

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAVELLY BORGES AMORIM

**UTILIZAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO DESENVOLVIMENTO DE UM
PRODUTO PARA REDUÇÃO DE RISCOS OCUPACIONAIS NA INDÚSTRIA
AUTOMOTIVA**



UBERLÂNDIA

2022

RAVELLY BORGES AMORIM

**UTILIZAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO DESENVOLVIMENTO DE UM
PRODUTO PARA REDUÇÃO DE RISCOS OCUPACIONAIS NA INDÚSTRIA
AUTOMOTIVA**

Projeto de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de concentração: Projetos mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

UBERLÂNDIA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades da vida que me guiaram até a conclusão deste curso.

Aos meus pais, Marcos e Fernanda, por todo o apoio e por nunca medirem esforços para me dar uma educação de qualidade, me proporcionando todas as condições para que eu pudesse focar nos estudos.

À minha irmã Raissa pelo otimismo e encorajamento.

Aos meus colegas da universidade por tornarem os momentos leves e descontraídos.

Ao Professor Alexandre pelo conhecimento compartilhado e orientação neste trabalho.

À empresa na qual realizei o estágio pela liberdade criativa e por disponibilizar equipamentos utilizados neste trabalho.

E à Universidade Federal de Uberlândia por proporcionar um ambiente motivador e cheio de oportunidades.

RESUMO

A Manufatura Aditiva é uma tecnologia disruptiva com potencial de se tornar um método de produção em série viável economicamente. Suas aplicações em conjunto com tecnologias de engenharia reversa e softwares de CAD e CAE impulsionam inovações e otimizações de projetos. Para que o potencial e oportunidades representados por essas tecnologias sejam efetivamente aproveitados, novas formas de projetar e caracterizar peças devem acompanhar esse desenvolvimento, visto que as possibilidades são muito vastas para serem logradas somente na determinação do processo de fabricação. Este trabalho descreve o processo de desenvolvimento de um produto com o objetivo de reduzir os esforços necessários à inserção de tampões em orifícios de carrocerias, processo geralmente realizado de forma manual pelos operadores nas linhas de produção da indústria automotiva. Para isso, foi desenvolvida uma peça digitalmente customizada para um usuário específico a partir da captura de dados por escaneamento 3D e projeto utilizando MATLAB e Solidworks. Por fim, a peça foi fabricada através de Modelagem por Fusão e Deposição utilizando filamento de ABS. Com sua utilização, espera-se obter maior conforto ergonômico e redução do risco de doenças ocupacionais aos trabalhadores, bem como ganhos de produtividade, qualidade e confiabilidade ao processo.

Palavras-chave: impressão 3D; escaneamento 3D; projeto auxiliado por computador; Fused Deposition Modelling (FDM).

ABSTRACT

Additive Manufacturing is a disruptive technology with potential to become economically viable for mass production. When combined with reverse engineering technologies and CAD and CAE software, it drives design innovations and optimizations. In order to effectively use the potential and opportunities represented by these technologies, new ways of designing and characterizing parts must accompany this development, since the possibilities are too vast to be achieved only in the determination of the manufacturing process. This work describes the process of developing a product with the objective of reducing the efforts required to assembly plugs into holes in car bodies, a process usually performed manually by operators in the production lines. For this, a digitally customized part was developed for a specific user from data captured by 3D scanning and designed using MATLAB and Solidworks. Finally, the part was manufactured through Fusion Deposition Modeling using ABS filament. By using this part, it is expected to obtain greater ergonomic comfort and reduce the risk of occupational diseases to workers, as well as gains in productivity, quality and reliability to the process.

Keywords: 3D printing; 3D scanning; computer-aided design; Fused Deposition Modelling (FDM).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.3	OBJETIVOS.....	16
2	MANUFATURA ADITIVA.....	17
2.1	PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA.....	18
2.1.1	Jateamento de aglutinante (Binder Jeting).....	19
2.1.2	Deposição com energia direcionada (DED).....	20
2.1.3	Jateamento de material (PolyJet).....	20
2.1.4	Fusão em leito de pó (Powder Bed Fusion - PBF).....	21
2.1.5	Laminação de folhas.....	22
2.1.6	Fotopolimerização em cuba.....	22
2.1.7	Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).....	23
2.2	ALGUMAS APLICAÇÕES.....	25
2.3	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA MA.....	28
3	O PROCESSO DE FABRICAÇÃO POR FDM.....	31
3.1	AS ETAPAS DO PROCESSO.....	31
3.1.1	Etapa 1: Modelagem por CAD (Projeto Assistido por Computador).....	32
3.1.2	Etapa 2: Conversão para o formato STL.....	32
3.1.3	Etapa 3: Transferência para a máquina.....	33
3.1.4	Etapa 4: Configuração da máquina.....	34
3.1.5	Etapa 5: Construção.....	36
3.1.6	Etapa 6: Remoção da peça da máquina e pós-processamento.....	37
3.2	MATERIAIS PARA FDM.....	37
3.2.1	Acrilonitrila butadieno estireno (ABS).....	38
3.2.2	Poliácido láctico (PLA).....	38
3.2.3	Polietireno tereftalato de etileno glicol (PETG).....	39

4	PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.....	40
4.1	MANUFATURA ADITIVA NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS	41
5	ENGENHARIA REVERSA	44
5.1	DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	46
5.1.1	Técnicas de digitalização tridimensional	47
5.1.2	Digitalização 3D para antropometria	50
5.1.3	Aplicações da antropometria por Digitalização 3D em conjunto com a MA	53
6	METODOLOGIA	57
6.1	DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	57
6.2	PROJETO DA PEÇA	59
6.3	FABRICAÇÃO	64
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
8	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A – Algoritmo em MATLAB para plotar o STL, gerar planos de corte e salvar as coordenadas da superfície de intersecção	87
	APÊNDICE B – Algoritmo em MATLAB para plotar todas as curvas simultaneamente	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de peças através de MA por prestadores de serviços independentes entre 1994 e 2020 (em milhões de dólares).....	12
Figura 2 – Exemplos de orifícios presentes em uma carroceria	14
Figura 3 - Inserção dos tampões de borracha nas carrocerias.....	14
Figura 4 - Principais variações de nomenclatura para MA	17
Figura 5 - Jateamento de Aglutinante	19
Figura 6 - Jateamento de material	21
Figura 7 – Princípio do processo FDM.....	24
Figura 8 - Exemplo da utilização de estruturas de suporte.....	25
Figura 9 – Utilização de Manufatura Aditiva por setor	25
Figura 10 - Componente do i8 Roadster fabricado por fusão em leito de pó	26
Figura 11 – Aplicações de MA de metais	27
Figura 12 – Otimização de componente do Airbus A320 para fabricação por MA	29
Figura 13 - Fluxo do processo de MA	31
Figura 14 - Exemplos da resolução do arquivo STL.....	33
Figura 15 - Efeito da orientação da peça no processo de MA	34
Figura 16 - Efeitos da densidade e geometria das camadas internas no custo, tempo de impressão e propriedades da peça.	35
Figura 17 - Representação da geometria transversal do filamento e seus parâmetros	36
Figura 18 - Inspeção de qualidade por engenharia reversa	45
Figura 19 - (a) Representação de objeto escaneado por nuvem de pontos, (b) malha de triângulos e (c) reconstrução da superfície do objeto.	46
Figura 20 – Escaneamento 3D por contato utilizando braço manipulado manualmente.....	47
Figura 21 – Escaneamento 3D a laser.....	48
Figura 22 - Princípio de um sensor de triangulação a laser (duas posições do objeto são mostradas).....	49
Figura 23 - Análise das dimensões internas de capacete para ciclistas	52
Figura 24 - Órtese personalizada a partir de escaneamento 3D e fabricada por MA.....	54
Figura 25 - Esquema do processo de fabricação de órtese personalizada utilizando escaneamento 3D e MA	55
Figura 26 - Prótese projetada a partir de escaneamento 3D e fabricada por MA	56
Figura 27 – Braço Romer e scanner RS3	57
Figura 28 – Detalhe do scanner.....	57
Figura 29 – Posicionamento da superfície a ser mensurada.....	58

Figura 30 - Representação dos dados escaneados exibida no software	59
Figura 31 - Desenho do polegar e do plano de corte da Equação 6.....	60
Figura 32 - Superfície de intersecção do plano da Equação 6 com o objeto tridimensional .	61
Figura 33 - Superfícies de intersecção obtidas	62
Figura 34 - Criação de esboços a partir da nuvem de pontos	62
Figura 35 - Planos criados a partir das seções	63
Figura 36 - Modelagem da peça	64
Figura 37 - Impressora 3D GTMax Core A3V2	65
Figura 38 - Posição definida para a impressão da peça.....	65
Figura 39 - Definição das camadas sólidas.....	66
Figura 40 - Definição do preenchimento	66
Figura 41 - Definição dos suportes	67
Figura 42 - Definição da temperatura da mesa de impressão	67
Figura 43 - Definição da temperatura do bico de impressão	68
Figura 44 - Definição das velocidades de impressão	68
Figura 45 - Simulação do processo de impressão.....	69
Figura 46 - Peça após a remoção dos suportes.....	69
Figura 47 - Lixas utilizadas no pós-processamento da peça	70
Figura 48 - Peça digitalmente customizada ao polegar do usuário	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de processos de MA	18
Tabela 2 - Resumo das etapas de processo de projeto	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno (Acrylonitrile Butadiene Styrene)
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais (American Society for Testing and Materials)
CAD	Projeto Auxiliado por Computador (Computer-aided design)
CCD	Dispositivo de carga acoplada (Charge-coupled device)
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DED	Deposição com Energia Direcionada
DORT	Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho
ER	Engenharia Reversa
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modelling)
ISO	Organização Internacional de Normatização (International Organization for Standardization)
LER	Lesões por Esforços Repetitivos
LOM	Fabricação de Objetos Laminados (Laminated Object Manufacturing)
MA	Manufatura Aditiva
MEF	Método dos Elementos Finitos
PBF	Fusão em Leito de Pó (Powder Bed Fusion)
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol (Polyethylene Terephthalate Glycol)
PLA	Poliácido Láctico (Polylactic Acid)
STL	Linguagem de Tesselação Padrão (Surface Tessellation Language)
UV	Radiação Ultravioleta

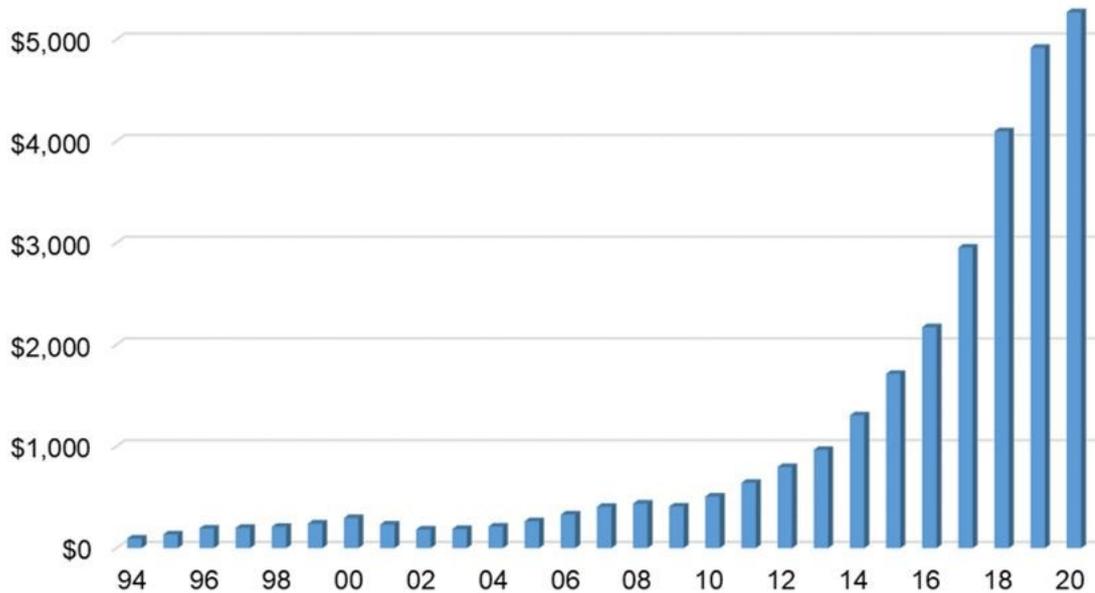
1 INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0, tem como fundamentos a aplicação de tecnologias da comunicação e da informação na indústria. De acordo com o Boston Consulting Group (BCG), ela apresenta 9 pilares: robôs autônomos; internet das coisas; manufatura aditiva (MA); integração de sistemas horizontais e verticais; simulação; realidade aumentada; *big data*; processamento e armazenamento de dados em nuvem e segurança cibernética (RÜßMANN et al., 2015). Essas inovações permitirão o desenvolvimento de novas formas de se criar valor e novos modelos de negócios, possibilitando que *start-ups* e pequenos negócios tenham a chance de oferecerem serviços (Figura 1) (KAGERMANN et al., 2013). Isso pode ser observado com a ascensão da MA em diversos setores nos últimos anos, uma antiga conhecida da indústria que tem se desenvolvido e ganhado cada vez mais popularidade.

Inicialmente uma ferramenta de prototipagem rápida, hoje a impressão 3D é aplicada em diversas etapas de processos de fabricação e também no desenvolvimento do produto final. Visando a contínua melhoria de eficiência através da redução de custos e *lead times* na indústria, as organizações podem encontrar na MA uma forma de encurtar o ciclo de desenvolvimento de produtos, reduzir desperdícios de material e custos com ferramental, bem como otimizar estruturas, visto que esta tecnologia permite a fabricação de geometrias complexas impossíveis de serem produzidas pelos métodos tradicionais de manufatura. Estes aspectos estão alinhados com os conceitos de *lean manufacturing*, de grande relevância principalmente para setores de alta competitividade. Para Blankey-Milner et al. (2021), embora os métodos tradicionais de fabricação tenham sido desenvolvidos ao longo de muitas décadas para acomodar esses objetivos em vários tipos de aplicações, a MA tem e continuará a ter um impacto profundo na forma como se projeta e fabrica.

A MA é vista como uma tecnologia disruptiva e com grande potencial de revolucionar muitas indústrias. Altamente versátil, suas aplicações não são restritas somente aos setores da indústria, mas também na saúde, artes e lazer. A introdução de modelos de impressoras 3D mais acessíveis impulsiona ainda o seu uso doméstico, o que possibilita o desenvolvimento de novas aplicações e soluções *open source*, que abrem espaço para a criação e inovação. A publicação Wohlers Report 2022 mostrou que a indústria da MA cresceu 19,5% em 2021, superando o crescimento de 7,5% em 2020, influenciado pelo impacto da pandemia (WOHLERS ASSOCIATES, 2022). A consultora MarketsandMarkets prevê que essa indústria movimentará US\$ 5.2 bilhões até 2026, crescimento impulsionado pelo aumento da demanda nos setores da saúde, automotivo e outras indústrias (MARKETSANDMARKETS, 2022).

Figura 1 - Produção de peças através de MA por prestadores de serviços independentes entre 1994 e 2020 (em milhões de dólares)



Fonte: Wohlers Associates (2021)

1.1 JUSTIFICATIVA

O chão de fábrica é um ambiente de mutação constante. Isso se deve aos diversos desafios que surgem no dia a dia, relacionados à busca pela melhoria contínua de técnicas e processos bem como o surgimento de imprevistos que demanda soluções imediatas. Encontrar formas de otimizar tempos e métodos dos processos sem perdas de qualidade faz parte do escopo de atividades do engenheiro, principalmente no contexto atual, em que as organizações buscam incentivar a criação e inovação. As possibilidades trazidas pela quarta revolução industrial são aliadas dessa busca, principalmente em setores altamente competitivos.

A intensificação da concorrência juntamente com o aumento da complexidade da produção tem demandado às organizações alterações significativas no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) (VOLPATO et al. 2007). A indústria 4.0 permite mudanças repentinas na produção e capacidade de reagir de forma flexível a interrupções e falhas ocasionadas por fornecedores. As novas tecnologias possibilitam que fábricas inteligentes atendam a demandas individuais de clientes e que até itens únicos ou de baixos

volumes de produção possam ser fabricados de forma lucrativa (KAGERMANN et al., 2013). A produção em massa, que fabrica produtos padronizados de forma mecanizada, já não é suficiente para atender as demandas da sociedade atual. A busca por produtos customizados e personalizados tem sido impulsionada pela mudança de paradigma acompanhada pela era digital (BODANZKY et al., 2019). Neste cenário, a manufatura aditiva tem ganhado cada vez mais espaço nos mais diversos setores da indústria devido a vantagens como a liberdade para produzir geometrias complexas com relativa rapidez, bons acabamentos superficiais e boas precisões dimensionais ao mesmo tempo em que minimiza o desperdício de material (OLIVEIRA, SANTOS, MIRANDA, 2020). A MA favorece ainda a personalização de peças de forma econômica, por dispensar investimentos para o desenvolvimento de ferramentaria (ALVES, 2021).

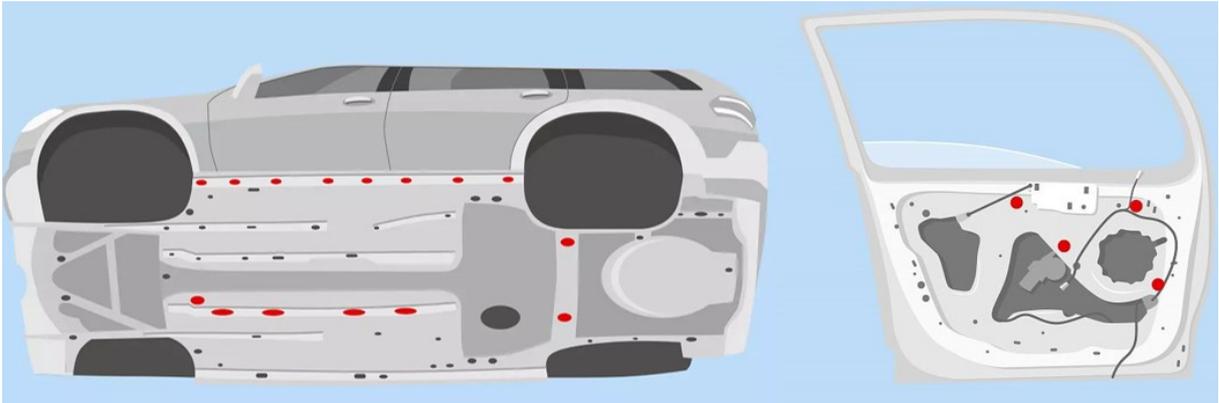
Inicialmente uma ferramenta de prototipagem rápida, hoje a MA é utilizada também com vários outros propósitos, inclusive na fabricação de produtos funcionais, fenômeno impulsionado pelo desenvolvimento de técnicas mais econômicas, com curtos ciclos de produção, custos competitivos e alta qualidade (DIZON et al., 2018). Esses avanços demonstram potencial para que a MA se torne um método de produção em série viável economicamente, em especial para produção em baixos volumes (ALVES, 2021).

Para que o potencial e oportunidades representados por essas tecnologias sejam efetivamente aproveitados, novas formas de projetar e caracterizar peças devem acompanhar esse desenvolvimento, visto que as possibilidades são muito vastas para serem logradas somente na determinação do processo de fabricação (ALVES, 2021). Quando utilizada em conjunto com outras tecnologias, como as de Engenharia Reversa, a MA pode encurtar significativamente tempos e custos de desenvolvimento de produtos (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015; WALACHOWICZ et al. 2017).

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os veículos automotores fabricados atualmente possuem vários orifícios na carroceria, que apresentam utilidade em etapas iniciais do processo de produção (Figura 2). À medida que se atinge determinados estágios do processo, estes furos não são mais necessários e devem ser fechados com segurança para evitar a entrada água, sujeira e geração de ruídos.

Figura 2 – Exemplos de orifícios presentes em uma carroceria

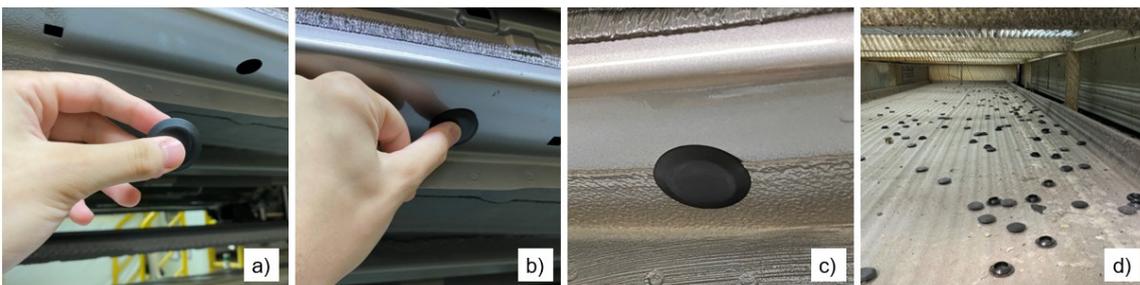


Fonte: tesa (c2022)

O presente trabalho foi realizado em uma montadora de veículos localizada no estado de São Paulo. Ao longo do processo de montagem, um dos procedimentos realizados é a cobertura destes furos pela inserção de tampões de borracha ou de plástico. Na estação observada, há um operador posicionado do lado esquerdo e outro do lado direito do trilho que transporta as carrocerias, que inserem manualmente os tampões nos sete furos localizados em ambos os lados da soleira (Figuras 3a e 3b). Para isso, são utilizados tampões de 25 mm de diâmetro. Trata-se de uma atividade que demanda movimentos repetitivos e com ritmos acelerados devido à velocidade de produção.

A introdução de um novo modelo de veículo na linha de produção trouxe um problema referente a esta atividade: foi constatado que tampões do primeiro furo de cada lado da carroceria estavam se soltando e caindo após a montagem. A Figura 3d mostra tampões caídos numa estação posterior à sua montagem. Uma das prováveis causas levantadas foi devido à camada de material anticorrosivo que é aplicada no assoalho das carrocerias deste modelo em etapas anteriores do processo, que torna a região próxima ao primeiro furo mais espessa (Figura 3c). Com isso, a inserção dos tampões neste furo demanda a aplicação de maiores forças no dedo polegar para o encaixe correto.

Figura 3 - Inserção dos tampões de borracha nas carrocerias



Fonte: elaborado pelo autor

Além da geometria desfavorável na região do primeiro furo, outra provável causa da queda de tampões pode estar relacionada à falha operacional. A aplicação de força no dedo polegar, por mais que seja de intensidade relativamente baixa, pode causar desconforto ergonômico se for levado em consideração que o processo é realizado repetidamente ao longo da jornada de trabalho, causando risco de ocorrência de Lesões por Esforços Repetitivos (LER) ou Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT).

Realizar trabalho repetitivo resulta na utilização do mesmo grupo muscular para a execução das mesmas atividades, sem que haja repouso necessário à musculatura solicitada. Este comportamento, somado à pré-disposição, pode resultar no desenvolvimento de LER/DORT. Anatomicamente, as articulações mais acometidas nos membros superiores são punho, mãos e dedos. Tendinites e as tenossinovites são as patologias mais comuns dentro do grupo da LER/DORT.

