânica, aproveitando as liberdades geométricas da manufatura aditiva.

3.8 DESIGN GENERATIVO

Sotomayor, Caiazzo e Alfieri (2021) apresenta o *design* generativo como uma abordagem que utiliza inteligência artificial e algoritmos para gerar automaticamente uma variedade de soluções de projeto. Na prática, o *design* generativo segue um fluxo iterativo: o designer define restrições geométricas, materiais disponíveis, direções de carga, limites de peso e condições de fixação, em seguida, *softwares* como Autodesk Fusion 360, nTopology ou SolidThinking Inspire executam variações automáticas, produzindo uma variedade de geometrias possíveis.

Sotomayor, Caiazzo e Alfieri (2021) ainda explica que se trata de um avanço em relação à otimização topológica tradicional, pois gera não apenas uma solução ótima, mas diversas alternativas viáveis, permitindo ao projetista avaliar e escolher entre diferentes combinações de desempenho e estética.

3.9 FERRAMENTAS E SUA INTEGRAÇÃO NO FLUXO DE TRABALHO DFAM

O Design para Manufatura Aditiva exige um conjunto de ferramentas computacionais integradas que apoiam todo o ciclo digital do produto - desde a modelagem até a fabricação (Thompson *et al.*,2016). Essas ferramentas são conhecidas como *Computer-Aided Technologies (CAx)*, que englobam sistemas de Projeto Auxiliado por Computador (CAD - *Computer-Aided Design*), Engenharia Auxiliado por Computador (CAE - *Computer-Aided Engineering*) e Fabricação Auxiliado por Computador (CAM - *Computer-Aided Manufacturing*).

De acordo com Sotomayor, Caiazzo e Alfieri (2021), o fluxo de trabalho DfAM é caracterizado pela integração entre ambientes de projeto, simulação e manufatura, permitindo uma retroalimentação contínua de dados entre as etapas de concepção e produção. Os autores observam que essa integração digital é o que diferencia o DfAM das práticas convencionais de design, uma vez que a manufatura aditiva é conduzida diretamente a partir de dados digitais tridimensionais.

3.9.1 Ferramentas CAD

Usualmente as geometrias são desenvolvidas, principalmente, na modelagem em sistemas CAD 3D, no entanto essa primeira etapa pode vir de outras formas como a partir de *scanners* 3D, tomografia computadorizada, microtomografia, ressonância magnética, ultrassonografia 3D, fotogrametria, entre outros, porém, posteriormente há necessidade de se trabalhar os arquivos recebidos em ferramentas CAD (Volpato, 2016).

Thompson *et al.* (2016) nos mostra um esquema onde o processo se inicia com a utilização de ferramentas CAD, para modelar a geometria tridimensional da peça. Ferramentas como *SolidWorks*, *Autodesk Fusion 360*, *PTC Creo*, *CATIA* e *Siemens NX* são amplamente utilizadas. Segundo Thompson *et al.*(2016) e Hinchy (2019), esses softwares permitem definir geometrias paramétricas e restrições, sendo a base para as análises posteriores. Além disso, muitos deles possuem módulos nativos de DfAM, capazes de verificar espessuras mínimas, ângulos de saliência e necessidade de suportes, auxiliando o projetista na adequação do modelo às restrições da manufatura aditiva.

3.9.2 Ferramentas CAE

Podemos ver em Volpato (2016) que as ferramentas CAE são utilizadas para análises estruturais, térmicas e de otimização, normalmente empregando métodos de elementos finitos (FEM/FEA). *Softwares* como *Autodesk Fusion 360*, *ANSYS*, *Abaqus*, *Altair OptiStruct*, *nTopology* e *Simulia* são citados nos textos de Nieto e Sánchez (2021) como opções para avaliar o comportamento mecânico das peças otimizadas. Essas ferramentas auxiliam na execução de otimizações de forma e topologia, simulando como a peça responderá às condições de carga.

Thompson *et al.* (2016) destacam que a otimização estrutural e de topologia é intrinsecamente dependente da integração CAE–CAD, pois o resultado da simulação deve ser interpretado e convertido em geometria fabricável dentro do mesmo ambiente digital.

3.9.3 Ferramentas CAM

Os *softwares* CAM convertem o modelo otimizado em instruções para a impressora 3D. Essa etapa envolve fatiamento digital, geração de suportes e

definição de parâmetros de impressão, como espessura de camada, velocidade e orientação de construção (Volpato, 2016).

De acordo com Posser (2019), a etapa de fatiamento representa a transição do modelo tridimensional para o domínio da manufatura, sendo responsável por determinar o caminho de deposição do material e os parâmetros de construção, que garantem a qualidade da peça, softwares como slic3r, Simplify3D, Ultimaker Cura, podem ser utilizados para esse fim.

3.10 FLUXO DE TRABALHO DFAM

Sotomayor, Caiazzo e Alfieri (2021) apresentam que o fluxo e trabalho tradicional da manufatura é linear e focado na transformação de modelos digitais em peças físicas enquanto o fluxo de trabalho do *Design for Additive Manufacturing (DfAM)* é iterativo e multidisciplinar, unindo modelagem, simulação e manufatura em um ambiente digital contínuo. Destacam ainda quatro fases importantes desse fluxo de trabalho, que correspondem a:

- **Planejamento:** nesta fase o modelo digital é desenvolvido, os requisitos físicos e mecânicos são estabelecidos assim como as restrições do produto. Também são realizadas análises de viabilidade estrutural e definida a tecnologia aditiva que será utilizada (Sotomayor; Caiazzo; Alfieri, 2021).
- **Otimização:** nessa segunda fase os autores explicam que é escolhida uma estratégia de otimização, que gere os melhores resultados de acordo com os requisitos apresentados na fase de planejamento (Sotomayor; Caiazzo; Alfieri, 2021).
- **Manufatura:** nesta etapa são definidos os parâmetros de impressão da peça física. Determina-se a necessidade de suportes e sua otimização, visando máxima eficiência com mínimo consumo de material (Sotomayor; Caiazzo; Alfieri, 2021).
- **Validação:** após a impressão da peça, é feito o pós-processamento (acabamento) quando necessário, e testes de uso para verificar se o produto atende aos requisitos de qualidade planejados (Sotomayor; Caiazzo; Alfieri, 2021).

4 AMPUTAÇÕES E AS TECNOLOGIAS ASSISTIDAS

A amputação é um procedimento terapêutico utilizado em diversas doenças com o objetivo de promover a melhoria da condição do paciente. Essa técnica consiste na extração total ou parcial de um membro. Antes e após a adoção desse método extremo, destinado a garantir a saúde e o bem-estar do indivíduo, algumas medidas são tomadas para assegurar que o paciente esteja ciente das possibilidades e do necessário, de acordo com as escolhas realizadas pelo próprio paciente e pela equipe multiprofissional responsável pelo acompanhamento (Brasil, 2013).

Apesar de a busca por recursos auxiliares para pessoas com membros amputados ser de longa data, foi somente após as grandes guerras mundiais que os governos passaram a intervir de forma mais intensa, gerando avanços significativos em todo o ciclo: desde a melhoria das técnicas cirúrgicas até o aprimoramento das tecnologias utilizadas em órteses, próteses e nos meios auxiliares de locomoção, as chamadas tecnologias assistivas (Brasil, 2019).

O Ministério da Saúde define prótese como um dispositivo destinado a substituir total ou parcialmente um membro ou órgão do corpo, podendo ser permanente ou transitório (Brasil, 2019). Ainda segundo o Ministério da Saúde as próteses podem ser classificadas em diferentes categorias: internas ou implantadas (como próteses articulares, substituição de órgãos ou ligamentos); externas, geralmente utilizadas para membros superiores; implantadas de forma total ou parcial; ou percutâneas, como no caso de implantes dentários e pele artificial (Brasil, 2019).

Além dessa classificação, o Ministério da Saúde apresenta que as próteses podem ser convencionais, também chamadas de exoesqueléticas, caracterizadas por uma estrutura externa rígida que busca proporcionar ao usuário sustentação e bom acabamento estético. Podem ser ainda endoesqueléticas ou modulares, nas quais existe uma estrutura interna modular responsável por garantir a sustentação (Brasil, 2019).

A produção dos componentes utilizados nas próteses ocorre por meio de processos industriais, o que permite a rápida alteração desses elementos, seja para ajustes, reparos ou substituições. No Brasil, até o momento, os materiais

empregados em próteses endoesqueléticas para garantir a sustentação são o aço, o alumínio e o titânio, cada um com características próprias que devem ser consideradas na confecção da prótese (Brasil, 2019).

As partes que compõem as próteses variam de acordo com o tipo de amputação que o paciente apresenta. A Figura 9 ilustra os diferentes níveis de amputação e as próteses que podem ser indicadas em cada caso. O esquema desenvolvido pela Confortpés (c2025) utiliza o corpo da nadadora paralímpica Camile Rodrigues para representar graficamente os níveis de amputação, a nomenclatura correspondente e, conseqüentemente, a classificação das próteses aplicáveis.

Figura 9 – Nomenclatura de Tipos de Próteses para Membros Inferiores



Fonte: CONFORPÉS (c2025)

4.1 USUÁRIOS DE PRÓTESES

Uma análise realizada por Borges (2024) compilou informações sobre as percepções de usuários de próteses. O estudo evidenciou alguns descontentamentos relacionados à estética dos dispositivos e apontou que determinadas alterações poderiam gerar maior aceitação. Um aspecto destacado foi a valorização da possibilidade de personalização da parte externa das próteses, tornando-as mais expressivas e alinhadas às preferências individuais dos usuários.

