



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PATRICK ALAN DE MENEZES ANDRADE

**EFEITO DAS DIMENSÕES NA PRECISÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS
FABRICADAS POR IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO PLA**

RUSSAS
2023

PATRICK ALAN DE MENEZES ANDRADE

EFEITO DAS DIMENSÕES NA PRECISÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS FABRICADAS
POR IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO PLA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A569e Andrade, Patrick Alan de Menezes.
Efeito das dimensões na precisão dimensional de peças fabricadas por impressão 3d utilizando PLA
/ Patrick Alan de Menezes Andrade. – 2023.
81 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de
Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

1. Manufatura aditiva. 2. Metrologia. 3. Precisão dimensional. 4. Impressão 3D. 5. Erro. I. Título.

CDD 620.1

PATRICK ALAN DE MENEZES ANDRADE

EFEITO DAS DIMENSÕES NA PRECISÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS FABRICADAS
POR IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO PLA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 29/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pois nele encontrei refúgio e força para enfrentar todas as dificuldades encontradas durante a vida acadêmica, principalmente nessa fase final da graduação.

Agradeço também aos meus pais, Paula e Artemio, por todo amor e amparo, além de me incentivarem durante toda minha vida acadêmica.

A minha noiva, Thaina, por estar sempre comigo, por me apoiar incondicionalmente durante toda a graduação e por sonhar junto comigo.

A toda minha família, irmãos, avós, que me auxiliaram nessa etapa.

Agradeço a todos meus professores, que auxiliaram em minha formação, em especial ao meu orientador, Dr. Pedro Helton pela orientação, paciência e disponibilidade.

A todos amigos, que de durante toda graduação proporcionaram momentos de estudo e descontração que vou levar pro resto da vida.

Por fim, gostaria de agradecer a UFC como um todo, aos que fazem parte dela, por proporcionar essa experiência durante todo esse período, com total estrutura e amparo.

RESUMO

A Manufatura Aditiva (MA) funciona com a premissa de adicionar camadas de material até chegar no produto final, enquanto os processos tradicionais de fabricação trabalham removendo o material de uma peça bruta, modelando o objeto até chegar no resultado desejado. Com ela, é possível otimizar o processo, eliminando perdas e diminuindo de forma significativa o tempo necessário para a fabricação. A Modelagem por Fusão e Deposição de Materiais (FDM), um dos métodos usados na impressão 3D, é a técnica de MA mais utilizada apresentando um alto potencial de crescimento. Um dos desafios enfrentados em qualquer processo de fabricação, bem como na manufatura aditiva, está relacionado à confiabilidade metrológica do produto fabricado, uma vez que a precisão dimensional da peça impressa é de suma importância diante de um mercado altamente competitivo e globalizado. Diante disso, o objetivo desse trabalho é analisar a precisão dimensional de peças fabricadas por impressão 3D, verificando o efeito das dimensões no erro produzido na fabricação, a fim de obter resultados que contribuam na escolha das correções a serem aplicadas ao realizar a impressão. Após realizar a seleção da geometria, a modelagem e a impressão dos corpos de prova, foram efetuadas medições em pontos pré-determinados dos CPs de todos os tamanhos escolhidos. Com isso, foi possível analisar, com o auxílio da Análise de Variância (ANOVA), a influência do tamanho da peça na precisão dimensional do processo. Através dos resultados obtidos, pôde-se concluir que o tamanho da peça impressa influencia diretamente na precisão dimensional do produto final, dado que quanto maior o CP, maior foi o erro obtido. Além disso, foi traçada a curva de erro para o processo, podendo-se observar o ponto de erro máximo, além do ponto de maior dispersão (erro aleatório).

Palavras-chave: manufatura aditiva; metrologia; precisão dimensional; impressão 3D; erro.