Uma das causas mais recorrentes de afastamentos do trabalho, a LER/DORT é considerada por muitos autores como uma epidemia. (MAGAS et al., 2014; DE MEDEIROS, SEGATTO, 2012). De acordo com dados da Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, em 2019, quase 39 mil trabalhadores foram afastados do trabalho por causa de alguma doença relacionada a LER/DORT (BRASIL, 2020).

“Os fatores considerados de risco para estas patologias são os movimentos repetitivos, o uso de aparelhos não ergonômicos, a postura de trabalho inadequada, o uso de força excessiva nos procedimentos, o repouso insuficiente, a falta de condicionamento físico, a pressão psicológica por resultados e as metas de produtividade, entre outros”. (DE MEDEIROS, SEGATTO, 2012).

Diante da situação e relação existente entre produtividade e adaptação ao ambiente de trabalho, foi levantada a possibilidade de desenvolver um dispositivo que pudesse ser posicionado no dedo polegar dos operadores de forma que se reduzam os esforços requeridos para a inserção manual dos tampões. Com isso, espera-se garantir maior conforto ergonômico aos operadores, bem como mais qualidade e confiabilidade ao processo.

1.3 OBJETIVOS

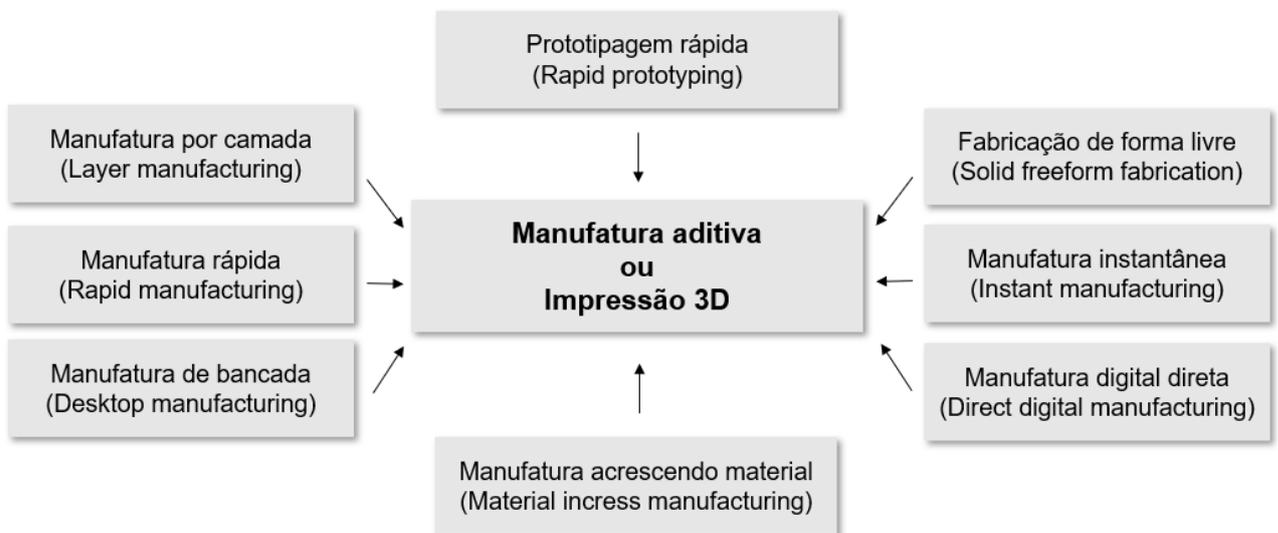
O presente trabalho tem como objetivo projetar e fabricar por manufatura aditiva uma peça conceitualmente baseada em um exoesqueleto, de forma que seja capaz de reduzir os esforços necessários à inserção de tampões em orifícios de carrocerias, processo geralmente realizado de forma manual pelos operadores nas linhas de produção da indústria automotiva. Dessa forma, espera-se obter maior conforto ergonômico e redução do risco de doenças ocupacionais aos trabalhadores, bem como ganhos de produtividade, qualidade e confiabilidade ao processo.

Com esta finalidade, é realizada uma revisão bibliográfica dividida em quatro capítulos, que apresentam conceitos e metodologias do processo de desenvolvimento de produtos, engenharia reversa, métodos de manufatura aditiva atualmente difundidos, bem como suas aplicações e vantagens no contexto da Indústria 4.0.

2 MANUFATURA ADITIVA

Os processos tradicionais de fabricação mecânica são baseados em métodos como a fusão seguida da moldagem do material (como no caso da moldagem por injeção de plástico), a remoção de material até atingir à forma buscada (torneamento, fresamento, etc.), a conformação para gerar a geometria da peça por deformação plástica do material (forjamento, laminação, estampagem de chapas, etc.), bem como a adição de material para juntar peças simples formando uma peça mais complexa (soldagem, brasagem, etc.) (VOLPATO et al., 2007). A Manufatura Aditiva, ou Impressão 3D (Figura 4), faz parte deste último grupo, e é definida pela norma ISO/ASTM 52900 (2021) como uma tecnologia que une materiais para obter peças por meio de dados oriundos de um modelo tridimensional a partir da deposição sucessiva de camadas, se diferenciando assim dos processos subtrativos de fabricação, como usinagem e eletroerosão.

Figura 4 - Principais variações de nomenclatura para MA



Fonte: Adaptado de Volpato (2017)

Este capítulo revisa noções gerais do funcionamento das categorias de processos de Manufatura Aditiva, conforme classificadas pela norma ISO/ASTM 52900 (2021), bem como aplicações, vantagens e desvantagens destas tecnologias no contexto atual.

2.1 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

A norma ISO/ASTM 52900 (2021) regula as nomenclaturas e definições dos processos de MA, e os classifica de acordo com o princípio de consolidação das camadas. Segundo a norma, os processos são classificados como jato de aglutinante; deposição com energia direcionada; extrusão de material; jateamento de material; fusão em leito de pó; laminação de folhas e fotopolimerização em cuba (Tabela 1). Conforme Gibson, Rosen, Stucker (2015), todos os processos de MA seguem o mesmo conceito: a adição de material em camadas, sendo que cada camada é uma fina seção transversal da peça em CAD. As principais diferenças entre estes processos estão nos materiais que podem ser utilizados e na forma pela qual as camadas são criadas e ligadas umas às outras. Essas diferenças, por sua vez, determinam fatores como a qualidade e propriedades do material do produto final, bem como tempo de produção, necessidade de pós processamento custo e dimensões da máquina.

Tabela 1 - Categorias de processos de MA

Categoria	Definição
Jateamento de aglutinante	Processo no qual um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó
Deposição de energia direcionada	Processo no qual a energia térmica concentrada é usada para fundir materiais por fusão à medida que são depositados
Extrusão de material	Processo no qual o material é dispensado seletivamente através de um bico ou orifício
Jateamento de material	Processo no qual gotículas de matéria-prima são depositadas seletivamente
Fusão em leito de pó	Processo no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó
Laminação de folhas	Processo no qual folhas de material são coladas para formar uma peça
Fotopolimerização em cuba	Processo no qual o fotopolímero líquido depositado em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz

Fonte: ISO/ASTM 52900 (2021)

Nesta seção, são descritos os princípios básicos de funcionamento destas tecnologias, cujas soluções disponíveis no mercado podem apresentar diferentes abordagens em um ou

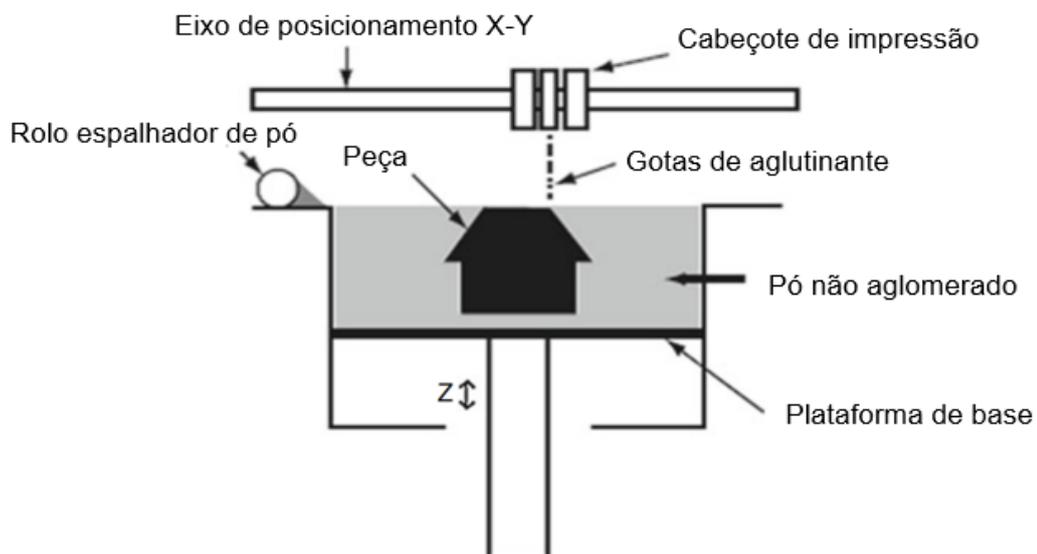
mais aspectos, devido a objetivos como a otimização e adequação de parâmetros ou substituição de recursos patenteados.

2.1.1 Jateamento de aglutinante (Binder Jetting)

Desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology (MIT) no início da década de 1990, o processo de jateamento de aglutinante foi a primeira tecnologia a ser intitulada “impressão 3D” (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020).

A técnica de jateamento de aglutinante que utiliza pó seco é a mais citada em artigos e disseminada comercialmente (COELHO, 2018). Neste método, o sistema é constituído por uma plataforma que atua como base para a construção das peças, um rolo que espalha o pó e um cabeçote que deposita líquido sobre o leito de pó, conforme mostrado na Figura 5. O processo se inicia com a deposição de uma fina camada de partículas de pó na plataforma de construção. Logo após, o cabeçote de impressão libera gotas de ligante, que une seletivamente as partículas de pó, que se solidifica. Assim que uma camada é criada, a plataforma desce uma camada, um rolo distribui pó na superfície e o processo se repete até que todas as camadas necessárias à formação da peça sejam realizadas (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

Figura 5 - Jateamento de Aglutinante



Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen, Stucker (2015)

Neste processo, podem ser empregados pós metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos (mistura de pós). A matéria prima utilizada para formar o pó e aspectos de sua geometria são fatores que influenciam a qualidade do processo (COELHO, 2018).

O pós-processamento das peças obtidas por este método inclui a remoção da peça do leito de pó, remoção do pó não aglutinado utilizando ar pressurizado, e infiltrando a peça com aditivos para torná-la mais forte e infiltrar alguma substância para fortalecer a peça e garantir propriedades desejadas (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

2.1.2 Deposição com energia direcionada (DED)

Este método utiliza uma fonte de energia térmica concentrada (laser, feixe de elétrons ou arco elétrico) para fundir e unir materiais metálicos enquanto são depositados seletivamente sobre um substrato ou peça. Este princípio pode funcionar para polímeros, cerâmicas e compósitos de matriz metálica, porém é predominantemente usado para pós e arames metálicos. As máquinas DED geralmente consistem em um bico montado em um braço multieixo, que deposita pó ou arame na superfície e no caminho de um feixe de energia, onde o material se funde e solidifica. A movimentação do cabeçote, da mesa de trabalho ou de ambos gera uma linha de deposição (cordão). A sobreposição destas linhas de deposição cria uma camada, e a adição de sucessivas camadas irá formar a peça (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015; DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020; TRUPPEL, 2020).

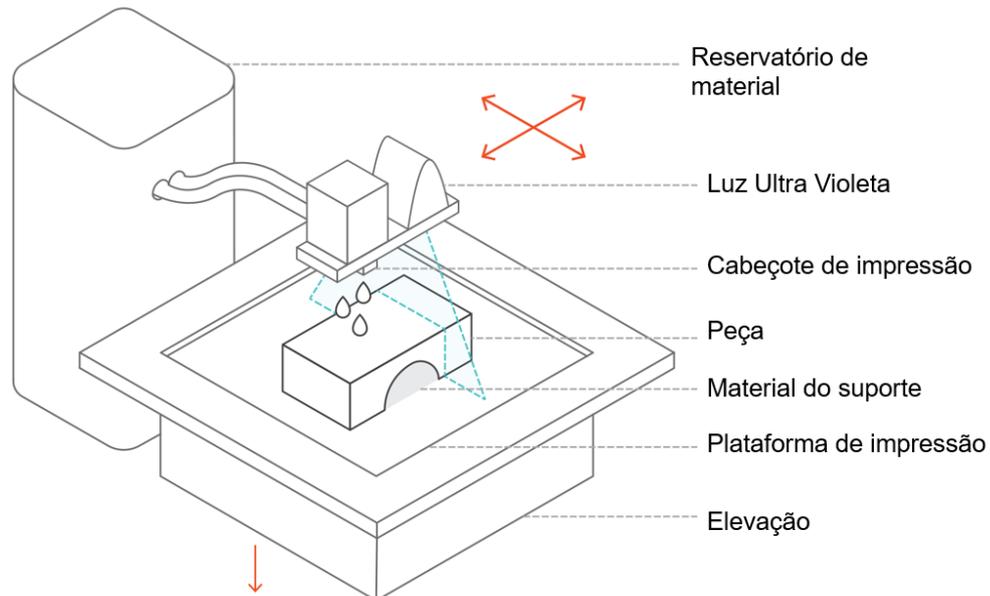
As peças produzidas por DED são consideravelmente menos precisas e com acabamento superficial inferior se comparadas a outros métodos de MA, exigindo pós-processamento por usinagem. Além da fabricação de novas peças, este processo também pode ser empregado para reparos em componentes já existentes (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020). Esta tecnologia é aplicada preferencialmente na fabricação de peças grandes.

2.1.3 Jateamento de material (PolyJet)

Neste método, o cabeçote de impressão deposita centenas de gotículas de fotopolímero líquido na plataforma de construção, que são então curadas por uma fonte de luz UV. Assim que uma camada é formada, a plataforma de construção desce uma camada e o processo se repete até a finalização da peça. Este processo permite a impressão com

diferentes materiais e cores em uma mesma peça, devido à possibilidade de ter múltiplos cabeçotes de impressão e depositar material em toda a superfície de impressão numa mesma trajetória. As peças obtidas por este processo são suscetíveis a degradação se desprotegidas e expostas à luz UV ambiente. (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020; VAROTSIS, c2022). Este processo é esquematizado na Figura 6.

Figura 6 - Jateamento de material



Fonte: Adaptado de Varotsis (c2022)

2.1.4 Fusão em leito de pó (Powder Bed Fusion - PBF)

A maioria dos sistemas de MA de metais utilizam processos de fusão em leito de pó, correspondendo a 54% desse mercado em 2020 (VAFADAR et al., 2021). Essas tecnologias incluem Sinterização a Laser (LS), Fusão Seletiva a Laser (SLM) e Fusão por Feixe de Elétrons (EBM). Nestes processos, uma fonte de energia concentrada (laser ou feixe de elétrons) funde seletivamente finas camadas de pó presentes na plataforma de construção (leito). Assim que uma camada é finalizada, o leito desce e uma nova camada de pó é espalhada, fundindo a camada atual e unindo à camada anterior (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020).

A fusão em leito de pó permite o uso uma ampla variedade de materiais, como polímeros, metais, cerâmicas e compósitos. Entretanto, há poucos materiais disponíveis no

mercado, possivelmente pela dificuldade de um processamento estável com resultados satisfatórios (VOLPATO et al., 2017).

Este tipo de processo é comumente empregado tanto para prototipagem quanto para a fabricação de produtos prontos para uso final, sendo que as propriedades mecânicas obtidas são compatíveis com as obtidas por processos tradicionais. Apresenta como vantagens a resolução fina e alta qualidade de impressão, sendo mais competitivo para aplicações de volume pequeno a médio e geometrias complexas. Destaca-se ainda o uso do próprio leito de pó como suporte, reduzindo ou eliminando a necessidade de construção de suportes extras. Como principais desvantagens, estão a lentidão e custo elevado (NGO et al., 2018; GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

2.1.5 Laminação de folhas

Esta categoria inclui Fabricação de Objetos Laminados (LOM) e Fabricação Aditiva Ultrassônica (UAM). A Fabricação de Objetos Laminados tem funcionamento baseado no corte e laminação camada por camada de folhas ou rolos de materiais. As camadas são cortadas com precisão usando um cortador mecânico ou laser e em seguida ligados entre si, de acordo com a geometria da seção da peça que é fabricada. LOM pode ser usado para vários materiais, como polímeros compósitos, cerâmicas, papel e fitas metálicas. A fabricação aditiva ultrassônica une as lâminas metálicas através de soldagem por ultrassom. Trata-se do único método de manufatura aditiva capaz de construir estruturas metálicas a baixa temperatura (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020; NGO et al., 2018).

2.1.6 Fotopolimerização em cuba

As principais tecnologias dessa categoria são a Estereolitografia (SLA), Processamento Digital de Luz (DLP) e a mais recente Produção de Interface Líquida Contínua (CLIP). Estes processos contam com uma cuba (ou tanque) preenchida com um fotopolímero líquido, que é curado seletivamente por uma luz UV. A reação química que endurece a resina submetida à radiação ultravioleta é chamada de fotopolimerização. Após o endurecimento de uma camada do modelo, a plataforma de construção sobe (ou desce, dependendo da máquina), uma nova camada de resina é espalhada sobre o topo da anterior, e o processo se

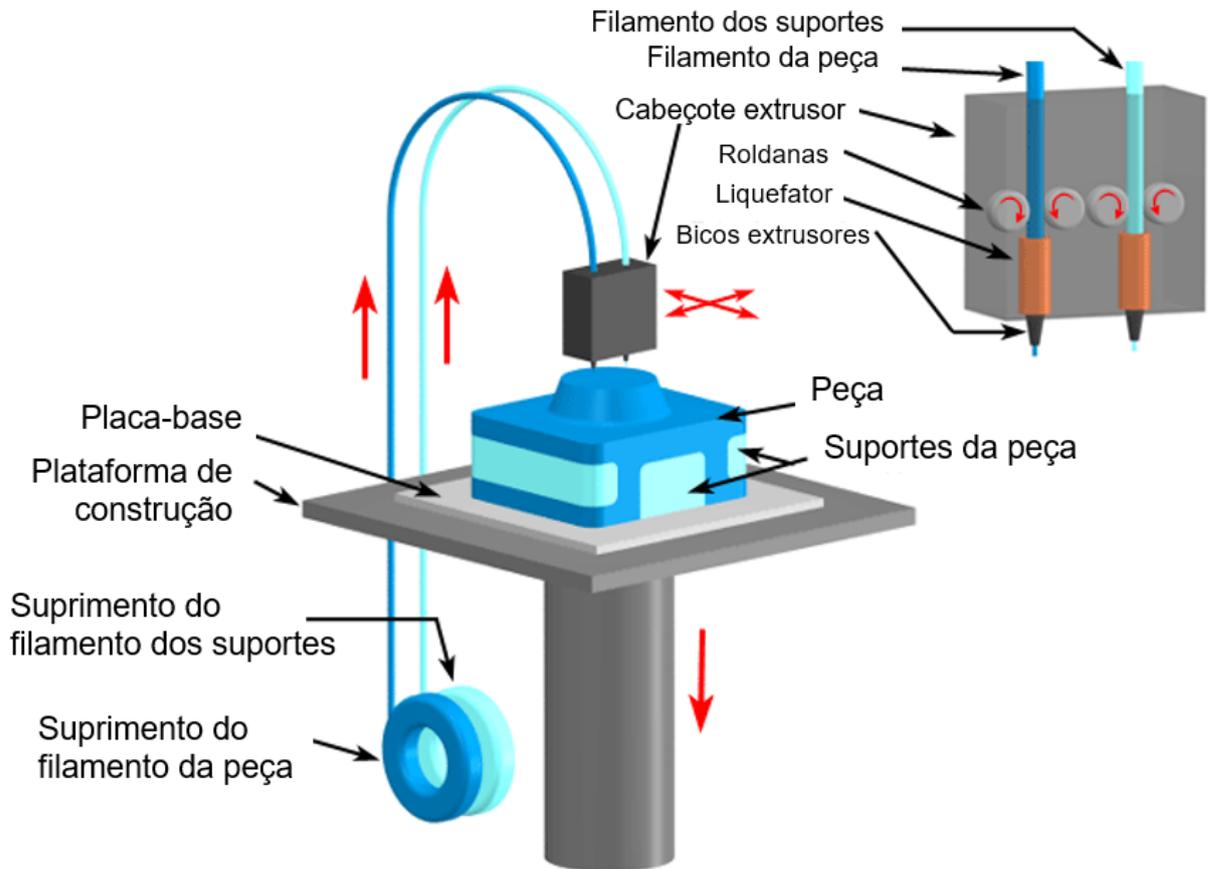
repete, construindo uma nova a fatia e ao mesmo tempo, ligando-a à camada anterior. (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015; DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020).

A fotopolimerização em cuba produz peças de alta qualidade e alta resolução, e alguns dos avanços recentes nas resinas permitem a produção de peças com clareza óptica suficiente para que, após o polimento, o componente seja transparente. Após a produção da peça, os suportes de sustentação construídos devem ser removidos manualmente e a peça deve ser pós-curada em um forno UV para endurecer completamente o material. Essas peças são suscetíveis à degradação se desprotegidas e expostas à luz UV ambiente. Trata-se de um processo de custo elevado, com pouca variedade de materiais disponíveis e processo de cura complexo, sendo mais indicado para fabricação de peças pequenas e geometrias complexas. (NGO et al., 2018; DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020).

2.1.7 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

O método de MA por extrusão de material é o mais comumente utilizado. Neste processo, esquematizado na Figura 7, o material é aquecido até atingir o ponto de fusão e depositado em locais definidos, através de um bico presente em um cabeçote de extrusão que é movido sobre a mesa de impressão. Ao ser depositado, o material fundido esfria e se solidifica. Após a conclusão de uma camada, a plataforma de construção desce uma fração de milímetros e o processo se repete. O cabeçote de impressão pode ter um segundo bico, que deposita estruturas de apoio para a construção de camadas sobressalentes (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020). Em algumas máquinas, a plataforma de construção se mantém fixa durante todo o processo e o cabeçote de extrusão se desloca para cima.

Figura 7 – Princípio do processo FDM



Fonte: Adaptado de CustomPartNet (c2022)

Para garantir a qualidade do processo, o material do filamento deve ter propriedades mecânicas que não permitam a flambagem antes de entrar no cabeçote de impressão. Ele deve passar pelo bico extrusor em estado pastoso num fluxo constante, se solidificar e aderir rapidamente à plataforma de construção e às camadas já depositadas (VOLPATO et al., 2017). Os filamentos mais utilizados são polímeros termoplásticos, cuja ausência de toxicidade, variedade de cores e tipos, em conjunto com a simplicidade e custo relativamente baixo do equipamento, tornam este método vantajoso (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015).

Podem ser produzidas peças prontas para o uso, química e mecanicamente estáveis, que não demandam pós-cura. Porém, em alguns casos pode exigir pós-processamento, como acabamento da superfície e a remoção de rebarbas e estruturas de suporte. O material utilizado nos suportes (Figura 8) pode ser mais frágil que o utilizado na peça, e sua remoção após a finalização do processo pode ser feita manualmente (VOLPATO, 2017).

