

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO VITOR GOMES DOS SANTOS

REPROJETO DE IMPRESSORA 3D DE MODELAGEM DE DEPOSIÇÃO FUNDIDA

CURITIBA

2021

JOÃO VITOR GOMES DOS SANTOS

REPROJETO DE IMPRESSORA 3D DE MODELAGEM DE DEPOSIÇÃO FUNDIDA

Redesign of fused deposition modeling 3D printer

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Schlischtig
Coorientador: Luiz Bento

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO VITOR GOMES DOS SANTOS

REPROJETO DE IMPRESSORA 3D DE MODELAGEM DE DEPOSIÇÃO FUNDIDA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 05/abril/2022

Rodrigo Schlischtig
Doutor em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fábio Martins
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Daniel Hioki
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido vida, saúde e as oportunidades que me permitiram chegar até aqui.

À minha família, de quem nunca faltou apoio e orientação. Aos professores, colegas e amigos que, de uma forma ou de outra, me presentearam com seu conhecimento, sabedoria e suporte.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Schlichting e ao Coordenador Luiz Bento, pela valiosa orientação de ambos ao longo do projeto.

E, por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

A manufatura aditiva é, em termos relativos, um método de fabricação extremamente recente. Apesar disto, essa tecnologia já penetrou e se estabeleceu em diversas esferas da sociedade. No setor industrial, por exemplo, a prototipagem rápida está intimamente ligada com o conceito de indústria 4.0 – associado a evoluções disruptivas na forma de produzir. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta o reprojeto completo de uma impressora 3D para aplicação industrial. A área beneficiada foi o setor de Engenharia de Manutenção de uma montadora de caminhões, que teve suas necessidades analisadas para o desenvolvimento do trabalho. Em seguida, foi definido o escopo do projeto e as restrições que se aplicam sobre o mesmo, tanto dimensionais quanto orçamentárias. O passo seguinte foi a seleção de componentes, que devem obedecer às limitações estabelecidas. Por fim, foi feita uma representação desse equipamento através de um software de CAD 3D. Como consequência da conclusão do trabalho, o setor de Engenharia de Manutenção tem um projeto viável de impressora 3D disponível para construção de um protótipo.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Projeto. Aplicação industrial. Impressora 3D.

ABSTRACT

Additive manufacturing is, in relative terms, an extremely recent manufacturing process. Despite this, this technology already inserted and established itself in several spheres of the society. In the industrial sector, for instance, the rapid prototyping is closely linked with the concept of industry 4.0 – associated with disruptive evolutions in the manner of producing. In this context, the current work aimed to present the complete redesign of the project of a 3D printer for industrial application. The benefited area is the Maintenance Engineering of a truck manufacturer. For the development of this work, the necessities of the sector were determined. Next, the scope of the project and the constraints regarding it were defined, either dimensional or budgetary. The following step was the selection of components, which had to obey the aforementioned constraints. Finally, a representation of this equipment was made through a CAD 3D software. Since the completion of this project, the Maintenance Engineering sector has the project of a viable 3D printer ready for the manufacturing of a prototype.

Keywords: Additive manufacturing. Project. Industrial application. 3D Printer

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes de impressoras 3D por extrusão de material fundido	20
Figura 2 - Diferentes modelos de bocais	23
Figura 3 - Cabeçote extrusor com resistências	24
Figura 4 - Principais componentes do bloco extrusor	25
Figura 5 - Mesa aquecida com PCB	26
Figura 6 - Diferentes modelos de sistema de movimentação	27
Figura 7 - Diferentes modelos de correia	28
Figura 8 - Exemplos de eixos e buchas	29
Figura 9 - Exemplos de transmissão para motor de passo	30
Figura 10 - Kit de sistema de controle RepRap	31
Figura 11- Sistema de manufatura aditiva SLM280	32
Figura 12 - Modelo do protótipo com carenagem	42
Figura 13 - Modelo do protótipo sem carenagem	43
Figura 14 - Guia de eixo usada para validação	44
Figura 15 - Cotas para validação do projeto	44
Figura 16 - Demais cotas usadas para validação do projeto	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor dos parâmetros medidos em mm	45
Tabela 2 - Lista de peças e custos associados	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades físicas do PLA	21
Quadro 2 - Propriedades de filamentos de diferentes materiais.....	21
Quadro 3 - Etapas da metodologia de reprojeto.....	33
Quadro 4 - Principais opções para os sistemas da impressora.....	37
Quadro 5 - Matriz de avaliação relativa da estrutura	38
Quadro 6 - Matriz de avaliação relativa da extrusora	39
Quadro 7 - Matriz de avaliação relativa da mesa	39
Quadro 8 - Matriz de avaliação relativa do sistema de movimentação em Z	40
Quadro 9 - Matriz de avaliação relativa do sistema eletrônico	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contexto do tema	12
1.2	Caracterização da oportunidade	13
1.3	Objetivos	14
1.4	Justificativa	15
1.5	Etapas do trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Princípios da impressão 3D	16
2.1.1	Jateamento de Material	17
2.1.2	Jateamento de Aglutinante	17
2.1.3	Deposição com Energia Direcionada	17
2.1.4	Fusão de Leito de Pó	17
2.1.5	Adição de Lâminas	18
2.1.6	Fotopolimerização em cuba	18
2.1.7	Extrusão	18
2.2	<i>Softwares</i> para impressão 3D	19
2.3	Impressão 3D por Modelagem de deposição fundida	19
2.3.1	Filamento	20
2.3.2	Cabeçote extrusor	22
2.3.3	Mesa	25
2.3.4	Sistema de movimentação	26
2.3.5	Fonte de potência	29
2.3.6	Sistema de controle	30
2.4	Oportunidades para aplicação industrial	31
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	33
3.1	Reprojeto de produtos	33
4	DESENVOLVIMENTO	34
4.1	Definição do projeto	34
4.2	Projeto conceitual	34
4.2.1	Oportunidades de melhoria	34
4.2.2	Restrições de projeto	35
4.2.3	Levantamento das soluções possíveis	35

4.3	Projeto preliminar.....	37
4.3.1	Estrutura	38
4.3.2	Extrusora	38
4.3.3	Mesa	39
4.3.4	Movimentação em Z	40
4.3.5	Movimentação em X-Y	40
4.3.6	Sistema eletrônico	41
4.4	Projeto detalhado	42
4.4.1	Projeto 3D.....	42
4.4.2	Validação	43
4.4.3	Lista de peças.....	46
4.4.4	Custo total	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O termo “manufatura” tem origem latina e significa literalmente “fazer com as mãos”. Embora seja praticada desde que o ser humano aprendeu a lidar com ferramentas, a manufatura, como a conhecemos hoje, remonta à primeira Revolução Industrial – período no qual a produção de bens acabados em grande escala começou a acontecer (ASHTON, 1997).

Atualmente, vive-se a quarta revolução industrial – conhecida com indústria 4.0. Entre suas principais características, destaca-se um tipo novo de manufatura: a manufatura aditiva (KLEER, PILLER e WELLER, 2015).

Em linhas gerais, esse tipo de fabricação difere da manufatura tradicional ao produzir seus produtos através da adição – e não da extração - de matéria prima. Uma vantagem, entre muitas outras, da manufatura aditiva é a economia de matéria prima, uma vez que virtualmente todo material consumido compõe o produto acabado.

Ainda em termos econômicos, outra característica relevante da manufatura aditiva são os custos inicial e de operação relativamente baixos quando comparados com máquinas tradicionais, como centros de usinagem, por exemplo. Nesse sentido, o fato de a presença de um operador ser prescindível durante a operação da máquina é um fator revolucionário.

1.1 Contexto do tema

No contexto da indústria 4.0, a manufatura aditiva contribui com a sua versatilidade operacional: a fabricação de geometrias mais complicadas não é proporcionalmente mais onerosa (VOLPATO, et al., 2018); além disso, as máquinas que realizam esse tipo de operação permitem o uso de diferentes materiais em rápida sucessão.

O método de manufatura aditiva mais utilizado na indústria (e também fora dela) é o de impressão 3D. Nele, camadas de material – geralmente plástico – são depositadas umas sobre as outras, de forma que a dimensão da peça no eixo vertical aumenta na medida do incremento programado na máquina. Esse incremento corresponde à espessura da camada depositada e é tão pequeno quanto a precisão do equipamento permite (SHAHRUBUDIN, et al., 2019).

Conforme a norma ASTM 52900, existem 7 principais métodos de impressão 3D, dentre os quais a *extrusão de material* é um dos mais utilizados, inclusive para aplicações industriais. Entre os métodos de impressão por extrusão de material, o *fused deposition modelling (FDM)* é o mais comum.

Nesse tipo de impressão, o material plástico fundido é extrudado sobre uma superfície plana através de um bico aquecido, formando uma camada. A camada recém depositada se solidifica rapidamente, servindo de base para a camada seguinte e assim por diante (SAXENA, 2016).

Conforme cita Shahrubudin (2019), a impressão 3D traz implicações positivas para diversos setores industriais, como o automotivo. Nessa área, o uso de peças impressas em 3D permite a aplicação de estruturas mais leves e mais complexas em menor tempo. Além disso, produzir protótipos se tornou uma tarefa muito mais barata e prática - motivo pelo qual esse método de fabricação também é conhecido como “prototipagem rápida” (VOLPATO, et al., 2018).

Um exemplo de indústria que se beneficia da tecnologia 3D é a de montagem de automóveis. Em uma fábrica de caminhões no Brasil, já se usam impressoras 3D em alguns setores. A expansão desse tipo de tecnologia para mais áreas com certeza traria ganhos substanciais para a operação como um todo.

Dada a natureza do projeto e as oportunidades a serem exploradas, o presente trabalho se vale de diversas disciplinas de interesse para a Engenharia Mecânica, como:

- Processos de fabricação;
- Projetos de máquinas;
- Mecânica dos sólidos;
- Sistemas eletrônicos.

1.2 Caracterização da oportunidade

Considerando as evidentes vantagens associadas à impressão 3D, em particular no setor industrial, o presente trabalho teve por objetivo projetar um protótipo de impressora 3D de aplicação industrial para o setor de Engenharia de Manutenção da montadora em questão.

Nesse sentido, uma alternativa que prontamente surge é a compra de um equipamento do tipo. Produtos comerciais, entretanto, apresentam algumas limitações importantes, duas das quais merecem ser tratadas com mais atenção.

A primeira delas é econômica. Conforme explica Volpato et al (2018), a produção industrial precisa ser competitiva e eficiente. Sabendo disto, é importante considerar que um equipamento comercial de impressão 3D para uso industrial possui um custo de aquisição bastante alto.

Deve-se levar em conta que os custos de manutenção autorizada e substituição de componentes serão proporcionalmente altos. Dessa forma, fica evidente que a redução de custos é uma oportunidade que esse trabalho deve abordar.

A segunda das limitações é processual. Considerando a colocação de Volpato et al (2018) de que os produtos produzidos devem ser tão livres de falhas e de alta qualidade quanto possível, espera-se que o equipamento usado seja capaz de atender essas expectativas. No caso de uma impressora 3D, isso se refere a parâmetros como rigidez estrutural, precisão de movimento e área de impressão.