Borges (2024) destaca ainda que um ponto recorrente de insatisfação, e que muitas vezes leva à desistência do uso, está relacionado ao peso dos dispositivos. Para alguns usuários, o excesso de peso torna-se um empecilho à utilização,

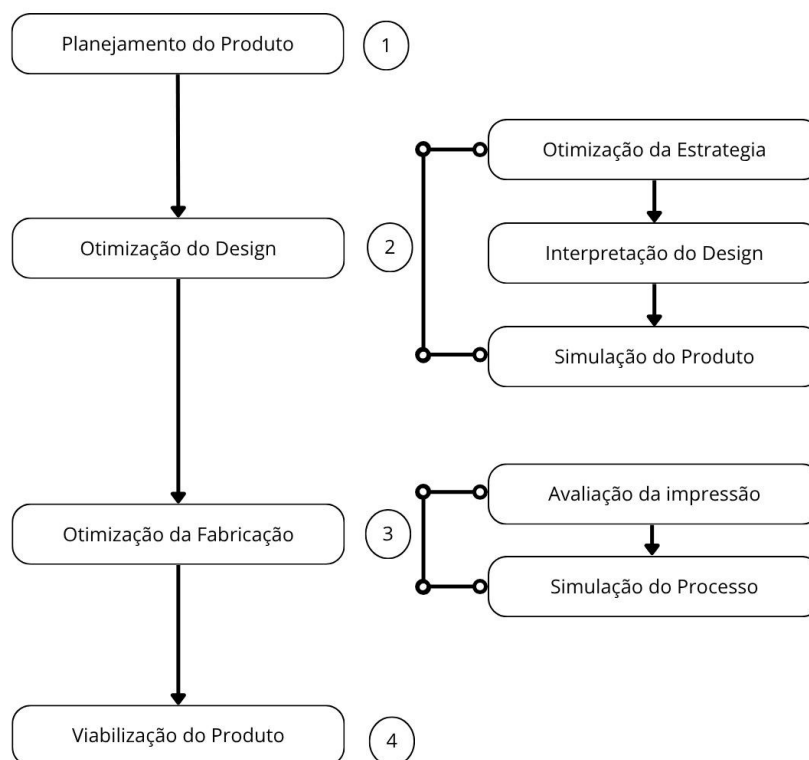
especialmente para aqueles que não possuem força suficiente para manusear o dispositivo de forma confortável.

5 METODOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO COM DFAM

O presente trabalho iniciou-se com a busca por compreender o *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) e suas possíveis aplicações em produtos. Como forma de aplicar as informações adquiridas, foram utilizadas referências de estudo de caso de Borges (2024), que reúne uma breve amostra de usuários de próteses. A partir desse levantamento, foram identificados alguns requisitos considerados relevantes, lembrando que, assim como as próteses, as capas protéticas também precisam se ajustar às necessidades individuais do usuário.

Conforme sugerido por Sotomayor, Caiazzo e Alfieri (2021), e explicado no capítulo de ferramentas, apresenta-se a seguir uma visão mais detalhada do fluxo de trabalho com aplicação do DfAM, ilustrado no Esquema 1, que reúne as principais etapas do desenvolvimento.

Esquema 1 – Plano de Trabalho voltado para DfAM e Otimização



Fonte: Sotomayor, Caiazzo e Alfieri (2021)

- **Primeira etapa – planejamento do produto**

A etapa um consiste no planejamento do produto. Nessa fase, são definidos o que será produzido, as necessidades dos usuários com base em pesquisa bibliográfica, as funcionalidades do produto, suas características físicas e

mecânicas, custos, tecnologias e materiais, além da apresentação do modelo 3D elaborado a partir dessas informações. O objetivo é responder a algumas perguntas iniciais que ajudam a delimitar o produto. Entre os questionamentos mais comuns estão os apresentados no Quadro 3:

Quadro 3 – Questionamentos para o Planejamento do Produto

Critério	Descrição
Perfil do usuário	Idade, gênero, nível de atividade física, tipo de prótese que utiliza (membro superior, inferior, tipo específico) e se existem restrições médicas
Objetivo da capa	Proteção da prótese, melhoria estética, conforto, camuflagem ou personalização visual
Conforto e Ajuste	Preferências do usuário quanto ao material (flexível, rígido, respirável), facilidade de colocação e retirada da capa
Peso e dimensionamento	Limitação quanto ao peso adicional e dimensões que não prejudiquem a função da prótese
Estilo e aparência	Preferências visuais, cores, texturas, possibilidade de personalização ou modularidade
Material e Impressão	O material utilizado será um polímero, e as tecnologias de impressão serão escolhidas de acordo com a capacidade de processamento desse material. A definição da técnica mais adequada será orientada pelas observações obtidas a partir dos esboços desenvolvidos

Fonte: Borges (2024) e Sotomayor, Caiazzo e Alfieri (2021)

- **Segunda Etapa – Otimização do Design**

A etapa dois corresponde à otimização de design, aplicando métodos de otimização com a ajuda do software de computador AutoDesk Fusion 360 disponibilizado pela faculdade. Nessa parte faremos os testes que determinam as modificações necessárias.

- **Terceira Etapa – Otimização da manufatura**

A etapa três corresponde à seleção da impressora e do material escolhido, de modo a atender da melhor forma ao design definido. Nessa fase, realiza-se a impressão do modelo para teste, permitindo a verificação prática das escolhas realizadas.

- **Quarta Etapa – Viabilidade do Produto**

A etapa quatro corresponde à validação do produto. Nessa fase, é impressa uma peça destinada à realização de testes físicos e funcionais, permitindo verificar se o modelo atende aos requisitos previamente definidos.

5.1 DESENVOLVIMENTO DE CAPA PARA PRÓTESE MODULAR

Nesta seção, apresentamos a proposta para o desenvolvimento da estrutura e do sistema de encaixe de uma capa para prótese ortopédica modular, fundamentada nas diretrizes do *Design for Additive Manufacturing* (DfAM).

5.1.1 Planejamento do Produto

Perfil do usuário – o público-alvo compreende usuários de diferentes faixas etárias e de ambos os gêneros, considerando a possibilidade de personalização. O produto é voltado para próteses ortopédicas modulares destinadas a membros inferiores.

Objetivo da capa – o objetivo principal da capa para prótese é proteger a estrutura e os mecanismos internos, sem desconsiderar a melhoria estética do dispositivo, já que a técnica utilizada possui elevado potencial de personalização.

Peso e dimensionamento – quanto ao peso e ao dimensionamento, a proposta inicial prevê que o projeto apresente estética semelhante ao membro saudável, nos casos em que o usuário possua apenas uma prótese, sem acrescentar peso significativo que comprometa a adaptação e a utilização. Esse aspecto foi apontado como preocupação pelos entrevistados na pesquisa de Borges (2024), sendo retomado neste trabalho.

Estilo e aparência – embora a pesquisa de Borges (2024) traga informações relevantes sobre estilo e aparência, este trabalho não terá esse aspecto como foco principal. A proposta busca apenas reduzir o aspecto **robotizado** que algumas próteses podem apresentar.

5.1.2 Requisitos

Para aplicação dos princípios do DfAM no desenvolvimento de uma capa para prótese modular de membro inferior, com foco em aspectos estruturais e de fixação alguns requisitos foram seguidos.

- **Requisitos Funcionais Atendidos:**
 - Sistema de fixação integrado, permitindo encaixe seguro na prótese.
 - Design adaptado às dimensões padrão de próteses de membro inferior.

- Possibilidade de personalização estética sem comprometer a função.
- **Requisitos Não Funcionais Atendidos:**
 - Redução de peso da peça por meio de otimização geométrica.
 - Produção viável em impressão 3D, com menor desperdício de material.
 - Superfícies projetadas para conforto e ergonomia.
 - Durabilidade assegurada por escolha adequada de materiais.
- **Restrições Consideradas:**
 - Processo de fabricação restrito à manufatura aditiva.
 - Compatibilidade com próteses modulares já existentes.

5.1.3 Análise de Materiais e Tecnologias de Impressão

Para o desenvolvimento da capa de prótese, com base em acabamento, estética, resistência e durabilidade as principais tecnologias de manufatura aditiva que foram levadas em consideração são SLS, SLA, FDM, BJT, MJT. No Quadro 4 um resumo de cada processo e suas indicações específicas, para serem analisadas:

Quadro 4 – Tecnologia x Níveis de Qualidade

Tecnologia	Acabamento	Estética	Resistência	Durabilidade	Indicado para
SLS	Muito bom	Bom	Alta	Alta	Peças funcionais duráveis
SLA	Excelente	Excelente	Média-baixa	Média	Peças detalhadas, estéticas
FDM	Médio	Médio	Boa	Média-baixa	Protótipos, baixo custo
BJT	Médio	Médio	Média	Média	Produção média, custo equilibrado
MJF	Bom	Bom	Alta	Alta	Peças resistentes e estéticas

Fonte: Adaptado de 3DLAB (2018)

Analisando o Quadro 4, observa-se que, dentre as cinco tecnologias de manufatura aditivas avaliadas para o projeto, as que possibilitam melhor qualidade para o produto são a *Selective Laser Sintering* (SLS) e a *Multi Jet Fusion* (MJF). A sinterização seletiva a laser (SLS) destaca-se por proporcionar tanto um excelente acabamento quanto elevada resistência mecânica, características que atendem diretamente às expectativas em relação ao desempenho do produto.