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) works on the premise of adding layers of material until reaching the final product, while traditional manufacturing processes work by removing material from a raw part, modeling the object until reaching the desired result. With it, it is possible to optimize the process, eliminating losses and significantly reducing the time required for manufacturing. Fusion and Deposition Modeling (FDM), one of the methods used in 3D printing, is the most used AM technique with high growth potential. One of the challenges faced in any manufacturing process, as well as in additive manufacturing, is related to the metrological reliability of the manufactured product, since the dimensional accuracy of the printed part is of paramount importance in a highly competitive and globalized market. Therefore, the objective of this work is to analyze the dimensional accuracy of parts manufactured by 3D printing, verifying the influence of dimensions on the error produced in manufacturing, in order to obtain results that contribute to the choice of corrections to be applied when printing. After selecting the geometry, modeling and printing the specimens, measurements were taken at pre-determined points of the PCs of all chosen sizes. Therefore, it was possible to analyze, with the help of Analysis of Variance (ANOVA), the influence of part size on the dimensional accuracy of the process. Through the results obtained, it was possible to conclude that the size of the printed part directly influences the dimensional accuracy of the final product, given that the higher the CP, the greater the error obtained. Furthermore, the error curve for the process was drawn, allowing the maximum error point to be observed, in addition to the point of greatest dispersion (random error).

Keywords: additive manufacturing; metrology; dimensional accuracy; 3D printing; error.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Controle metrológico com relógio comparador.....	20
Figura 2 - Resultado dos disparos dos canhões A, B, C e D	21
Figura 3 - Distribuição <i>t de Student</i>	26
Figura 4 - Curva de erros padrão	27
Figura 5 - Medidor de pressão arterial	28
Figura 6 - Controle de qualidade utilizando um paquímetro.....	29
Figura 7 - Nomenclaturas da Manufatura Aditiva	31
Figura 8 - Etapas da impressão 3D.....	32
Figura 9 - Modelo esquemático de uma impressora 3D.....	33
Figura 10 - Laminação na superfície do objeto impresso.....	34
Figura 11 - Impressora 3D Cartesiana	35
Figura 12 - Impressora 3D CoreXY	36
Figura 13 - Desenho esquemático de uma impressora 3D Delta.....	37
Figura 14 - Materiais usados na impressão 3D.....	38
Figura 15 - Propriedades e desempenhos do PLA e do ABS.....	40
Figura 16 - Efeito da altura de camada no acabamento superficial.....	42
Figura 17 - Densidade de preenchimento	43
Figura 18 - Tipos de preenchimento disponíveis no Ultimaker Cura.....	43
Figura 19 - Efeito da velocidade de impressão no acabamento superficial.....	44
Figura 20 - Desenho esquemático da largura de extrusão	47
Figura 21 - Comparativo entre manufatura subtrativa e aditiva.....	48
Figura 22 - Peças fabricadas por manufatura aditiva	50
Figura 23 - Efeito degraus de escada produzido pela adição de camadas.....	51
Figura 24 - Distribuição de onde está sendo usada a manufatura aditiva	52
Figura 25 - Mancal de alternador veicular fabricado por impressora 3D.....	53
Figura 26 - Setores que utilizam a manufatura aditiva.....	54
Figura 27 - Coletor de admissão impresso em 3D para a equipe belga Heli Racing	55
Figura 28 - Corpos de prova impressos no estudo feito por Yaman em 2018.....	56
Figura 29 - Estudo feito por Mohamed em 2017	56
Figura 30 - Fluxograma metodológico	57
Figura 31 - Geometria do corpo de prova.....	58
Figura 32 - Filamento de PLA.....	59

Figura 33 - Impressora GTMax3D H5	60
Figura 34 - Paquímetro digital.....	60
Figura 35 - Termo-higrômetro	61
Figura 36 - Referenciando a face frontal	62
Figura 37 - Interface do software Ultimaker Cura	64
Figura 38 - Impressora com a tampa superior e porta abertas.....	64
Figura 39 - Primeira camada da peça de 160mm	65
Figura 40 - Impressão da peça de 40mm.....	65
Figura 41 - Detalhe da superfície do corpo de prova pronto	66
Figura 42 - Lados que foram medidos.....	67
Figura 43 - Tabela com registros das medições dos CPs de 10mm.....	67
Figura 44 - ANOVA dos erros com relação aos eixos X e Y de impressão.....	69
Figura 45 - ANOVA dos erros médios das medidas externas dos CPs.....	70
Figura 46 - ANOVA dos erros percentuais das medidas externas	71
Figura 47 - ANOVA dos erros médios das medidas internas dos CPs	72
Figura 48 - Curva de Erros	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura de extrusão recomendada para PLA, ABS e PETG.....	46
Tabela 2 - Temperatura da mesa de impressão recomendada para PLA, ABS e PETG	46
Tabela 3 - Parâmetros de impressão	63
Tabela 4 – Tendência (Td), Incerteza padrão (u) e Repetitividade (Re) para cada CP.....	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Efeito da altura de camada sob o tempo de impressão	41
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MA	Manufatura Aditiva
CP	Corpo de prova
UFC	Universidade Federal do Ceará
3D	Tridimensional
FDM	Fused Deposition Modeling
PIB	Produto Interno Bruto
PLA	Ácido Poli Lático
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
SI	Sistema Internacional de unidades
CNC	Comando Numérico Computadorizado
mm	Milímetros
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
ANOVA	Análise de Variância
CAD	Computer-Aided Design
s	Segundos