Tendo em mente os elevados requisitos de qualidade que caracterizam a fabricante, entendeu-se que é necessário o uso de um produto com especificações acima das encontradas no mercado, novamente, a um custo razoável. Assim sendo, a segunda grande oportunidade a abordada foi o desenvolvimento de um equipamento com elevada capacidade técnica.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi projetar um protótipo de impressora 3D para aplicação industrial para o setor de Engenharia de Manutenção de uma montadora de veículos. O equipamento projetado deve ter o custo inferior ao dos equivalentes comerciais e ser de alta qualidade.

Para atingir o objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Entender as aplicações que uma impressora 3D teria no setor de Engenharia de Manutenção;
- Levantar as características que o equipamento precisa ter para performar bem nas aplicações propostas;
- Levantar as limitações, orçamentárias e de outros tipos, que o equipamento precisa respeitar;

- Fazer a seleção de materiais e componentes comerciais a serem utilizados além de projetar componentes próprios para esse equipamento;
- Fazer a montagem em software CAD do conjunto completo.

1.4 Justificativa

O desenvolvimento do projeto de uma impressora 3D para aplicação industrial é justificado pela forma como o tema está situado de maneira central no ambiente de desenvolvimento tecnológico caracterizado pela indústria 4.0.

Conforme Volpato et al (2018), o uso de tecnologias de prototipagem rápida é uma tendência de mercado que representa uma vantagem operacional e econômica para as indústrias que assimilam esses conceitos.

Além disso, o desenvolvimento de um projeto próprio representa ganhos ainda maiores pois o resultado é um produto não apenas customizado para as necessidades da montadora, mas também mais barato em termos de manutenção e substituição de componentes.

1.5 Etapas do trabalho

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta uma visão geral sobre a tecnologia usada além de apresentar um contexto de mercado que justifica o interesse no tema proposto. A partir disso, foi traçado um objetivo geral e, a partir desse, objetivos específicos.

O segundo capítulo se dedica à fundamentação teórica sobre a tecnologia de impressão 3D utilizada no projeto aqui desenvolvido. Isso ofereceu a base necessária para a seleção de componentes adequados.

O capítulo posterior trata das metodologias aplicadas no desenvolvimento do projeto. Isso envolve os parâmetros considerados no desenvolvimento do equipamento além dos métodos utilizados pela fabricante para criação de projetos.

O quarto capítulo trata do desenvolvimento do projeto em si, apresentando as condições de contorno e aplicação das metodologias adequadas para a criação de um protótipo que atenda às necessidades identificadas.

Por fim, o capítulo final apresentará os comentários finais do autor sobre a execução do projeto e possíveis oportunidades de melhoria para o futuro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo deste capítulo será feita uma revisão sobre os conceitos fundamentais do processo de impressão 3D como um todo, do método *Fused Deposition Modeling* (FDM) em particular e as possíveis aplicações para o setor de Engenharia de Manutenção da montadora.

2.1 Princípios da impressão 3D

A tecnologia de impressão 3D existe desde a primeira metade da década de 1980, quando Charles W. Hull desenvolveu a primeira impressora 3D. O método mais comum de impressão 3D, o *Fused Deposition Modeling* (FDM) foi patenteado em 1989. Nele, um filamento plástico alimenta uma extrusora aquecida que deposita o material (SAXENA, 2016).

Segundo Volpato (2018), para a fabricação de uma peça impressa em 3D, alguns passos são necessários, a saber:

- A criação de um modelo CAD 3D da peça final;
- A conversão do modelo em CAD para um formato de arquivo reconhecível por um software de impressão 3D. Os formatos mais comuns são o *Stereolithographic* (STL) e o *Additive Manufacturing Format* (AMF);
- O fatiamento do modelo, agora em um formato adequado, em seções 2D que correspondem às camadas de material que serão depositadas pela impressora;
- A fabricação em si, pelo método suportado pela impressora.

De acordo com o método de impressão utilizado e a aplicação da peça, talvez seja necessária uma etapa de pós-processamento, que contempla ações de limpeza e acabamento, entre outras.

Conforme a norma ASTM 52900, são reconhecidas 7 diferentes formas de alimentação para uma impressora 3D; essas formas de alimentação também são conhecidas como tecnologias de impressão e constam a seguir.

2.1.1 Jateamento de Material

A peça é fabricada pela deposição de pequenas partículas do filamento. A cura é feita através de exposição a raios ultravioleta. A resolução é de aproximadamente 16 microns de altura por camada (SAXENA, 2016).

Segundo Shahrubudin (2019), peças fabricadas por esse método possuem excelentes acabamento superficial e precisão dimensional, quando comparadas com peças produzidas por outros métodos de manufatura aditiva. A disponibilidade de materiais para essa tecnologia é vasta, exemplos incluem polímeros, cerâmicas, compósitos e material biológico.

2.1.2 Jateamento de Aglutinante

Nessa tecnologia, a matéria prima está em pó e a peça é formada através da aplicação, novamente por jateamento, de um aglutinante.

As principais vantagens desse método são o custo relativamente baixo e a possibilidade de imprimir peças de grandes dimensões. Outro ponto importante é a possibilidade de se trabalhar com metais (SHHRUBUDIN, 2019).

2.1.3 Deposição com Energia Direcionada

Esse processo complexo e relativamente caro se vale de energia térmica concentrada, como um laser, para formar a peça conforme a matéria prima é depositada em um substrato (SAXENA, 2016).

Conforme Volpato et al (2018), alguns exemplos de tecnologias que aplicam esse método são o *Laser engineered Net Shaping* (LENS) e o *Direct Metal Deposition* (DMD).

Uma grande vantagem desse método é a possibilidade de adicionar material a uma peça já existente, além disso, o fato de energia direcionada ser utilizada permite mais controle sobre a microestrutura do material, geralmente um metal na forma de pó ou em fio (SHHRUBUDIN, 2019).

2.1.4 Fusão de Leito de Pó

Este método apresenta algumas semelhanças com a deposição de energia direcionada. No caso da fusão de leito de pó, um feixe de elétrons ou de laser para

fundir o material, em forma de pó, que está depositado em um recipiente próprio, o leito.

Existem diversas tecnologias que usam esse método, entre elas pode-se citar o *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), onde o pó metálico é colocado em uma câmara de gás inerte para então ser fundido por um raio laser concentrado. Outro exemplo é o *Electron Beam Melting* (EBM), no qual um feixe de elétrons funde o pó que está em vácuo (SAXENA, 2019).

2.1.5 Adição de Lâminas

Nesse método de impressão, lâminas de material são coladas umas às outras para formar camadas do material. Um aspecto relevante dessa tecnologia é a possibilidade de imprimir peças coloridas. Além disso, o baixo preço e a facilidade de manuseio da matéria prima são outras vantagens (SHHRUBUDIN, 2019).

Exemplos de tecnologias que incorporam esse método incluem o *Laminated Object Manufacturing* (LOM) e o *Selective Deposition Lamination* (SDL) (VOLPATO et al, 2018).

2.1.6 Fotopolimerização em cuba

Constrói peças ao curar camadas de polímero fotossensível com o uso de luz (raios ultravioleta e laser também podem ser usados). A matéria prima é colocada em uma cuba de material fotopolimérico para o início da operação (SAXENA, 2019). Essa tecnologia produz peças com excelente acabamento superficial (SHHRUBUDIN, 2019).

2.1.7 Extrusão

A extrusão de material é o método mais barato, acessível e comum de impressão 3D. Entre os tipos de impressão por extrusão, o mais aplicado é o *Fused Deposition Modeling* (FDM), que trabalha principalmente com polímeros.

Nele, o filamento de matéria prima passa por um bocal aquecido, que funde o material (ou o deixa próximo do ponto de fusão) e o deposita sobre uma superfície plana, conhecida como mesa. A camada recém depositada solidifica em poucos

segundos e a camada seguinte é depositada sobre ela. A repetição desse processo dá forma à peça.

A extrusão por FDM permite a aplicação de diferentes materiais em uma mesma peça, o que expande as possibilidades de personalização. Além disso, esse processo é conhecido pela capacidade de produzir peças funcionais, prontas para o uso (SHAHRUBUDIN, 2019).

2.2 Softwares para impressão 3D

Segundo Saxena (2019), três tipos de softwares são necessários para a execução completa da fabricação de uma peça impressa em 3D, são eles:

- Software de CAD 3D para a criação do modelo virtual da peça;
- Software de CAM, que converte o modelo do software CAD em comandos mecânicos legíveis para o sistema da impressora;
- Software de controle da impressora, que gerencia a sucessão de comandos que a impressora recebe, garantido que os passos sejam feitos na ordem correta. Além disso, esse software também faz a interface entre máquina e usuário.

Assim como acontece em outras máquinas, a impressão 3D é controlada por um tipo de código conhecido como Código-G. Esse código envia um comando por vez para a impressora através de um dispositivo de armazenamento, como um cartão SD ou por meio de uma conexão USB. O software da impressora interpreta o código e o converte em um comando mecânico. Da mesma forma, informações são exibidas ao usuário através da conexão USB.

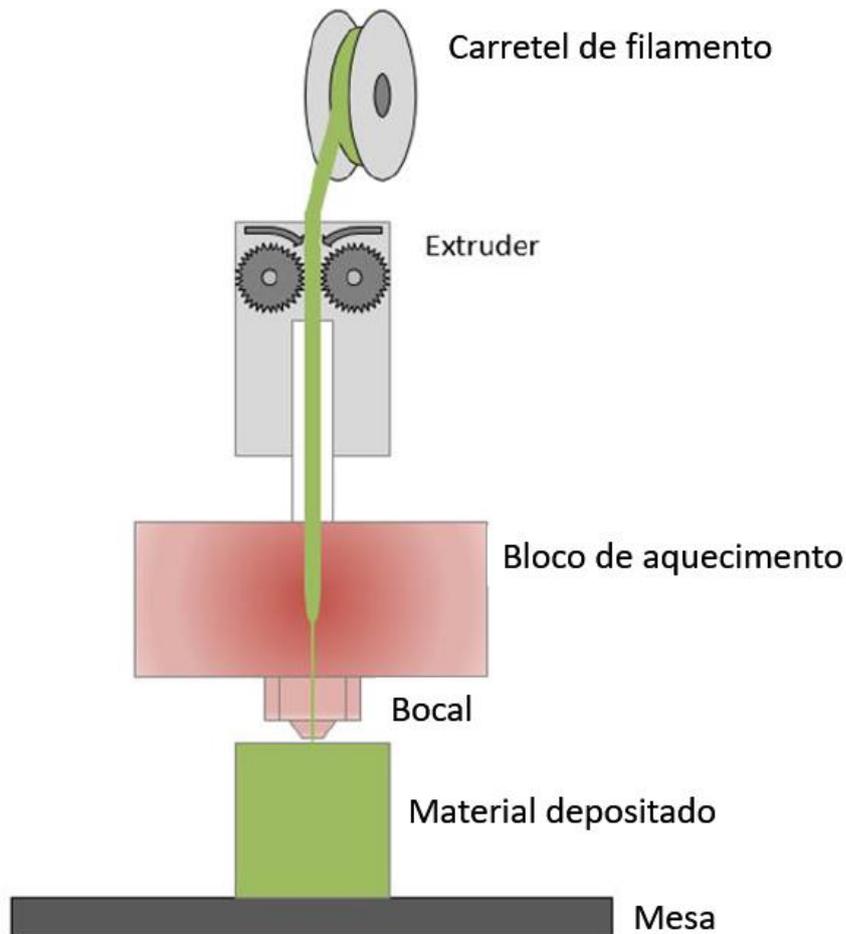
2.3 Impressão 3D por Modelagem de deposição fundida

A tecnologia de modelagem de deposição fundida foi desenvolvida por Scott Crump no final dos anos 1980. Conforme explica Kun (2016), a peça impressa por FDM é fabricada através da extrusão de material termoplástico em camadas que são sobrepostas.