Após a definição da tecnologia a ser utilizada, procede-se à seleção da matéria-prima que será aplicada no projeto. No caso da sinterização seletiva a laser (SLS), os materiais disponíveis devem estar em forma de pós finos. O Quadro 5, reúne algumas possibilidades de materiais, considerando como critério principal a característica de resistência.

Quadro 5 – Materiais, Características e Indicação de uso

Polímero	Características Principais	Indicações de Uso
PEBA	Alta elasticidade, resistência térmica e química	Produtos esportivos, médicos, flexíveis
PA12	Alta resistência mecânica, baixa absorção de água	Peças funcionais, protótipos, componentes industriais
PA6	Boa resistência mecânica, térmica e ao desgaste	Aplicações industriais, componentes mecânicos
PE	Leve, resistente à umidade e química	Recipientes, peças flexíveis, uso geral
ABS	Boa resistência ao impacto, fácil acabamento	Protótipos, peças mecânicas de média resistência

Fonte: Adaptado de 3DLAB (2018)

Dentre as opções apresentadas no Quadro 5, podem ser utilizados o *Nylon 6* (PA6), o *Nylon 12* (PA12) e o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). O PA6 e o PA12 são amplamente aplicados em peças industriais, o que indica sua boa resistência ao desgaste. Já o ABS destaca-se pela facilidade de acabamento, embora apresente resistência mecânica considerada mediana.

5.1.4 Levantamento de Restrições de Design para AM

Assim como nas manufaturas tradicionais, a manufatura aditiva também apresenta restrições que devem ser consideradas na produção de peças. Nos processos de fusão em leito de pó (PBF - *Powder Bed Fusio*), mais especificamente na sinterização seletiva a laser (SLS), destacam-se as seguintes limitações:

- Custo elevado tanto o equipamento quanto a matéria-prima.
- Limitação de volume máximo da peça devido ao espaço útil da máquina.
- Peças tendem a ser mais porosas, necessitando de pré-processamento para garantir resistência e acabamento.
- Taxa de encolhimento maior, gerando distorções e deformações.
- Anisotropia nas propriedades mecânicas dependendo da orientação da peça.

- Qualidade de acabamento inicial baixa necessitando pós-processamento para qualidade estica.
- Tempo de produção relativamente longo.
- Necessita controle rigoroso da temperatura do leito para evitar falhas e defeitos na peça.
- Necessidade de ambiente controlado e manejo cuidadoso do pó para evitar contaminação e degradação do material.

Essas restrições indicam que a tecnologia SLS é particularmente adequada para a produção de protótipos funcionais, peças com geometria complexa e pequenos lotes, mostrando-se eficiente em aplicações personalizadas que exigem elevada resistência mecânica. Diferentemente de outras tecnologias, a SLS não requer estruturas de suporte, o que reduz o consumo de material. Além disso, possibilita a utilização de materiais que oferecem alta resistência com menor peso, atendendo às necessidades de desempenho e ergonomia do produto.

5.1.5 Ideação e Geração de Conceitos

Após a análise dos requisitos do projeto e das limitações tanto do processo de manufatura escolhido (SLS) quanto dos materiais selecionados (PA6 e PA12) para o desenvolvimento da capa de prótese modular, o primeiro passo consistiu em compreender as dimensões de um exemplar de prótese. Por se tratar de um dispositivo altamente personalizado para cada indivíduo, há pouca disponibilidade de informações técnicas padronizadas. No entanto, por meio de pesquisas em bancos de projetos 3D, como o 3D Warehouse (SketchUp), foi possível localizar uma prótese escaneada aplicada em um usuário. Conforme ilustrado na Figura 10, o modelo encontrado corresponde a uma prótese transfemoral; portanto, neste trabalho será desenvolvido um protótipo de capa voltado para a região da tíbia.

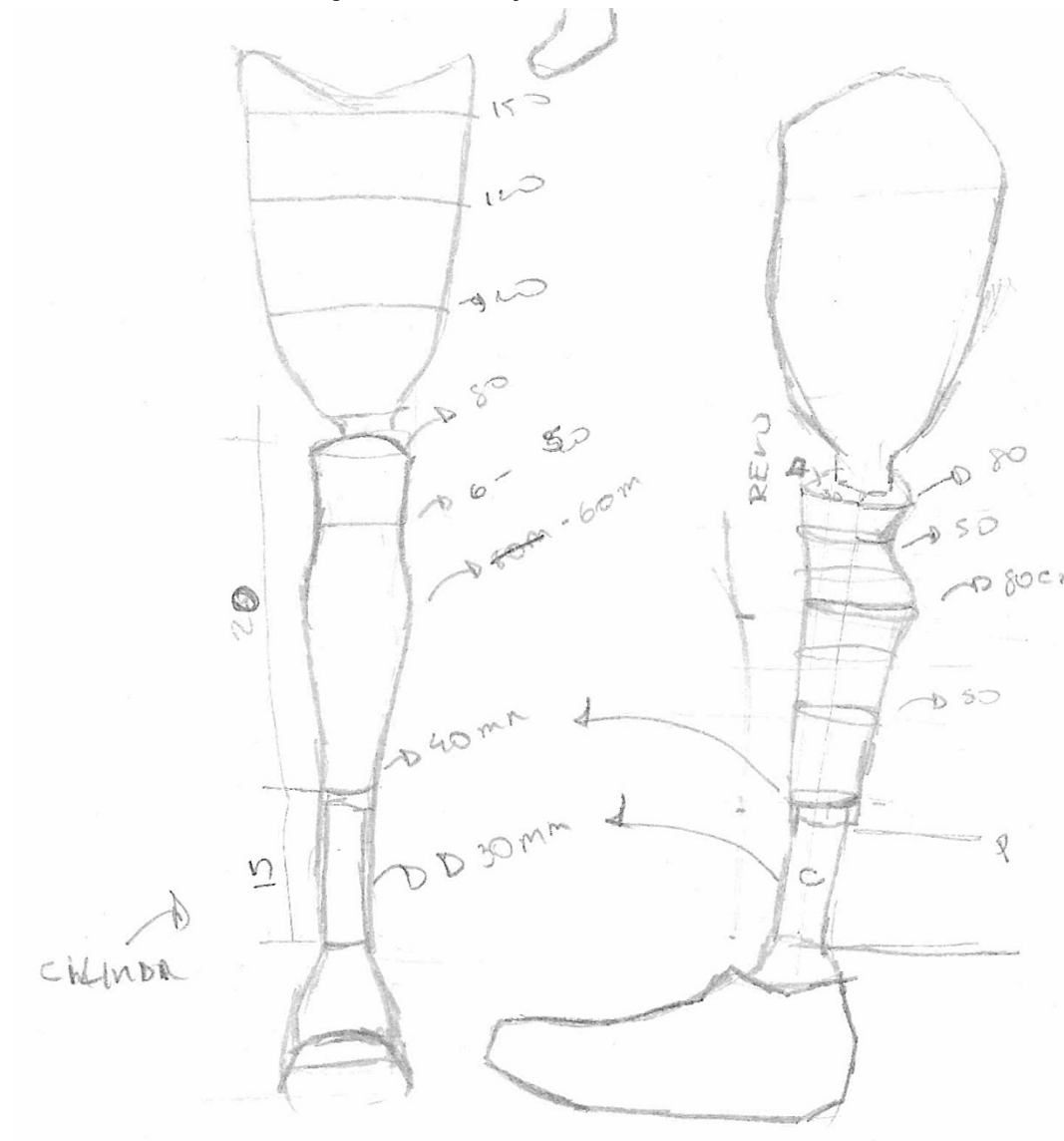
Figura 10 – Prótese Escaneada – Modelo 3D



Fonte: 3DWAREHOUSE (2016)

A partir da obtenção do projeto 3D, foi possível extrair informações referentes ao tamanho aproximado (diâmetro e altura) e à forma do modelo em questão. Com base nesses dados, iniciaram-se os primeiros esboços da prótese, com o objetivo de compreender seu funcionamento e registrar medidas aproximadas obtidas no projeto 3D, facilitando a reprodução digital, caso necessário. Essas informações estão apresentadas na Figura 11. Paralelamente, foram realizadas pesquisas em bancos de imagens na internet para analisar próteses semelhantes ao modelo 3D, de modo a compreender melhor sua estrutura e funcionamento. Esse levantamento permitiu elaborar uma reprodução da prótese, sobre a qual foi desenvolvido o protótipo da capa correspondente ao modelo estudado utilizando o Autodesk Fusion 360.

Figura 11 – Esboço de Prótese Modular



Fonte: Autoria Própria (2025)

Em seguida, foram impressos em folhas A4 modelos de prótese transfemoral e transtibial, utilizados como base para o desenvolvimento dos esboços da capa protética. Nessa etapa, iniciou-se a definição da geometria externa da capa. Inicialmente, pensava-se em um formato liso; contudo, com a liberdade geométrica possibilitada pelos projetos destinados à manufatura aditiva, a forma evoluiu para algo mais orgânico, em uma tentativa de imitar um membro humano. Conforme ilustrado na Figura 12, os primeiros esboços apresentavam linhas mais retas, que posteriormente foram se tornando mais curvilíneas.

Figura 12 – Esboço da Capa da Prótese Modular



Fonte: Autoria Própria (2025)

Após a definição da forma externa da capa, iniciou-se a etapa de estudo dos encaixes responsáveis por fixá-la à prótese. Para isso, foram realizadas pesquisas adicionais em bancos de imagens na Internet, com o objetivo de observar como as capas existentes são atualmente fixadas. Conforme ilustrado nas Figura 13, 14 e 15, verificou-se que alguns modelos utilizam sistemas de fixação por meio de parafusos, enquanto outros empregam ímãs.