Figura 8 - Exemplo da utilização de estruturas de suporte

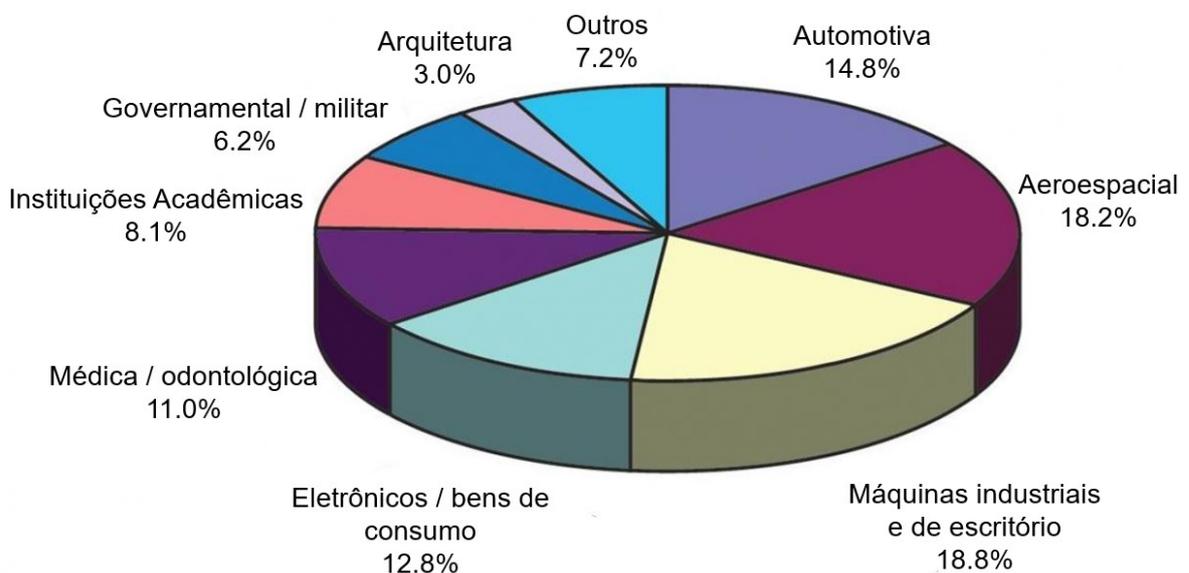


Fonte: Volpato (2017)

2.2 ALGUMAS APLICAÇÕES

A princípio usada para criação e visualização de modelos ao longo do processo de desenvolvimento, atualmente a manufatura aditiva já é encontrada em diversas áreas, e a quantidade de aplicações aumenta conforme os processos surgem e são aprimorados (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015). A Figura 9 apresenta os setores que mais utilizaram MA em 2016 segundo a consultora Wohlers Associates (NAJMON, RAEISI, TOVAR, 2019).

Figura 9 – Utilização de Manufatura Aditiva por setor



Fonte: adaptado de Najmon, Raeisi, Tovar (2019)

A indústria automotiva é uma das que mais utiliza a MA. Neste setor, apresenta variados usos, como prototipagem de peças novas e desenvolvimento de peças que já saíram de linha (LWT, 2016). Também são fabricados ferramentas, gabaritos, fixadores e diversos dispositivos para utilização no processo produtivo, conforme divulgado por montadoras como Volkswagen e Nissan, que relatam a vantagem dessa tecnologia na redução de custos e tempo de desenvolvimento (VRIES, 2017; MOLITCH-HOU, 2017; THE MANUFACTURER, 2021). Em 2018, o grupo BMW atingiu a marca de atinge 1 milhão de peças impressas em 3D após 10 anos da introdução da tecnologia em seus processos. A milionésima peça foi um trilho de guia de janela para o BMW i8 Roadster (BMW, 2018). Este modelo também possui outro componente produzido por manufatura aditiva: uma peça de fixação da capota (Figura 10), fabricada em liga de alumínio e com peso 44% menor que a peça de plástico injetado normalmente utilizada, porém dez vezes mais rígida (BMW, 2018; BAKEWELL, 2019, VAFADAR et al., 2021). A Bugatti já apresentou aplicações da MA de metais na produção de componentes estruturais de topologia otimizada. A Audi por sua vez revela utilizar a MA na produção de produtos personalizados, peças de reposição e peças que são solicitadas raramente (VAFADAR et al., 2021).

Figura 10 - Componente do i8 Roadster fabricado por fusão em leito de pó



Fonte: Zieler (2018)

A indústria aeroespacial foi uma das primeiras a adotarem as tecnologias de MA (VAFADAR et al., 2021). Nesta área, são vistas aplicações comerciais de alto perfil, incluindo motores de foguete de combustível líquido, tanques de propelente, componentes de satélite, trocadores de calor, válvulas e componentes estruturais (BLAKEY-MILNER et al., 2021). A Figura 11a e 11b mostram aplicações de MA de metais na indústria aeroespacial, sendo um

bocal de foguete da NASA e o motor do foguete Superdraco da SpaceX, respectivamente (BRYAN, 2020; BLAKEY-MILNER et al., 2021; SHER, 2019).

Figura 11 – Aplicações de MA de metais



Fonte: Bryan (2020); Sher (2019); Ribeiro (2020)

Aplicações da MA em diferentes áreas incluem as estruturas e paredes de concreto na construção civil (MA, WANG, JU, 2018; YOSSEF, CHEN, 2015); na moda desde solas de tênis (ZASTROW, 2020) até peças de alta costura (HEMMINGS, 2020); e na indústria alimentícia sob pretextos como a obtenção de estruturas mais complexas, nutrição personalizada e maior variedade ingredientes (BHANDARI, YANG, 2017; LIU, 2017). A Figura 11c mostra a primeira peça de MA para indústria de óleo e gás, produzida por pesquisadores da Universidade Federal de Uberlândia em parceria com pesquisadores do Centro de Pesquisas da Petrobras (RIBEIRO, 2020).

Recentemente a tecnologia se mostrou útil no combate à pandemia da COVID-19, por meio da produção de itens que se tornaram escassos devido à dificuldade dos fornecedores em suprir o aumento repentino da demanda, como válvulas para respiradores, escudos faciais e máscaras. Estes projetos voluntários foram amplamente documentados na mídia e em artigos científicos, e reafirmaram a versatilidade e caráter disruptivo da impressão 3D, que ainda apresenta muito potencial a ser explorado. Em março de 2020, uma empresa na Itália desenvolveu e imprimiu 100 válvulas para respiradores em 24 horas para um hospital que não possuía mais a peça (KLEINMAN, 2020). Projetos voluntários ao redor do mundo produziram e distribuíram protetores faciais (faceshields) de baixo custo aos profissionais de saúde da linha de frente. Foram desenvolvidos ainda diversos tipos de máscaras, inclusive modelos feitos sob medida. Flanagan, Ballard (2020) destaca que empresas compartilharam designs open-source, que permitiram que qualquer pessoa com uma impressora 3D pudesse ter acesso e utilizá-los. Para Radfar et al. (2021), esses esforços não atenderam toda a demanda no que tange a qualidade e quantidade, porém representam um passo significativo para demonstração do potencial da prototipagem rápida e manufatura aditiva. Outras aplicações em áreas médicas são apresentadas na seção 5.1.3.

2.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA MA

Atualmente, uma das maiores vantagens da MA na indústria é a redução de *lead times* (BLAKEY-MILNER et al., 2021). Ao reduzir o ciclo de projeto-fabricação, a MA possibilita ainda a redução do custo de produção e aumento da eficácia do processo de fabricação em um processo de produção sob demanda. Por isso, é vantajosa na produção de componentes em pequenos lotes. Trata-se de uma tecnologia versátil, com a possibilidade de ser aplicada nos mais diversos setores. Reduz restrições quanto às máquinas, moldes e processos de montagem e simplifica cadeias de suprimentos. A MA se destaca pela redução de custos na fabricação de produtos personalizados e customizados, permite respostas mais rápidas às variações do mercado e reduz o lead time da produção. (VALINO et al., 2019; ZIER et al., 2019; VOLPATO et al., 2017).

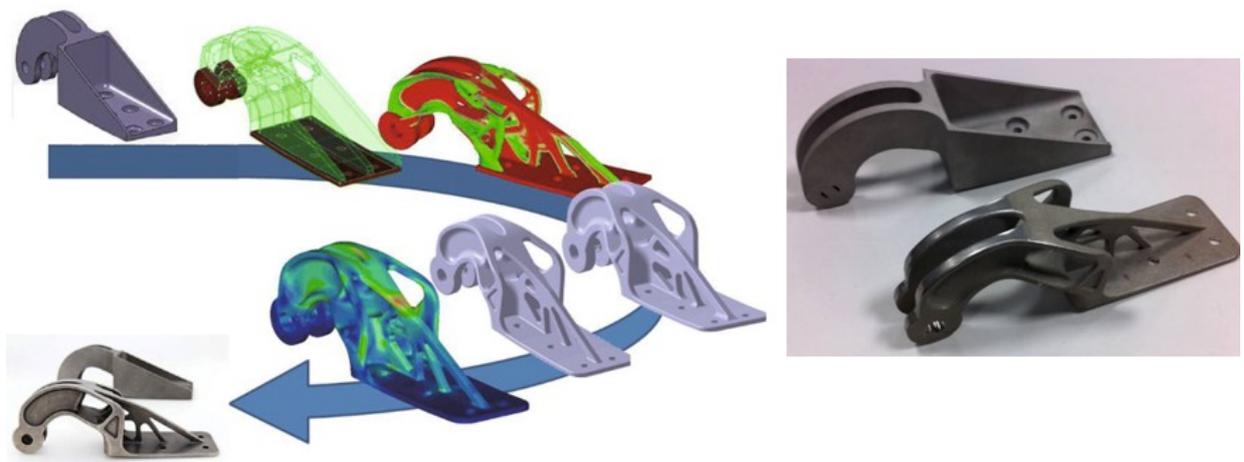
Os processos de MA são facilmente automatizáveis, se comparados a processos tradicionais, visto que permitem a fabricação um produto diretamente de seu modelo digital tridimensional gerado por computador, sem a necessidade de moldes e ferramentas, o que diminui a interferência do operador durante o processo. Enquanto os processos tradicionais de fabricação demandam uma análise ampla da geometria da peça para determinar aspectos como processos e ferramentas a serem utilizados, na MA são necessários apenas detalhes básicos da geometria desejada, entendimento sucinto do funcionamento da máquina a ser utilizada e materiais que serão empregados (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015; VOLPATO et al., 2007). Além disso, os processos de fabricação são facilitados por não exigirem dispositivos específicos para fixação e moldes. Os processos de MA dispensam a troca de ferramenta durante a fabricação, como ocorre em máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado), e a fabricação ocorre num único equipamento (dependendo da peça, pode ser necessário pós-processamento).

Através dos processos de MA, é possível fabricar estruturas complexas, muitas vezes inviáveis de serem produzidas pelos métodos convencionais de fabricação. Dessa forma, a MA permite a busca pela otimização do tamanho, forma e topologia de estruturas. A otimização topológica é um método computacional que busca essas estruturas, que resultam em geometrias complexas. Esse tema tem grande importância em setores como o aeroespacial, no qual o peso é um fator determinante no custo e viabilidade de estruturas (VOLPATO, 2017). Usando a MA em conjunto com Método dos Elementos Finitos (MEF) e ferramentas de CAD, é possível projetar estruturas leves porém de elevada resistência mecânica, permitindo a substituição de componentes já existentes por versões otimizadas que sejam mais compactas ou que requerem menos material para serem fabricadas (VALINO et

al., 2019). Essas otimizações podem reduzir a quantidade de material empregada na fabricação, que é distribuído de forma otimizada, reduzindo a massa do componente ao mesmo tempo em que as propriedades mecânicas e outros aspectos relacionados à performance são mantidos. Permite ainda a combinação de diferentes componentes em um só, reduzindo riscos e custos associados a fabricação e utilização de múltiplos componentes, bem como o potencial de falhas em juntas (BLAKEY-MILNER, 2021).

A Figura 12 mostra um caso onde é percebida a liberdade de criação por processos de MA, que permitem a fabricação de estruturas mais orgânicas. Trata-se de um suporte de dobradiça de um Airbus A320 que passou por otimização topológica que resultou numa redução de massa de 64% em relação a peça original (apesar do uso de Ti-6Al-4V ao invés de HC101, como na original, tenha correspondido a quase metade dessa melhoria em relação à massa). Na imagem da esquerda, observa-se o processo de otimização topológica. Na imagem da direita, a peça original acima e o design otimizado final abaixo (BLAKEY-MILNER, 2021). De acordo com Lim et al. (2016), a MA reduz o desperdício de material em aproximadamente 90% se comparada a manufatura subtrativa.

Figura 12 – Otimização de componente do Airbus A320 para fabricação por MA



Fonte: Adaptado de Blakey-Milner (2021)

Dentre as desvantagens, pode-se citar a baixa velocidade de construção, que limitam o uso para produção em massa, visto que a MA surgiu para, inicialmente, atender a aplicações de prototipagem rápida. Para aplicações industriais, os equipamentos, materiais e insumos possuem custo elevado (o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo tem mudado este cenário). Além disso, a eficiência do processo depende das dimensões da peça a ser produzida e está ligada ao seu custo final (ZIER et al., 2019; VOLPATO, 2017).

O princípio de adição de camadas representa desvantagens como precisão e acabamentos inferiores, se comparados com processos tradicionais como usinagem. Além

disso, torna as propriedades dos materiais diferentes das propriedades obtidas por processos tradicionais (VOLPATO, 2017).

Os possíveis defeitos encontrados nos processos de manufatura aditiva incluem distorções e empenamento do material, fusão insuficiente do material devido a deposição de material que não foi fundido adequadamente, fissuras e delaminação devido ao acúmulo de tensões residuais entre camadas depositadas. (OLIVEIRA, SANTOS, MIRANDA, 2020; VOLPATO, 2017). Defeitos como descontinuidades geradas durante o processo são identificadas somente após a finalização da construção da peça, o que representa desperdícios de tempo e recursos. Por isso, existe grande interesse no desenvolvimento de técnicas que monitorem o processo e notifiquem o operador assim que um defeito seja detectado (OLIVEIRA, SANTOS, MIRANDA, 2020).

Outras desvantagens incluem a falta de padrões técnicos amplamente aceitos, gama limitada de materiais, necessidade de pós processamento, necessidade de habilidades com ferramentas para projetar componentes com geometrias complexas que sejam viáveis e softwares de otimização topológica que consomem tempo, bem como a necessidade de estritos controles de qualidade e certificação dos processos (BLAKEY-MILNER, 2021). Além disso, variações entre diferentes séries de uma mesma impressora, juntamente com a qualidade de sua calibração e configuração podem influenciar a qualidade do produto final (VAFADAR et al., 2021).

De acordo com Alves (2021), a viabilidade econômica na MA é obtida para produtos de geometria ou composição de materiais complexas, necessidade de mudanças frequentes no design, fabricação sob demanda ou pequenos lotes.

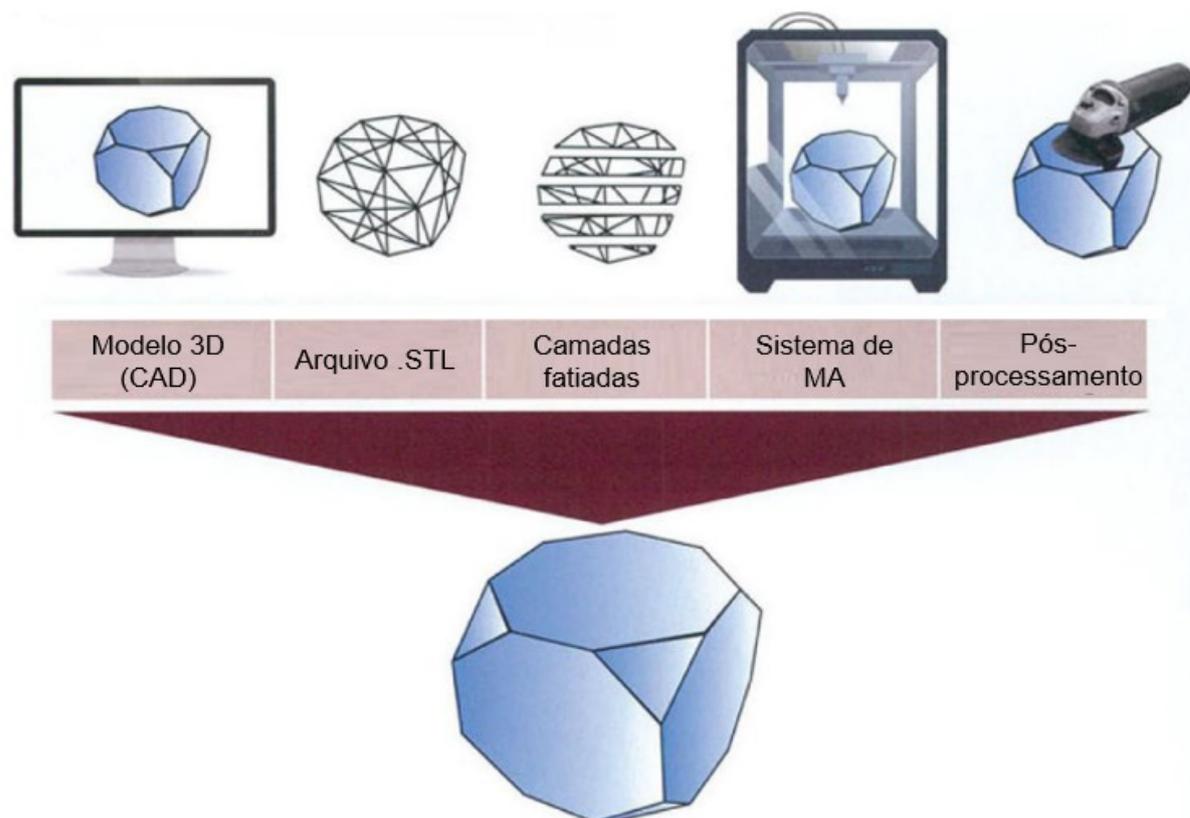
3 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO POR FDM

Este capítulo descreve os procedimentos seguidos para a fabricação por Modelagem por Fusão e Deposição e os principais materiais utilizados como matéria-prima neste método.

3.1 AS ETAPAS DO PROCESSO

A Manufatura Aditiva fabrica um determinado produto diretamente de seu modelo digital tridimensional, gerado por computador. Para isso, são seguidas algumas etapas, esquematizadas pela Figura 13 e descritas a seguir. Apesar do foco nos processos de FDM, parte significativa dos conceitos se aplicam também a outros processos de MA, e diferentes produtos podem envolver a MA em formas e graus distintos (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

Figura 13 - Fluxo do processo de MA



Fonte: Adaptado de Vitale, Cotteleer, Holdowsky (2016)

3.1.1 Etapa 1: Modelagem por CAD (Projeto Assistido por Computador)

Os processos de manufatura aditiva se iniciam com a modelagem tridimensional da peça desejada em um ambiente virtual (CAD), com o desenvolvimento de um modelo que descreva totalmente sua geometria. Para isso, pode ser utilizado qualquer software de modelagem ou equipamentos de engenharia reversa (scanners 3D) (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015; DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020).

Conforme classificado por Borges (2016), a maior parte dos softwares modeladores paramétricos tridimensionais atuais apresentam três ambientes principais: peças, no qual são modeladas as partes individuais do equipamento; montagem, onde os produtos e equipamentos são organizados e montados utilizando as peças previamente modeladas; e desenho, ambiente em que são geradas as vistas ortográficas e perspectivas para impressão ou geração de desenhos bidimensionais que fazem parte da documentação técnica do produto.

Com os softwares de modelagem, é possível criar protótipos virtuais, nos quais podem ser realizadas análises e simulações que avaliam o desempenho do produto final sem tornar necessário a fabricação de protótipos físicos. É o caso da análise por Método dos Elementos Finitos (MEF), amplamente empregada em projetos de engenharia. Com a montagem virtual do produto, é possível ainda obter a estrutura por meio de uma lista de componentes e materiais associados; a detecção de interferências entre peças e a execução de análises de movimentos entre os componentes do produto, incluindo posição, velocidade e aceleração (BORGES, 2016).

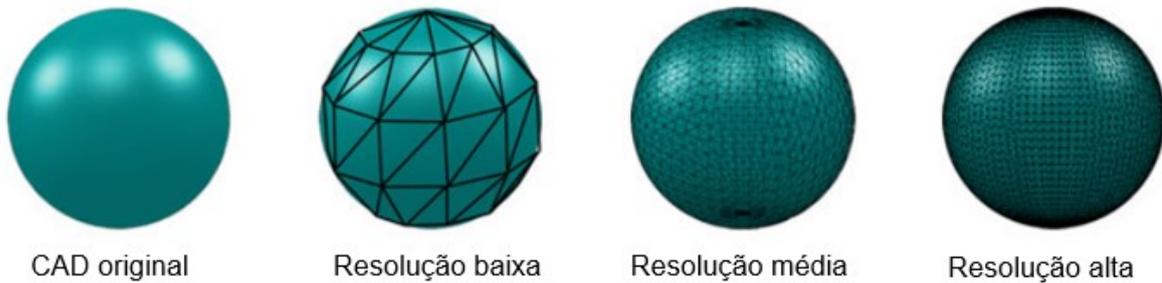
A modelagem deve ser realizada de forma que seja levada em consideração não apenas as características geométricas do modelo, mas também as propriedades específicas associadas ao material utilizado (BORGES, 2016).

3.1.2 Etapa 2: Conversão para o formato STL

O arquivo CAD deve ser convertido em um formato de arquivo que pode ser entendido pela máquina, sendo que o mais comum é o STL (Linguagem de Tesselação Padrão / Surface Tessellation Language), um formato de arquivo neutro projetado para que qualquer sistema CAD possa alimentar dados para o processo de impressão 3D. Praticamente todos os sistemas de MA aceitam este formato de arquivo, que descreve as superfícies externas

fechadas do modelo CAD original, que será utilizado como referência para o cálculo das fatias. O arquivo STL é basicamente um CAD triangulado, sendo que a quantidade de triângulos está relacionada a resolução do arquivo, conforme ilustrado na Figura 14 (GRIMM, 2004; GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015; DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020).

Figura 14 - Exemplos da resolução do arquivo STL



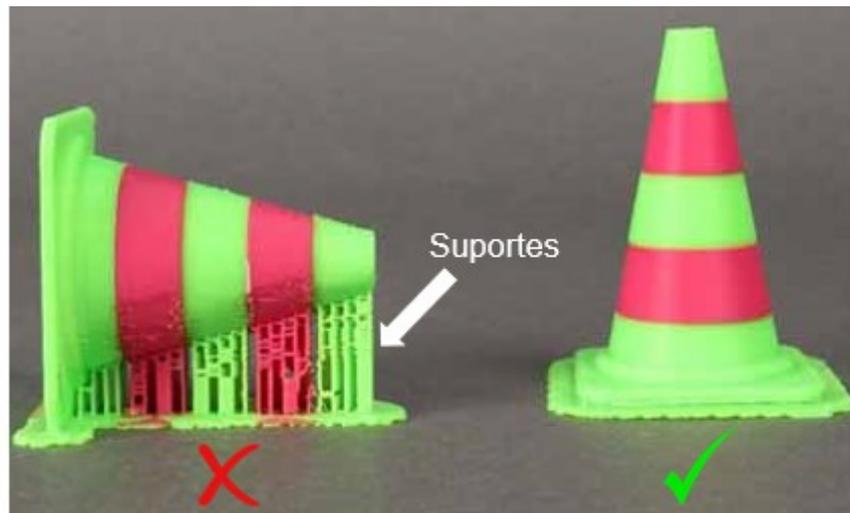
Fonte: Adaptado de Diegel, Nordin, Motte (2020)

3.1.3 Etapa 3: Transferência para a máquina

Nesta etapa, o arquivo STL com os dados da peça é transferido para a máquina que realizará a fabricação. No software da máquina, o arquivo pode ser manipulado para ajustes de escala, escolha do posicionamento mais adequado e orientação para construção (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015).