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Coeficiente de Student
%	Porcentagem
®	Marca Registrada
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos.....	18
<i>1.1.1 Objetivo Geral</i>	<i>18</i>
<i>1.1.2 Objetivos Específicos</i>	<i>18</i>
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Fundamentos de Metrologia	19
<i>2.1.1 Histórico</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2 Erros de medição</i>	<i>21</i>
<i>2.1.3 Precisão x Exatidão</i>	<i>22</i>
<i>2.1.4 Erro Sistemático</i>	<i>23</i>
<i>2.1.4.1 Tendência e Correção</i>	<i>23</i>
<i>2.1.5 Erro Aleatório</i>	<i>24</i>
<i>2.1.5.1 Incerteza-padrão e Repetitividade</i>	<i>24</i>
<i>2.1.6 Curva de erros.....</i>	<i>27</i>
<i>2.1.7 Aplicações da Metrologia</i>	<i>28</i>
2.2 Manufatura Aditiva.....	29
<i>2.2.1 Histórico e Nomenclatura</i>	<i>29</i>
<i>2.2.2 Tipos de M.A.</i>	<i>31</i>
<i>2.2.2.1 FDM – Fused Deposition Modeling.....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.3 Tipos de impressoras FDM.....</i>	<i>34</i>
<i>2.2.3.1 Cartesiana</i>	<i>34</i>
<i>2.2.3.2 CoreXY.....</i>	<i>36</i>
<i>2.2.2.3 Delta</i>	<i>36</i>
<i>2.2.4 Materiais para impressão 3D</i>	<i>37</i>
<i>2.2.4.1 PLA – Ácido Poli Lático</i>	<i>38</i>

2.2.4.2 ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno.....	39
2.2.4.3 PETG – Polietileno Tereftalato Glicol	39
2.2.5 Principais Parâmetros de impressão.....	41
2.2.5.1 Altura de Camada.....	41
2.2.5.2 Densidade e Tipos de Preenchimento.....	42
2.2.5.3 Velocidade de impressão.....	44
2.2.5.4 Temperatura do bico de extrusão	45
2.2.5.5 Temperatura da mesa de impressão	46
2.2.5.6 Largura de extrusão	46
2.2.6 Manufatura aditiva x Manufatura subtrativa	47
2.2.6.1 Vantagens e Limitações	49
2.2.7 Principais Aplicações.....	52
2.2.8 Precisão dimensional na Manufatura Aditiva.....	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1 Geometria.....	58
3.2 Materiais e equipamentos	58
3.2.1 Filamento de impressão 3D.....	59
3.2.2 Impressora 3D.....	59
3.2.3 Instrumento de medição	60
3.2.3 Termo-higrômetro	61
3.2.4 Marcador permanente	61
3.3 Parâmetros de impressão	62
3.4 Impressão dos corpos de prova	63
3.5 Análise qualitativa dos CPs impressos.....	66
3.6 Medições dos corpos de prova	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.2 Análise do erro nos eixos X e Y.....	69

4.3 Análise do erro nas medidas externas dos CPs	69
4.3.1 Erro médio das medidas externas	70
4.3.2 Erro percentual das medidas externas.....	71
4.4 Análise do erro nas medidas internas dos CPs.....	72
4.5 Curva de Erros.....	73
4.6 Possíveis causas de erro dimensional.....	75
5 CONCLUSÃO.....	76
6 SUJESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A metrologia abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza em qualquer campo da ciência ou da tecnologia. Para a engenharia, o crescimento e a inovação tecnológica, a metrologia científica e industrial é uma importante ferramenta, pois promove a competitividade e cria um ambiente favorável ao desenvolvimento científico e industrial em todo e qualquer país (Ferreira, 2018).