Figura 13 – Capa para Prótese Transtibial Confetti



Fonte: MAGALU [c2025]

Figura 14 – Capa Para Prótese Transfemoral – Amputação Acima do Joelho/encaixe magnético



Fonte: Mercado Livre [c2025]

Figura 15 – Capa Para Prótese Transfemoral - Amputação Acima Do Joelho encaixe parafuso



Fonte: Mercado Livre [c2025]

Buscando a consolidação das peças e a redução para apenas duas partes da capa, sem a necessidade de uma terceira, de modo a facilitar o manuseio, surgiram os primeiros esboços de como seria a fixação das partes na prótese e entre si, conforme ilustrado na Figura 16. Como a proposta prevê facilidade na colocação e remoção das partes, foram cogitados diferentes sistemas de fixação, tais como o sistema click, o encaixe por rabo de andorinha deslizante e o encaixe por garra.

Figura 16 – Esboços da fixação

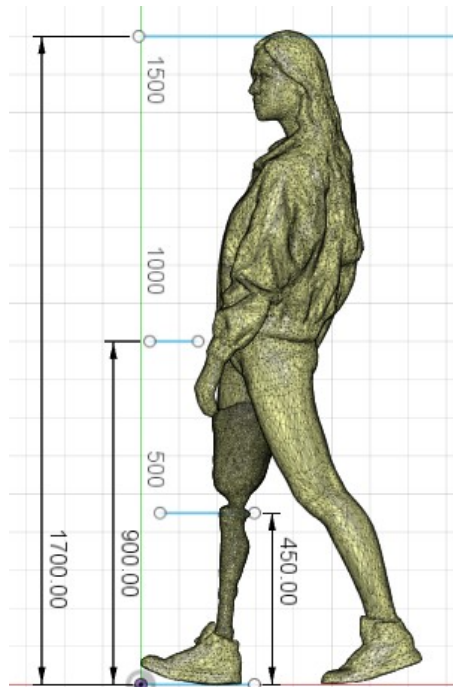


Fonte: Autoria Própria (2025)

Todas as informações obtidas nos esboços foram transferidas para o ambiente 3D, a fim de possibilitar uma análise mais detalhada sobre a viabilidade do projeto. O software utilizado para a modelagem da capa protética foi o Fusion 360, da Autodesk.

Primeiramente, foi adquirido um modelo 3D obtido por meio de escaneamento de uma prótese modular disponível no banco de projetos 3D do SketchUp. A partir desse modelo, foi possível extrair informações métricas com elevado grau de proximidade em relação às dimensões reais. A Figura 17 apresenta algumas das informações básicas obtidas a partir do projeto 3D.

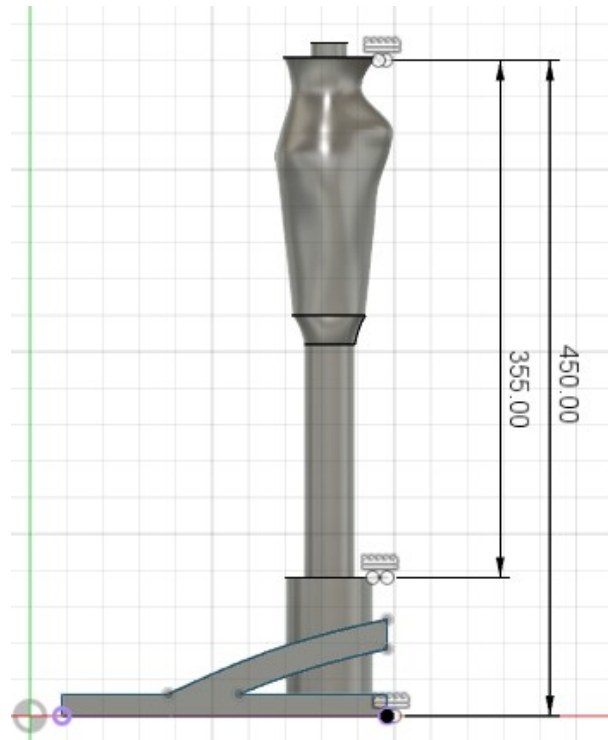
Figura 17 – Projeto 3D com medidas



Fonte: Adaptado de 3DWAREHOUSE (2016)

A partir desse ponto, foi desenvolvida uma versão própria da parte tibial da prótese modular, destinada a servir como parâmetro para o desenvolvimento da capa. As medidas da prótese foram aproximadas considerando um indivíduo com 1,70 metro de altura, comprimento total da perna de 90 cm e região da tíbia de 45 cm. A Figura 18 apresenta essas dimensões de referência.

Figura 18 – Projeto aproximado da parte inferior de prótese modular

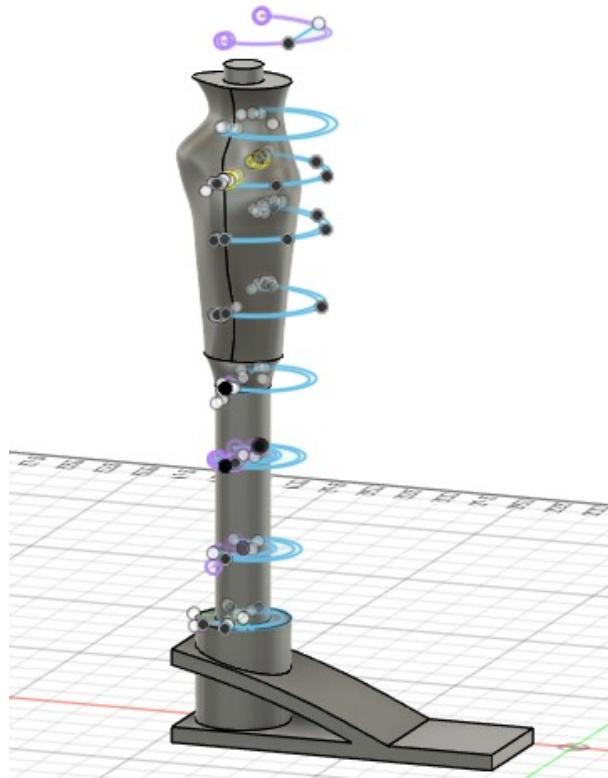


Fonte: Autoria Própria (2025)

Após o desenvolvimento da parte da prótese destinada ao contato com a capa, iniciou-se a etapa de concepção da parte externa da capa. Por se tratar de uma prótese voltada para o uso cotidiano, optou-se por um desenho mais limpo e orgânico, buscando imitar as formas do membro inferior, com curvas na região da panturrilha que seguem o padrão de uma perna humana. A Figura 19 apresenta o esboço elaborado antes da criação do sólido, evidenciando os planos utilizados para dar forma e facilitar a transição das superfícies. A Figura 20 mostra o elemento finalizado, enquanto a Figura 21 ilustra a forma como a peça será posicionada na prótese.

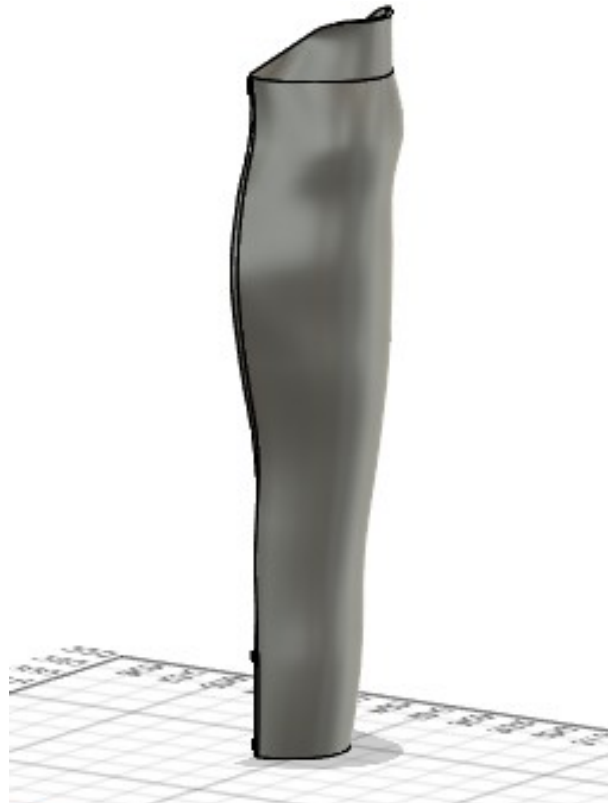
Por questões de praticidade, a capa foi dividida em duas partes. Inicialmente, trabalhou-se com a parte frontal, definindo planos que determinariam o afastamento da capa em relação à prótese. Essa medida variou conforme o plano, situando-se entre 5 mm e 30 mm. Em seguida, estabeleceu-se a espessura da capa, que também apresentou variação, mas manteve-se aproximadamente entre 3 mm e 5 mm.