A matéria prima costuma ser usada na forma de carretel de filamento, que é desenrolado conforme o bocal de extrusão é ativado. Um parafuso sem fim ou um par de engrenagens puxam o filamento para dentro do bocal na velocidade necessária.

O bocal de extrusão é aquecido de forma a fundir o filamento e pode ser movido ao longo dos três eixos conforme o mecanismo de controle da impressora. Esse movimento costuma ser feito por motores de passo (KUN, 2016). A figura 1 apresenta os componentes básicos de uma extrusora FDM.

Figura 1 - Componentes de impressoras 3D por extrusão de material fundido



Fonte: Adaptado de Polak (2017)

2.3.1 Filamento

Segundo Hausman e Horne (2014), o material termoplástico que alimenta impressoras de modelagem por deposição fundida costuma ser vendido em carretéis de filamento fino, com diâmetros entre 1,75 e 3 milímetros.

Conforme Besko et al (2017), as matérias primas de filamento mais comuns no Brasil são, respectivamente, o ácido polilático (PLA) e o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). O quadro 1 apresenta algumas propriedades físicas do PLA.

Quadro 1 - Propriedades físicas do PLA

Propriedade	Valor	Unidade
Temperatura de fusão	173 - 178	°C
Temperatura de transição vítrea	60	°C
Temperatura de deflexão térmica a 455kPa	65	°C
Densidade	1,3	g/cm ³
Diâmetro do filamento	1,75	mm
Fórmula química	(C ₃ H ₄ O ₂)	-

Fonte: Adaptado de Polak, 2017

Além do PLA e do ABS, outros materiais que podem ser usados em filamentos incluem:

- Polietileno Tereftalato com glicol (PETG);
- Politereftalato de trimetileno (PETT);
- Poliamida (Nylon);
- Elastômero termoplástico (TPE), poliuretano termoplástico (TPU) e copoliéster termoplástico (TPC);
- Policarbonato (PC).

O quadro 2 apresenta o desempenho de cada um desses materiais considerando parâmetros mecânicos, ambientais e financeiros. Os três níveis possíveis (baixo, médio e alto) são relativos apenas aos materiais usados na comparação.

Quadro 2 - Propriedades de filamentos de diferentes materiais

Propriedade	PLA	ABS	PETG (PET, PTT)	NYLON	TPE, TPU e TPC	PC
Impacto ambiental	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Baixo
Brilho	Médio	Baixo	Alto	Médio	Médio	Alto
Transparência	Médio	Baixo	Alto	Baixo	Médio	Alto
Rigidez	Médio	Alto	Alto	Alto	Baixo	Alto
Resistência ao impacto	Baixo	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto
Flexibilidade	Baixo	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio
Contração	Baixo	Alto	Médio	Baixo	Médio	Baixo
Nível de detalhamento	Alto	Baixo	Médio	Alto	Médio	Alto

Qualidade superficial	Alto	Baixo	Alto	Alto	Médio	Alto
Resistência ao atrito	Baixo	Médio	Alto	Alto	Baixo	Alto
Resistência química	Médio	Baixo	Alto	Alto	Alto	Alto
Resistência a temperatura	Baixo	Alto	Médio	Alto	Médio	Alto
Usinabilidade	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Médio
Densidade	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Alto
Temperatura de impressão	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Temperatura da mesa aquecida	Baixo	Alto	Médio	Alto	Baixo	Alto
Preço por m ³ /grama/hora	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Alto

Fonte: Adaptado de Besko (2017)

Conforme Besko et al (2017) aponta, o PLA é o mais ecológico entre os materiais analisados, isso graças à sua biodegradabilidade e ao fato de suas matérias primas serem renováveis. Entretanto, suas propriedades mecânicas são inferiores às das alternativas, de forma que fica a critério do usuário equilibrar os requisitos para a peça com o impacto ambiental.

Segundo Smith (2015) para fabricação de um filamento de PLA, por exemplo, o processo é como segue:

1. A resina de matéria prima, em forma de cristais transparentes, é misturada com o pigmento desejado. Pode-se incluir na mistura um aditivo que melhore as propriedades do material;
2. A resina, agora colorida, é posta para secar a uma temperatura de 60°C a 80°C. Esse processo dura em torno de 2 horas;
3. A resina é então colocada em uma extrusora, que aquece o material até um estado semilíquido e faz a extrusão na forma de um monofilamento. Imediatamente após sair da extrusora, o produto passa por um tanque de água aquecida para reduzir sua temperatura lentamente;
4. O filamento passa por um tanque de água fria, para finalizar o processo de resfriamento e então é enrolado em um carretel.

2.3.2 Cabeçote extrusor

A extrusora, ou *hot end*, é um componente crítico para impressoras FDM. O bico da extrusora, por exemplo, define a espessura de cada camada depositada.

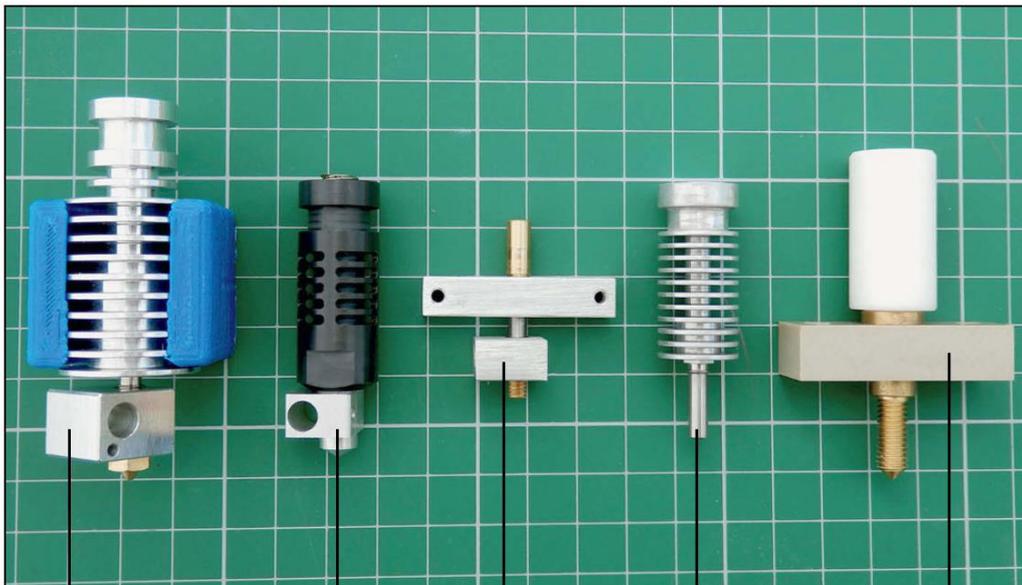
Outro parâmetro importante que depende da extrusora é a velocidade de deposição (RAULINO, 2011).

Conforme constam Hausman e Horne (2014), a extrusora típica possui um bocal de alumínio ou latão com um furo de 0,5 milímetros na extremidade, é por esse furo que passa o material derretido.

O latão costuma ser mais utilizado na fabricação de bocais pelo fato de sua usinabilidade e condutividade térmica serem mais adequadas às restrições dessa operação, a principal das quais é a necessidade de certo grau de isolamento térmico.

Além disso, o latão tem menos chances de danificar outros componentes com os quais possa interferir (HAUSMAN e HORNE, 2014). A figura 2 apresenta diferentes tipos de bocais usados no projeto RepRap.

Figura 2 - Diferentes modelos de bocais



Fonte: Hausman e Horne (2014)

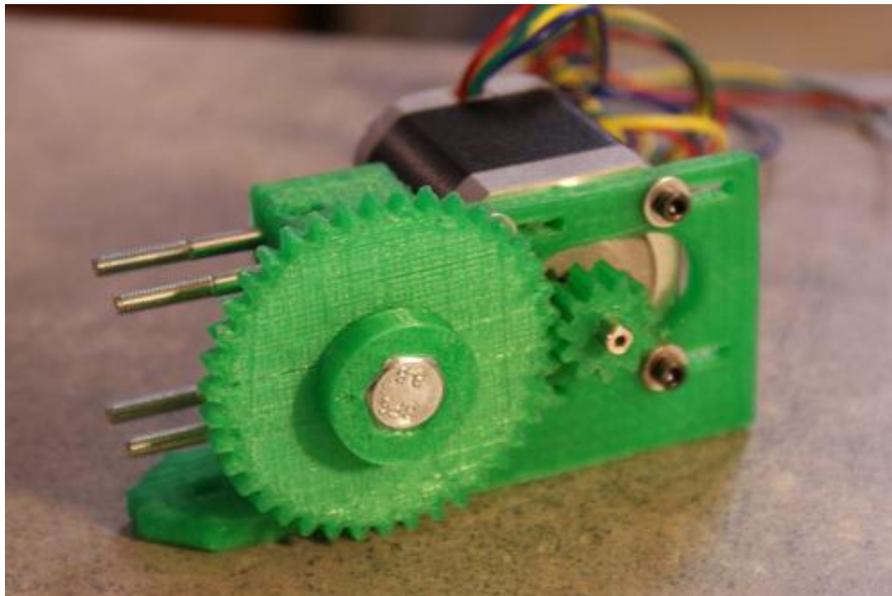
Hausman e Horne (2014) apontam que furos de diâmetros maiores ou menores que 0,5 milímetros podem ser usados. Para diâmetros menores, que podem ser tão baixos quanto 0,2 milímetros, o nível de detalhamento cresce, mas, na mesma medida, também aumenta o tempo de impressão, que pode passar de 10 horas até para peças pequenas.

Analogamente, diâmetros maiores reduzem bastante o tempo de impressão, mas também fazem diminuir o nível de detalhamento da peça. Esse tipo de

configuração pode ser desejável para peças como potes ou copos, já que a espessura de parede maior significa um objeto mais resistente (HAUSMAN e HORNE, 2014).

Além do bocal, o cabeçote também conta com um bloco de aquecimento, responsável por levar o filamento a um estado semilíquido. A energia térmica que o bloco de aquecimento produz costuma ser fornecida por um cartucho aquecedor ou resistência (RAULINO, 2011). A figura 3 mostra um cabeçote extrusor com bloco de aquecimento por resistências.