A orientação da construção é a busca da posição mais adequada para fabricação da peça, em concordância com as dimensões da máquina e de forma que sejam utilizadas a menor quantidade possível de suportes. Esta etapa é definida através da rotação do arquivo tridimensional em formato STL em relação aos eixos do sistema de coordenadas da impressora. A orientação da peça pode afetar tanto a qualidade da superfície quanto sua resistência. Determinados posicionamentos podem ainda resultar na produção de peças altamente anisotrópicas, com fragilidade entre as camadas ou na direção vertical da deposição de material. (ZIEMIAN et al. 2015; DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020). A Figura 15 exemplifica o efeito do posicionamento na qualidade da peça e quantidade de estruturas de suporte para a impressão de partes pendentes.

Figura 15 - Efeito da orientação da peça no processo de MA

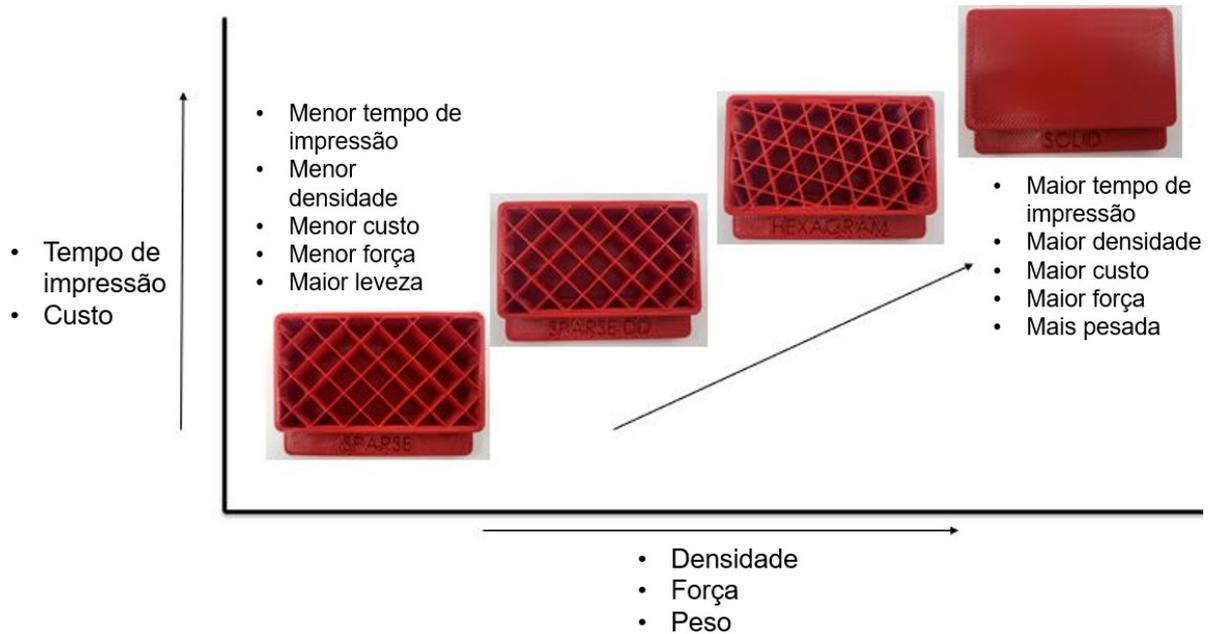


Fonte: Adaptado de Evans (2022)

3.1.4 Etapa 4: Configuração da máquina

Nesta etapa, o software da máquina divide o arquivo STL em camadas finas, podendo permitir ao usuário a definição de parâmetros como resolução de impressão (espessura da camada de material a ser depositada), padrões de preenchimento, sentido e velocidade de impressão (DIEGEL, NORDIN, MOTTE, 2020). Os parâmetros escolhidos afetam o resultado final da peça em aspectos como dimensões, qualidade e propriedades mecânicas, conforme verificado na literatura (DIZON et al., 2018; RANKOUHI et al., 2016; CHRISTIYAN et al., 2016). Dependendo da peça a ser produzida, podem haver prioridades distintas, como minimizar custos, reduzir tempo de fabricação e atender tolerâncias dimensional e geométrica (ZIEMIAN et al. 2015). Dessa forma, os parâmetros aplicados devem estar alinhados com os objetivos que se deseja buscar, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Efeitos da densidade e geometria das camadas internas no custo, tempo de impressão e propriedades da peça.



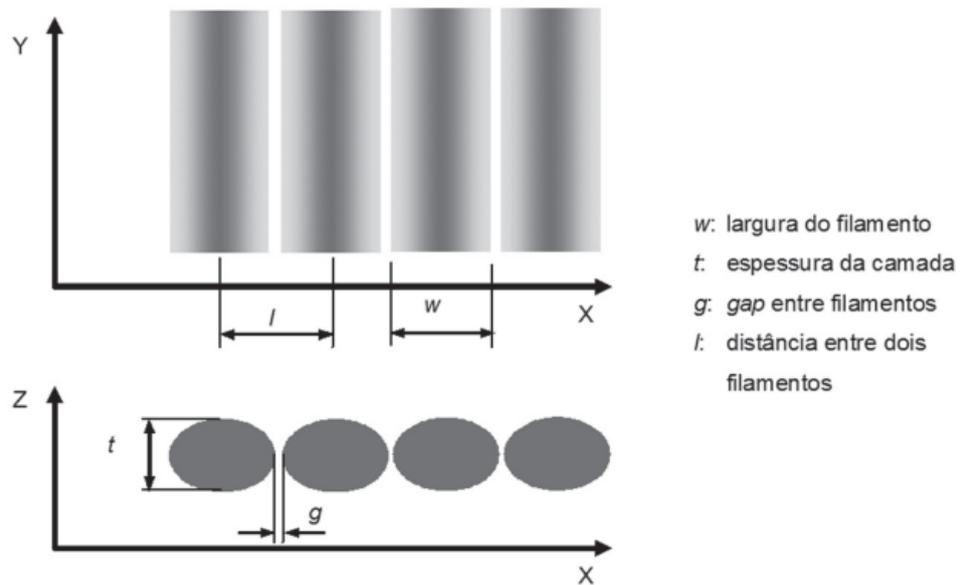
Fonte: Adaptado de Ricoh (c2022)

Ao formar uma camada, é definido um perímetro externo que delimita a região onde ocorre o preenchimento, chamado de contorno (DI NISIO, 2022). Este contorno pode ser preenchido de diferentes formas. A estratégia de preenchimento interno está relacionada a densidade das paredes da peça, que pode ser sólida ou hachurada de diferentes formas, sendo que quanto mais sólida, maior será a quantidade de material depositado e maior o tempo de fabricação.

A largura do filamento pode apresentar valores distintos para o contorno e para o preenchimento da peça. Como pode ser observado na Figura 17, a seção transversal do filamento extrudado apresenta formato próximo ao de uma elipse, visto que o filamento extrudado, ao ser depositado, é pressionado contra a camada previamente depositada. Isso melhora a adesão entre as camadas (VOLPATO, 2017; DI NISIO, 2022). O *gap*, também ilustrado na Figura 17, representa vazios entre dois filamentos adjacentes. Valores positivos para o *gap* resultam em espaçamento entre os filamentos, enquanto valores negativos ou iguais a zero permitem obter contato lateral entre dois filamentos (DI NISIO, 2022).

Também é possível definir a velocidade de movimento do bico extrusor e quantidade de material extrudado. A velocidade do bico extrusor se relaciona com a velocidade dos motores que executam seu posicionamento nos eixos X e Y. A quantidade de material extrudado, por sua vez, é associada à velocidade de rotação do motor do sistema de alimentação e assim, com a pressão aplicada no material no interior do cabeçote extrusor (DI NISIO, 2022).

Figura 17 - Representação da geometria transversal do filamento e seus parâmetros



Fonte: Volpato (2017)

O arquivo STL é “fatiado” em camadas individuais por um software, geralmente fornecido pelo próprio fabricante da máquina. O software gera automaticamente o G-code, um código que reproduz o arquivo STL fatiado e os parâmetros de impressão, e que irá orientar o funcionamento da máquina para a produção da peça (DIZON et al., 2018; VIAU, 2021).

3.1.5 Etapa 5: Construção

A construção da peça ocorre camada por camada, de acordo com o método e máquina escolhidos. Nos processos FDM, essas camadas bidimensionais são impressas uma acima da outra, formando assim um objeto tridimensional. Este é um processo automatizado que não exige supervisão constante. Entretanto, convém verificar o andamento do processo para identificar eventuais erros, como falta de material, ocorrência de quedas de energia e falhas software (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015; DIZON et al., 2018).

3.1.6 Etapa 6: Remoção da peça da máquina e pós-processamento

Com o fim do processo de impressão pela máquina, a peça é retirada. Em alguns casos, a peça já está pronta para uso, em outros casos ou dependendo da aplicação, pode demandar pós-processamento. Para as peças produzidas por FDM, o pós-processamento geralmente inclui a remoção de suportes e rebarbas de material de forma manual, bem como a pintura caso a cor desejada seja diferente da cor do filamento utilizado ou uma outra textura seja buscada.

3.2 MATERIAIS PARA FDM

Atualmente, existe uma gama diversificada de materiais utilizados em processos de MA. Dentre eles, estão os metais, concreto, produtos alimentícios e até tecidos humanos. Nesta seção serão destacados os materiais plásticos empregados nos processos de FDM.

Os materiais mais utilizados nos processos de deposição por extrusão são os polímeros termoplásticos, devido ao seu custo relativamente baixo e baixa temperatura de fusão. Dentre os mais utilizados estão o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PLA (Poliácido Láctico) e PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol), comercializados em formato filamentosos. Geralmente, são adicionadas partículas, fibras e nanomateriais aos termoplásticos para reforçar os filamentos. No mercado existem ainda termoplásticos de alto desempenho, como PEEK (Polieteretercetona) e PEI (Polieterimida), que demandam maiores temperaturas, incompatíveis com as máquinas mais comuns. (VALINO et al., 2019; TIAN et al., 2016; DICKSON, ABOURAYANA, DOWLING, 2020; VILELA, 2021). Há ainda filamentos preenchidos com pós metálicos, que podem ser utilizados em impressoras FDM convencionais. Nestes casos, os pós metálicos são misturados a filamentos como ABS ou PLA em porcentagens variadas (VAFADAR et al., 2021).

Segundo Chua, Leong e Lim (2010), peças impressas com termoplásticos chegam a ter até 85% da resistência mecânica de peças do mesmo material obtidas por injeção. Os filamentos normalmente apresentam as características descritas a seguir:

[...] os materiais são caracterizados por seu diâmetro, normalmente de 1,75 mm; pela faixa de transição vítrea, que deve ser estreita para permitir a formação de material viscoso durante a extrusão e solidificação em pós-extrusão sem necessidade de grandes diferenças de temperaturas

controladas (ΔT); e pelo módulo de elasticidade, tendo taxas de viscosidade abaixo de $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ para prevenção de obstruções no bico de extrusão. (VILELA, 2021).

3.2.1 Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

O ABS é um polímero termoplástico amorfo que dispõe de propriedades como alta rigidez, alta temperatura de transição vítrea, resistência a choques mecânicos, abrasão e deformação. Se destaca ainda pela durabilidade e estabilidade, sendo resistente a ambientes desfavoráveis, como exposição à radiação UV. Sua resistência a tração está entre 31,9 MPa e 51,2 MPa, módulo de elasticidade próximo de 2,49 GPa. (AUMNATE et al., 2018; VILELA, 2021).

Para utilização na MA, recomenda-se que a temperatura do bico extrusor esteja entre 215 °C e 250 °C, a temperatura da mesa de impressão deve estar entre 100 °C e 130 °C e a velocidade de impressão seja de até 180 mm/s (CARNEIRO et al., 2019). Conforme avaliado por Carneiro et al. (2019), a influência da temperatura da mesa de impressão é baixa na dureza, porém significativa nas dimensões macrogeométricas de amostras impressas em ABS. Peres, Gomes, Guarato (2021) estuda a influência da temperatura do bico extrusor nas tolerâncias dimensionais de amostras impressas em ABS, obtendo melhores dimensões gerais com o bico a 250 °C e melhores tolerâncias dimensionais para diâmetros internos utilizando temperatura de 210 °C.

O material apresenta como desvantagens a combustibilidade, baixa resistência química, temperatura de atuação limitada e propensão à deformação. As porcentagens consideráveis de porosidade que se formam em suas camadas podem prejudicar as propriedades mecânicas da peça produzida (VILELA, 2021).

3.2.2 Poliláctico (PLA)

O PLA é um polímero biocompatível sintetizado a partir de fontes naturais como milho e cana-de-açúcar. Quando comparado ao ABS, o PLA, dispõe de maior resistência mecânica e menor coeficiente de expansão térmica. Isso representa melhor processabilidade, resultando em vantagens como a redução de empenamento durante a impressão. Tem

resistência à tração entre 50 MPa e 70 MPa, módulo de elasticidade entre 3,0 GPa e 4,0 GPa, temperatura de transição vítrea entre 55 °C e 65 °C e ponto de fusão entre 170 °C e 180 °C quando semicristalino (SANTANA et al., 2018). Este ponto de fusão é menor que o do ABS, não necessitando de mesa aquecida para impressão (BESKO, BILYK, SIEBEN, 2017).

As características que limitam seu uso incluem baixa resistência à tração, que o torna quebradiço e desvantajoso em aplicações que demandam deformações plásticas, como elementos de fixação. Apresenta ainda baixa resistência ao impacto (RASAL, JANORKAR, HIRT, 2010; SANTANA et al., 2018).

Possui muitas aplicações em diversas áreas, e devido a suas propriedades e por ser biodegradável e biocompatível (inofensivo ao organismo humano), é um dos polímeros mais escolhidos para aplicações em áreas médicas e de alimentos (RASAL, JANORKAR, HIRT, 2010). Os filamentos deste material são comercializados em diversas cores, com variações brilhantes, foscas e translúcidas. Seu armazenamento requer cuidado, visto que absorve umidade do ar facilmente (BESKO, BILYK, SIEBEN, 2017).

3.2.3 Polietireno tereftalato de etileno glicol (PETG)

O PETG é um polímero amorfo, obtido pela adição de glicol modificado durante a polimerização do PET. Apresenta temperatura de transição vítrea próxima de 80 °C, se destaca pela tenacidade, flexibilidade e alta capacidade de processamento. Na literatura há registros de resistência à tração próxima de 25 Mpa e 50,4 MPa, alongamento até a ruptura entre 73% e 93% e módulo de elasticidade entre 1,6 GPa e 2,02 GPa (SANTANA et al., 2018). Sua temperatura de impressão está por volta de 220 °C e 250 °C e necessita de mesa aquecida (BESKO, BILYK, SIEBEN, 2017). Conforme avaliado por De Miranda et al. (2019) através de ensaios com amostras impressas em PETG, quanto mais alta a temperatura do bico extrusor, maior será o Módulo de Young. Dessa forma, foram obtidas maiores resistências a deformação para as amostras impressas com temperaturas mais elevadas, enquanto temperaturas menores resultaram em melhores acabamentos superficiais e menor incidência de empenamento.

O PETG vem ganhando cada vez mais espaço por unir características favoráveis do ABS e PLA. Assim como o ABS, apresenta alta durabilidade e resistência, além da facilidade de impressão característica do PLA, sendo recomendado para fabricação de componentes flexíveis e duráveis (SANTANA et al., 2018; LEFTERI, 2018).

4 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Para Shigley (2011), projetar é elaborar planos visando resolução de um problema ou o suprimento de uma necessidade. Naveiro, Oliveira (2001) destaca que “O processo de projeto envolve uma série de atividades de criação, tais como planejamento de artefatos, desenvolvimento de produtos, síntese do produto e solução de problemas”. O Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) pode ser definido como as atividades que buscam suprir necessidades do mercado e dos clientes levando-se em conta as possibilidades tecnológicas, as estratégias competitivas e o custo, para assim, definir as especificações de projeto de um produto e a viabilidade de sua manufatura, que deve atender restrições de custo e de qualidade (ROZENFELD et al., 2006). Segundo Volpato (2017), “Uma atividade essencial no PDP é o projeto, que é composto por várias etapas, constituindo-se num processo sistemático capaz de solucionar um problema, ordenando as atividades sem restringir a criatividade.”

A engenharia do produto detalha os componentes, materiais e ferramentas que constituem o produto, elabora os desenhos técnicos, define os detalhes do processo, bem como fichas de processo, montagem e custo. Para isso, são considerados a competitividade do mercado, sendo importante, ao projetar, buscar soluções criativas e inovadoras. Neste contexto, faz parte das preocupações do engenheiro a busca por redução de custos do processo ao mesmo tempo em que busca melhorias no desempenho e qualidade, de forma que o produto seja competitivo no mercado (NUNES, BORGES, 2006). Devido a competitividade do mercado, o PDP deve ser capaz, em habilidades e competências, a operar de forma dinâmica e flexível (ROZENFELD et al. 2006).

A Tabela 2 apresenta de forma sintetizada as etapas necessárias ao desenvolvimento de produto. É possível encontrar na literatura diversas propostas de metodologias, cabendo às organizações a seleção ou adequação daquela que seja mais coerente com as suas realidades (OLIVEIRA et al., 2015).

Tabela 2 - Resumo das etapas de processo de projeto

Etapas	Descrição
Especificação do problema	Verificação das necessidades de usuários. Exame das possibilidades de realização
Estruturação do problema	Decomposição do problema global em subproblemas.

Geração de alternativas	Proposição de soluções globais para o problema proposto inicialmente. Proposição de soluções para os subproblemas identificados anteriormente.
Seleção de alternativa	Uso de metodologias para escolha da alternativa de solução mais adequada para os problemas identificados.
Detalhamento do projeto	Elaboração da documentação final, detalhamento dos componentes, planejamento da produção, entre outros aspectos.

Fonte: Borges (1998)

Segundo Alves (2021), as teorias de PDP mais comumente empregadas começam com a identificação e mapeamento da necessidade, seguido de estudos de viabilidade econômica, identificação do público alvo, verificação da necessidade da solução e análise de mercado. Rozenfeld et al. (2006) menciona as fases de Projeto Informacional, na qual informações são adquiridas e transformadas, e a fase de Projeto Conceitual, que envolve a busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema em questão. A busca inclui a procura por soluções já existentes, podendo envolver a observação de produtos concorrentes. A criação de soluções não possui restrições, porém deve ser voltada aos requisitos e especificações de projeto do produto, em conjunto com a criatividade. A representação pode ser feita por esboços e esquemas. A seleção das soluções é baseada na viabilidade dos métodos de acordo com as necessidades e requisitos estabelecidos inicialmente.

4.1 MANUFATURA ADITIVA NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

A metodologia “*Design for X*”, traduzida como “Projeto para X”, é uma ferramenta aplicada ao desenvolvimento de produtos visando otimizar o desenvolvimento com base em alguma característica “X”. Esse foco pode ser na montagem, cadeia de suprimentos, resistência, rigidez, qualidade, customização em massa, entre outros. Dessa forma, essa prática permite reduzir erros, custos e prever possíveis modificações de projeto para evitar atrasos no PDP, bem como buscar altos níveis de excelência de acordo com a característica

aplicada. Essas técnicas facilitam o PDP e cumprem necessidades e requisitos de forma assertiva, resultado em ganhos de desempenho, qualidade e lucratividade (BENABDELLAH et al., 2019; ALVES, 2021).

O Projeto para Manufatura e Montagem é elaborado de forma que as dificuldades de fabricação sejam eliminadas, bem como os custos reduzidos. As possibilidades trazidas pelas tecnologias de MA permitem que esse processo seja repensado de forma que suas características sejam aproveitadas, sendo aplicadas em áreas como forma, hierarquia estrutural, composição de materiais e funcionalidade. O Projeto para Manufatura Aditiva considera simultaneamente aspectos como os objetivos do projeto, as restrições de fabricação, processos, materiais e necessidades do usuário. (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2015; ALVES, 2021).

O desenvolvimento de técnicas de manufatura aditiva de menor custo, mais rápidas e capazes de fabricar peças com qualidade satisfatória tem impulsionado a tecnologia e continuamente mudado a forma como produtos são desenvolvidos, fabricados e utilizados pelos usuários. Como a impressão 3D, se tornou mais fácil produzir protótipos de ideias, inclusive aquelas com design complexo, reduzindo o tempo de processo de semanas para algumas horas. Assim, a MA pode minimizar custos de produção e melhorar a eficiência dos setores de manufatura (DIZON et al., 2018).

A MA possibilita maior agilidade e assertividade no PDP, por materializar ideias e facilitar a validação de decisões e resultados, além de auxiliar o exercício da criatividade (VOLPATO, 2017). Devido a essas facilidades, a MA é uma alternativa considerada para produção em diversas áreas (DIZON et al., 2018). A utilização da MA para prototipagem rápida, por exemplo, tem papel importante no desenvolvimento de produtos, pois permite uma comunicação eficiente entre os envolvidos no projeto, facilita a tomada de decisões e possibilita a antecipação de testes que indicam erros de projeto logo nas fases iniciais de desenvolvimento, prevenindo gastos com alterações tardias ou até o reprojetado de peças devido a inviabilidades técnicas. Assim, as fases de design e engenharia podem trabalhar quase simultaneamente (VOLPATO et al., 2007; ALVES, 2021). Em projetos interativos, onde há junção do projeto do produto com o projeto do processo, permite redução do tempo de atividade do projeto, desde a concepção até a introdução no mercado, encurtando o tempo de lançamento (Time to Market) do produto (MACEDO, 2011).

Ao avaliar a possibilidade de utilização da MA, o projetista tem liberdade para atribuir geometrias ao produto, porém deve verificar as oportunidades e restrições associadas ao processo escolhido para definir as melhores soluções para o projeto e processo de fabricação de forma simultânea. Devem ainda ser consideradas as características desejadas ao produto fabricado, bem como aspectos econômicos.

A norma ISO/ASTM 52910 (2018) apresenta um modelo de PDP voltado à MA, com recomendações e aspectos gerais que podem ser considerados para aproveitamento das vantagens dos processos de MA.

5 ENGENHARIA REVERSA

Engenharia Reversa (ER) consiste na utilização de modelos já existentes para produzir novas peças, produtos ou ferramentas. Tradicionalmente, este é um processo empregado quando se faz necessário a substituição de um componente por outro similar, cujas informações não são totalmente conhecidas, ou quando se almeja o desenvolvimento de adequações e melhorias (INGLE, 1994 apud ALES, 2010). Abella (1994) define ER como a produção de uma peça baseada em sua versão original ou modelo físico sem que sejam utilizados desenhos técnicos para isso. Para Sokovic e Kopac (2006), ER é o processo de criação de um modelo matemático a partir de um modelo físico.