Figura 19 – Esboços de criação digital da parte frontal da capa



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 20 – Capa Frontal digital



Fonte: Autoria Própria (2025)

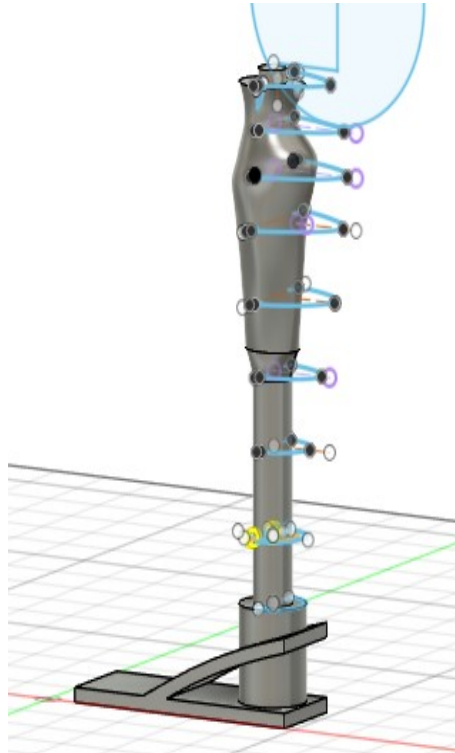
Figura 21 – Capa Frontal Digital – Aplicada à Prótese



Fonte: Autoria Própria (2025)

Para a parte posterior, foi seguido o mesmo procedimento: os planos foram definidos nas mesmas alturas para que houvesse a coincidência da forma quando o projeto fosse unido. As Figuras 22, 23 e 24 mostram o processo de desenvolvimento da parte posterior, seguindo as mesmas etapas que a parte frontal. O diferencial da parte posterior está na necessidade de um rebaixo próximo da articulação, na região do joelho, para possibilitar a movimentação da prótese.

Figura 22 – Esboços de criação digital da parte posterior da capa



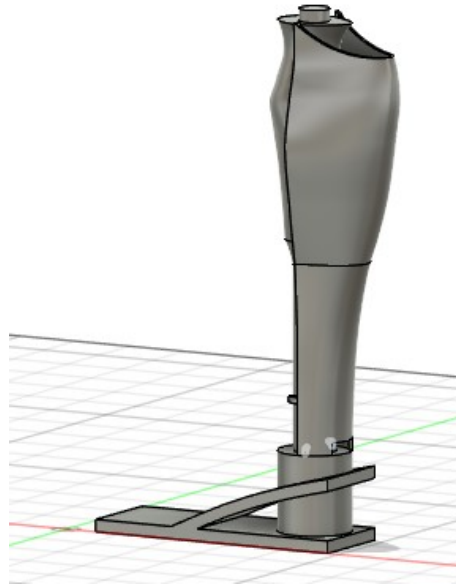
Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 23 – Capa Posterior Digital



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 24 – Capa Posterior Digital – Aplicada à Prótese



Fonte: Aatoria Própria (2025)

Em seguida, foram desenvolvidos os encaixes e os elementos responsáveis por garantir a estabilidade da capa quando posicionada na prótese. Nessa etapa, tanto os encaixes quanto o sistema de segurança foram concebidos de forma integrada, surgindo da própria peça e distribuídos em três pontos estratégicos: no topo, um encaixe deslizante que fixa uma parte da capa à outra; na região intermediária e na base, encaixes que asseguram a fixação da capa tanto na prótese quanto entre si. As Figuras 25 e 26 apresentam, respectivamente, os encaixes da parte frontal e da parte posterior da capa.

Figura 25 – Visualização dos Encaixes da Parte Frontal da Capa



Fonte: Aatoria Própria (2025)

Figura 26 – Visualização dos Encaixes da Parte Posterior da Capa



Fonte: Autoria Própria (2025)

Para verificar a funcionalidade dos encaixes, foi impresso um protótipo em escala reduzida, utilizando PLA, com o objetivo de realizar testes. Durante os ensaios, surgiu a preocupação de que os encaixes poderiam não resistir caso fossem manuseados incorretamente por longos períodos. Diante disso, foram realizadas pequenas modificações, incluindo a adição de uma região destinada a facilitar a remoção da capa e de uma seção de suporte para evitar sua movimentação. A Figura 27 ilustra essas alterações.

Figura 27 – Visualização dos Encaixes da Parte Frontal e posterior da Capa



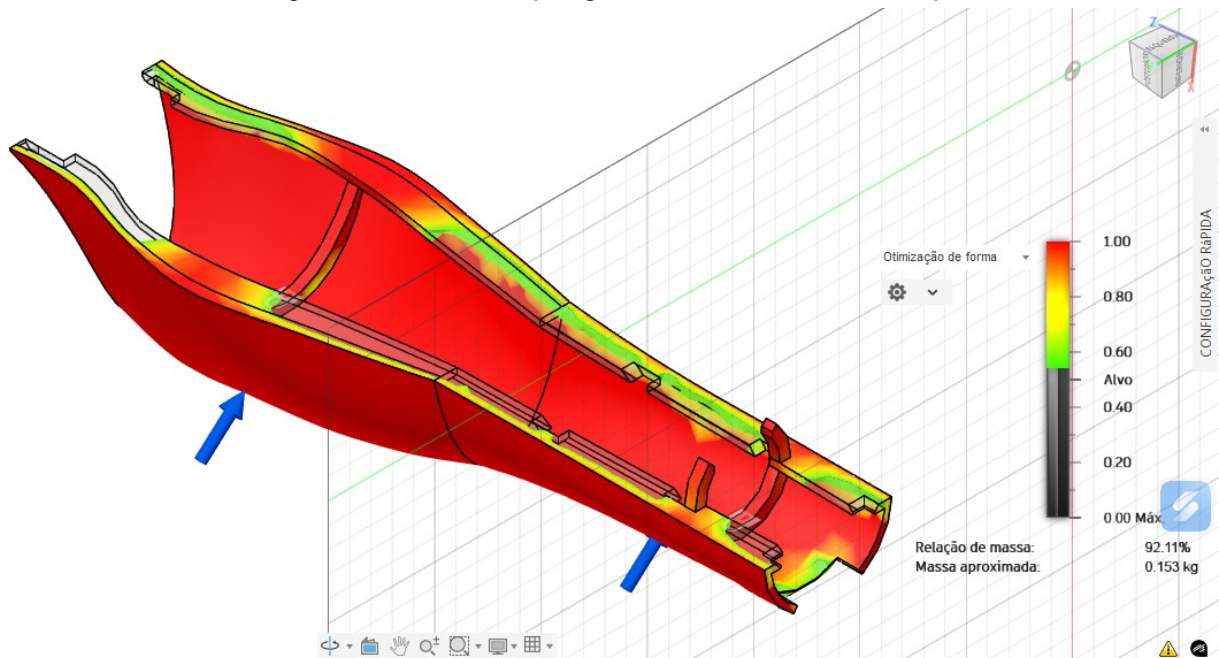
Fonte: Autoria Própria (2025)

5.1.6 Otimização de Projeto com Foco em DfAM

O projeto foi desenvolvido em conformidade com a definição apresentada no capítulo sobre design e otimização. Desde o início, buscou-se aplicar conceitos de otimização topológica, consolidação de partes e redução de materiais sem comprometer a resistência estrutural. Para assegurar esses objetivos, após a conclusão do desenvolvimento das peças, elas foram submetidas a uma análise de otimização de forma, utilizando cálculos de elementos finitos para identificar possíveis reduções de material sem prejudicar as delimitações estabelecidas no briefing. As Figuras 28 e 29 apresentam as áreas que o software indicou para remoção de material sem comprometer a integridade da estrutura.

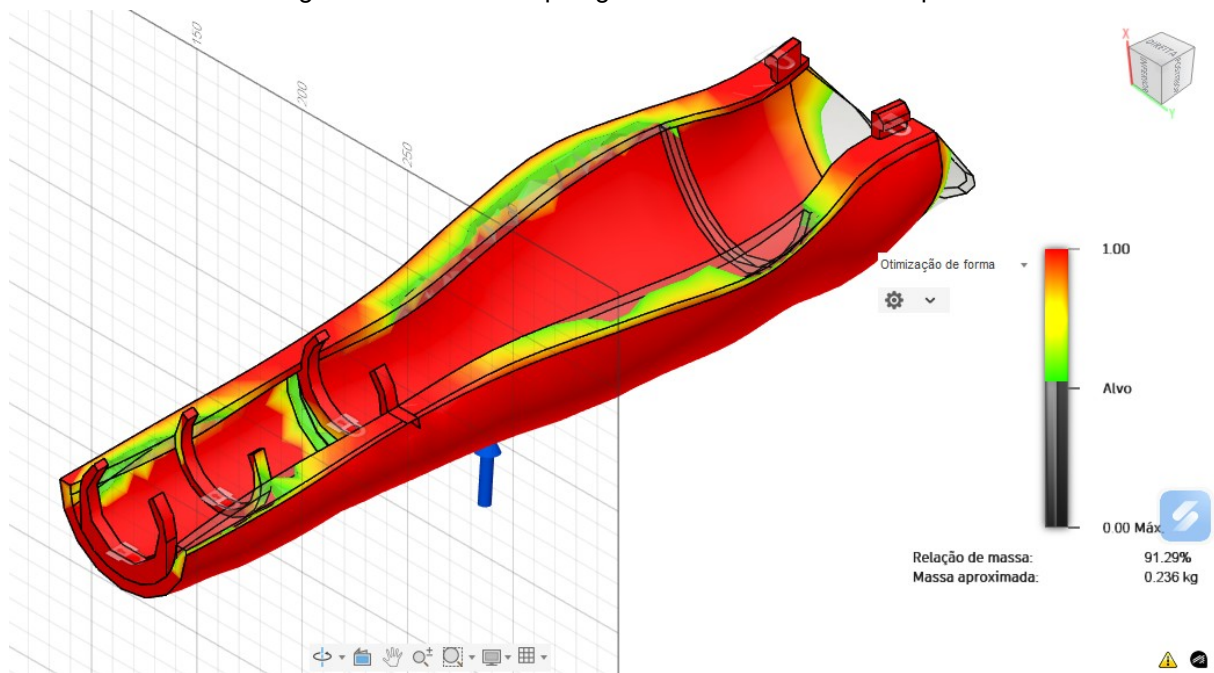
Conforme observado nas Figuras 28 e 29 a área de redução é extremamente pequena, variando entre 150 g e 250 g. Considerando tratar-se de uma peça altamente personalizada, tal redução não se mostra necessária, pois representa menos de 10% do material total.