Figura 3 - Cabeçote extrusor com resistências



Fonte: Raulino (2011)

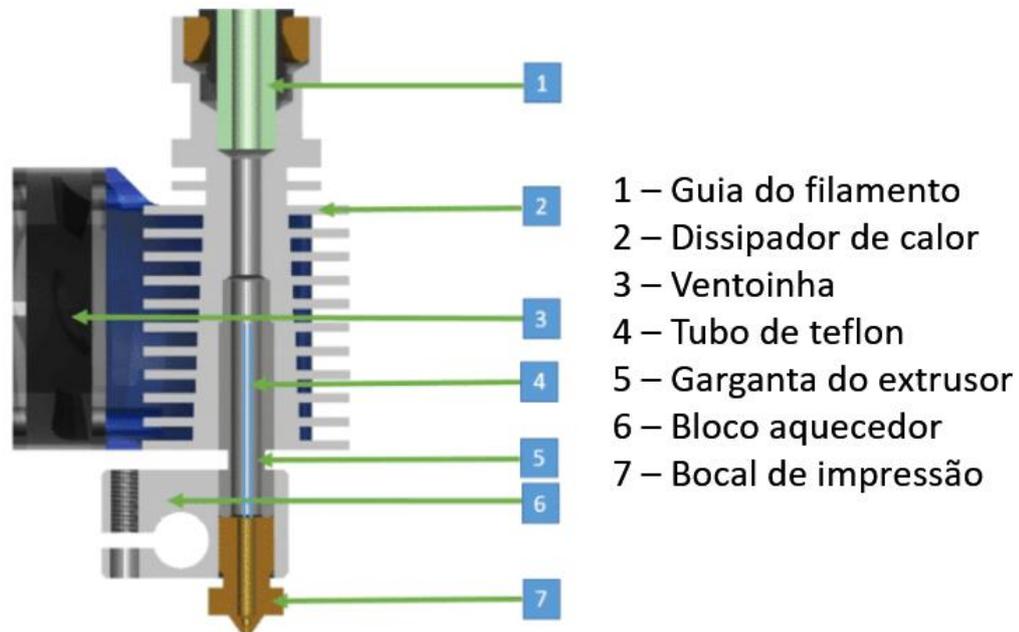
Um importante elemento que também faz parte do cabeçote é o sensor de temperatura, usado tanto para monitorar o processo quanto como medida de segurança contra o superaquecimento. O tipo de sensor mais comum para essa aplicação é um termistor (HAUSMAN e HORNE, 2014).

Raulino (2014) aponta que um bloco isolante também é necessário. O material mais comumente escolhido para desempenhar essa função é o politetrafluoretileno (Teflon). O teflon apresenta vantagens importantes como o baixo coeficiente de atrito, gerando assim pouca interferência com o filamento (HAUSMAN e HORNE, 2014).

Hausman e Horne (2014) apontam ainda que uma ventoinha geralmente é usada para promover o resfriamento do elemento isolante. Se esse isolamento não for adequado, o filamento que chega ao bloco extrusor expandirá e provocará um entupimento.

A figura 4 apresenta uma vista de corte com os principais elementos de um bloco extrusor.

Figura 4 - Principais componentes do bloco extrusor



Fonte: Adaptado de 3DLAB (2020)

2.3.3 Mesa

A mesa é o elemento sobre o qual o material ejetado pelo bocal de extrusão será colocado, é esse item que servirá de suporte definitivo para a peça durante todo o processo de fabricação e, por isso, deve ter características que contribuam para a qualidade final da peça e para a viabilidade do processo.

Hausman e Horne (2014) ressaltam que, como a mesa costuma ser um componente móvel – principalmente em aplicações onde serão produzidas peças menores -, de forma que é importante que materiais leves sejam usados em sua construção, de forma a facilitar as acelerações e desacelerações.

Embora existam variações, a mesa de uma impressora 3D por FDM costuma ser constituída por 3 itens:

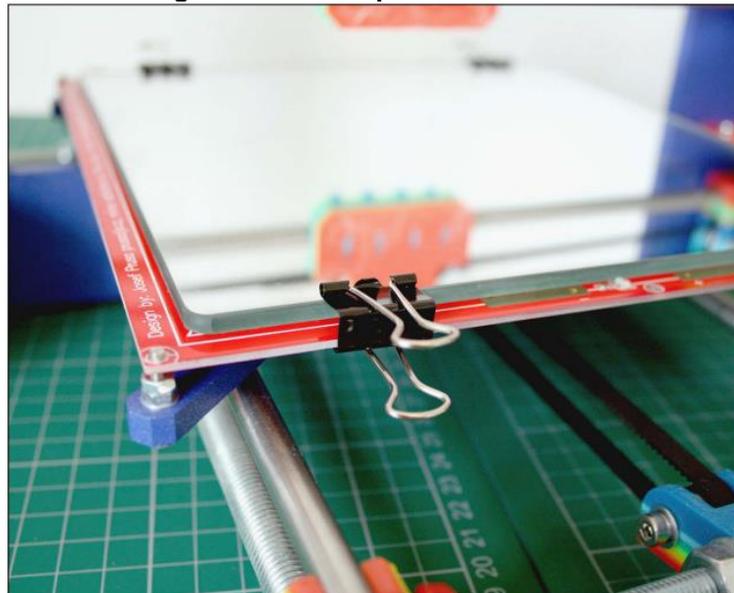
- Um suporte, geralmente de alumínio;
- Uma placa de circuito impresso (PCB) montada sobre o suporte e que funciona como fonte de calor para a mesa;
- Uma lâmina de vidro, montada sobre a PCB.

Hausman e Horne (2014) esclarecem que a placa de circuito impresso não é estritamente necessária, mas o calor que esse componente fornece permite que uma variedade maior de materiais seja impressa, além de melhorar a qualidade geral das peças devido o resfriamento controlado das camadas, o que aumenta a adesão entre elas.

A cobertura de vidro é importante pois o risco de a peça acabada permanecer aderida a esse material é muito baixa. Além disso, o vidro possui uma superfície muito mais regular que a PCB, o que contribui para a qualidade superficial do produto.

A figura 5 apresenta uma mesa para impressão 3D por FDM. A placa de circuito impresso aparece em vermelho e um grampo é usado para evitar deslizamentos entre a lâmina de vidro e a PCB.

Figura 5 - Mesa aquecida com PCB



Fonte: Hausman e Horne (2014)

2.3.4 Sistema de movimentação

Um requisito natural do processo de impressão 3D por extrusão é que o bocal extrusor se movimente ao longo dos três eixos espaciais em relação à peça. Convenciona-se, seguindo o padrão cartesiano, que o eixo Z é perpendicular ao plano da mesa, enquanto os eixos X e Y estão contidos nesse mesmo plano.

Como as camadas de material semilíquido são sobrepostas no sentido do eixo Z, essa direção não exige uma velocidade de movimento muito alta por parte do bocal

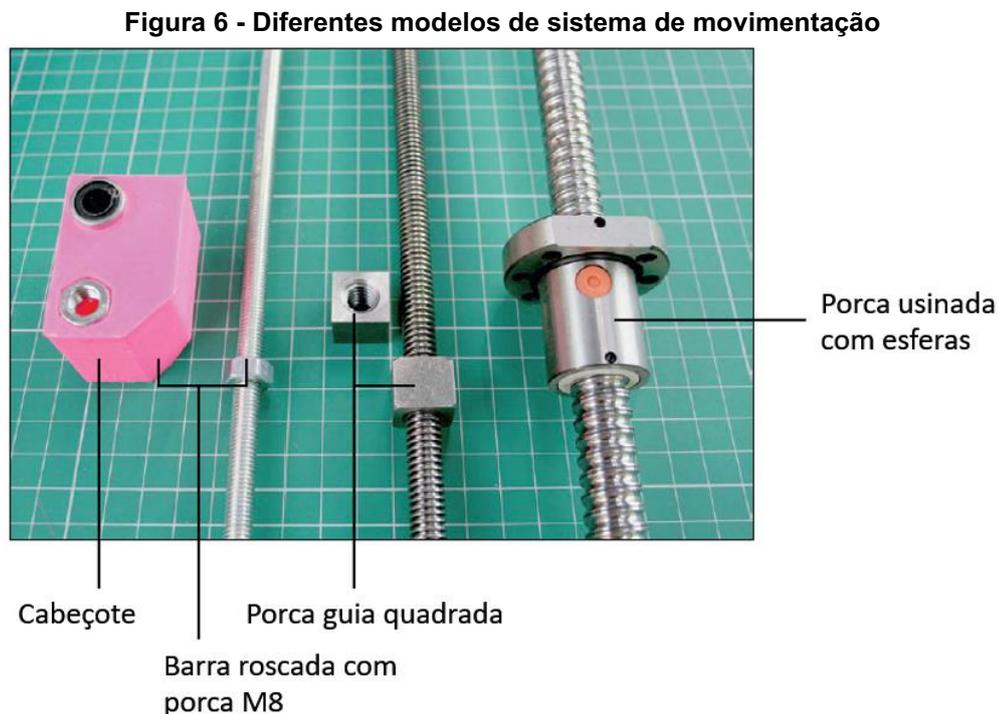
extrusor. Além disso, um movimento com incrementos pequenos é desejável pois isso contribui para a qualidade final da peça (HAUSMAN e HORNE, 2014).

O movimento no eixo vertical costuma ser feito através de uma barra roscada conectada à fonte de potência. Uma porca é então colocada na barra e presa à mesa ou à fixação da extrusora. Conforme a fonte de potência faz girar a barra roscada, a porca sobe ou desce, levando consigo a mesa ou a extrusora.

Hausman e Horne (2014) indicam que esse método garante uma ótima resolução de movimento, já que mesmo para uma rosca grossa M8, por exemplo, cada revolução da barra representa um movimento vertical de apenas 1,25 milímetro.

Caso resoluções mais altas sejam necessárias, pode-se usar um rolamento especial. Nesse caso, a barra contará com uma pista helicoidal em vez de uma rosca. As esferas do rolamento percorrerão a pista e isso promoverá o movimento vertical.

A figura 6 apresenta diferentes opções de sistema de movimentação no eixo Z.



Fonte: Adaptado de Hausman e Horne (2014)

Por outro lado, no plano da mesa, que inclui os eixos X e Y, a velocidade de deposição é muito maior. Portanto, a velocidade de movimentação nesses eixos

precisa ser muito mais alta que no eixo vertical, uma vez que a qualidade da peça será comprometida se esse não for o caso (HAUSMAN e HORNE, 2014).

Pensando nisso, o sistema de movimentação, que costuma ser constituído por correias e polias dentadas, é diretamente ligado à fonte de potência. Uma alta resolução de movimentação ainda é importante e por isso as correias costumam ter um passo de 5mm, 2,5mm ou mesmo 2mm (HAUSMAN e HORNE, 2014).

A figura 7 apresenta alguns exemplos de correias usadas na movimentação do cabeçote extrusor nos eixos X e Y.

Figura 7 - Diferentes modelos de correia



Fonte: Hausman e Horne (2014)

Outro aspecto importante do movimento nos eixos X e Y é o sistema que guiará o movimento do cabeçote extrusor nessas direções. Segundo Hausman e Horne (2014), guias ou eixos costumam ser os componentes mais usados para suportar esses movimentos lineares.

O cabeçote é fixado a suportes que deslizam sobre as guias ou eixos. Em alguns casos, utilizam-se buchas, que podem ser impressas em 3D, para fazer a interface entre o suporte e a guia ou eixo.

A figura 8 apresenta alguns eixos e diferentes tipos de buchas.

Figura 8 - Exemplos de eixos e buchas

Fonte: Hausman e Horne (2014)

2.3.5 Fonte de potência

Outro componente de grande importância para o funcionamento de impressoras 3D por extrusão é o sistema que fornece a potência necessária para a movimentação de seus componentes. Para realizar essa tarefa, diferentes tipos de motores podem ser utilizados, como motores de corrente contínua (motores DC), servomotores e motores de passo (RAULINO, 2011). Dentre essas opções, o motor de passo costuma ser a opção mais escolhida.