As empresas e organizações que pretendem participar do mercado globalizado precisam enfrentar muitos desafios, entre eles podemos citar: preços competitivos, qualidade dos produtos, agilidade, flexibilidade e capacidade de inovação. Para que estas dimensões sejam atendidas é necessário investir em qualidade, normalização e estabelecer uma base metrológica que transforme amostras, calibrações, e ensaios em informações confiáveis para o processo de tomada de decisão. A utilização da metrologia é uma forma de melhorar a qualidade dos processos produtivos, o que deve ser perseguido continuamente por todas as empresas que pretendem participar de um mercado altamente competitivo e globalizado (Campos; Silva, 2001).

A impressão 3D vem revolucionando a maneira com que obtemos peças, permitindo criar objetos únicos, eliminar perdas, otimizar processos e gerar uma série de benefícios para diversas aplicações. As impressoras 3D estão cada vez mais presentes no dia a dia das pessoas e nas empresas, inclusive criando profissões e carreiras até então não exploradas (Portela, 2022).

Segundo Costa (2022), de maneira geral, a grande diferença, quando comparada a processos tradicionais de fabricação, é que a manufatura aditiva funciona com a premissa de adicionar camadas de material até chegar no produto final, enquanto a subtrativa trabalha removendo o material de uma peça bruta, modelando o objeto até chegar no resultado desejado. A diferença também é perceptível no que diz respeito ao tempo para fabricação dos materiais. Na manufatura aditiva, é utilizado apenas um equipamento para a impressão, enquanto que para a subtrativa podem ser necessários diversos equipamentos e ferramentas diferentes.

Diante disso, com o desenvolvimento cada vez maior da manufatura aditiva tanto no âmbito industrial como para outras diversas aplicações, como por exemplo na medicina, é de suma importância o estudo desse processo, devido a busca inerente por peças e produtos com tolerâncias dimensionais cada vez mais estreitas, aliadas a boas propriedades mecânicas.

Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo analisar a precisão dimensional de peças fabricadas por impressão 3D, verificando a influência das dimensões da peça na confiabilidade metrológica.

1.1 Objetivos

Os objetivos serão divididos em objetivo geral e objetivos específicos para um melhor entendimento do trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo da precisão dimensional de peças fabricadas por impressão 3D, utilizando como material o PLA (Ácido Poli Lático), verificando o efeito das dimensões da peça no erro produzido na fabricação, afim de obter resultados que contribuam na escolha da correção aplicada ao realizar a impressão.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos necessários para o cumprimento das etapas até a formulação final do objetivo geral do trabalho são:

- Produzir corpos de prova padrões com diferentes dimensões pré-estabelecidas;
- Realizar medições nos CPs com um instrumento de medição calibrado;
- Analisar a influência do sentido de impressão na precisão dimensional da peça fabricada;
- Verificar o erro para as medidas externas dos CPs;
- Verificar o erro para as medidas internas dos CPs;
- Analisar a influência das dimensões das peças no erro produzido na fabricação;
- Traçar as curvas de erro para diferentes dimensões de corpos de prova;
- Catalogar correções a serem aplicadas para eliminar o erro médio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundamentos de Metrologia

A palavra metrologia originou-se do termo grego “metron”, que significa medida, e do termo “logos”, que remete à ciência. Assim, entende-se a metrologia como a ciência das medições (Lira, 2015). Por definição é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza em qualquer campo da ciência ou tecnologia.

2.1.1 Histórico

A necessidade de medir as coisas é muito antiga e remete à origem das primeiras civilizações. Tudo começou quando na antiguidade percebeu-se a necessidade da criação de unidades de medida que permitissem as trocas e o comércio de mercadorias (Mede, 2018).

Para as atividades individuais, quantificar algo a partir de medidas corpóreas poderia até ser suficiente. Contudo, pensando em um contexto global, envolvendo relações comerciais entre diferentes povos, não havia um padrão de unidade que atendesse às novas demandas advindas do estreitamento dos vínculos entre diferentes regiões, tampouco que acompanhasse o desenvolvimento tecnológico. Assim, a necessidade de se criar um sistema unificado de unidades foi se intensificando e muitas tentativas, por partes de ilustres cientistas, como Gauss, Maxwell e Thomson, foram se desenvolvendo. Foi nesse contexto que se criou o Sistema Internacional de Unidades (do francês, *Système international d'unités*, SI) (Akkari, 2017).