Segundo Rathore e Jain (2014), um componente pode ser alterado no chão de fábrica para atender demandas surgidas, e essas alterações podem não ser incluídas nos desenhos dos componentes. Neste caso, a ER serve para atualizar estes dados para uso na próxima fabricação deste componente. Ainda de acordo com Rathore e Jain (2014), a ER pode ser empregada caso um fornecedor deixe de produzir peças de reposição; para inspeção dimensional de componentes pela comparação da geometria digitalizada com o modelo em CAD (Figura 18); e para o projeto de componentes com design ergonômico. Outras aplicações da ER, conforme listado por Ferneda (1999), incluem adequações de produtos importados; necessidade de obter dados de um concorrente; preferência por modelar componentes a mão livre devido a peculiaridades da geometria que dificultam o uso de CAD; replicação de elementos da anatomia humana; replicação de obras de arte, dentre outras.

Alves (2010) cita o uso da ER em conjunto com imitação e adaptação para capacitação tecnológica voltada ao desenvolvimento de produtos e introdução de melhorias. Rozenfeld et al. (2006) define como projetos incrementais ou derivados aqueles que criam produtos e processos derivados, híbridos ou com ligeiras alterações de projetos ou processos já estabelecidos, e com isso, demandam menos recursos, ampliando seu ciclo de vida e possibilidades de aplicação.

Figura 18 - Inspeção de qualidade por engenharia reversa



Fonte: Adaptado de Wishbox (2021)

Na indústria atual, a busca pela otimização de processos, redução de tempos e custos são constantes devido à alta competitividade e escassez de recursos, num cenário onde é crescente a demanda por produtos customizados de acordo com os gostos e necessidades específicas dos usuários, bem como aspectos ergonômicos. Neste contexto, a Engenharia Reversa atua como aliada ao agilizar e flexibilizar os sistemas produtivos, impulsionada pelo desenvolvimento de recursos como scanners 3D, softwares de CAD e prototipagem rápida. Essas ferramentas são capazes de viabilizar a customização de produtos com menores custos e prazos. Para Volpato (2017), a liberdade de alteração do design do produto e a adequação quase imediata do meio de produção pela MA abrem espaço para a introdução da customização em massa, aumentando a variedade e diminuindo a quantidade a ser produzida.

Segundo Dias (1998), conforme citado por Mury (2000), a ER se difere do processo tradicional de desenvolvimento de produtos por partir de um produto já concebido, enquanto os métodos tradicionais são iniciados com o desenvolvimento de uma ideia nova. Assim, são necessárias diferentes ações de caráter técnico. Mury (2000) destaca o uso da ER na fase de desenvolvimento de um produto quando a intenção é ter como referência os parâmetros de qualidade de um produto já existente e aperfeiçoá-los, com base em aspectos de qualidade determinados pelo cliente.

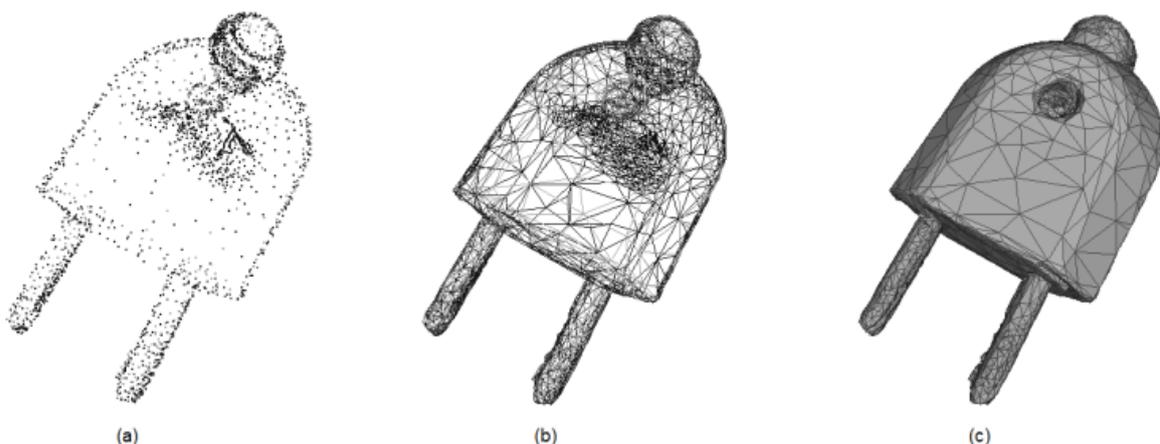
Sokovic e Kopac (2006) destacam a importância da ER, em especial as ferramentas de digitalização tridimensional, para o desenvolvimento de produtos no contexto da indústria automotiva, já que cada veículo recebe uma grande quantidade de peças ao longo do processo de montagem. Sendo assim, quaisquer mudanças no modelo dos veículos implicam na necessidade de alteração de várias peças. As tecnologias de ER são facilitadores desses

processos ao possibilitar a obtenção da descrição dimensional exata de componentes de forma ágil.

5.1 DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

A digitalização tridimensional (ou escaneamento 3D) é o primeiro e mais importante passo num processo de ER, de forma que a qualidade do resultado da ER depende da qualidade do processo de digitalização (MIAN, AL-AHMARI, 2019). Este processo permite a obtenção de um modelo virtual a partir da coleta de dados de uma superfície tridimensional já existente fisicamente. Esses dados são um conjunto de coordenadas de pontos, obtidos a partir da movimentação de um sistema ao redor da superfície, e armazenados na forma de nuvem de pontos, em que cada ponto corresponde a uma coordenada da superfície do objeto escaneado. As coordenadas podem ser apenas $[x,y,z]$, $[x,y,z,c]$ para digitalizadores que capturam outros parâmetros do ponto como cor e temperatura, ou $[x,y,z, i,j,k]$, quando são inclusos dados da inclinação do equipamento utilizado. Essas coordenadas formam uma nuvem de pontos, que é tratada e convertida em superfícies (SOKOVIC, KOPAC, 2006; FREITAS, 2006), conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 - (a) Representação de objeto escaneado por nuvem de pontos, (b) malha de triângulos e (c) reconstrução da superfície do objeto.



Fonte: Gomes, Simas (2014)

O arquivo obtido pela digitalização tridimensional podem ser manipulado e receber modificações, permitindo o desenvolvimento de um novo modelo a partir daquele já existente, sem necessidade de utilizar desenhos prévios como referência (SOKOVIC, KOPAC, 2006).

5.1.1 Técnicas de digitalização tridimensional

A digitalização tridimensional pode apresentar diferentes princípios de operação. A escolha da técnica a ser utilizada influencia na viabilidade e qualidade dos dados a serem obtidos, e devem ser considerados aspectos da geometria como dimensões, existência de furos, rugosidades na superfície. As tecnologias de digitalização tridimensional podem ser classificadas de forma geral como digitalizadores com contato físico ou digitalizadores sem contato físico.

O escaneamento por contato (linear ou ponto-a-ponto) explora a geometria da superfície de interesse através de um apalpador com uma ponta dura (sonda), de forma que sensores internos determinam a posição espacial da ponta e permitem assim a reconstrução do objeto a partir das nuvens de pontos (MOLINA, HERAS, 2015). Este tipo de scanner geralmente opera em plataformas fixas, com a sonda localizada no final de um braço mecânico articulado, máquina de medição por coordenadas (CMM - Coordinate Measurement Machines) ou controle numérico por computador (CNC). O braço pode ser robotizado ou manipulado manualmente sobre a superfície (EBRAHIM, 2015; SANTOS, 2016).

Este método (Figura 20) tem como vantagens a ótima precisão e a possibilidade de digitalizar também objetos de superfície transparente, brilhante e reflexiva. Dentre as limitações, estão o longo tempo do processo, o custo do maquinário e manutenção complexa. Além disso, a necessidade de encostar no objeto durante todo o processo traz consigo o risco de danificar a superfície (CHAN et al., 2011; SANTOS, 2016).

Figura 20 – Escaneamento 3D por contato utilizando braço manipulado manualmente



FONTE: Faro (c2022)

Os digitalizadores sem contato realizam a varredura das geometrias de forma mais rápida, capturando uma maior quantidade de pontos simultaneamente. Os métodos de escaneamento 3D sem contato incluem fotogrametria por fotografias digitalizadas, radar laser, tomografia, tunelamento, moiré de proteção e luz infravermelha, CCD linear, triangulação laser de varredura por ponto, triangulação laser de varredura por linha, triangulação por cores com câmeras CCD (Dispositivo de carga acoplada) e sensor conoscópico a laser (SILVA, 2011).

Os scanners 3D a laser (Figura 21) podem ser divididos em três categorias: tempo de voo, mudança de fase e triangulação a laser. Essas técnicas podem ser usadas tanto de forma independente quanto combinadas, com ganho de versatilidade ao sistema (EBRAHIM, 2015). Este tipo de scanner geralmente é utilizado para digitalização de objetos pequenos em curtas distâncias, visto que em grandes distâncias podem surgir erros consideráveis de leitura (BUENO, 2012). Neste trabalho, são destacados os scanners a laser que seguem o princípio da triangulação, que é a tecnologia mais difundida entre os scanners comerciais (GOMES, SIMAS, 2014).

Figura 21 – Escaneamento 3D a laser

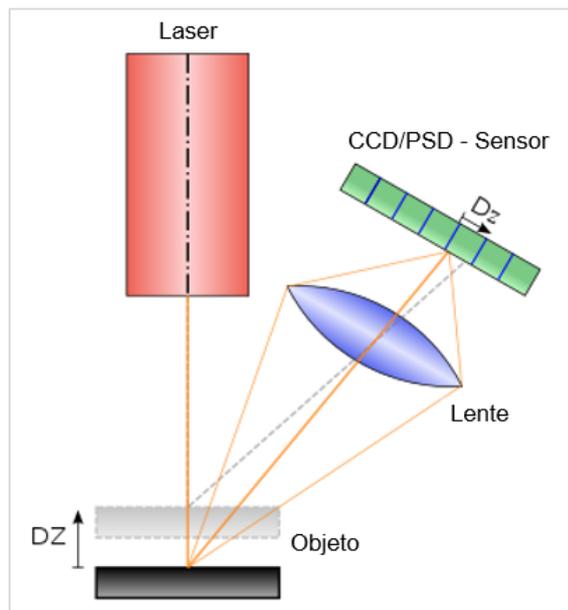


Fonte: Creafom (2020)

Os sensores a laser emitem um feixe de luz linear ou em formato de plano na superfície a ser escaneada. Estes sistemas possuem ao menos 1 câmera, que capta a intersecção entre a superfície do objeto e o ponto ou linha do laser. Esta câmera geralmente é do tipo CCD, e possuem uma matriz de células fotossensíveis que geram um sinal elétrico analógico proporcional à intensidade da luz. Estes sinais são então convertidos em sinais numéricos por um conversor analógico-numérico. Dependendo da distância que o laser atinge a superfície

do objeto, o laser aparece em pontos diferentes do campo de visão da câmera. Esta técnica é chamada de triangulação pois a luz do laser, a câmera e o emissor do laser formam um triângulo imaginário entre eles (Figura 22) (EBRAHIM, 2015; GOMES, SIMAS, 2014).

Figura 22 - Princípio de um sensor de triangulação a laser (duas posições do objeto são mostradas)



Fonte: adaptado de Ebrahim (2015)

O laser linear é projetado na peça e a câmera captura uma imagem que contém este feixe. Sabendo a posição da câmera e utilizando a posição do pixel na imagem, é possível estimar um vetor entre o pixel na imagem e o ponto da peça que está sendo escaneada. Sabendo o posicionamento do laser, é possível equacionar um plano formado pela projeção de sua luz. A interseção deste plano com vetor descreve o ponto que contém o dado espacial da peça (SANTOS, WINSCH, 2014).

Dentre os fatores que afetam a precisão escaneamento a laser, está a resolução da CCD. Além disso, no caso de peças reflexivas, o efeito de luz incidente nas superfícies se torna um obstáculo à digitalização à laser. Como a luz refletida do objeto deve ser reconhecida por um sensor, os efeitos da difusão reduzem a precisão do processo (CHAN et al., 2011). Dessa forma, devem ser adotadas medidas que tornem essas superfícies opacas, como pintura ou deposição temporária de pó. Outra possibilidade é a utilização de sensores a laser infravermelho, que emitem uma luz infravermelha de alta potência sobre a peça, resultando num aquecimento da região, que é capturado por uma câmera infravermelha.

Os dados capturados são otimizados para estruturação e otimização do arquivo gerado. Na malha digitalizada podem aparecer elementos residuais, que são quaisquer ruídos fora do objeto de interesse captado durante o escaneamento. O surgimento desses elementos

está associado a vários fatores, como a reflexão do feixe de laser por parte do objeto e captura de superfícies presentes no ambiente ao redor da peça que está sendo digitalizada (WEIGERT, 2017). Para isso, são utilizados recursos de limpeza e redução de ruídos. Pontos muito próximos ou sobrepostos podem ser corrigidos pela ferramenta de redução de redundância. Podem ainda surgir furos por motivos como falta de dados na região. Se suas dimensões não forem muito grandes, estes furos podem ser fechados de forma automática. Caso contrário e caso não sejam atingidas as tolerâncias esperadas, é necessário fazer novas varreduras. Para evitar oclusões, convém posicionar a superfície de forma que as regiões de interesse não sejam ocultadas. Podem ser necessárias várias varreduras para que a geometria seja totalmente capturada. Quando são utilizados dados de várias capturas distintas, as nuvens de pontos obtidas não possuem a mesma orientação. O processo de registro de dados irá combinar, alinhar ou fundir essas nuvens de forma que fiquem alinhadas em um sistema de coordenadas comum (BUENO, 2012).

A digitalização a laser trouxe mudanças significativas no que tange a modelagem 3D. Essa tecnologia se destacou em relação a outras técnicas pela qualidade, devido a obtenção de densas nuvens de pontos, e o fato de ser altamente automatizada, o que agiliza o processo e exige menos habilidade do usuário (SKARLATOS, KIPARISSI, 2012). Através do escaneamento a laser, é possível coletar os dados de uma superfície e em alguns casos, sua aparência (como a cor).

5.1.2 Digitalização 3D para antropometria

A antropometria é um ramo da metrologia aplicada que estuda como medir humanos, o que geralmente inclui o processo de coleta de dados, documentação, resumo e análise. Em suma, a antropometria utiliza comprimentos, larguras, alturas e circunferências para descrever de forma numérica partes específicas do corpo ou corpos como um todo (BARTOL et al., 2021).

A medição de dimensões e formas de partes do corpo humano são essenciais para quantificar variações de indivíduos e grupos de diferentes populações. Também possui aplicações significativas na medicina, em pesquisas, condicionamento físico, indústria da moda e entretenimento. Essas medições podem ser feitas de forma manual com paquímetros e fitas métricas, mas recentemente, se tornou possível a medição de forma automática pelo uso de scanners tridimensionais (TRELEAVEN, WELLS, 2007; BARTOL et al., 2021).

As tecnologias de obtenção de informações sobre estruturas internas ao corpo como raios-X, ressonância magnética e ultrassonografia apresentam grande importância no diagnóstico e monitoramento de doenças, além de permitir estudos fisiológicos e de anatomia. As medições externas também podem ter papel tão importante, por permitirem que profissionais da saúde tenham dados detalhados para aplicações como avaliação do estado nutricional e normalidade do desenvolvimento, cálculo de dosagens de medicamentos, radioterapia e quimioterapia, bem como para a produção de próteses e órteses. Esta tecnologia também possibilita a visualização do estado de saúde da pele e simulações de cirurgias plásticas (TRELEAVEN, WELLS, 2007).

A produção em massa tornou a antropometria mais desafiadora, visto que erros de dimensionamento poderiam comprometer a produção, aumentando custos e até tornando-a inviável economicamente. Como exemplo, pode-se citar o caso de projetos aeroespaciais, nos quais cada centímetro ou quilograma podem impactar o desempenho da aeronave, e um controle posicionado fora do raio de alcance do operador de um sistema complexo pode comprometer seu tempo de resposta e resultar em catástrofes (PEQUINI, 2005; SILVA, 2011).

A possibilidade de se obter dimensões, formatos e superfícies com elevada precisão, bem como o caráter não-invasivo da tecnologia, a velocidade e facilidade de uso, tornam o escaneamento 3D um método vantajoso para medição de corpos. Vários estudos presentes na literatura sugerem que o uso de scanners e a medição manual alcançam precisões comparáveis e que a repetibilidade geralmente é maior no escaneamento 3D. Por este método, são realizadas de forma automática centenas de medições, e são eliminados erros associados a medição manual, como erros de transcrição (TRELEAVEN, WELLS, 2007; BARTOL et al., 2021).

Ao utilizar scanners 3D, o corpo humano pode estar em posição estacionária ou em movimento. Para a varredura estática, método que obtém maior precisão nas medidas, é solicitado que a pessoa defina inicialmente uma pose e se mantenha parada durante o processo de varredura. Para evitar movimentos que podem interferir no processo, pode-se utilizar um apoio ou fixação. O suporte e fixação devem ter a menor área de contato com o corpo possível, para minimizar a ocorrência de “pontos cegos” no escaneamento. Algumas tecnologias requerem a utilização de marcações em pontos pré-definidos do corpo ou silhuetas que representam pontos 3D ou pixels de todo o corpo humano ou segmentos do corpo, que facilitam a identificação por softwares para separar os pixels do objeto ou corpo de interesse do restante dos pixels capturados (BARTOL et al., 2021; BUENO, 2012). O uso de marcações é comumente visto na criação de efeitos visuais na indústria cinematográfica. Com a região do corpo humano preparada, pode-se iniciar o escaneamento, que consiste basicamente em realizar várias tomadas da região a ser digitalizada por ângulos distintos, garantindo uma captura suficiente de dados, evitando oclusões (BUENO, 2012).

Diferentes tecnologias de escaneamento tridimensional podem ser utilizadas para estas finalidades, sendo o escaneamento a laser e fotogrametria os mais empregados. No caso de imagens médicas obtidas por tomografia (ou microtomografia) computadorizada (TC), a ressonância magnética (RM) e ultrassonografia, existem vários sistemas computacionais voltados à visualização e/ou tratamento dos dados, disponíveis tanto soluções comerciais quanto em soluções livres e de código-fonte aberto.

Ellena et al. (2016) estuda as dimensões internas de capacetes para ciclistas com o objetivo de garantir maior segurança aos usuários. Para isso, foi utilizado antropometria por escaneamento tridimensional, técnicas de engenharia reversa e análise computacional. Foram escaneados a cabeça dos participantes, modelos distintos de capacetes comerciais e os usuários utilizando o capacete. Este terceiro modelo foi utilizado como referência para garantir o alinhamento adequado entre os modelos da cabeça e capacete digitalizados separadamente (Figura 23a). Dessa forma, por meio de software computacional foi possível analisar os espaços entre as áreas internas do capacete e a superfície da cabeça do usuário (Figura 23b), bem como suas proporções, visto que segurança do acessório está ligada ao seu ajuste adequado ao usuário.

Figura 23 - Análise das dimensões internas de capacete para ciclistas



Fonte: Ellena et al. (2016)

A ISO 7250-1 (2017) indica formas de obtenção de medidas antropométricas que podem ser utilizadas como referência para o desenvolvimento de produtos e criação de bancos de dados antropométricos de acordo com diferentes grupos populacionais. A ISO 20685 (2010) por sua vez apresenta protocolos focados na digitalização 3D do corpo humano para obtenção dos dados antropométricos definidos na ISO 7250-1.

5.1.3 Aplicações da antropometria por Digitalização 3D em conjunto com a MA

O desenvolvimento de produtos customizados é uma possibilidade relevante num contexto em que os consumidores estão cada vez mais exigentes e informados, em conjunto com a busca por itens feitos sob medida e que atendam aspectos ergonômicos. Essa mudança de paradigma da manufatura é chamada Personalização em Massa, e combina aspectos do trabalho artesanal e da produção em massa. A Personalização em Massa pode ser aplicada em três níveis, podendo ou não ser aplicados simultaneamente: estilo; ajuste e conforto; funcionalidade. A personalização de estilo está relacionada à aparência, incluindo aspectos como cores e formas. A personalização de ajuste e conforto é voltada à fabricação de produtos sob medida para o usuário. Já a personalização de funcionalidade fabrica produtos segundo demandas do cliente como velocidade, potência, interfaces, entre outros. A Personalização em Massa é aplicada principalmente por modularização, técnica em que os componentes de um produto são montados em diferentes configurações, garantindo um certo nível de personalização com custos competitivos. A MA e a ER combinadas são capazes de flexibilizar e aprimorar esses métodos (BUENO, 2012).

Segundo Volpato (2017), “diversos produtos, como óculos de natação, caneleiras, capacetes e outros elementos, podem ser criados a partir das superfícies e dos dimensionamentos obtidos levando em consideração particularidades relacionadas às dimensões reais do usuário.” Na literatura podem ser encontrados variados exemplos de uso da antropometria aplicada ao desenvolvimento de produtos. Mariño et al. (2018), por exemplo, estudam o caso do dimensionamento de tesouras de corte e costura visando o risco de lesões, e Silva (2011) desenvolve caneleiras digitalmente customizadas por três maneiras: modelagem em gesso, digitalização e tomografia, obtendo maior precisão e repetibilidade pela digitalização.

Nas áreas médicas, a digitalização tridimensional pode ser utilizada em conjunto com a MA para aplicações como órteses imobilizadoras projetados sob medida (Figura 24) a partir da digitalização do membro (LI, TANAKA, 2018; BLAYA et al, 2018). Há vários registros na literatura de desenvolvimento de órteses imobilizadoras personalizadas que utilizaram estas tecnologias, como em Mavroidis et al. (2011) (Figura 25), Telfer et al. (2012), Palousek et al. (2014) e Weigert (2017). Quando comparadas com imobilizadores de gesso, tem como vantagens a fato de ser arejadas, leves, higienizáveis e resistentes à água. Estudos mostram resultados satisfatórios em tratamentos que utilizaram órteses fabricadas por MA quando comparadas a modelos tradicionais (CHA et al. 2017; LU et al. 2021; ZHENG et al. 2019). Werner et al. (2010) utilizam ultrassonografia tridimensional, imagens de ressonância

magnética e tomografia computadorizada para gerar modelos físicos de fetos por MA, possibilitando estudos e identificação de malformações ou patologias.