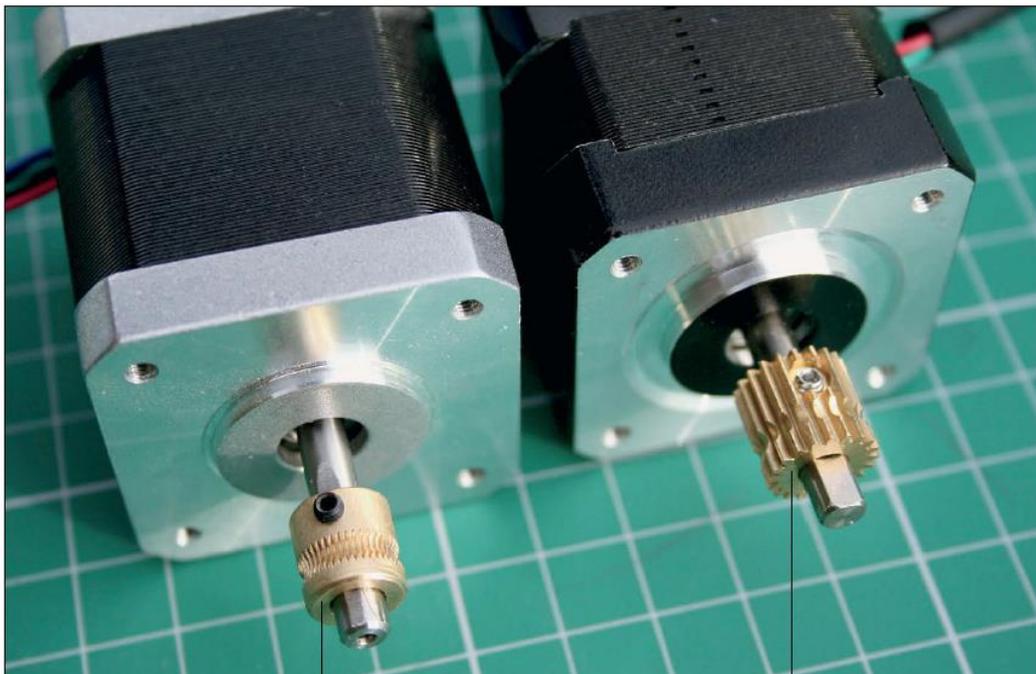
Segundo Raulino (2011), o motor de passo é um sistema síncrono que produz potência a partir de sinais elétricos aplicados em suas bobinas. Conforme a tensão é aplicada sobre esse dispositivo, seu eixo rotaciona uma quantidade predeterminada de graus, esse avanço é chamado de passo e é tão pequeno quanto a resolução do motor permite, de forma que um passo menor representa mais precisão no movimento gerado.

No caso de impressoras 3D por extrusão, costuma-se aplicar um motor por eixo ou guia na qual os componentes se movimentam. Além disso, um motor de passo é usado no cabeçote extrusor para puxar o filamento.

Segundo Hausman e Horne (2014), o método mais comum de transmissão de potência costumam ser polias. Conforme citado anteriormente, para a movimentação do cabeçote nos eixos X e Y, utilizam-se correias dentadas e polias, que são posicionadas nos eixos dos motores de passo e em outros pontos de apoio ou de mudança de direção.

A figura 9 traz dois exemplos alternativos de transmissão para motores de passo: uma roda motriz e uma roda dentada.

Figura 9 - Exemplos de transmissão para motor de passo



Fonte: Hausman e Horne, 2014

2.3.6 Sistema de controle

O sistema eletrônico de controle para uma impressora 3D por extrusão pode ter uma variedade imensa de configurações. Os tipos de sistema mais comuns, entretanto, são aqueles baseados no projeto de código aberto Arduino – uma placa de prototipagem para sistemas eletrônicos. A popularidade desse sistema se deve à possibilidade de ser usado em projetos próprios de impressora 3D, sendo o projeto RepRap o mais popular desse tipo.

Segundo Raulino (2011), no caso do modelo de impressora Mendel, parte do projeto RepRap, utilizam-se os seguintes componentes para realizar o controle eletrônico:

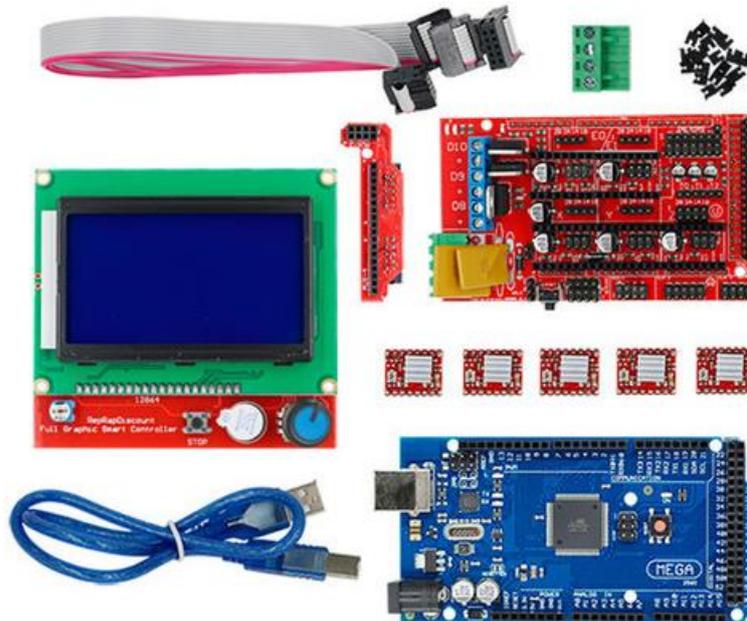
- Placa mãe;
- Placa controladora da extrusora;
- Placas para controle dos motores de passo;
- Sensores de fim de curso.

Além destes itens, costuma-se utilizar um *display* eletrônico, que serve de interface entre o usuário e a máquina, e *drivers* que permitem o uso de cartões de memória ou dispositivos semelhantes para o *upload* do código para a impressora.

Esses componentes costumam ser vendidos em kits especificamente preparados para aplicação em impressoras 3D de projeto próprio. Isso permite uma grande simplificação, já que os produtos vêm devidamente programados, além dos custos serem mais baixos.

A figura 10 apresenta um kit comercial de sistema de controle para aplicação em projetos próprios de impressora por extrusão.

Figura 10 - Kit de sistema de controle RepRap



Fonte: FilipeFlop (2019)

2.4 Oportunidades para aplicação industrial

Conforme consta Volpato et al (2018), empresas que trabalham com o desenvolvimento de produtos devem sempre buscar a redução do tempo de desenvolvimento e fabricação ao mesmo tempo que aumentam a qualidade dos seus

produtos. Nesse sentido, a tecnologia de prototipagem rápida é uma ferramenta indispensável, uma vez que desonera a fabricação de protótipos e até mesmo de produtos acabados.

No setor automotivo em particular, montadoras já fazem amplo uso dessa tecnologia. A montadora americana Local Motors fabricou o primeiro carro elétrico impresso em 3D no ano de 2014. As alemãs BMW e Audi utilizam a tecnologia de manufatura aditiva para construir protótipos e dispositivos de montagem ou manutenção. (SHAHRUBUNDIN, 2019).

A figura 11 mostra o sistema de manufatura aditiva utilizado pela Audi.

Figura 11- Sistema de manufatura aditiva SLM280



Fonte: Petch (2018)

No caso da montadora em questão, em particular no setor de Engenharia de Manutenção, a tecnologia de impressão 3D seria muito útil para a prototipagem de dispositivos e ferramentas a serem usados na linha de montagem. Além disso, as peças plásticas impressas em 3D poderiam ser usadas para a reposição de componentes metálicos em aplicações onde as solicitações sobre o item permitem essa substituição.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente capítulo apresenta a metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho. O objetivo é permitir que o processo de tomada de decisões que levaram ao desenvolvimento de um projeto viável possa ser reproduzido.

3.1 Reprojeto de produtos

Considerando que o escopo do trabalho não incluiu o desenvolvimento de uma tecnologia ou produto inédito, com a maior parte dos componentes sendo de origem comercial, a metodologia de reprojeto descrita por Dufour (1996) foi escolhida como base para o desenvolvimento do trabalho.

Conforme definem Hashim, Juster e Pennington (1993), o processo de reprojeto se trata do desenvolvimento de melhorias para um sistema físico com o objetivo de melhor adequá-lo às necessidades do cliente.

Dufour (1996) estrutura o reprojeto de um sistema industrial em 4 etapas principais, apresentadas no quadro 3.

Quadro 3 - Etapas da metodologia de reprojeto

Etapa	Atividades
1. Definição da tarefa	- Definição do projeto
2. Projeto conceitual	- Identificar problemas/oportunidades de melhoria; - Identificar restrições técnicas ou econômicas; - Identificar possíveis soluções;
3. Projeto preliminar	- Selecionar as melhores soluções através de metodologias adequadas
4. Projeto detalhado	- Determinar especificações, materiais, lista de peças e custo total

Fonte: Dufour (1996)

Além das atividades citadas na tabela 3, foram utilizadas ferramentas de outras metodologias de projeto, como a matriz de decisão. Essas ferramentas não contradizem a proposta da metodologia de reprojeto, mas a complementam, uma vez que permitiram uma execução mais assertiva das etapas propostas por Dufour.

4 DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo apresenta a execução de cada uma das etapas da metodologia de reprojeto citadas na Tabela 3. A realização de cada um desses passos permitiu o desenvolvimento do projeto proposto.

4.1 Definição do projeto

O projeto consistiu no desenvolvimento de uma impressora de 3D que atua pelo método *Fused Deposition Modelling* (FDM). A impressora projetada há de ser utilizada no departamento de projeto de dispositivos da montadora de caminhões.

O projeto foi baseado em tecnologias e componentes já existentes, de forma que a metodologia de reprojeto foi utilizada para garantir que o produto final fosse viável, de qualidade e atendesse às necessidades específicas da aplicação para o qual será desenvolvido.

4.2 Projeto conceitual

Esta seção se dedica a apresentar as oportunidades de melhorias identificadas, as restrições impostas e possíveis soluções de projeto.

4.2.1 Oportunidades de melhoria

Vários fatores foram identificados como favoráveis ao uso de um método de fabricação por manufatura aditiva. Entre os principais estão:

- Redução no custo das matérias-primas;
- Redução no custo da mão de obra;
- Redução no custo de manutenção do maquinário;
- Mais flexibilidade para fabricação de protótipos;
- Liberdade para criação de geometrias mais complexas.

Apesar da importância de cada um desses tópicos, um fator em particular foi identificado, pela gerência do departamento, como o principal motivo para a implementação desta tecnologia. Trata-se da oportunidade de familiarizar a equipe do setor com essa modalidade de fabricação, pavimentando o caminho para seu aprimoramento dentro da empresa e para o crescimento profissional dos envolvidos.

Dessa forma, a implantação da tecnologia de impressão 3D foi vista como uma necessidade para o departamento de Engenharia de Manutenção da montadora.

4.2.2 Restrições de projeto

Tendo em vista que a aplicação do projeto desenvolvido é no setor industrial, a limitação orçamentária foi um fator que logo se apresentou. Isso se aplica tanto ao custo de aquisição dos componentes, limitado a R\$ 25.000,00 pela gerência do departamento, quanto à sua eventual manutenção e/ou substituição.

Outro ponto importante considerado no projeto foi a simplicidade. Como se trata de um dos primeiros projetos de impressora 3D desenvolvidos internamente na empresa, era desejável que todas as etapas de montagem e operação fossem o mais simples possível.

Por fim, a capacidade do equipamento também teve de ser levada em conta no desenvolvimento. Isso se refere tanto à dimensão quanto à qualidade das peças produzidas.