Percebe-se, então, que a capacidade do homem para quantificar e entender o mundo ao seu redor se desenvolveu em uma linguagem, que é a base da ciência e da tecnologia modernas, otimizando as relações de comércio, bem como os processos de produção e manufaturas intercambiáveis, além de garantir maior coerência das medições ao longo dos anos. Lord Kelvin afirmou, em 1883, que: “O conhecimento amplo e satisfatório sobre um processo ou um fenômeno somente existirá quando for possível medi-lo e expressá-lo por meio de números”. A partir dessa afirmação, fica claro que as palavras e impressões não são suficientes para descrever de forma clara um fenômeno ou processo. É necessário expressá-lo de modo quantitativo, é necessário medi-lo. Medir é uma forma objetiva de descrever o mundo.

A grandeza que está sendo medida recebe o nome de mensurando, que é o objeto da medição. Já a operação de medição é realizada por um dispositivo denominado instrumento de medição ou sistema de medição e, o resultado mostrado pelo sistema de medição é chamado de indicação (Albertazzi; Sousa, 2008).

A metrologia tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medições. Como as medições estão presentes, direta ou indiretamente, em praticamente todos os processos de tomada de decisão, a abrangência da metrologia é imensa, envolvendo a indústria, o comércio, a saúde, a defesa, a segurança e o meio ambiente, para citar apenas algumas áreas. Estima-se que de 4 a 6% do produto interno bruto (PIB) nacional dos países industrializados sejam dedicados aos processos de medição (National and International Needs in Metrology, BIPM), junho de 1998 (CONMETRO, 2017).

Figura 1 - Controle metrológico com relógio comparador



Fonte: Canevo (2022)

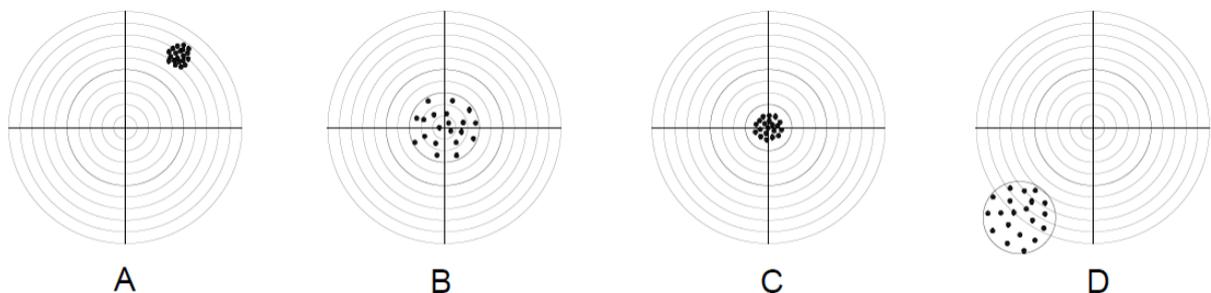
2.1.2 Erros de medição

Segundo Albertazzi (2008), é impossível medir sem cometer erros de medição. Para realizar uma medição sem erros, seriam necessários um sistema de medição perfeito, um ambiente controlado e perfeitamente estável, um operador perfeito e que a grandeza sob medição (mensurando) tivesse um valor único, perfeitamente definido e estável. Na prática, nenhuma dessas quatro condições costuma acontecer isoladamente, muito menos simultaneamente. Logo, em menor ou maior grau, um erro de medição sempre estará presente.

Para entender como é caracterizado um erro de medição vamos considerar o seguinte experimento:

Com a intenção de avaliar a qualidade de 4 canhões foi estabelecido que cada canhão mirasse no centro de um alvo e disparasse 20 projéteis, todos com a mesma mira e à mesma distância do alvo preestabelecida. Na Figura 2 são mostrados os resultados para os tiros dos canhões A, B, C e D.

Figura 2 - Resultado dos disparos dos canhões A, B, C e D



Fonte: Albertazzi (2008, com adaptações)

Todos os projéteis do canhão A atingiram o alvo em uma região sempre acima e à direita do centro do alvo. Os erros foram relativamente grandes e tiveram valores muito próximos. Logo, não seria difícil prever a posição aproximada que o 21º projétil atingiria o alvo: certamente um pouco acima e à direita do centro. Essa parcela previsível do erro é chamada de Erro sistemático, que corresponde ao erro médio.