Figura 24 - Órtese personalizada a partir de escaneamento 3D e fabricada por MA

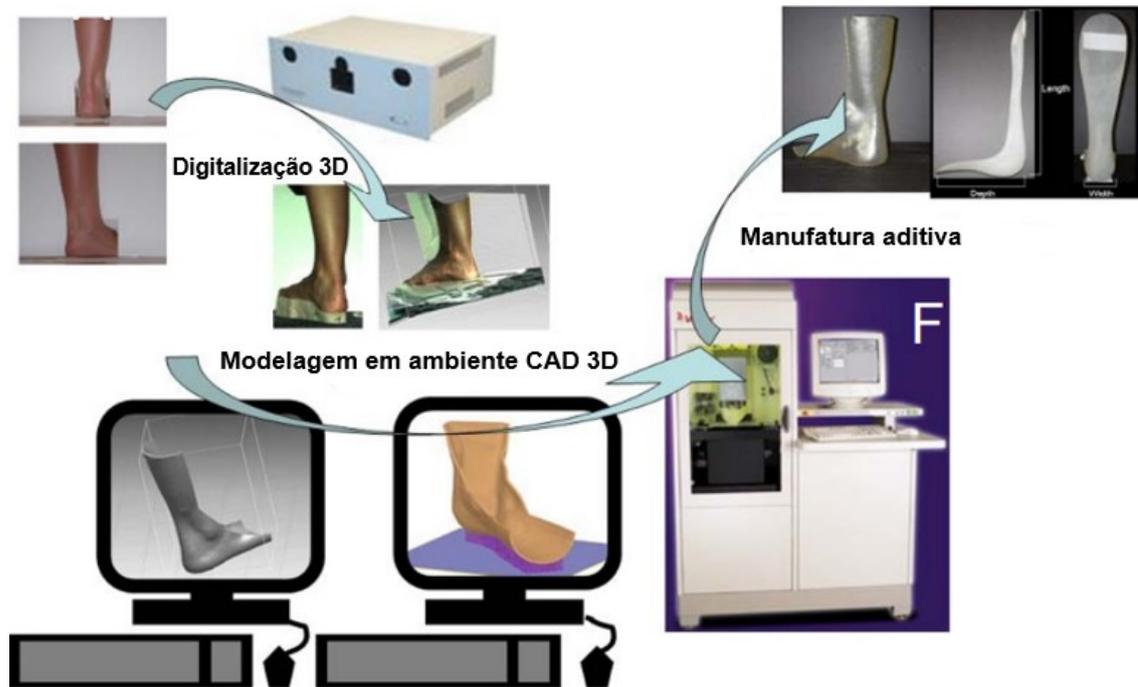


Fonte: Lafloufa (2014)

O uso das imagens digitais permite ainda que estruturas do corpo humano sejam mimetizadas, reconstruindo de forma altamente fiel próteses e implantes que podem ser posteriormente fabricados por manufatura aditiva utilizando materiais biocompatíveis (MAVROIDIS et al., 2011; VOLPATO, 2017). Silva (2019) por exemplo apresenta o desenvolvimento de prótese maxilofacial a partir da digitalização tridimensional da forma geométrica do paciente para elaboração de molde por AM.

Para estas finalidades, a digitalização pode ser direta ou indireta. Na digitalização direta, o membro do usuário é escaneado, e na digitalização indireta, a geometria é obtida pela digitalização de um modelo físico criado com base no membro (WEIGERT, 2017).

Figura 25 - Esquema do processo de fabricação de órtese personalizada utilizando escaneamento 3D e MA



Fonte: adaptado de Mavroidis et al. (2011)

Dessa forma, dispositivos médicos que antes eram fabricados em tamanhos pré-definidos (como o padrão pequeno, médio e grande) agora podem usufruir da liberdade de fabricação permitida pelas técnicas de impressão e digitalização tridimensional para o desenvolvimento de dispositivos customizados de acordo com as necessidades e preferências de cada usuário. Podem ainda ser criadas estruturas mais orgânicas e otimizadas, em projetos capazes de incluir até mesmo o estilo e preferências estéticas do usuário. A Figura 26 mostra uma prótese descrita por Root (2014) como de baixo custo, projetada sob medida a partir de escaneamento tridimensional e fabricada por MA por sinterização a laser utilizando titânio (material biocompatível).

Figura 26 - Prótese projetada a partir de escaneamento 3D e fabricada por MA



Fonte: Root (2014)

As aplicações dessas tecnologias quando combinadas são vastas. Outro exemplo que comprova sua versatilidade pode ser visto no processo de reconstrução de peças do Museu Nacional do Rio de Janeiro, instituição de mais de 200 anos que teve parte de seu acervo perdido após um incêndio de grandes proporções em 2018. Isso foi possível devido a trabalhos de pesquisa realizados previamente, que digitalizaram itens como o crânio do fóssil Luzia, fósseis de dinossauros e múmias egípcias utilizando técnicas não invasivas e não destrutivas. De forma simbólica, a reconstrução por MA contou inclusive com a utilização de cinzas dos escombros do incêndio como matéria-prima (TRINDADE, LOPES, 2020).

6 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os equipamentos, técnicas e materiais utilizados na execução do trabalho. Para que a peça fosse desenvolvida sob medida para um usuário específico, apresentando as devidas proporções e aspectos funcionais desejados, foi necessário inicialmente realizar as medições para obter o perfil correspondente. Para isso, foi utilizada a digitalização tridimensional. Em seguida, foi realizado o projeto utilizando ferramentas computacionais para que por fim, a peça fosse fabricada por manufatura aditiva.

6.1 DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

A digitalização tridimensional foi realizada por escaneamento, tendo sido escolhido o método de escaneamento a laser. Para isso, foram utilizados os equipamentos disponíveis na fábrica: um braço poliarticulado Romer de 6 eixos (Figura 27) com scanner RS3 integrado (Figura 28), ambos do fabricante Hexagon Metrology. De acordo com o fabricante, o equipamento apresenta faixa de medição de 3.5 m, repetibilidade de ponto de 0,040 mm e precisão volumétrica de $\pm 0,057$ mm.

Figura 27 – Braço Romer e scanner RS3



Fonte: Hexagon (c2022)

Figura 28 – Detalhe do scanner



Fonte: elaborado pelo autor

Neste processo, o mensurando é o dedo polegar da mão esquerda, cujas dimensões serão utilizadas como referência para a modelagem da peça. A preparação da superfície de estudo consistiu na deposição de um pó opaco nas regiões a serem escaneadas, como pode ser observado na Figura 29. Este procedimento teve como finalidade matificar a pele para evitar a reflexão e consequente saturação dos sensores, devido a reflexão na unha e possível presença de oleosidade e suor na pele.

A primeira tentativa de captura resultou em uma representação insatisfatória da geometria, devido a ocorrência de irregularidades como furos na malha gerada. Para assegurar maior precisão das medidas e diminuir a incidência de erros, foi necessário garantir que a mão permanecesse em posição estacionária durante o processo de varredura. Com este objetivo, foi utilizada uma haste metálica como apoio, posicionada sobre uma mesa de desempenho em granito da fabricante Mitutoyo. A haste tem pequena área de contato com o corpo, o que minimiza a incidência de “pontos cegos” no escaneamento. Foi adotada uma posição que permitisse que a região de interesse fosse escaneada de vários ângulos diferentes, para a captura efetiva de toda a superfície (Figura 29).

Figura 29 – Posicionamento da superfície a ser mensurada

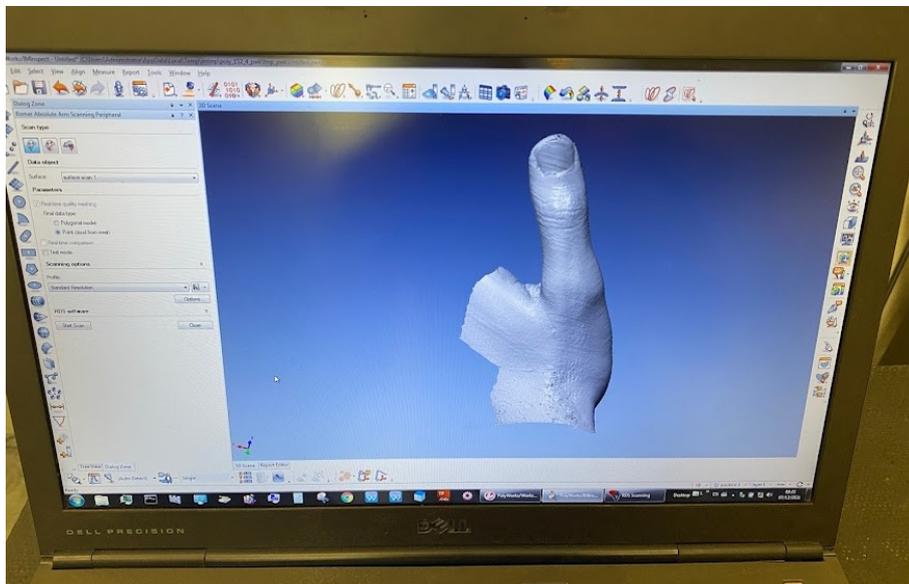


Fonte: elaborado pelo autor

A captura foi realizada com o scanner posicionado a distâncias de aproximadamente 30 centímetros do mensurando. Em seguida, com a malha do escaneamento exibida no software PolyWorks, foi realizada uma limpeza de forma manual para eliminar facetadas alongadas e elementos residuais capturados durante o

processo, que não fazem parte da região de interesse (Figura 30). A malha triangular gerada foi salva num arquivo em formato STL.

Figura 30 - Representação dos dados escaneados exibida no software



Fonte: elaborado pelo autor

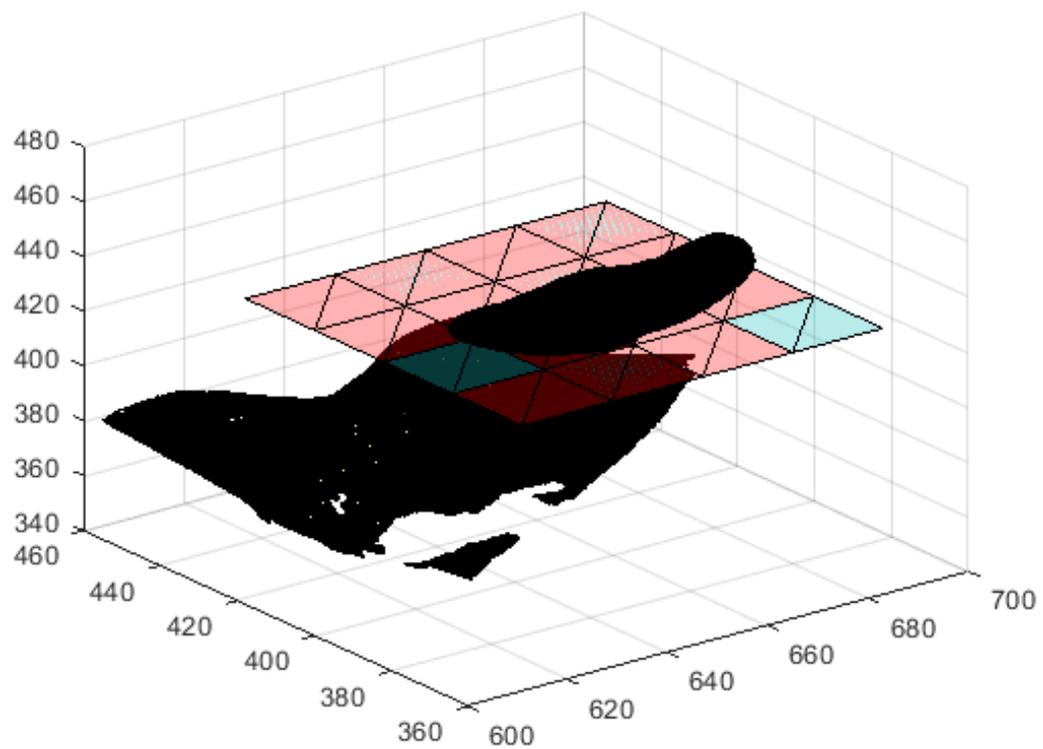
6.2 PROJETO DA PEÇA

Inicialmente, o arquivo STL obtido pela digitalização tridimensional do polegar foi trabalhado no software MATLAB R2020a. O MATLAB possui várias funções que vêm previamente instaladas, mas para realizar este procedimento foi necessário utilizar duas funções adicionais disponíveis no site da Math Works: *stlread* e *SurfaceIntersection*, sendo a primeira utilizada para leitura do arquivo STL e a segunda para determinar a intersecção entre o objeto 3D do STL e planos de corte.

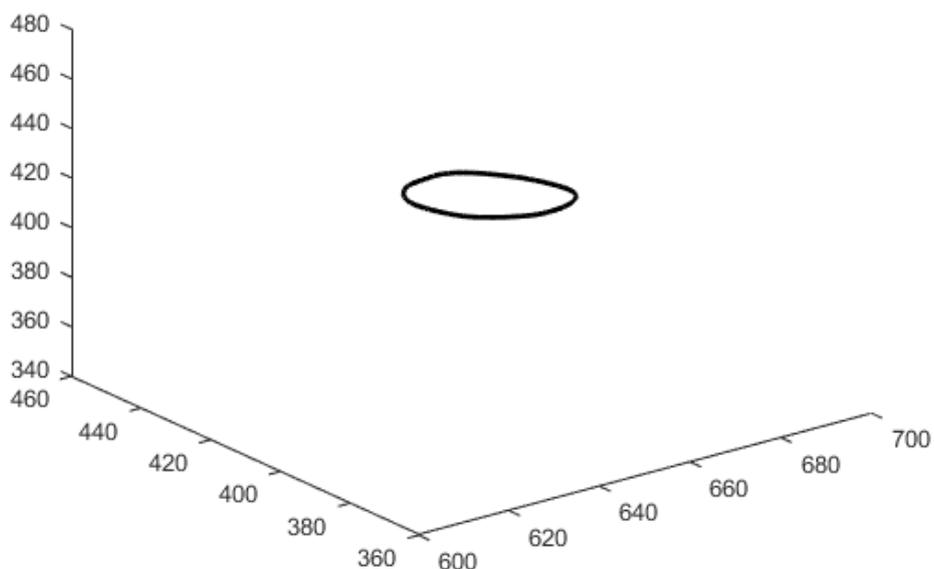
Assim, foi programado um código que permitiu plotar o arquivo tridimensional e gerar secções transversais ao polegar. Este código completo pode ser conferido no Apêndice A. Os planos foram formados por uma equação simples: altura = $f(z)$, sendo que o valor da constante depende de qual altura se deseja fazer o “corte” na figura tridimensional do polegar. Foram atribuídos catorze valores distintos à constante, gerando catorze cortes diferentes (Equações 1 a 14). Com intuito didático, a Figura 31 apresenta o desenho 3D do polegar e o plano de corte $z = 433$ (Equação 6). Já na Figura 32, é mostrado apenas a superfície de intersecção, com a finalidade de garantir uma melhor visualização.

$z = 410,5$	(1)
$z = 415$	(2)
$z = 419,5$	(3)
$z = 424$	(4)
$z = 428,5$	(5)
$z = 433$	(6)
$z = 437,5$	(7)
$z = 442$	(8)
$z = 446,5$	(9)
$z = 451$	(20)
$z = 455,5$	(11)
$z = 460$	(12)
$z = 464,5$	(13)
$z = 469$	(14)

Figura 31 - Desenho do polegar e do plano de corte da Equação 6



Fonte: elaborado pelo autor

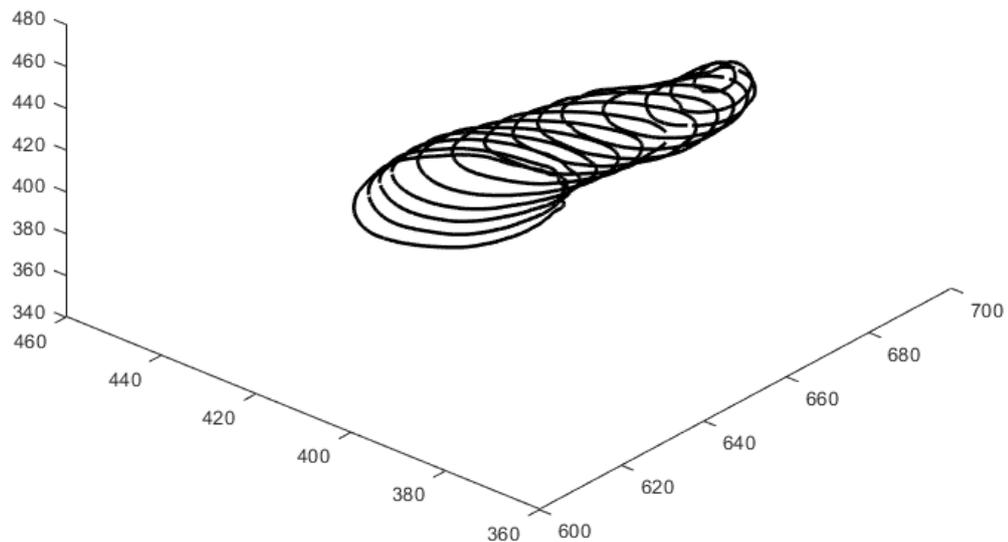
Figura 32 - Superfície de intersecção do plano da Equação 6 com o objeto tridimensional

Fonte: elaborado pelo autor

O código foi executado 14 vezes, com a finalidade de gerar 14 planos transversais ao longo do polegar. Esta foi uma quantidade considerada suficiente para uma boa representação da geometria desejada. Na Figura 33 são mostradas as superfícies de intersecção de todos estes planos com o polegar. O algoritmo que gera essas superfícies simultaneamente pode ser conferido no Apêndice B.

A função *SurfaceIntersection* possui três campos (ou *fields*) como saídas (ou *outputs*), sendo um deles denominado *vertices*, o qual contém as coordenadas dos pontos que formam a superfície de intersecção. A partir disso, foi possível obter as coordenadas dos pontos que formam as superfícies de intersecção. As coordenadas dos pontos de cada secção transversal foram obtidas em três vetores: coordenadas x, coordenadas y e coordenadas z. Essas coordenadas foram então concatenadas em uma única variável matricial e as matrizes salvas em um arquivo no formato .txt (arquivo de texto).

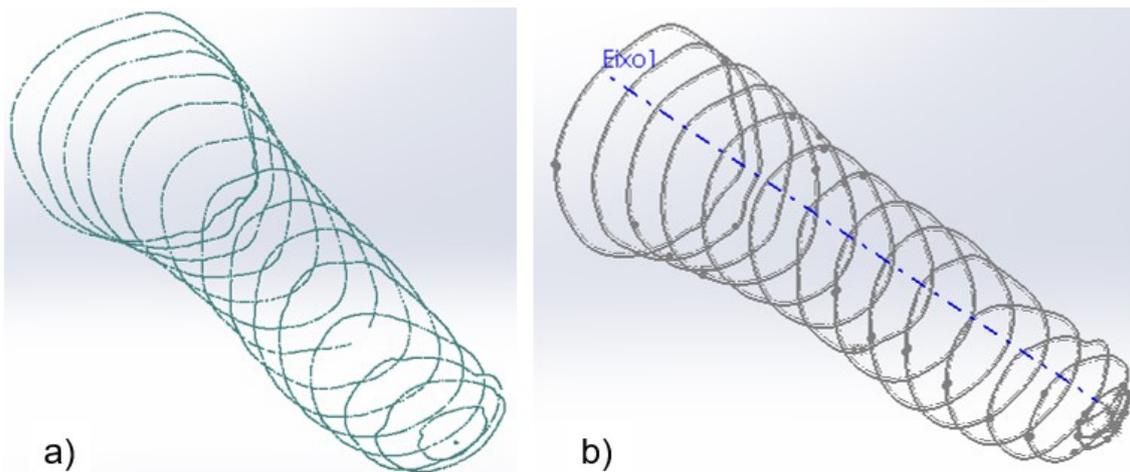
Figura 33 - Superfícies de intersecção obtidas



Fonte: elaborado pelo autor

O arquivo em formato .txt contendo as coordenadas dos pontos das superfícies de intersecção entre os planos e o polegar foi aberto no Solidworks 2020, um software de CAD 3D, gerando uma nuvem de pontos, conforme mostrado na Figura 34a. Utilizando recursos do software, os pontos foram então convertidos em um esboço de curvas (Figura 34b).

Figura 34 - Criação de esboços a partir da nuvem de pontos

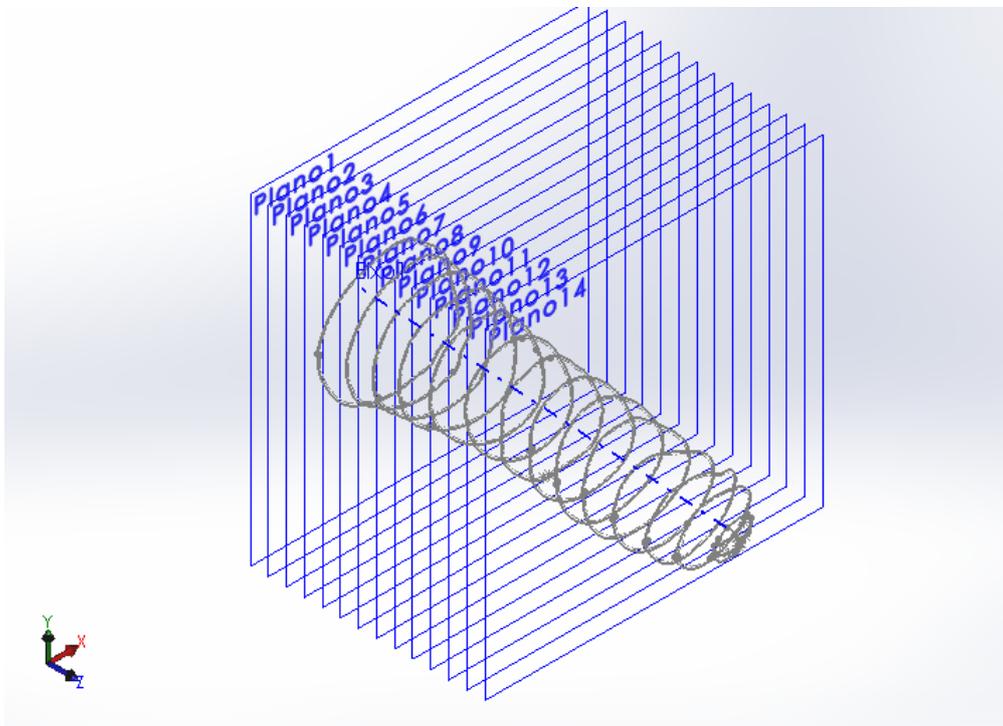


Fonte: elaborado pelo autor

Em seguida, foram criados planos auxiliares para todos os catorze planos transversais (Figura 35), o que, juntamente com o Eixo 1 mostrado na Figura 34b, teve

como objetivo orientar a modelagem da peça. Foram esboçadas também linhas de curvatura (Figura 36a), baseadas no modelo 3D do polegar.