No aspecto dimensional, era importante que a impressora fosse capaz de produzir peças de dimensões maiores que as alternativas existentes na montadora, onde a dimensão máxima que pode ser produzida no plano XY é de 250mm. Quanto à qualidade, esperava-se um sistema que produzisse peças com boa precisão dimensional, considerando o material usado e o método de impressão (FDM).

De posse de todas estas informações, as restrições foram sintetizadas nos pontos a seguir:

- Custo máximo de aquisição dos componentes de R\$ 25.000,00;
- Componentes facilmente operáveis e substituíveis;
- Capacidade de produzir peças com dimensão máxima de até 400mm (no plano XY);
- Sistema capaz de entregar precisão dimensional relativamente boa, considerando o material e a aplicação.

4.2.3 Levantamento das soluções possíveis

Conforme discutido anteriormente, o desenvolvimento de um projeto próprio de impressora 3D abre um extenso leque de escolhas para cada um dos seus

principais sistemas. Nesta seção serão apresentadas as principais opções consideradas na construção de um dispositivo do tipo.

Para a estrutura, as soluções mais populares incluem chapas de alumínio, madeira ou aço, além de alternativas tubulares de alumínio ou aço. Os perfis de alumínio, por exemplo, são um dos mais utilizados em projetos de desenvolvimento próprio.

Quanto a extrusora, que pode ser considerada o coração da impressora, os principais fatores que diferenciam os produtos entre si são o material e diâmetro do bocal, além do tipo de elemento aquecedor (que fornece calor para o derretimento do filamento) e do material do isolamento térmico.

A superfície de deposição, também chamada de mesa, é um componente cujo o material e o tamanho são os principais diferenciais entre os modelos. Os materiais mais comuns são madeira, alumínio e vidro. Há ainda a possibilidade do uso de uma placa aquecida, que diminui o gradiente de temperatura entre a mesa e o material derretido ali depositado.

Para o sistema de movimentação na vertical - ou eixo Z, como convencionase chamar nos sistemas cartesianos – a principal questão envolve qual conjunto de componentes fará o movimento: a mesa ou o cabeçote extrusor. Além disso, existem alguns sistemas de movimentação disponíveis, como o uso de barra roscada com porca ou de uma barra com pista helicoidal para um rolamento.

O sistema de movimentação no plano X-Y (o plano da superfície da mesa), pode ser montado de duas maneiras principais. A primeira e mais comum envolve o uso de polias e correias dentadas, enquanto a segunda utiliza carretéis e linhas de pesca trançadas.

Finalmente, quanto ao sistema eletrônico, é importante ressaltar que, conforme Hausman e Horne (2014), a grande maioria dos projetos próprios de impressora 3D utilizam as placas Arduino como central de controle.

Associado ao Arduino, utiliza-se um sistema conhecido como *shield*, que contém sensores e permite o controle dos motores, *display* e demais componentes eletrônicos. Enquanto o Arduino é a escolha natural como placa de controle, existe uma variedade de opções de *Shields*, como a RAMPS, RAMBo, Sanguinololu e RUMBA.

As principais diferenças entre cada tipo de *shield* se relacionam à forma como os *drivers* são instalados, os tipos de componentes que são suportados pelo equipamento e a quantidade em que podem ser instalados.

O quadro 4 sintetiza as informações que constam nesta seção de forma a apresentar as principais soluções disponíveis para cada sistema de forma mais condensada.

Quadro 4 - Principais opções para os sistemas da impressora

	Opção			
	A	B	C	D
Estrutura	Tubular de alumínio	Chapas de madeira	Chapas de alumínio	Tubular de aço
Extrusora	Bocal de latão, aquecimento por fio de nicromo e isolamento de aço inox	Bocal de alumínio, aquecimento por cartucho aquecedor e isolamento de teflon	Bocal de alumínio, aquecimento por cartucho aquecedor e isolamento de aço inox	Bocal de latão, aquecimento por resistência e isolamento de teflon
Mesa	Alumínio	Madeira	Vidro	-
Movimentação Z	Mesa móvel com barra roscada	Mesa móvel com barra de pista helicoidal	Cabeçote móvel com barra roscada	Cabeçote móvel com barra de pista helicoidal
Movimentação X-Y	Linhas de pesca e carretéis	Correias dentadas e polias	-	-
Sistema eletrônico	Sanguinololu	RAMBo	RAMPS	RUMBA

Fonte: Autoria própria (2021)

4.3 Projeto preliminar

Esta seção é dedicada à seleção da melhor solução, entre as apresentadas na tabela 4, para cada um dos sistemas citados no tópico anterior. A comparação entre as alternativas disponíveis foi feita através da Matriz de Avaliação Relativa, conceituada por Dufour (1996).

Essa metodologia utiliza uma das opções disponíveis como elemento de referência e, nos parâmetros escolhidos, compara as demais opções com essa referência. Por padrão, os itens de referência usados nas comparações a seguir serão sempre a opção A da tabela 4. Para indicar que uma opção é melhor, pior ou igual à

referência são usados sinais de negativo (-), positivo (+) e igualdade (=), respectivamente.

Em seguida, a quantidade de sinais negativos é subtraída da quantidade de sinais positivos (os sinais de igualdade têm peso zero). A opção escolhida será aquela que obtiver o maior resultado positivo após essa operação, incluindo a referência, cujo resultado final será zero por padrão.

4.3.1 Estrutura

Para a composição estrutural da impressora foram considerados três materiais diferentes: madeira (em chapas), alumínio (em chapas ou tubos) e aço (em tubos). Considerando a aplicação, destacam-se cinco critérios de escolha para o material da estrutura: custo, precisão dimensional, durabilidade, rigidez e massa total.

A matriz de avaliação relativa desse sistema está apresentada no quadro 5.

Quadro 5 - Matriz de avaliação relativa da estrutura

Critérios	Opções			
	A	B	C	D
Custo	Referência	+	+	-
Precisão dimensional		-	-	=
Durabilidade		-	=	=
Rigidez		-	-	+
Massa total		+	-	-
Somatório	0	-1	-2	-1

Fonte: Autoria Própria (2021)

Dessa forma, a opção com a maior pontuação positiva foi o elemento de referência A, e, portanto, uma estrutura tubular de alumínio foi a opção escolhida.

4.3.2 Extrusora

Para a extrusora, foram consideradas as seguintes configurações:

- Bocal de latão, aquecimento por resistência e isolamento de teflon;
- Bocal de latão, aquecimento por fio de nicromo e isolamento de aço inox;
- Bocal de alumínio, aquecimento por cartucho aquecedor e isolamento de aço inox;
- Bocal de alumínio, aquecimento por cartucho aquecedor e isolamento de teflon;

Conforme Hausman e Horne (2014), as principais características de uma extrusora são: material do bocal, sistema de aquecimento e material isolante.

Para o material do bocal, as características mais desejáveis são usinabilidade e condutividade térmica. Quanto ao sistema de aquecimento, custo e facilidade de reposição são os principais fatores. As mesmas características são desejáveis para o material isolante, adicionando-se ainda, naturalmente, a capacidade de isolar termicamente.

A comparação entre as opções disponíveis através da matriz de avaliação relativa está exposta no quadro 6.

Quadro 6 - Matriz de avaliação relativa da extrusora

Critérios	Opções			
	A	B	C	D
Material do bocal	Referência	-	-	=
Sistema de aquecimento		+	+	+
Material isolante		+	=	+
Somatório	0	1	0	2

Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa forma, a opção escolhida foi uma extrusora com bocal de latão, aquecimento por resistência e isolamento de teflon.

4.3.3 Mesa

Os principais critérios para a escolha do material da mesa são o custo, acabamento superficial, massa específica (quanto menor, melhor). Conforme a tabela 4, os materiais analisados foram alumínio, madeira e vidro. O quadro 7 apresenta a comparação entre eles.

Quadro 7 - Matriz de avaliação relativa da mesa

Critérios	Opções		
	A	B	C
Custo	Referência	+	+
Acabamento superficial		-	+
Massa específica		+	+
Somatório	0	2	3

Fonte: Autoria própria (2021)

Considerando estes resultados, o vidro foi o material escolhido para a fabricação da mesa. Quanto à capacidade de imprimir peças de até 400mm no plano X-Y, uma das restrições de projeto, é necessário apenas que a mesa, junto da estrutura e correias, tenha o dimensional adequado.

4.3.4 Movimentação em Z

Para a translação em Z, o elemento a ser movido pode ser tanto a mesa quanto o cabeçote que contém a extrusora. Além disso, o movimento é feito por meio de uma barra, que conta com uma rosca ou uma pista helicoidal.

Os critérios para escolha do sistema de movimentação no eixo Z são a precisão do movimento, custo e facilidade de reposição. O quadro 8 traz o comparativo entre as opções disponíveis.

Quadro 8 - Matriz de avaliação relativa do sistema de movimentação em Z

Critérios	Opções			
	A	B	C	D
Precisão	Referência	+	=	+
Custo		-	-	-
Facilidade de reposição		+	-	=
Somatório	0	1	-2	0

Fonte: Autoria própria (2021)

A análise da matriz de avaliação relativa mostra que a melhor alternativa é a aplicação de movimento na mesa, feito através de uma barra com pista helicoidal.

4.3.5 Movimentação em X-Y

Para a movimentação no plano X-Y, apenas duas opções principais existem, de acordo com Hausman e Horne (2014). Ambas as alternativas correspondem aos meios de transmissão de potência dos motores de passo, a primeira é o uso de linhas de pesca e carretéis enquanto a segunda envolve o uso de correias dentadas e polias.

Considerando a maior precisão e durabilidade do conjunto correia dentada e polia, conforme apontam Hausman e Horne (2014), essa alternativa foi selecionada.

4.3.6 Sistema eletrônico

Segundo Hausman e Horne (2014), embora existam muitos modelos disponíveis de conjuntos eletrônicos, todos eles atuam de maneira semelhante, além compartilharem as mesmas funções. Isso posto, os principais critérios para a escolha de um modelo específico são a facilidade de manutenção, disponibilidade no mercado e custo.

A facilidade de manutenção se refere ao nível de modularização da placa. Modelos onde os *drivers* estão soldados à estrutura da placa podem exigir a substituição da placa inteira quando um *driver* for danificado. Nesse sentido, a modularização é uma característica desejável.

A disponibilidade se refere à facilidade em repor o modelo de placa em questão. Isso envolve principalmente a oferta do produto em território nacional e a velocidade de entrega. O custo engloba, principalmente, o preço de aquisição de cada modelo.

Os modelos considerados para uso neste projeto foram alguns dos mais populares segundo Hausman e Horne (2014), a saber: RAMBo, Sanguinololu, RAMPS e RUMBA. A tabela 9 apresenta o comparativo entre eles.

Quadro 9 - Matriz de avaliação relativa do sistema eletrônico

Critérios	Opções			
	A	B	C	D
Facilidade de manutenção	Referência	-	+	=
Disponibilidade no mercado		-	+	+
Custo		-	+	+
Somatório	0	-3	3	2

Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa forma, a opção escolhida foi a C, uma placa do modelo RAMPS. Muito por conta das características que justificaram a sua escolha para esse projeto, a RAMPS é o modelo de sistema de controle eletrônico mais usado no mundo para impressoras de projeto próprio.