O canhão B apresenta um comportamento diferente do A, apresentando um grande espalhamento em todas as direções, porém, a média das posições das marcas dos projéteis está muito próxima do centro do alvo. Seria muito difícil prever em que posição o 21º disparo atingiria o alvo. Poderia ser acima, abaixo, à esquerda, à direita ou em qualquer diagonal. Os erros do canhão B são denominados Erros aleatórios, que correspondem à parcela imprevisível

do erro. É o agente que faz com que repetições levem a resultados diferentes.

Já o canhão C apresentou um desempenho espetacular, onde todos os disparos atingiram a região central do alvo e com pequeno espalhamento. Logo, o erro médio ou sistemático é praticamente nulo e o erro aleatório é relativamente pequeno. Por sua vez, os projéteis do canhão D se espalharam por uma grande área abaixo e à esquerda do centro do alvo, onde o erro sistemático está associado à distância entre o centro da região de dispersão dos disparos e o centro do alvo. Quanto maior a dispersão dos disparos, maior a intensidade do erro aleatório.

Diante disso, temos que o erro de medição é formado pelas componentes sistemática e aleatória, representado pela seguinte equação 1.

$$E = EE + EE \quad (1)$$

sendo:

E Erro de medição

EE Erro sistemático

Ea Erro aleatório

2.1.3 Precisão x Exatidão

Para Silva (2011), a precisão de uma série de medições é uma medida da concordância entre determinações repetidas. A precisão é usualmente quantificada como o desvio padrão de uma série de medidas. A exatidão de uma medida (ou da média de um conjunto de medidas) é a distância estimada entre a medida e um valor “verdadeiro”, “nominal”, “tomado como referência”, ou “aceito”. Geralmente é expressa como um desvio ou desvio percentual de um valor conhecido. A precisão geralmente é associada com erros aleatórios do processo de medição, enquanto a exatidão está associada a fontes sistemáticas.

No experimento dos canhões citado anteriormente, têm-se que o canhão C é um sistema com excelente exatidão, que é a capacidade de um sistema funcionar sem erros, tendo sempre um ótimo desempenho. Um sistema que sempre acerta é um sistema com ótima exatidão. A exatidão é uma característica qualitativa que não pode ser associada a um número.

Além de um sistema exato, o canhão C também é um sistema preciso, o que está relacionado com a pouca dispersão de seus resultados, ou seja, a capacidade de obter o mesmo

resultado quando repetições são efetuadas. O canhão A, por exemplo, mesmo que nenhum disparo tenha atingido o centro do alvo (sem exatidão), trata-se de um sistema de ótima precisão, uma vez que seu espalhamento é pequeno. Sendo assim, dizer que um sistema é preciso não significa que sempre acerta, mas apenas que se comporta sempre da mesma forma nas mesmas condições.

2.1.4 Erro Sistemático

O erro de medição está presente cada vez que a indicação do sistema de medição não coincide com o valor verdadeiro do mensurando, sendo a diferença entre o valor indicado pelo sistema e o valor verdadeiro do mensurando.

Segundo Lira (2015), a componente sistemática é a parcela previsível do erro de medição e tende a se manter constante se as condições em que as medições são feitas também forem mantidas as mesmas.

2.1.4.1 Tendência e Correção

De acordo com Albertazzi (2008), é possível estimar o erro sistemático de um sistema de medição fazendo medições repetitivas de um mensurando cujo valor verdadeiro é bem conhecido (um bloco padrão, por exemplo). Como, na prática, não se conhece o valor exato do mensurando, denomina-se um valor aproximado do verdadeiro, o qual é chamado de valor verdadeiro convencional (VVC), que deve ser próximo o suficiente do valor verdadeiro de acordo com a finalidade em que vai ser usado. Quanto maior o número de medições repetitivas, melhor será a estimativa do erro sistemático. Essa estimativa é denominada Tendência, que é calculada pela equação 2.

$$TT = I - VVC \quad (2)$$

sendo:

Td Tendência

I Média de um número finito de indicações

VVC Valor verdadeiro convencional do mensurando

Diante disso, a tendência é calculada por meio da diferença entre a média de um número finito de indicações e o valor verdadeiro convencional do mensurando, sendo assim uma estimativa para o erro sistemático. A partir disso, é possível definir a Correção, que é a constante que deve ser adicionada à indicação para corrigir os erros sistemáticos do sistema de medição. A correção é calculada pela equação 3.

$$V = -TT = VVV - I \quad (3)$$

Ao somar a correção (C) com a indicação do sistema de medição, temos a Indicação corrigida, ou seja, com a compensação dos erros sistemáticos.