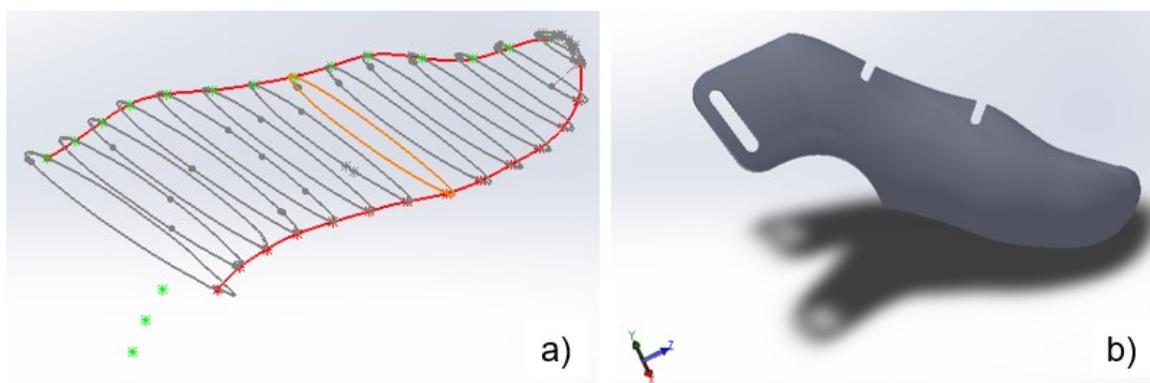
Figura 35 - Planos criados a partir das seções



Fonte: elaborado pelo autor

A partir dos esboços, foi possível realizar a modelagem da peça utilizando diferentes recursos do software. Foi definida uma espessura de 1,5 mm para as paredes com o objetivo de facilitar a impressão, de acordo com o bico extrusor da impressora que será utilizada.

Para a utilização da peça, foi necessário levantar soluções que permitam que a peça fique estabilizada na mão do usuário. A solução planejada foi a utilização de uma fita velcro, passando pela peça e pela mão, garantindo sua fixação. Com este objetivo, foram modeladas abas nas laterais, baseadas em esboços bidimensionais no formato planejado. Por fim, foram incluídos orifícios na parte superior da peça, com o objetivo de permitir ventilação e mais conforto ao usuário, conforme visualizado na Figura 36b.

Figura 36 - Modelagem da peça

Fonte: elaborado pelo autor

Por fim, o arquivo foi salvo também no formato STL, para dar continuidade ao processo no software fatiador que irá gerar os comandos para a impressora.

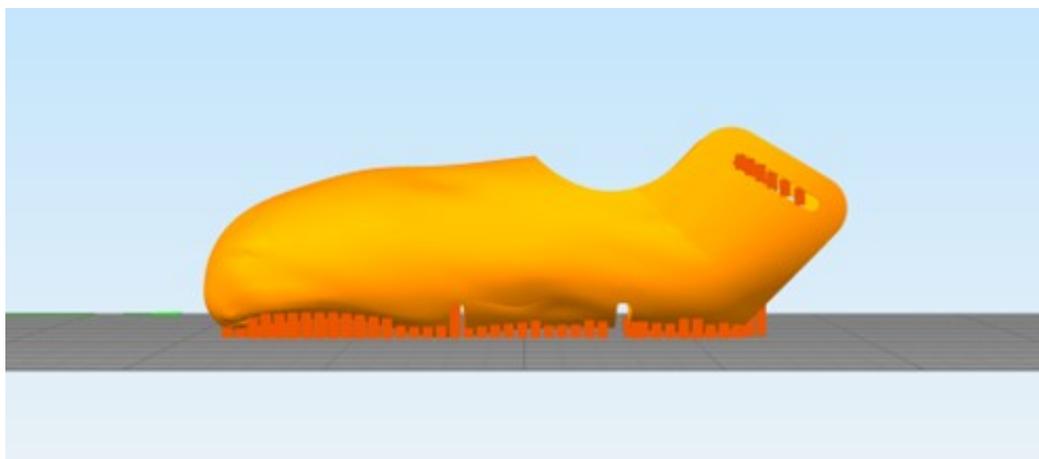
6.3 FABRICAÇÃO

A peça foi fabricada com a impressora 3D GTMax Core A3V2, mostrada na Figura 37. O material escolhido foi o filamento plástico ABS com diâmetro de 1,75 mm e cor branca, da fabricante 3D Fila. A escolha do ABS se deu em função de sua durabilidade, resistência à impacto e menor custo quando comparado aos outros materiais apresentados na revisão bibliográfica.

Figura 37 - Impressora 3D GTMax Core A3V2

Fonte: elaborado pelo autor

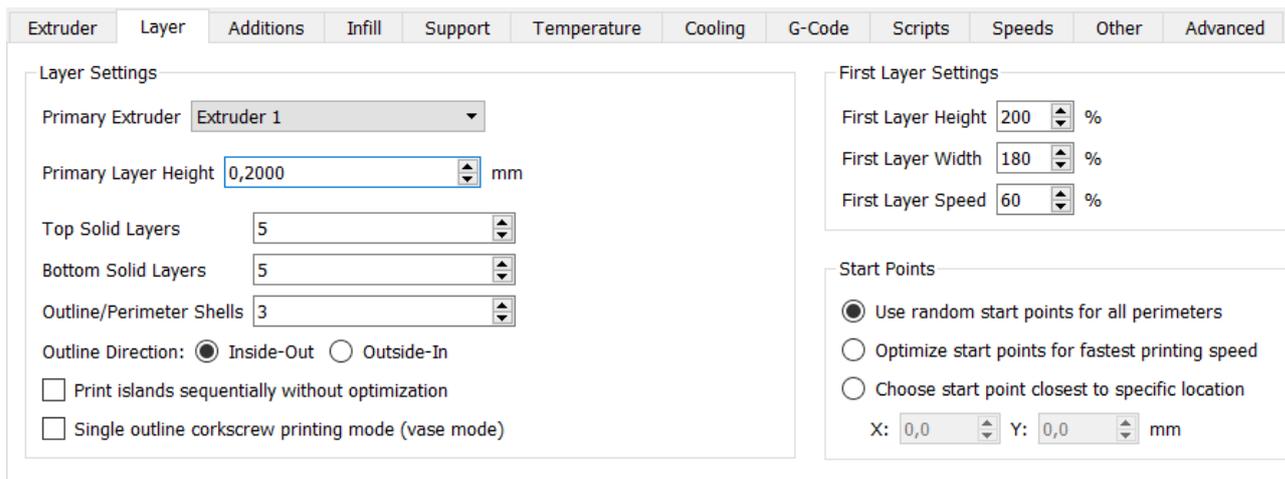
O arquivo da peça em formato STL foi aberto no software Simplify3D 4.1.2, no qual foram definidos os parâmetros de impressão. A Figura 38 mostra, no ambiente do software, a posição definida para a impressão da peça na mesa de impressão. Essa escolha levou em consideração a quantidade de estruturas de suporte necessárias. Os suportes são utilizados quando as geometrias apresentam superfícies com ângulos superiores a 45° ou inferiores a -45° . Conforme observado na simulação do processo realizada pelo software, foram necessários suportes externos (Figura 38) e suportes internos para segurar as paredes superiores em balanço (Figura 45a).

Figura 38 - Posição definida para a impressão da peça

Fonte: elaborado pelo autor

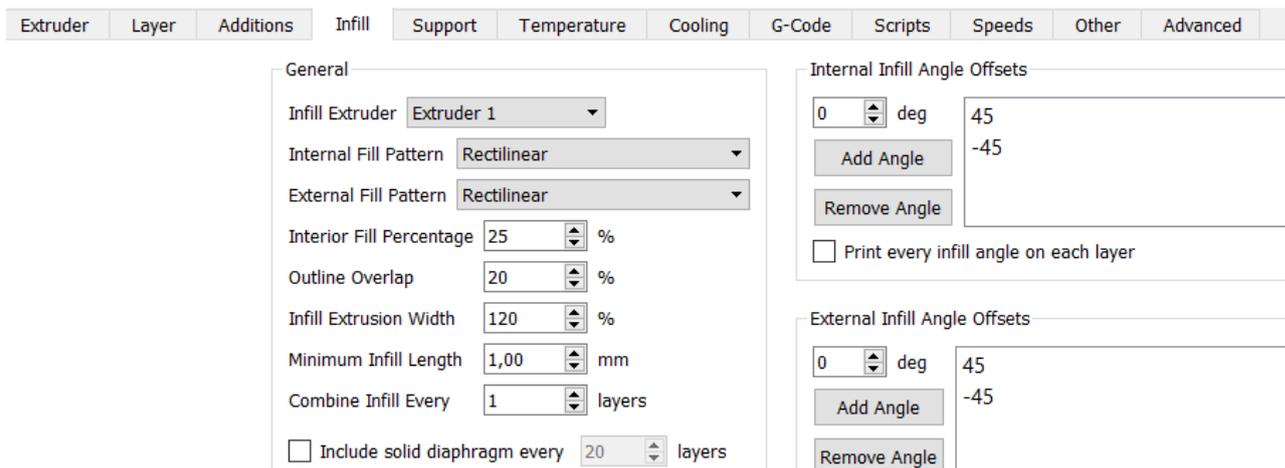
Na aba referente às camadas (Figura 39), foi definida altura de 0,20 mm para cada camada que compõe a peça. Buscando garantir uma rigidez adequada à peça, para as 5 camadas inferiores e 5 camadas superiores da peça, bem como para as 3 camadas de contorno de sua geometria, foi atribuído preenchimento sólido. Já as camadas restantes receberam preenchimento de 25% (Figura 40) e os suportes de 20%, com padrão retilíneo (Figura 41).

Figura 39 - Definição das camadas sólidas



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 40 - Definição do preenchimento



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 41 - Definição dos suportes

Extruder	Layer	Additions	Infill	Support	Temperature	Cooling	G-Code	Scripts	Speeds	Other	Advanced
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>Support Material Generation</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Generate Support Material</p> <p>Support Extruder: Extruder 1</p> <p>Support Infill Percentage: 20 %</p> <p>Extra Inflation Distance: 0,40 mm</p> <p>Support Base Layers: 0</p> <p>Combine Support Every: 1 layers</p> <hr/> <p>Dense Support</p> <p>Dense Support Extruder: Extruder 1</p> <p>Dense Support Layers: 0</p> <p>Dense Infill Percentage: 30 %</p> </div> <div style="width: 48%;"> <p>Automatic Placement</p> <p><i>Only used if manual support is not defined</i></p> <p>Support Type: Normal</p> <p>Support Pillar Resolution: 2,00 mm</p> <p>Max Overhang Angle: 60 deg</p> <hr/> <p>Separation From Part</p> <p>Horizontal Offset From Part: 0,60 mm</p> <p>Upper Vertical Separation Layers: 1</p> <p>Lower Vertical Separation Layers: 1</p> <hr/> <p>Support Infill Angles</p> <p>0 deg 90</p> <p>Add Angle</p> <p>Remove Angle</p> </div> </div>											

Fonte: elaborado pelo autor

A impressora GTMax Core A3V2 possui mesa de impressão em vidro, e teve sua temperatura definida como 110 °C (Figura 42), escolha baseada nos resultados obtidos por Carneiro et al. (2019) que verificou por meio de ensaios a influência da temperatura da mesa de impressão na dureza e precisão dimensional.

Figura 42 - Definição da temperatura da mesa de impressão

Extruder	Layer	Additions	Infill	Support	Temperature	Cooling	G-Code	Scripts	Speeds	Other	Advanced						
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>Temperature Controller List (click item to edit settings)</p> <table border="1"> <tr> <td>Primary Extruder</td> </tr> <tr> <td>Heated Bed</td> </tr> </table> <p>Add Temperature Controller</p> <p>Remove Temperature Controller</p> </div> <div style="width: 48%;"> <p>Heated Bed Temperature</p> <p>Overview</p> <p>Temperature Identifier: T0</p> <p>Temperature Controller Type: <input type="radio"/> Extruder <input checked="" type="radio"/> Heated build platform</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Wait for temperature controller to stabilize before beginning build</p> <hr/> <p>Per-Layer Temperature Setpoints</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Layer</th> <th>Temperature</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>110</td> </tr> </tbody> </table> <p>Add Setpoint</p> <p>Remove Setpoint</p> <p>Layer Number: 1</p> <p>Temperature: 200 °C</p> </div> </div>												Primary Extruder	Heated Bed	Layer	Temperature	1	110
Primary Extruder																	
Heated Bed																	
Layer	Temperature																
1	110																

Fonte: elaborado pelo autor

Já para o bico de impressão, foi atribuída temperatura de 245 °C para a primeira camada. Para as demais camadas, foi atribuída temperatura de 225 °C (Figura 43), com base nos resultados obtidos por Peres, Gomes, Guarato (2021) para a influência da temperatura do bico de impressão nas tolerâncias dimensionais de amostras.

Figura 43 - Definição da temperatura do bico de impressão

The screenshot shows the 'Temperature' tab in Simplify3D. On the left, a 'Temperature Controller List' shows 'Primary Extruder' and 'Heated Bed'. The main area is titled 'Primary Extruder Temperature'. Under 'Overview', the 'Temperature Identifier' is 'T0', 'Temperature Controller Type' is 'Extruder', and 'Wait for temperature controller to stabilize before beginning build' is checked. The 'Per-Layer Temperature Setpoints' table is as follows:

Layer	Temperature
1	245
2	225

Below the table, 'Layer Number' is set to 1 and 'Temperature' is set to 200 °C. Buttons for 'Add Setpoint' and 'Remove Setpoint' are visible.

Fonte: elaborado pelo autor

Na aba referente às velocidades (Figura 44), foi atribuída uma velocidade padrão de 120 mm/s para a impressão. Nas camadas de preenchimento, contornos e suportes essa velocidade é reduzida em 70%, 50% e 90%, respectivamente, para garantir melhor adesão entre as camadas.

Figura 44 - Definição das velocidades de impressão

The screenshot shows the 'Speeds' tab in Simplify3D. The 'Speeds' section contains the following settings:

- Default Printing Speed: 120,0 mm/s
- Outline Underspeed: 50 %
- Solid Infill Underspeed: 70 %
- Support Structure Underspeed: 90 %
- X/Y Axis Movement Speed: 300,0 mm/s
- Z Axis Movement Speed: 50,0 mm/s

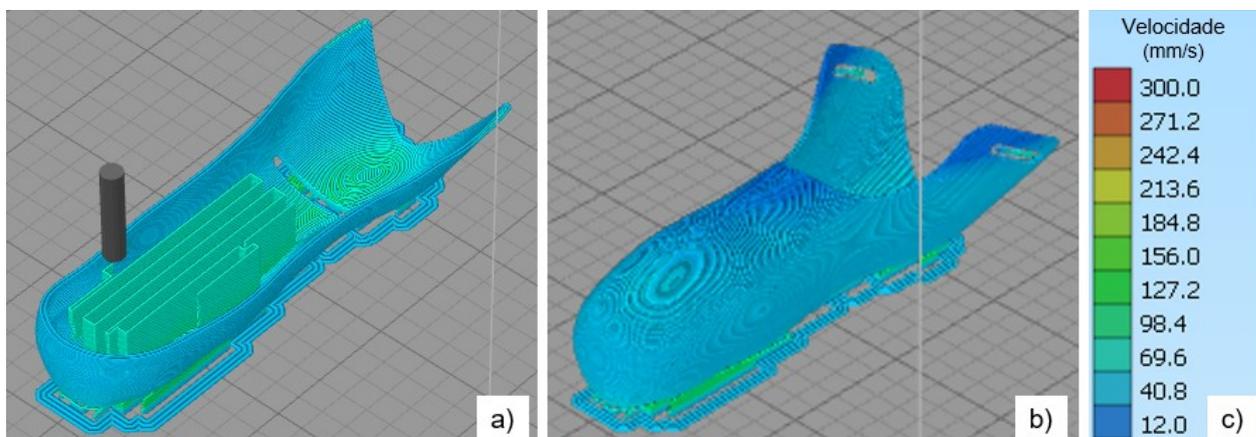
The 'Speed Overrides' section has 'Adjust printing speed for layers below' checked at 15,0 sec, and 'Allow speed reductions down to' set to 20 %.

Fonte: elaborado pelo autor

Com os parâmetros definidos, o software Simplify3D gera o G-Code, um algoritmo com os comandos operacionais que irão instruir a máquina a realizar a

impressão de acordo com as condições adotadas e disponibiliza uma simulação do processo de fabricação (Figura 45).

Figura 45 - Simulação do processo de impressão



Fonte: elaborado pelo autor

Conforme previamente detalhado pelo software Simplify3D, o tempo de impressão da peça foi de 51 minutos. Foram consumidos 3871,5 mm de filamento, com peso de 9,94 g e custo de R\$ 1,19. Após a impressão, a peça foi retirada da máquina e teve os suportes removidos com alicate (Figura 46).

Figura 46 - Peça após a remoção dos suportes



Fonte: elaborado pelo autor

Em seguida, para garantir melhor aparência à parte externa e maior conforto à parte interna, a peça recebeu lixamento. Para isso, utilizou-se lixa de gramatura 80, seguida de lixa de gramatura 150. Por fim, foi realizado lixamento a úmido utilizando lixa d'água 400 (Figura 47). Assim, foi possível melhorar o aspecto das regiões onde houve estruturas de suporte e encobrir as linhas que evidenciam as camadas de impressão.

Figura 47 - Lixas utilizadas no pós-processamento da peça



Fonte: elaborado pelo autor

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado final da peça digitalmente customizada é mostrado na Figura 48, que simula as condições de uso no chão de fábrica.

Figura 48 - Peça digitalmente customizada ao polegar do usuário



Fonte: elaborado pelo autor

Foi acrescentada uma fita velcro para a fixação do dispositivo à mão do usuário, passando pelo furo previsto no projeto e com aperto regulado conforme desejado. Dessa forma, a peça pode se manter estável durante a sua utilização.

A luva de segurança para tato é um Equipamento de Proteção Individual (EPI) exigido no processo de montagem dos tampões para garantir a segurança das mãos do operador. Para sua utilização em conjunto com a peça desenvolvida, a luva teve a parte que cobre o dedo polegar removida para possibilitar o ajuste correto. Outra possibilidade considerada seria a de projetar uma peça que se sobreposse à luva, utilizando o recurso de *offset* das linhas obtidas no Solidworks a partir dos dados extraídos no MATLAB, atribuindo ao *offset* o valor da espessura da luva. Esta segunda possibilidade resultaria em perda de respirabilidade e conforto térmico.

Conforme previsto, a peça fabricada apresentou as proporções ideais para o usuário que teve o dedo polegar escaneado. Durante o uso da peça, espera-se que, quando o operador a pressionar contra o tampão, ela seja deformada e a tensão seja distribuída ao longo da peça, armazenando energia. Dessa forma, assim que o tampão for inserido, a energia é liberada e a peça retorna para sua forma inicial. Por questões de logística, não foi possível testar a peça efetivamente nas condições de uso.

8 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu aplicar tecnologias de manufatura aditiva, escaneamento 3D e projeto assistido por computador no processo de desenvolvimento de um produto. Foi possível revisar conceitos e aplicações dessas tecnologias em diversas áreas e levantar suas vantagens e limitações.

Foram verificadas metodologias de desenvolvimento de produtos customizados para usuários específicos e produzidos em pequena escala, cenário que tem sido favorecido pela difusão de impressoras e scanners 3D mais acessíveis nos últimos anos, bem como pelos avanços da computação de baixo custo e alta potência, que abrem margem para uma vasta gama de aplicações.

No contexto do chão de fábrica, destaca-se o potencial dessas tecnologias para o desenvolvimento de soluções rápidas que atendam as demandas imediatas do processo de produção.

Obteve-se êxito no objetivo de desenvolver um produto digitalmente customizado para um usuário específico, visto que a peça apresentou as dimensões necessárias. A peça desenvolvida tem potencial para tornar o processo de inserção de tampões mais eficiente. Acredita-se que represente uma significativa redução do risco de desenvolvimento de doenças ocupacionais e acidentes de trabalho, bem como um ganho de conforto na execução da tarefa. Contudo, os dados aqui apresentados não são suficientes para um diagnóstico preciso, sendo necessária a obtenção de dados mais criteriosos e quantitativos dos esforços musculares utilizados na execução dos movimentos e fatores de risco associados à atividade.

Em caso de produção em larga escala e com restrições de tempo, pode ser estudada a viabilidade do projeto de peças com tamanhos padrão (pequeno, médio e grande) em versões que atendam usuários destros e canhotos. A utilização de impressão 3D por FDM com polímeros termoplásticos pode representar um obstáculo nesta aplicação devido à variabilidade dos parâmetros para diferentes máquinas e filamentos fornecidos por fabricantes distintos, aspectos que tendem a tornar o processo lento até que sejam encontrados parâmetros adequados de repetibilidade. Trata-se de um fator muitas vezes incompatível com as exigências da produção industrial.

Trabalhos futuros podem desenvolver protótipos com diferentes geometrias, considerando a possibilidade de limitação simultânea dos movimentos de extensão e abdução do dedo polegar e avaliar seu desempenho em relação a esforços musculares através de eletromiografia de superfície. Simulações computacionais ou testes

mecânicos podem validar a peça em diferentes condições, utilizando por exemplo, uma estrutura robótica que simule o movimento humano para verificar a quantidade de ciclos que a peça resiste até se degradar.

Além do desempenho ergonômico, o impacto da peça na linha de produção pode ser verificado por técnicas como cronoanálise e estudo de tempos e métodos, comparando dados anteriores e posteriores à introdução de seu uso.

Outros trabalhos podem ainda comparar o desempenho de protótipos impressos com filamentos de diferentes materiais, como PLA e nylon, levantando aspectos como processabilidade, performance e conforto. Podem também ser estudados processos e metodologias de desenvolvimento de produto baseados nas características da MA e que permitam sua adoção para produção em larga escala, visto que as metodologias clássicas de desenvolvimento de produto podem restringir os potenciais das novas tecnologias.

REFERÊNCIAS

ABELLA, R. J.; DASCHBACH, J. M.; MCNICHOLS, R. J. Reverse engineering industrial applications. **Computers & industrial engineering**, 1994, cap. 26.2, p. 381-385.

ALVES, L. B. **Análise da utilização do Technology Roadmapping como Meio de Seleção de Produto de Referência para a Engenharia Reversa**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade de Itajubá, Itajubá, 2010.

ALVES, T. C. **Proposta de uma sistemática do projeto para manufatura aditiva (DfMA) no contexto de desenvolvimento de produtos**. 2021. 152 f., il. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos). Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

AUMNATE, C. et al. Fabrication of ABS/graphene oxide composite filament for fused filament fabrication (FFF) 3D printing. **Advances in Materials Science and engineering**, 2018.

BAKEWELL, J. Customising production. **Automotive Manufacturing Solutions**, 2019. Disponível em: <<https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/joining/customising-production/31218.article>>. Acesso em: 17 maio 2022.

BARTOL, K. et al. A review of body measurement using 3D scanning. **IEEE Access**, 2021.

BENABDELLAH, Abla Chaouni et al. A systematic review of design for X techniques from 1980 to 2018: concepts, applications, and perspectives. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9, p. 3473-3502, 2019.

BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gestão, Tecnologia e Inovação. Revista eletrônica dos Cursos de Engenharia**, v. 1, n. 3, p. 9-18, 2017.

BLAKEY-MILNER, B. et al. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. **Materials & Design**, v. 209, p. 110008, 2021.

BLAYA, F. et al. Design of an orthopedic product by using additive manufacturing technology: the arm splint. **Journal of medical Systems**, v. 42, n. 3, p. 1-15, 2018.

BMW. BMW Group atinge 1 milhão de peças impressas em 3D com i8 Roadster, uma das atrações da BMW no Salão de SP. **BMW GROUP PRESSCLUB BRASIL**, 2018.

Disponível em:

<<https://www.press.bmwgroup.com/brazil/article/detail/T0287001PT/bmw-group-atinge-1-milh%C3%A3o-de-pe%C3%A7as-impressas-em-3d-com-i8-roadster-uma-das-atra%C3%A7%C3%B5es-da-bmw-no-sal%C3%A3o-de-sp?language=pt>>. Acesso em: 15 maio 2022.