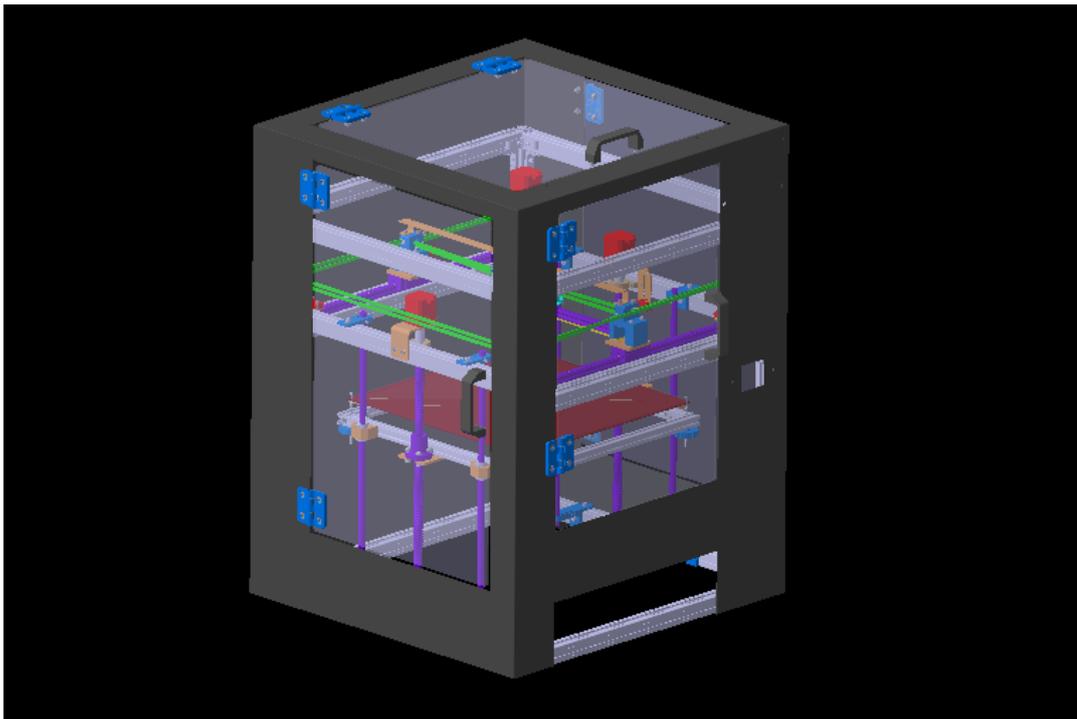
4.4 Projeto detalhado

Após a seleção de componentes ter sido concluída, foi feito o levantamento da lista de peças e do custo total para a fabricação da impressora, atividades que são exploradas nesta seção. Além disso, com o auxílio de um protótipo anterior de impressora 3D do departamento, foi feita a validação do projeto aqui desenvolvido.

4.4.1 Projeto 3D

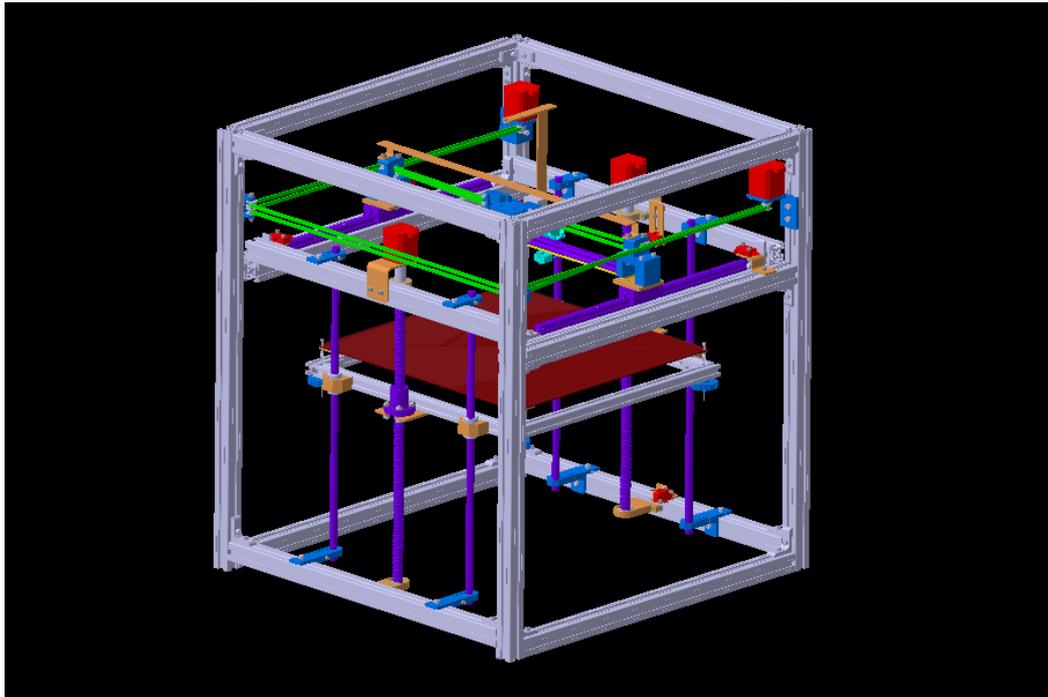
Feita a definição de todos os componentes a serem utilizados, foi possível preparar um modelo 3D do protótipo. Essa etapa foi feita com o auxílio do *software* CATIA e permite a visualização do produto acabado. As figuras 12 e 13 apresentam o modelo matemático do conjunto montado.

Figura 12 - Modelo do protótipo com carenagem



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 13 - Modelo do protótipo sem carenagem



Fonte: Autoria própria (2021)

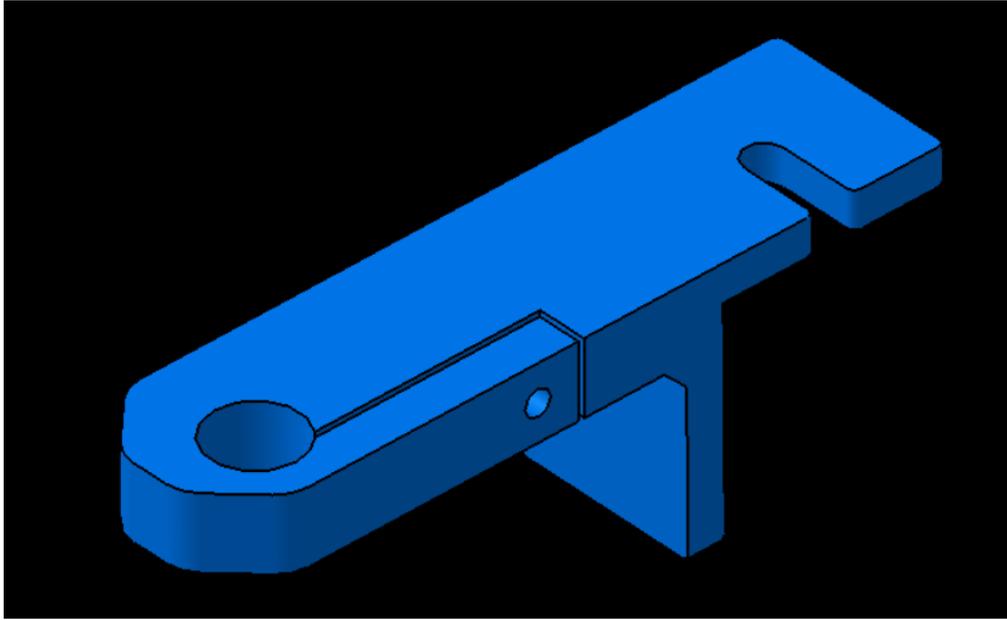
Além do modelo em CAD 3D do conjunto, também foram feitos dos desenhos de fabricação dos componentes não comerciais.

4.4.2 Validação

O projeto aqui desenvolvido teve como base um protótipo de impressora 3D montado pela equipe do departamento. Para validação da viabilidade do projeto, portanto, foi feito o comparativo entre a qualidade de impressão do protótipo e de uma impressora comercial do modelo *Flashforge Guider II*.

O produto impresso em questão é uma das guias de eixo usadas no protótipo. As características geométricas da peça permitem que sejam comparadas a precisão dimensional e o acabamento superficial. A figura 14 apresenta o modelo CAD 3D da peça em questão.

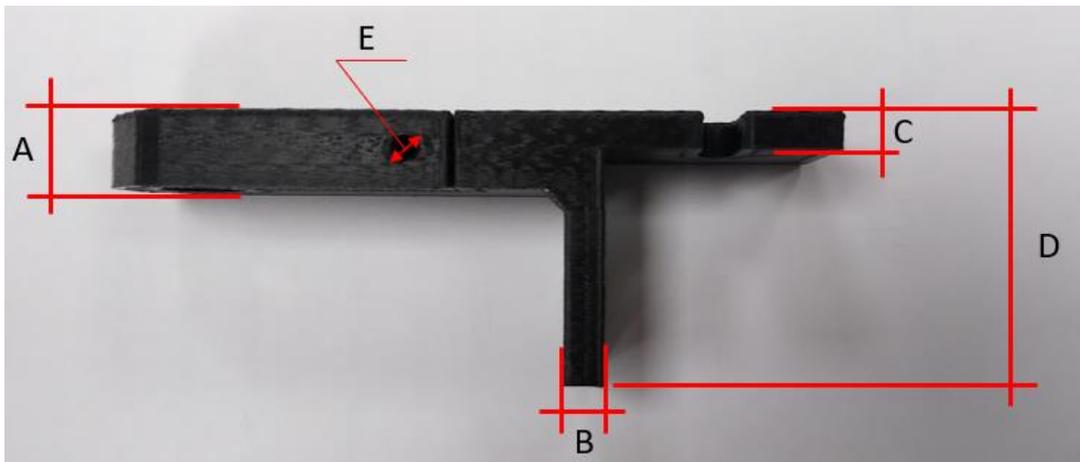
Figura 14 - Guia de eixo usada para validação



Fonte: Autoria própria (2021)

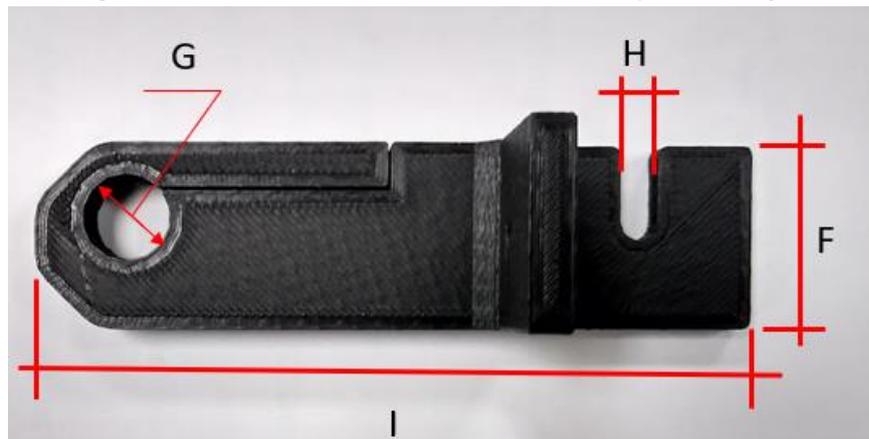
Para avaliação da precisão dimensional do projeto, foram tomadas 9 medidas da peça, sendo 7 dimensões lineares e dois diâmetros. As figuras 15 e 16 identificam essas medidas e as associam a parâmetros, que vão de A a J.