Figura 28 – Análise Topológica da Parte Posterior da Capa



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 29 – Análise Topológica da Parte Frontal da Capa



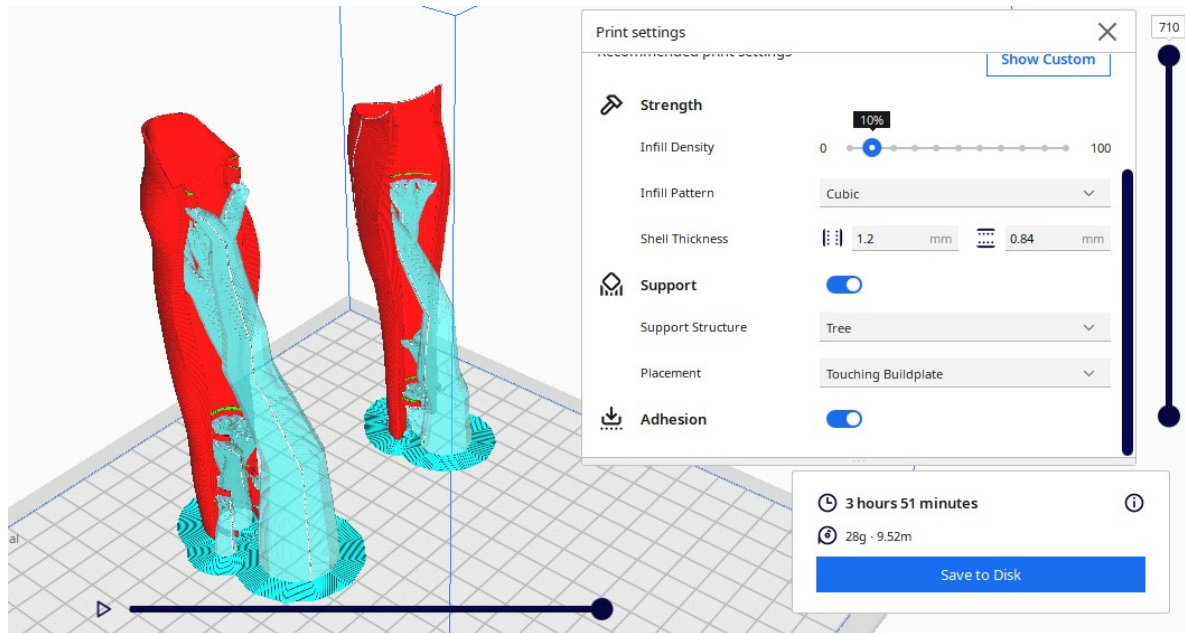
Fonte: Autoria Própria (2025)

5.1.7 Validação Virtual

Para a validação virtual, seria necessário o acesso ao *software* CAM de fatiamento (*slicer*) da impressora SLS que será utilizada. Como esse acesso não foi possível, a demonstração foi realizada por meio do *software Ultimaker Cura*, que trabalha essencialmente com impressões em FDM. A utilização de um *software slicer* permite a geração dos parâmetros de impressão, tais como altura e largura da camada, necessidade ou não de estruturas de suporte, quantidade de preenchimento da peça e a posição em que será impressa.

Na impressão por SLS não há necessidade de estruturas de suporte, uma vez que a peça é construída pela sinterização de camadas de partículas finas depositadas em todo o leito. O pó não sinterizado atua como suporte natural durante o processo. Já os demais parâmetros, como altura e largura da camada, preenchimento e posicionamento da peça, variam de acordo com as capacidades da impressora utilizada. A Figura 30 apresenta os parâmetros empregados nos testes de encaixe realizados em tecnologia FDM.

Figura 30 – Parâmetros para Impressão em PLA



Fonte: Autoria Própria (2025)

5.1.8 Prototipagem e Testes Físicos

Os testes físicos foram realizados com o objetivo de avaliar a eficiência dos encaixes. Durante o desenvolvimento das partes, foram feitas algumas impressões intermediárias para corrigir os encaixes, especialmente no que se refere à pega para remoção e à melhoria da fixação. As Figuras 31 e 32 apresentam os resultados dessas impressões.

Figura 31 – Esboços de criação digital



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 32 – Esboços de criação digital



Fonte: Autoria Própria (2025)

6 ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho aplicou as diretrizes do *Design for Additive Manufacturing (DfAM)* no desenvolvimento de uma capa para prótese ortopédica modular. Essas diretrizes foram seguidas desde a concepção dos esboços e ideias iniciais, contemplando aspectos como geometria mais livre, com curvas que remetem à forma do membro amputado, e consolidação de peças, resultando no mínimo de componentes necessários para garantir o pleno funcionamento do produto. A adoção desses princípios, direcionados à produção por manufatura aditiva, possibilitou o desenvolvimento de uma capa adaptável para prótese. Assim, após a definição do conceito e a modelagem no *software Fusion 360*, todas as partes relevantes mostraram-se passíveis de alteração conforme as necessidades do usuário, o que pode gerar significativa economia de material

Além da possibilidade de otimização da estrutura, redução do peso e aumento da personalização - fatores que contribuem para maior conforto e funcionalidade do usuário, a tecnologia de impressão 3D pode também ampliar os benefícios relacionados à sustentabilidade. Isso ocorre porque é possível construir todo o produto utilizando apenas um tipo de material, incluindo os encaixes e eventuais texturas, o que torna a reciclagem mais viável.

Os requisitos funcionais foram atendidos com a criação de uma estrutura segura, sistema de fixação integrado e design compatível com as dimensões padrão de próteses. Além disso, o projeto possibilitou a personalização estética sem comprometer a funcionalidade.

Do ponto de vista não funcional, a capa apresentou redução significativa de peso em virtude da otimização geométrica, foi produzida por manufatura aditiva com menor desperdício de material e oferece superfícies ergonômicas que proporcionam maior conforto ao usuário. A escolha dos materiais assegurou durabilidade e confiabilidade.

As restrições técnicas foram respeitadas, garantindo compatibilidade com próteses modulares existentes e controle dos custos de produção. Como resultado, os critérios de sucesso foram atingidos: a capa demonstrou resistência nos testes e fixação segura.

REFERÊNCIAS

3DLAB. Conheça os tipos de impressão 3D e os seus benefícios! **Blog 3DLAB Soluções em Impressões 3D**, Dicas, 25 set. 2018. Disponível em:

<https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

3DWAREHOUSE. **Models: Mulher com prótese**. [s. l.]: Trimble, 2016. Disponível em:

<https://3dwarehouse.sketchup.com/model/23841f1f-588f-45a8-936d-236dcfbe6625/Mulher-com-Pr%C3%B3tese>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura aditiva – Princípios gerais – Fundamentos e vocabulário**. 2. ed. São Paulo, 2025. 32 p.

ALMEIDA, Henrique A.; CORREIA, Mário S. Sustainable Impact Evaluation of Support Structures in the Production of Extrusion-Based Parts. *In*: MUTHU, Subramanian Senthilkannan; SAVALANI, Monica Mahesh (ed.). **Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing**. Singapore: Springer, 2016. v. 1. p. 7-30.

BADOTTI, Alexandre Vilas Boas. **Avaliação do Processo de Metalização Superficial Aplicada à Peças Obtidas por Estereolitografia**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85963/198066.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Ações Programáticas Estratégicas. **Diretrizes de atenção à pessoa amputada**. 1. ed. 1. reimp. Brasília: Ministério da Saúde, 2013. Disponível em:

<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/s/saude-da-pessoa-com-deficiencia/publicacoes/diretrizes-de-atencao-a-pessoa-amputada.pdf/view>. Acesso em: 15 out. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção Especializada à Saúde. **Guia para Prescrição, Concessão, Adaptação e Manutenção de Órteses, Próteses e Meios Auxiliares de Locomoção**. Brasília: Ministério da Saúde, 2019. Disponível em:

https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia_manutencao_orteses_protases_auxiliares_locomocao.pdf. Acesso em: 15 out. 2025.

BORGES, Ana Caroline R. **Aplicação do Design de Superfícies no projeto de próteses ortopédicas, como ferramenta capaz de melhorar aspectos táteis, visuais e simbólicos do produto, garantindo maior bem-estar dos usuários**. 2024. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Graduação em Tecnologia em Design de Produto com Ênfase em Processos de Produção e Industrialização, Faculdade de Tecnologia do Tatuapé – Victor Civita, São Paulo, 2024.

BÜRDEK, Bernhard E. **DESIGN: História, Teoria e Prática do Design de Produtos**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2010. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ljBdDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA13&dq=o+que+é+design&ots=b-NOfsidi2&sig=0X-IM1w3X9JBnCA7KE992VhOeKI&redir_esc=y#v=onepage&q=o%20que%20é%20design&f=false. Acesso em: 19 out. 2025.