BODANZKY, Alice et al. Customização em massa e reconfiguração dinâmica de produtos incompletos. **DAT Journal**, v. 4, n. 1, p. 52-64, 2019.

BORGES, M. M.; NAVEIRO, R. M. A projeção e as formas de representação do projeto. **Graf & Tec, Florianópolis**, v. 2, n. 1, p. 2, 1998.

BORGES, M. M. O uso de modeladores tridimensionais paramétricos na formação de competências de representação gráfica e raciocínio espacial no processo de projeto. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 11, n. 1, p. 21-38, 2016.

BRASIL, Fundacentro. **Quase 39 mil trabalhadores são afastados por LER/Dort em 2019**. Disponível em: <<https://www.gov.br/fundacentro/pt-br/assuntos/noticias/noticias/2020/3/a>>. Acesso em: 14 mar. 2022.

BRYAN, W. Future Rocket Engines May Include Large-Scale 3D Printing. **NASA**, 2020. Disponível em:

<<https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/releases/2020/future-rocket-engines-may-include-large-scale-3d-printing.html>>. Acesso em: 14 maio 2022.

BUENO, A. **Contribuições ao desenvolvimento de produtos sob medida utilizando engenharia reversa e Manufatura Aditiva**. 2012. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2012.

CARNEIRO, L. R. R. et al. Influência da temperatura da mesa de impressão 3D na dureza e dimensões geométricas de amostras em ABS. **XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**. 2019.

CHA, Y. H. et al. Ankle-foot orthosis made by 3D printing technique and automated design software. **Applied Bionics And Biomechanics**, v. 2017, p. 1-6, 2017.

CHAN, D. C. N. et al. The accuracy of optical scanning: influence of convergence and die preparation. **Operative dentistry**, v. 36, n. 5, p. 486-491, 2011.

CHAN, D. et al. The Accuracy of Optical Scanning: Influence of Convergence and Die Preparation. **Operative Dentistry**, v. 36, n. 5, p. 486-491, 2011.

CHRISTIYAN, K. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. In: **IOP conference series: materials science and engineering**. IOP Publishing, 2016.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles And Applications. 3. ed. Singapura. World Scientific Publishing Company. 2010.

COELHO, A. W. F. **Manufatura aditiva por jato de aglutinante (impressão 3D):** fabricação e avaliação de compósitos de gesso com bras de sisal. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

CREAFORM. Automotive Service Provider Relies on 3D Laser Scanners for the Measurement of Vehicle Components. **Creaform**, 2020. Disponível em: <<https://www.creaform3d.com/blog/automotive-service-provider-relies-on-3d-laser-scanners-for-the-measurement-of-vehicle-components/>>. Acesso em: 15 maio 2022.

CUSTOMPART.NET. **Fused Deposition Modeling (FDM)**. Disponível em <<https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>>. Acesso em 17 abr. 2022.

DE MEDEIROS, U. V.; SEGATTO, G. G. Lesões por esforços repetitivos (LER) e distúrbios osteomusculares (Dort) em dentistas. **Revista Brasileira de Odontologia**, v. 69, n. 1, p. 49, 2012.

DE MIRANDA, M.F.O. et al., Cob-2019-1931: Experimental analysis on the mechanical properties of PETG parts made with fused deposition modeling manufacturing, **25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, October 20-25, 2019, Uberlandia, MG, Brazil, pp. 1–5.

DI NISIO, F. G. **Estratégia de deposição com variação de largura do filamento para geração de estruturas porosas com manufatura aditiva por extrusão de material**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

DICKSON, A. N.; ABOURAYANA, H. M.; DOWLING, D. P. 3D printing of fibre-reinforced thermoplastic composites using fused filament fabrication—A review. **Polymers**, v. 12, n. 10, p. 2188, 2020.

DIEGEL, O.; NORDIN, A.; MOTTE, D. **A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing**. [S.l.]: Springer, 2020.

DIZON, J. R. C. et al., 2018. "Mechanical characterization of 3D-printed polymers". **Additive Manufacturing**, Vol. 20, p. 44–67.

EBRAHIM, M. A. B. 3D laser scanners' techniques overview. **Int J Sci Res**, v. 4, n. 10, p. 323-331, 2015.

ELLENA, T. et al. The Helmet Fit Index—An intelligent tool for fit assessment and design customisation. **Applied ergonomics**, v. 55, p. 194-207, 2016.

EVANS, J. **How Does Part Orientation Affect 3D Printing?** 3D Beginners. 3/02/2022. Disponível em: <<https://www.3dbeginners.com/how-does-part-orientation-affect-3d-printing/>> Acesso em: 21 abr. 2022.

FARO. Gage FaroArm: Rápido como um micrômetro, preciso como uma MMC. **Faro**. Disponível em: <<https://www.faro.com/pt-BR/Resource-Library/Case-Study/gage-faroarm-as-quick-as-a-micrometer-as-accurate-as-a-cmm>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

FERNEDA, A. B. **Integração metrologia, CAD e CAM:** uma contribuição ao estudo de engenharia reversa. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

FLANAGAN, S. T.; BALLARD, D. H. 3D printed face shields: a community response to the COVID-19 global pandemic. **Academic radiology**, 2020, 27.6: 905.

FREITAS, G. **Metodologia e aplicabilidade da digitalização 3D a laser no desenvolvimento de moldes para calçados e componentes.** Dissertação de mestrado, PPGEM/UFRGS. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies:** 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2. ed. Nova Iorque: Springer, 2015.

GOMES, D.; SIMAS, A. G. **Scanner Tridimensional a Laser.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

GRIMM, T. **User's guide to rapid prototyping.** Society of Manufacturing Engineers, 2004.

HEMMINGS, J. Iris van Herpen: Transforming Fashion. **Fashion theory**, v. 24, n. 2, p. 287-291, 2020.

HEXAGON. Absolute Arm 6-Axis. **Hexagon**. Disponível em: <<https://www.hexagonmi.com/pt-BR/products/portable-measuring-arms/absolute-arm-6-axis>>. Acesso em: 11 jan. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 20685:2010(en) 3-D scanning methodologies for internationally compatible anthropometric databases. **ISO**, 2010. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:20685:ed-2:v1:en>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7250-1:2017(en) Basic human body measurements for technological design — Part 1: Body measurement definitions and landmarks. **ISO**, 2017. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:7250:-1:ed-2:v1:en>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/ASTM 52900:2021(en) Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. **ISO**, 2021. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/ASTM 52910:2018(en) Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations. **ISO**, 2018. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52910:ed-1:v1:en>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech. 2013.

KLEINMAN, Z. Coronavirus: 3D printers save hospital with valves. **BBC News**, 16 de março de 2020. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/technology-51911070>>. Acesso em: 27 abr. 2022.

LAFLOUFA, J. Osteoid, o gesso do futuro. **B9**, 2014. Disponível em: <<https://www.b9.com.br/49192/osteoid-o-gesso-futuro/>>>. Acesso em: 09 maio 2022.

LEFTERI, C. **Materiais em Design** – 112 materiais para design de produtos. Blucher, São Paulo, SP, 2018.

LI, J.; TANAKA, H. Rapid customization system for 3D-printed splint using programmable modeling technique—a practical approach. **3D printing in medicine**, v. 4, n. 1, p. 1-21, 2018.

LIM, C. W. J. et al. An overview of 3-D printing in manufacturing, aerospace, and automotive industries. **IEEE potentials**, v. 35, n. 4, p. 18-22, 2016.

LIU, Z. et al. 3D printing: Printing precision and application in food sector. **Trends in Food Science & Technology**, v. 69, p. 83-94, 2017.

LU, P. et al. Customized three-dimensional-printed orthopedic close contact casts for the treatment of stable ankle fractures: finite element analysis and a pilot study. **ACS omega**, 2021, 6.4: 3418-3426.

LWT SISTEMAS. **Os benefícios da impressão 3D na indústria automobilística**. Disponível em: <<https://www.lwtsistemas.com.br/2016/04/08/beneficios-impresao-3d-automobilistico/>>. Acesso em: 13 maio 2022.

MA, G.; WANG, L.; JU, Y. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. **Science China Technological Sciences**, v. 61, n. 4, p. 475-495, 2018.

MACEDO, G. M. A Utilização de Tecnologias de Prototipagem Rápida no processo de Desenvolvimento de Produto: Um Estudo de Caso. In: **VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. 2011.

MAGAS, V. et al. Avaliação da aplicação da termografia no diagnóstico de Tendinite de punho por LER/DORT. **Curitiba: PUC-PR**, 2014.

MARIÑO, S. et al. Antropometria Aplicada ao Design de Produtos: Um Estudo de Caso de Dimensionamento de Tesouras de Corte e Costura, p. 5260-5274. In: **Anais do 13º Congresso Pesquisa e Desenvolvimento em Design (2018)**. São Paulo: Blucher, 2019.

MARKETSANDMARKETS. Industrial 3D Printing Market worth \$5.2 billion by 2026. **MarketsandMarkets**, 2022. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/industrial-3d-printing.asp>>. Acesso em: 19 maio 2022.

MAVROIDIS, C. et al. Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, 2011, 8.1: 1-11.

MIAN, S. H.; AL-AHMARI, A. Comparative analysis of different digitization systems and selection of best alternative. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 30, n. 5, p. 2039-2067, 2019.

MOLINA, A.; HERAS, S. Accuracy of 3D Scanners in Tooth Mark Analysis. **Journal of Forensic Sciences**, v. 60, n. s1, p. S222–S226, 2015.

MOLITCH-HOU, M. Volkswagen Autoeuropa 3D Prints Manufacturing Tools to Save Thousands of Euros. **Engineering.com**, 2017. Disponível em: <<https://www.engineering.com/story/volkswagen-autoeuropa-3d-prints-manufacturing-tools-to-save-thousands-of-euros>>. Acesso em: 15 maio 2022.

MURY, L. G. M. **Uma metodologia para adaptação e melhoria de produtos a partir da engenharia reversa**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2000.

NAJMON, J. C.; RAEISI, S.; TOVAR, A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. **Additive manufacturing for the aerospace industry**, p. 7-31, 2019.

NAVEIRO, R. M. OLIVEIRA, V. F. Conceitos e metodologias de projeto. In: Ricardo Manfredi Naveiro; Vanderli Fava de Oliveira. (Org.). **O projeto de engenharia, arquitetura e desenho industrial**. 1 Ed. Juiz de Fora, 2001, v. 1, p. 25-64. 2001.

NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p.172-196, 2018.

NUNES, R. P.; BORGES, M. M. **Exercício acadêmico para o desenvolvimento de produtos de baixa complexidade**, Juiz de Fora, 2006.

OLIVEIRA, J. P.; SANTOS, T. G.; MIRANDA, R. M. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: from theory to practice. **Progress in Materials Science**, v. 107, p. 100590, 2020.

OLIVEIRA, M. S. B. et al. Projeto e desenvolvimento de um novo produto: anilha de encher. **XXXV Encontro Nacional De Engenharia De Produção: Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção**, Fortaleza, 2015.

PALOUSEK, D., et al. Pilot study of the wrist orthosis design process. **Rapid prototyping journal**, 2014.

PEQUINI, S. M. **Ergonomia aplicada ao design de produtos**: um estudo de caso sobre o design de bicicletas. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PERES, J. G. F., GOMES, L. R, GUARATO, A. Z., 2021. Influence of nozzle temperature on dimensional tolerances of specimens produced with fused deposition modeling manufacturing. **26th ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2021**, Florianópolis.

RADFAR, P. et al. The Role of 3D Printing in the Fight against COVID-19 Outbreak. **Journal of 3D printing in Medicine**, v. 5, p. 51-60, 2021.

RANKOUHI, B. et al. Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 16, n. 3, p. 467-481, 2016.

RASAL, R.M., JANORKAR, A.V., HIRT, D.E., Poly(lacticacid) modifications, **Progress in Polymer Science**, v. 35, n. 3, pp. 338-356, 2010.

RIBEIRO, L. Mecânica da UFU fabrica primeira peça 3D para indústria de óleo e gás. **comunica.ufu.br**, 2020. Disponível em: <<https://comunica.ufu.br/noticia/2020/01/mecanica-da-ufu-fabrica-primeira-peca-3d-para-industria-de-oleo-e-gas>>. Acesso em: 15 maio 2022.

RICOH. **FDM Design Guide**. Disponível em <<https://rapidfab.ricoh-europe.com/resources/help/fdm-design-guides/>>. Acesso em 17 abr. 2022.

ROOT, W. Exo Prosthetic Leg. **Behance**, 2014. Disponível em: <<https://www.behance.net/gallery/20696469/Exo-Prosthetic-Leg>>. Acesso em: 13 maio 2022.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**: uma referência para melhoria de processo. São Paulo: Saraiva, 2006.

RÜßMANN, M. et al. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. **Boston Consulting Group (BCG)**, 2015. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries>. Acesso em: 03 fev. 2022.

SANTANA, L. et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

SANTOS, M. A. R. **Engenharia reversa**: um método orientado a imobilizadores ortopédicos. 2016. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

SANTOS, P. H. S. e WINSCH, G. A. **Desenvolvimento de um escâner tridimensional baseado em sistema ótico e feixe de laser**. 2014. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2014.

SILVA, L. M. **Seleção de materiais e design em produtos esportivos**: estudo do perfil interno de caneleiras personalizadas. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, P. L. C. **Aplicação da impressão 3D e reconstrução digital no desenvolvimento de próteses maxilofaciais**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SKARLATOS, D.; KIPARISSI, S. Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces. 2012. ISPRS Annals of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. 3, pp. 299–304, 2012.

SOKOVIC, M.; KOPAC, J. RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, p. 398-403, 2006.

TELFER, S. et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 88, p. 198-205, 2016.

TESA. Produtos e indústrias. **tesa**. Disponível em: <<https://www.tesa.com/pt-br/industria/automovel/aplicacoes-automoveis/cobertura-de-orificios>>. Acesso em: 03 Julho 2022.

THE MANUFACTURER. Nissan accelerates assembly line with 3D printing solution. **The Manufacturer**, 2021. Disponível em: <<https://www.themanufacturer.com/articles/nissan-accelerates-assembly-line-3d-printing-solution/>>. Acesso em: 15 maio 2022.

TRELEAVEN, P.; WELLS, J. 3D body scanning and healthcare applications. **Computer**, v. 40, n. 7, p. 28-34, 2007.

TRINDADE, B. C; LOPES, J. R. S. **Renascendo das cinzas**: experimentação com resíduos do incêndio no Museu Nacional na recriação de peças do acervo através de manufatura aditiva. 2020. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Artes e Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

TRUPPEL, G. H. **Manufatura aditiva de compósito à base de Nd-Fe-B por deposição por energia direcionada a laser**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

VAFADAR, Ana et al. Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1213, 2021.

VALINO, A. D. et al. Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites. **Progress in Polymer Science**, v. 98, p. 101162, 2019.

VAROTSIS, A. B. Introduction to material jetting. **3D printing.Hubs**. Disponível em: <<https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>>. Acesso em: 10 abr. 2022.

VIAU, K. Precisa converter G-code para STL novamente? Veja como fazer! **3D Lab**, 2021. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/gcode/>. Acesso em: 11 maio 2022.

VILELA, F. B. **Desenvolvimento de malha polimérica impressa com dispositivo de eletroestimulação não invasivo acoplado para tratamento de fraturas ósseas**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

VITALE, M.; COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J. An overview of additive manufacturing. **Defense AT&L, November-December**, 2016. Disponível em: <https://www.dau.edu/library/defense-atl/p/Defense-ATandL---November-December_2016>. Acesso em: 07 maio 2022.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.

VOLPATO, N. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. Editora Blucher, 2007.

VRIES, C. D. Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures. **Ultimaker**, 2017. Disponível em: <https://ultimaker.com/learn/volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed>. Acesso em: 4 maio 2022.

WALACHOWICZ, F. et al. Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. S1, p. S203-S215, 2017.

WEIGERT, M. C. **Método de desenvolvimento de órtese personalizada de baixo custo para a Manufatura Aditiva**. 2017. 102 f. Dissertação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

WERNER, Heron et al. Additive manufacturing models of fetuses built from three-dimensional ultrasound, magnetic resonance imaging and computed tomography scan data. **Ultrasound in Obstetrics and Gynecology**, v. 36, n. 3, p. 355-361, 2010.

WISHBOX. **ENGENHARIA REVERSA: O QUE É E COMO PODE SER APLICADA?** Disponível em <<https://www.wishbox.net.br/blog/engenharia-reversa/>>. Acesso em 26 abr. 2022.

WOHLERS ASSOCIATES. New Wohlers Report 2021 Finds 7.5% Growth in Additive Manufacturing Industry Despite Pandemic. **Wohlers Associates**, 2021. Disponível em: <<https://wohlersassociates.com/press83.html>>. Acesso em: 11 maio 2022.

WOHLERS ASSOCIATES. Wohlers Report 2022 Finds Strong Industry-Wide Growth. **Wohlers Associates**, 2022. Disponível em: <<http://www.wohlersassociates.com/press87.html>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

WOODBURN, J. Embracing Additive Manufacture: Implications for Foot and Ankle Orthosis Design. **BMC Musculoskeletal Disorders**, v. 13, n. 1, p. 84, 2012.

YANG, F.; ZHANG, M.; BHANDARI, B. Recent development in 3D food printing. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 57, n. 14, p. 3145-3153, 2017.

YOSSEF, M.; CHEN, A. Applicability and limitations of 3D printing for civil structures. In: **Proceedings of the 2015 conference on autonomous and robotic construction of infrastructure**. USA: Ames, 2015. p. 237-246.

ZASTROW, M. 3D printing gets bigger, faster and stronger. **Nature**, v. 578, n. 7793, p. 20-24, 2020.

ZHENG, Y. et al. Effects of a 3D-printed orthosis compared to a low-temperature thermoplastic plate orthosis on wrist flexor spasticity in chronic hemiparetic stroke patients: a randomized controlled trial. **Clinical Rehabilitation**, 2020, 34.2: 194-204.

ZIELER, J. Leichter und schneller produziert dank 3D-Druck. **3D-grenzenlos Magazin**, 2018. Disponível em: <<https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/bmw-i8-roadster-dachkonsole-aus-3d-drucker-27421603/>>. Acesso em: 17 maio 2022.

ZIEMIAN, C. W. et al. Computer aided decision support for fused deposition modeling. **Rapid Prototyping Journal**, v. 7, n. 3, p. 138-147, 2015.

ZIER, A. F. et al. Estudo da prototipagem rápida por meio da impressão 3D e seu efeito na redução de custos e prazos dos projetos de produto. **Memorial TCC Caderno da Graduação**, v. 5, n. 1, p. 301-318, 2019.

APÊNDICE A – Algoritmo em MATLAB para plotar o STL, gerar planos de corte e salvar as coordenadas da superfície de intersecção

```

%% Código elaborado por Ravelly Amorim
% início

%% Começando limpado tudo
clc; close all; clear all;

%% Lendo o arquivo do desenho do polegar
f1 = stlread('polegar.stl');

%% Definindo o plano de corte
[x,y] = meshgrid(-2:2);
w = 433; % Como serão 14 planos de
corte, será executado esse script 12 vezes, para 14 valores diferentes
de w. Os valores de w serão: 410.5; 415; 419.5; 424; 428.5; 433;
437.5; 442; 446.5; 451; 455.5; 460; 464.5; 469.
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w);

f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';

%% Calculando a intersecção entre o desenho do polegar e o plano de
corte
[~,ff] = SurfaceIntersection(f1,f2);
ff = rmfield(ff, 'edges');

%% Desenhando o gráfico tridimensional
patch(f1, 'facecolor', 'y') % desenhando o polegar
patch(f2) % desenhando o plano de corte
patch(ff, 'linewidth',2) % desenhando a intersecção
entre eles

alpha(0.3)
axis([600 700 360 460 340 480]) % definindo os limites do
gráfico

%% Desenhando uma nova figura apenas com a intersecção:
figure
patch(ff, 'linewidth',2)
axis([600 700 360 460 340 480])

%% Extraindo as coordenadas x, y e z da intersecção:
[lin,col] = size(ff.vertices);

coord_x = zeros(lin,1);
coord_y = zeros(lin,1);
coord_z = zeros(lin,1);

for i = 1:1:lin
    coord_x(i) = ff.vertices(i,1);
    coord_y(i) = ff.vertices(i,2);
    coord_z(i) = ff.vertices(i,3);

```

```
end
```

```
%% Salvando as coordenadas em um arquivo .txt  
data = [coord_x coord_y coord_z]; % concatenando as 3  
coordenadas numa única matriz  
  
dlmwrite('Curva05.txt',data) % salvando essa matriz em um  
arquivo .txt, no caso serão 14 arquivos diferentes do 01 ao 14
```

APÊNDICE B – Algoritmo em MATLAB para plotar todas as curvas simultaneamente

```

%% Código elaborado por Ravelly Amorim
% início

%% Limpado tudo
clc; close all; clear all;

%% Início
f1 = stlread('polegar.stl');
[x,y] = meshgrid(-2:2);

%% Curva 1
w = 410.5;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff1] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff1 = rmfield(ff1, 'edges');

%% Curva 2
w = 415;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff2] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff2 = rmfield(ff2, 'edges');

%% Curva 3
w = 419.5;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff3] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff3 = rmfield(ff3, 'edges');

%% Curva 4
w = 424;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff4] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff4 = rmfield(ff4, 'edges');

%% Curva 5
w = 428.5;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff5] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff5 = rmfield(ff5, 'edges');

%% Curva 6
w = 433;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff6] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff6 = rmfield(ff6, 'edges');

%% Curva 7
w = 437.5;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff7] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff7 = rmfield(ff7, 'edges');

```

```

%% Curva 8
w = 442;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff8] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff8 = rmfield(ff8, 'edges');

%% Curva 9
w = 446.5;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff9] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff9 = rmfield(ff9, 'edges');

%% Curva 10
w = 451;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff10] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff10 = rmfield(ff10, 'edges');

%% Curva 11
w = 455.5;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff11] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff11 = rmfield(ff11, 'edges');

%% Curva 12
w = 460;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff12] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff12 = rmfield(ff12, 'edges');

%% Curva 13
w = 464.5;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff13] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff13 = rmfield(ff13, 'edges');

%% Curva 14
w = 469;
h = surf(x*18+650, y*18+400, x*0+w); f2 = surf2patch(h, 'triangles');
f2.facecolor= 'r';
[~,ff14] = SurfaceIntersection(f1,f2); ff14 = rmfield(ff14, 'edges');

%% Plotando todas as curvas
figure; patch(ff1, 'linew', 2); patch(ff2, 'linew', 2);
patch(ff3, 'linew', 2); patch(ff4, 'linew', 2); patch(ff5, 'linew', 2);
patch(ff6, 'linew', 2); patch(ff7, 'linew', 2); patch(ff8, 'linew', 2);
patch(ff9, 'linew', 2); patch(ff10, 'linew', 2); patch(ff11, 'linew', 2);
patch(ff12, 'linew', 2); patch(ff13, 'linew', 2); patch(ff14, 'linew', 2);
axis([600 700 360 460 340 480]);

```