Figura 15 - Cotas para validação do projeto



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 16 - Demais cotas usadas para validação do projeto



Fonte: Autoria própria (2021)

Determinadas as dimensões a serem medidas nos dois exemplares da peça, foi usado um paquímetro eletrônico da marca Mitutoyo para aferir essas grandezas. Para comparar a média dos valores de cada variável, foi utilizado o teste t de Student.

A metodologia para o teste envolveu a tomada de 5 medidas para cada cota de ambos os exemplares da peça. A seguir, as médias e as variâncias de cada uma das cotas foram usadas para o cálculo de um valor de t. Compara-se então o valor calculado de t com um valor tabelado. Se o t calculado for maior, as médias diferem estatisticamente.

O comparativo entre as dimensões obtidas está disposto na tabela 1.

Tabela 1 - Valor dos parâmetros medidos em mm

Medida	CAD 3D	Média Comercial	Média Protótipo	T calculado	T tabelado
A	10,00	10,05	10,03	4,47	2,45
B	5,00	5,05	5,05	0,00	2,36
C	5,00	5,08	5,05	5,00	2,31
D	35,00	35,12	35,06	9,73	2,31
E	3,50	3,28	3,39	8,15	2,31
F	25,00	25,21	25,08	8,65	2,31
G	12,00	11,22	11,59	31,73	2,31
H	5,20	4,97	5,01	3,27	2,31
I	96,00	96,6	96,37	9,83	2,36

Fonte: Autoria própria (2021)

A comparação, feita a um nível de significância de 5%, aponta que as médias das medidas de cada cota são estatisticamente diferentes. Isso demonstra que o protótipo construído pelo departamento possui uma precisão dimensional consistentemente melhor que o modelo comercial.

Isso se deve, em grande parte, às guias lineares e aos fusos de esfera, cuja tolerância é uma ordem de grandeza mais apertada em relação às buchas de esferas, usadas na impressora comercial. Quanto ao acabamento superficial, verificou-se que a qualidade de ambos os exemplares foi satisfatória considerando a aplicação pretendida.

Outra consideração importante é a diferença entre os tempos de fabricação para cada um dos modelos de impressora. Como esse fator é fortemente dependente do diâmetro do orifício do bocal, e como o diâmetro de ambos os modelos é igual – 0,4 milímetros - não foram observadas diferenças significativas no tempo de produção dos dois exemplares.

Considerando que o projeto aqui desenvolvido tem a configuração desse protótipo como referência, é seguro dizer que se trata uma opção viável e capaz de atender as necessidades do departamento.

4.4.3 Lista de peças

Uma vez que os principais sistemas da impressora 3D foram definidos, iniciou-se o processo de escolha dos modelos e respectivos fornecedores de todos os componentes utilizados.

Esse processo exigiu algumas abordagens diferentes para os diversos tipos de peças a serem usadas no projeto. Por exemplo, as chapas metálicas devem ser entregues por fornecedores credenciados que colaboram com o departamento de Manutenção Industrial nos demais projetos; já componentes mais específicos, como a extrusora ou a placa aquecida, devem ser adquiridos por lojas online – via que uma pessoa usaria para um projeto pessoal de impressora.

Outros componentes, ainda, podem ser feitos de plástico. Considerando que na fabricante dispõe-se de modelos comerciais de impressora 3D prontas para uso, alguns desses componentes foram produzidos internamente.

4.4.4 Custo total

Foi preparada também uma tabela para controle de gastos do projeto. Considerando que uma das restrições impostas foi de um custo inferior a R\$25.000,00,

identificar e registrar o custo de aquisição ou fabricação de cada um dos componentes foi uma tarefa indispensável.

A tabela 2 apresenta o custo unitário dos componentes do projeto e, ao final apresenta o custo total.

Tabela 2 - Lista de peças e custos associados

#	Componente	Fornecedor	Especificação	Custo unitário	Qtd.	Custo Total
1	Kit estrutura	Forseti	Código: R3D01-02	R\$ 900,00	1	R\$ 900,00
2	Motor de passo	Kalatec	KTC-42HS48-1684-08AF	R\$ 89,00	5	R\$ 445,00
3	Fuso de esfera	Hiwin	R16-5-L0, 05-505mm	R\$ 358,55	2	R\$ 717,10
4	Eixo linear	Hiwin	EL12-H6 500	R\$ 135,00	4	R\$ 540,00
5	Guia linear trilho	Hiwin	HGR15-C com bloco HGH15CA	R\$ 1.099,73	3	R\$ 3.299,19
6	Porca fuso	Hiwin	R16-5T3 - FSI FORM B TYPE 1	R\$ 1.398,24	2	R\$ 2.796,48
7	Acoplamento eixo	Eletrogate	5x5	R\$ 16,90	2	R\$ 33,80
8	Rolamento linear	IKO	kb 12 uu 12x22x32	R\$ 49,21	4	R\$ 196,84
9	Rolamento	SKF	7200 BE	R\$ 84,87	4	R\$ 339,48
11	Polia	Forseti	GT2 30 dentes	R\$ 32,00	10	R\$ 320,00
12	Cantoneiras				2	
13	Peças impressas 3D				14	
16	Mancais	Ferramentaria	-	R\$ 8.700,00	2	R\$ 8.700,00
17	Suporte porca fuso				2	
18	Carenagem				1	
20	Mesa aquecida	JMP	420x420mm 127/220V	R\$ 380,00	1	R\$ 380,00
21	Tampa de vidro	Katana	3x410x420	R\$ 38,50	1	R\$ 38,50
22	Kit elétrico	-	Kit Impressora 3D RAMPS RepRap com Arduino	R\$ 240,00	1	R\$ 240,00
23	Chave fim de curso	-	NS0-050D	R\$ 12,00	6	R\$ 72,00
24	Fonte	-	PWS-2003 Marca: FOR-TREK	R\$ 70,00	1	R\$ 70,00
Total						R\$ 19.097,03

Fonte: Autoria própria (2021)

Considerando o custo total de pouco mais de R\$19.000,00, o projeto foi bem-sucedido em permanecer dentro do limite orçamentário estabelecido pela liderança do departamento.

Um comentário importante a respeito do custo final é de que ele pode ser substancialmente reduzido, caso haja interesse em desenvolver um projeto semelhante para uso pessoal. Considerando que os orçamentos foram feitos em nome da montadora, é normal que alguns preços estejam acima da média de mercado.

Outro ponto importante a ser considerado são os fornecedores escolhidos para alguns dos componentes. É recomendável que interessados no desenvolvimento de projetos pessoais pesquisem por alguns dos componentes mais caros, como as guias lineares, em *marketplaces* online, onde componentes semelhantes podem ser encontrados por valores muito menores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O surgimento de novas tecnologias geralmente representa, ao mesmo tempo, uma oportunidade e um desafio. Nesse sentido, se familiarizar com as mudanças é algo fundamental para o futuro de qualquer negócio que deseja manter sua relevância.

O desenvolvimento de um projeto próprio de impressora 3D representa parte do esforço da fabricante de caminhões em manter seus colaboradores atualizados sobre as tendências do mercado e sua cadeia produtiva a mais moderna e eficiente possível. Considerando estas pretensões, o projeto aqui apresentado foi um excelente primeiro passo.

Para o desenvolvimento do projeto, foram traçados 5 objetivos específicos, dos quais todos foram concluídos. A vasta – e cada vez mais crescente - literatura sobre o tema ofereceu um entendimento sólido sobre como funcionam as impressoras por modelagem de deposição fundida.

O contato com a liderança do departamento e com os responsáveis técnicos da área permitiu que as restrições de projeto e as principais características a serem alcançadas fossem definidos. Por fim, o auxílio da equipe de projetos permitiu que a montagem do projeto em CAD 3D e os desenhos de fabricação fossem feitos com sucesso.

Por fim, a comparação com a impressora já disponível no departamento permitiu validar a qualidade e viabilidade do presente projeto. A partir destes fatos conclui-se, então, que o objetivo geral de desenvolver um protótipo de impressora 3D para o departamento de Manutenção Industrial foi um sucesso.

Como sugestões para o amadurecimento do uso dessa tecnologia no setor, recomenda-se estudos mais aprofundados, como este, visando projetos de impressora que utilizem outros métodos de adição. Alguns exemplos pertinentes incluem as tecnologias de jateamento de material e deposição com energia direcionada.

REFERÊNCIAS

- 3D LAB. **Conjunto do extrusor: tudo o que você precisa saber!** 2020. Disponível em: <https://www.3dlab.com.br/conjunto-do-extrusor/>. Acesso em: 17 de out. 2021.
- ANDREWS, Alex. **Scrum Of One: How to Bring Scrum into your One-Person Operation.** 2017. Disponível em: <https://www.raywenderlich.com/585-scrum-of-one-how-to-bring-scrum-into-your-one-person-operation>. Acesso em: 22 de out. 2021.
- ASHTON, T. S. **The Industrial Revolution 1760-1830.** Oxford: Oxford University Press, 1997.
- ASTM INTERNATIONAL. **ISO/ASTM52900-15**, Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. ASTM, 2015.
- BESKO, Marcos. BILYK, Cláudio. SIEVEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gest. Tecnol. Inov.** Vol.01 n.3, 10 p. 2017.
- DUFOUR, Carlos Alvarado. **Estudo do processo e das ferramentas de reprojeto de produtos industriais, como vantagem competitiva e estratégia de melhoria constante.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.
- HAUSMAN, Kalani Kirk. HORNE, Richard. **3D Printing.** New Jersey: For Dummies, 2014.
- KUN, krisztian. Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology. **Procedia Engineering**, Volume 149. 9 p. 2016.
- FILIFELOP. **Kit Impressora 3D RAMPS RepRap com Arduino.** 2019. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/kit-impressora-3d-ramps-reprap-com-arduino/>. Acesso em: 17 de out. 2021.
- MOHD, Hashim F. JUSTER, N. P. PENNINGTON, A. Generating Design Variants Based on Functional Reasoning. *In: International Conference on Engineering design. ICED '93.* The Hague, 1993.
- PETCH, Michael. **Audi gives update on use of SLM metal 3D printing for the automotive industry, 2018.** Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/audi-gives-update-use-slm-metal-3d-printing-automotive-industry-129376/>. Acesso em: 20 de out. 2021.
- POLAK, Roman. KAREL, Raz. SEDLACEK, Frantisek. Determination of FDM Printer Settings with Regard to Geometrical Accuracy. *In: 28TH INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM.* Zadar, 2017. 7 p.
- RAULINO, Bruno Ribeiro. **Manufatura aditiva: Desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (Modelagem por fusão e**

deposição). Dissertação (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica), Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SAXENA, Abhishek. A Comprehensive Study on 3D Printing Technology. **MIT International Journal of Mechanical Engineering**, Vol. 6, No. 2, pp. 63-69. 2016.

SHAHRUBUDIN, N. LEE, T.C. RAMLAN, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. **Procedia Manufacturing**, Volume 35, 11 p. 2019.

SMITH, Joshua. **How It Is Made: 3D Printing Filament**. 2015. Disponível em: https://www.allthat3d.com/3d-printer-filament/#What_is_a_3D_Printer_Filament. Acesso em: 12 de out. 2021.

VOLPATO, Neri.; *et al.* **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Bulcher, 2018.

WELLER, Christian. KLEER, Robin. PILLER, Frank. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. **International Journal of Production Economics**, Volume 164, 14 p. 2015.