CARDOSO, Rafael. **Uma introdução à história do design**. 3. ed. São Paulo: Blücher, 2008. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=nom6DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT15&dq=o+que+é+design&ots=mZrv2y5Ufu&sig=X4yn-4miLTuApIXB66MY8tXaq8U&redir_esc=y#v=onepage&q=o%20que%20é%20design&f=false. Acesso em: 19 out. 2025.

CONFORPÉS. **Próteses**. Sorocaba, c2025. Disponível em: <https://www.conforges.com.br/proteses>. Acesso em: 18 out. 2025.

DIEGEL, O.; KRISTAV, P.; MOTTE, D.; KIANIAN, B. Additive Manufacturing and its Effect on Sustainable Design. *In*: MUTHU, Subramanian Senthilkannan; SAVALANI, Monica Mahesh (ed.). **Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing**. Singapore: Springer, 2016. v. 1. p. 73-99.

GEBHARDT, Andreas; HÖTTER, Jan-Steffen. **Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing**. Ohio: Hanser Publications, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/310691287_Additive_Manufacturing_3D_Printing_for_Prototyping_and_Manufacturing. Acesso em: 14 out. 2025.

HINCHY, Eoin Patrick. Design for Additive Manufacturing. *In*: DEVINE, Declan M. (ed.) **Polymer-Based Additive Manufacturing: Biomedical Applications**. [London]: Springer Cham, 2019. p. 23-50. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-24532-0_2. Acesso em: 14 ago. 2025.

HOSKINS, S. **3D Printing for artists, designers and makers**. London/NewYork: Bloomsbury Visual Arts, 2018. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/911240638/3D-Printing-for-Artists-Designers-and-Makers-2nd-Edition-Stephen-Hoskins-instant-download-full-chapters>. Acesso em: 14 nov. 2025.

LÖBACH, Bernd. **Design industrial: Bases para a configuração dos produtos industriais**. 1. ed. São Paulo: Blücher, 2001.

LOY, Jennifer; CANNING, Samuel; HASKELL, Natalie. 3D Printing Sociocultural Sustainability. *In*: MUTHU, Subramanian Senthilkannan; SAVALANI, Monica Mahesh (ed.). **Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing**. Singapore: Springer, 2016. v. 1. p. 51-72. Acesso em 14 aug. 2025.

MAGALU – O MAGAZINE LUIZA. Capa para Prótese Confetti TT Black – ID. **Produtos**, [c2025]. Disponível em: https://www.magazineluiza.com.br/capa-para-protese-confetti-tt-black-id/p/gk268ddf7f/cp/acmm/?seller_id=centropcd. Acesso em: 13 nov. 2025.

MERCADO LIVRE. Capa para prótese transfemoral – Amputação acima do joelho. **Saúde**, Ortopedia, [c2025]. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-3230436423-capa-para-protese-transfemoral-amputaco-acima-do-joelho-_JM. Acesso em: 13 nov. 2025.

MUTHU, Subramanian Senthilkannan; SAVALANI, Monica Mahesh (ed.). **Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing**. Singapore: Springer, 2016. v. 1. p. 168.

NIETO, Daniel Moreno; SÁNCHEZ, Daniel Moreno. Design for Additive Manufacturing: Tool Review and a Case Study. **Applied Sciences**, v. 11, ed. 4, 8 feb. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1571>. Acesso em: 15 ago. 2025.

POSSER, Thiago. Princípios de Design para Manufatura Aditiva Aplicados em Cilindros de Motores Dois Tempos para Máquinas Portáteis. 2019. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/206561>. Acesso em: 1 maio 2025.

RAEDER, Marcelo. **Proposta de Diretrizes para o Projeto para Manufatura Enxuta**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/92183/265985.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 maio 2025.

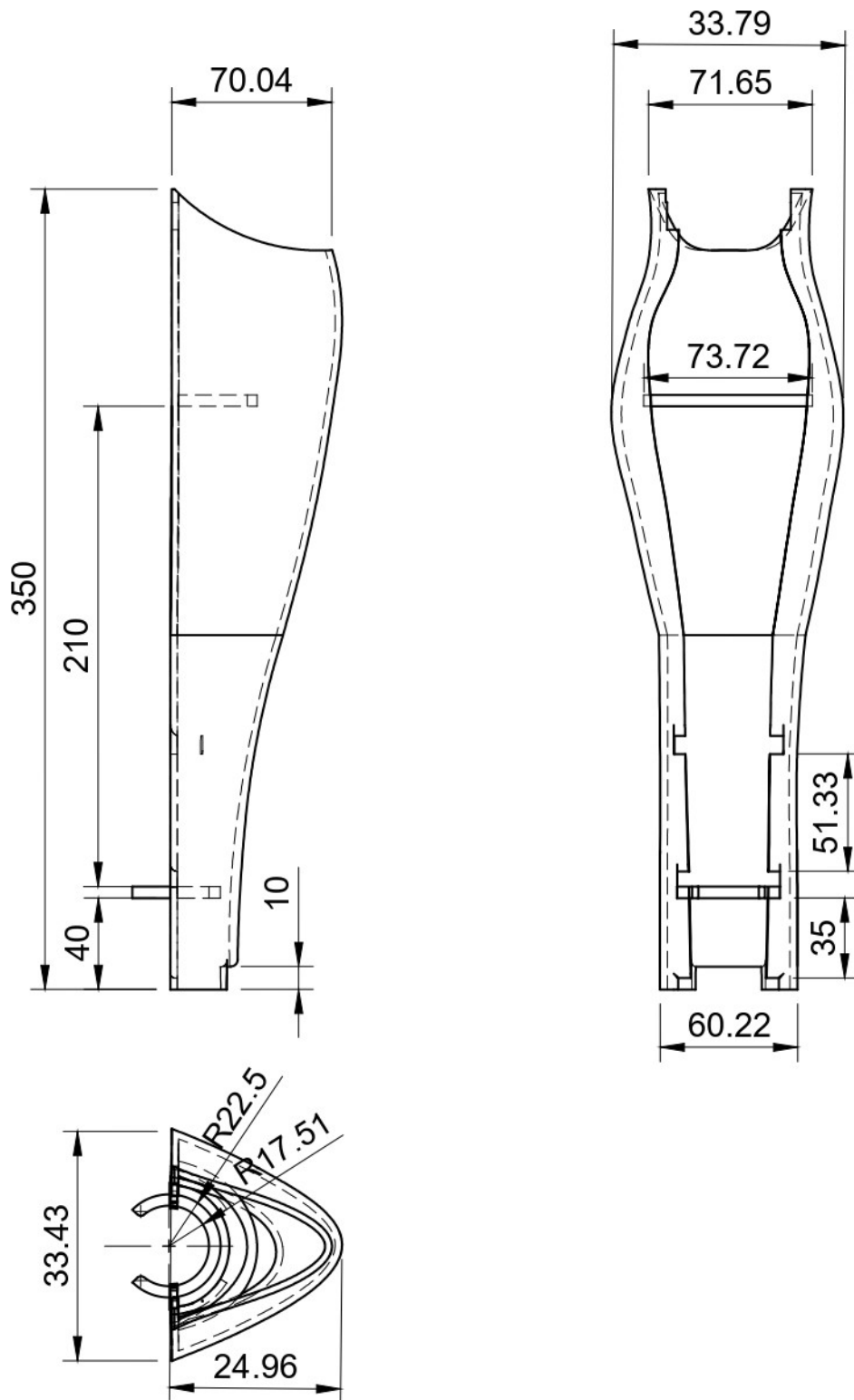
SOTOMAYOR, Nicolas Alberto Sbrugnera; CAIAZZO, Fabrizia; ALFIERRI, Vittorio. Enhancing Design for Additive Manufacturing Workflow: Optimization, Design and Simulation Tools. **Applied Sciences**, v. 11, ed. 14, 18 July 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/14/6628>. Acesso em: 15 ago. 2025.

THOMPSON, Mary Kathryn; MORONI, Giovanni; VANEKER, Tom; FADEL, Georges; CAMPBELL, R. Ian; GIBSON, Ian; BERNARD, Alain; SCHULZ, Joachim; GRAF, Patricia; AHUJA, Bhrihu; MARTINA, Filomeno. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *In: THE INTERNATIONAL ACADEMY FOR PRODUCTION ENGINEERING*, 2016, USA. **Annals [...]**. USA: CIRP, v. 65, n. 2, p. 737-760, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850616301913#preview-section-abstract>. Acesso em: 1 maio 2025.

VOLPATO, Neri (org.). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blücher, 2021.

VEMAX. Evolução da Manufatura Aditiva (Impressão 3D). **Blog Vemax**, 20 ago. 2020. Disponível em: <https://vemax.ind.br/blog/evolucao-manufatura-aditiva/>. Acesso em: 1 maio 2025.