2.1.5 Erro Aleatório

O erro de medição também possui a componente aleatória, isto é, um erro que não pode ser previsto (ocorre de modo aleatório) e, tampouco, corrigido. Logo, entende-se o erro aleatório como aquele que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível e um exemplo característico dessa componente refere-se ao erro do operador. Resultado da medição subtraído da média que resultaria de um número infinito de medições do mesmo mensurando, efetuadas em condições de repetibilidade. Como só pode ser efetuado um número finito de medições, só é possível determinar uma estimativa do erro aleatório (INMETRO, 2012).

2.1.5.1 Incerteza-padrão e Repetitividade

Para caracterizar quantitativamente a intensidade da componente aleatória do erro de medição calculamos a Incerteza-padrão (equação 4), que corresponde ao valor do desvio-padrão do erro aleatório de medição. Deve ser associado a incerteza-padrão o número de graus de liberdade (equação 5) com que foi estimada. Quando estimamos ela através do desvio-padrão da amostra, temos que o grau de liberdade é igual ao número de medições efetuadas menos um (Albertazzi; Sousa, 2008).

A incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2011).

$$u = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - I)^2}}{n-1} \quad (4)$$

$$v = n - 1 \quad (5)$$

sendo:

- u Incerteza-padrão obtida a partir da amostra
- I_i i-ésima indicação
- I Média das indicações
- n Número de medições repetitivas efetuadas
- v Número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão

O valor do erro aleatório por si tem pouco interesse prático. O que realmente interessa é a faixa de valores dentro da qual o erro aleatório de um sistema de medição é esperado, que é chamada de repetitividade, a qual é uma informação extremamente útil para estimar a faixa de incertezas associadas ao resultado de medição (Albertazzi; Sousa, 2008)

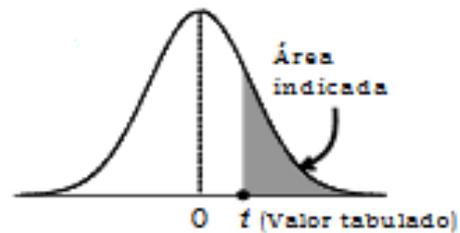
Para Neto (2015), a repetitividade de um instrumento de medição é uma faixa simétrica de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatística definida, se situa o erro aleatório.

A ideia é que quanto mais dados forem usados para estimar a incerteza-padrão, melhor será a confiabilidade da estimativa realizada. Porém, poucos dados levam a uma estimativa pobre e incerta. Para compensar essa incerteza a repetitividade deve ser calculada multiplicando-se a estimativa da incerteza-padrão por uma espécie de “coeficiente” devidamente calculado. Esse número é o fator *t de Student*, cujo os valores estão representados na Figura 3. Logo, a repetitividade pode ser calculada pela equação 6.

$$RR = \pm t * u \quad (6)$$

sendo:

- Re Repetitividade
- t Coeficiente *t de Student* para 95,45% de probabilidade e n-1 graus de liberdade
- u Incerteza-padrão obtida a partir da amostra com n-1 graus de liberdade

Figura 3 - Distribuição *t* de Student

<i>gl</i>	Área na cauda superior								
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
z	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