APÊNDICE A – PROJETO DA CAPA DE PRÓTESE ORTOPÉDICA



TÍTULO

CAPA - POSTERIOR

EQUIPE

GRAZIELE BRITO DA SILVA

FOLHA Nº

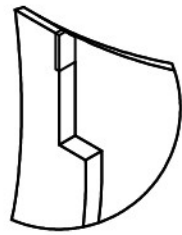
01/03

DISCIPLINA TG II - GT5

DATA 09/12/25

ESCALA 1:5

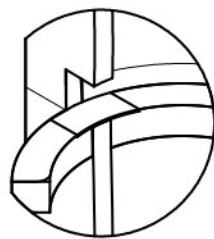
ORIENTADOR(A) ARISOL SIMONE SAYURI TSUDA YAMAMOTO



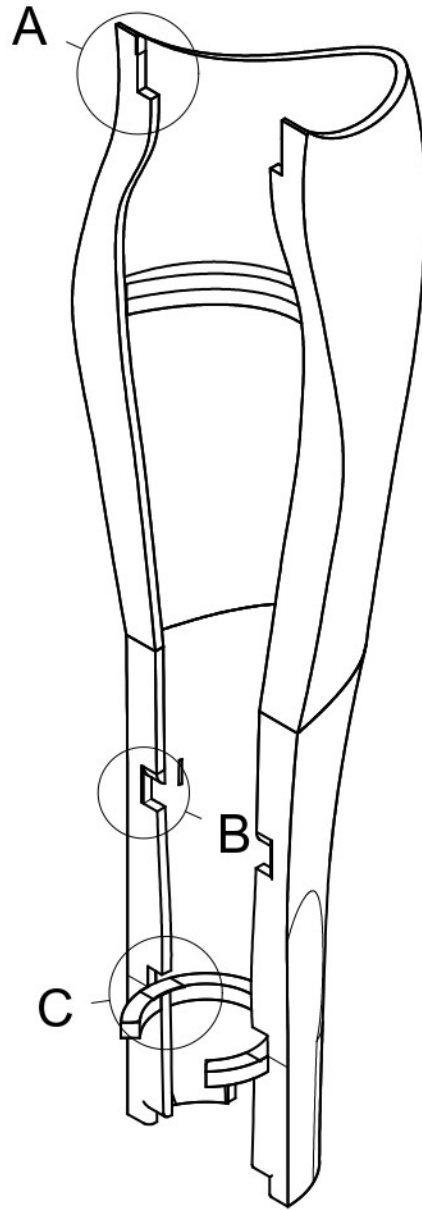
A (1:1)



B (1:1)



C (1:1)



TÍTULO

CAPA - POSTERIOR

EQUIPE

GRAZIELE BRITO DA SILVA

FOLHA Nº

02/03

DISCIPLINA TG II - GT5

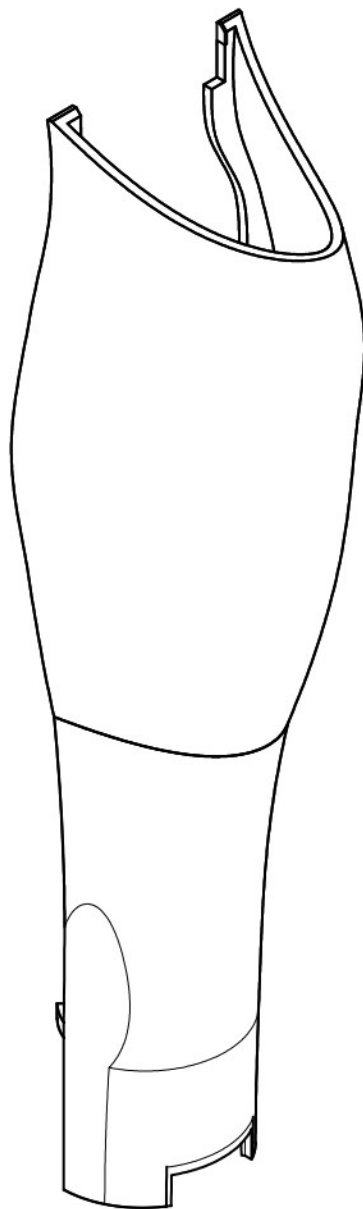
DATA

09/12/25

ESCALA

1:5

ORIENTADOR(A) ARISOL SIMONE SAYURI TSUDA YAMAMOTO



TÍTULO

CAPA - POSTERIOR

EQUIPE

GRAZIELE BRITO DA SILVA

FOLHA Nº

03/03

DISCIPLINA TG II - GT5

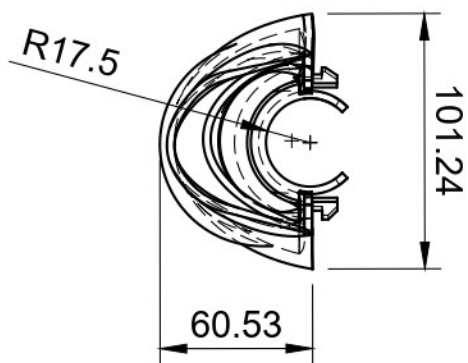
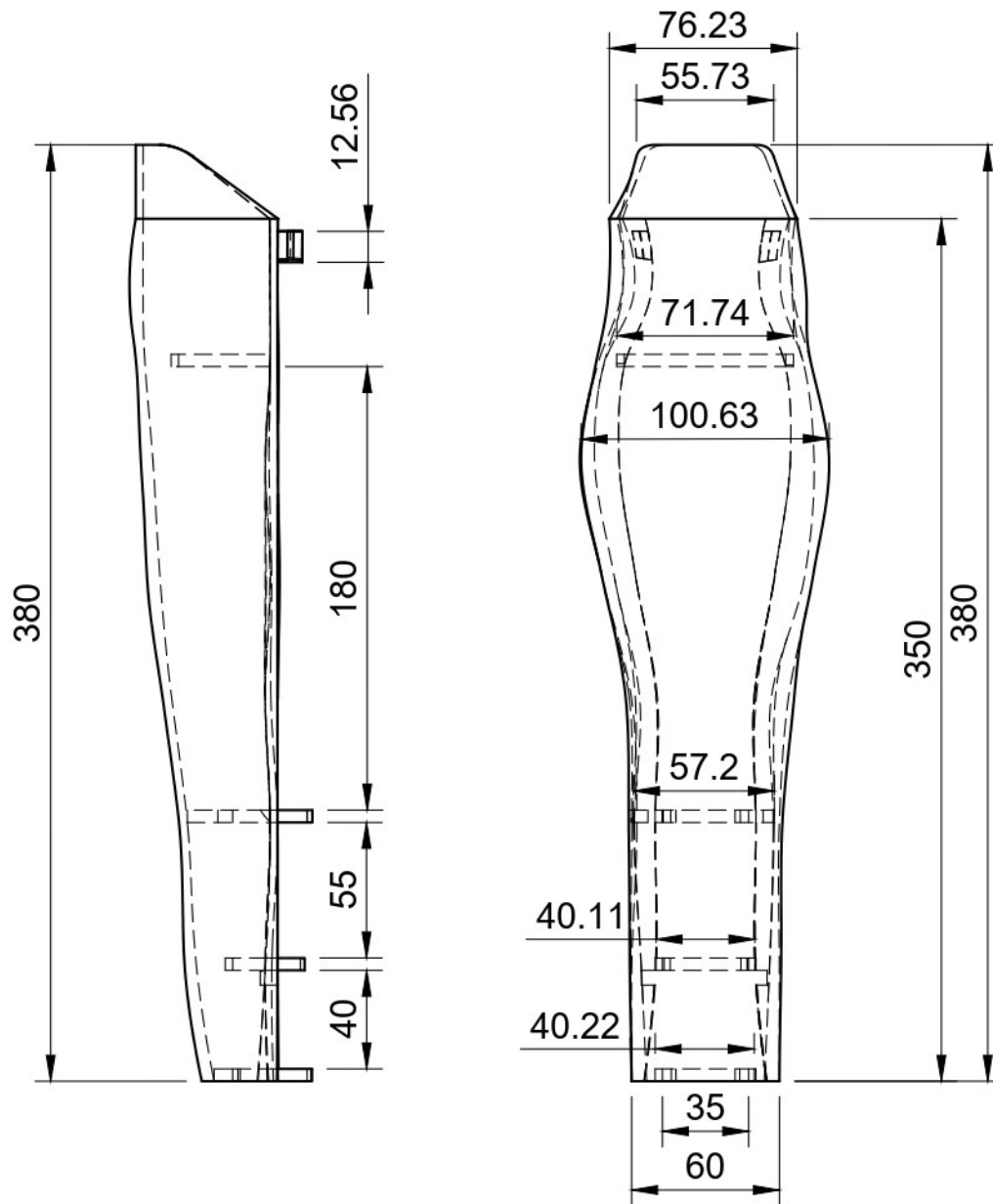
DATA

09/12/25

ESCALA

1:5

ORIENTADOR(A) ARISOL SIMONE SAYURI TSUDA YAMAMOTO



TÍTULO

CAPA - FRONTAL

EQUIPE

GRAZIELE BRITO DA SILVA

FOLHA Nº

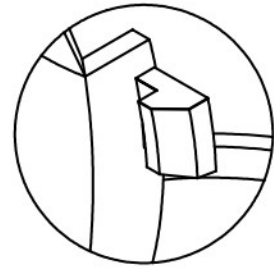
01/02

DISCIPLINA TG II - GT5

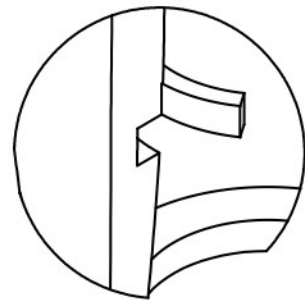
DATA 09/12/25

ESCALA 1:5

ORIENTADOR(A) ARISOL SIMONE SAYURI TSUDA YAMAMOTO



A (1:1)



B (1:1)

TÍTULO

CAPA - FRONTAL

EQUIPE

GRAZIELE BRITO DA SILVA

FOLHA Nº

02/02

DISCIPLINA

TG II - GT5

DATA

09/12/25

ESCALA

1:5

ORIENTADOR(A)

ARISOL SIMONE SAYURI TSUDA YAMAMOTO