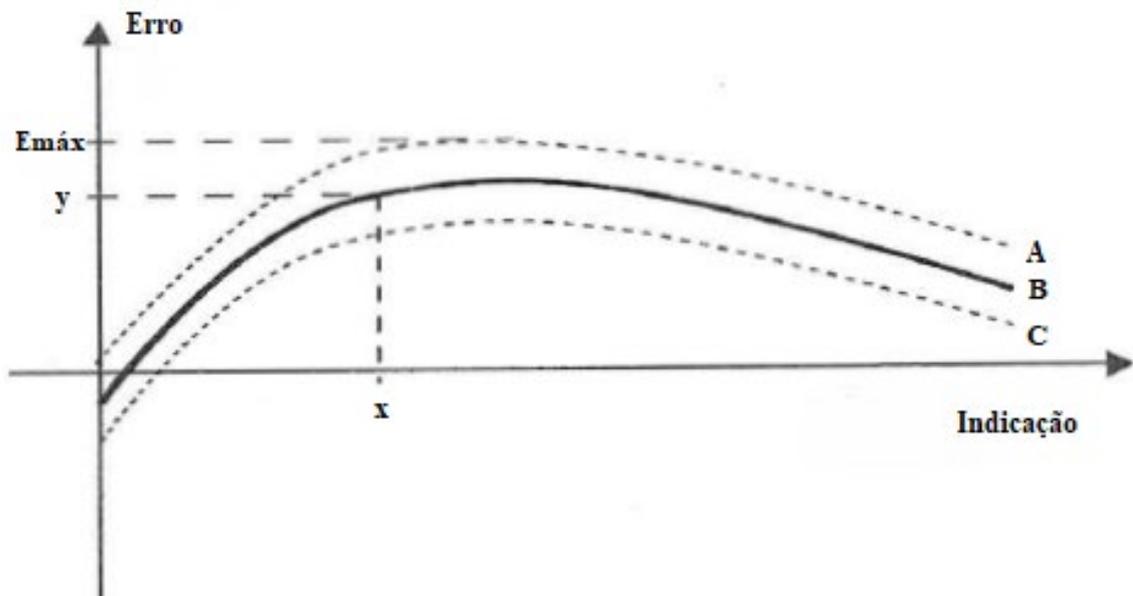
Fonte: Barbetta (2010)

2.1.6 Curva de erros

A partir da execução de repetidas medições de um corpo de prova padrão, cujo valor verdadeiro convencional é bem conhecido, é possível estimar a parcela sistemática do erro de medição pela tendência e calcular a correção que deve ser aplicada para compensar os erros sistemáticos. Além disso, podemos estimar a faixa dentro da qual é esperado o erro aleatório (repetitividade) calculada a partir da incerteza-padrão. Assim, é conveniente determinar a tendência e a repetitividade para vários pontos dentro da faixa de medição. Essas informações podem ser representadas de forma gráfica pela curva de erros do sistema de medição (Albertazzi; Sousa, 2008).

A curva de erros é formada por três linhas, sendo B a linha central que contém os valores da tendência, A o limite superior da faixa que contém os erros, calculado pela soma da tendência com a repetitividade, e C o limite inferior da faixa que contém os erros, calculado subtraindo-se a repetitividade da tendência.

Figura 4 - Curva de erros padrão



Fonte: Albertazzi (2008, com adaptações)

2.1.7 Aplicações da Metrologia

Atualmente, existem inúmeros exemplos de onde a metrologia é aplicada, desde situações básicas como precificar um produto pelo seu peso no supermercado, até o setor da saúde, seja em uma dosagem de medicamento ou na fabricação de equipamentos de diagnóstico com tolerâncias de erro estreitas, como um medidor de pressão arterial (Figura 5), por exemplo.

Nas indústrias, existem sistemas de medição responsáveis pelo controle dos processos produtivos e pela garantia da qualidade e segurança dos produtos finais (Figura 6). A metrologia industrial atua no âmbito das medições da produção e transformação de bens para a demonstração da qualidade metrológica em organizações com sistemas de qualidade certificados (Teodoro, 2020).

Segundo Zeiss (2021), alguns dos benefícios da metrologia na indústria são:

- Desenvolvimento de um sistema de medição padronizado
- Maior controle da qualidade do produto
- Análise comparativa para detecção de falhas
- Garantia de segurança para os consumidores
- Implantação de novas tecnologias dentro do setor
- Automatização de processos nas empresas
- Repetibilidade e rastreabilidade metrológica na indústria
- Promoção de um setor mais inovador e competitivo

Figura 5 - Medidor de pressão arterial



Fonte: Mercado livre (2023)

Figura 6 - Controle de qualidade utilizando um paquímetro



Fonte: InfoEng (2022)

2.2 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA) ou impressão 3D é um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional (Volpato, 2017).

2.2.1 Histórico e Nomenclatura

O princípio da Manufatura Aditiva (MA) ou impressão 3D, como também é conhecida, é aplicado desde 2500 a.c. onde as pirâmides egípcias eram construídas através da sobreposição de blocos até formar a construção final. Porém, apenas em 1981, no Japão, mais precisamente no Instituto de Pesquisas de Nagoya, o pesquisador Hideo Kodama teve o que seria a primeira ideia de fazer uma impressão tridimensional, inspirado pela tecnologia de polímero foto-endurecido. A ideia de Kodama, porém, só se tornou realidade 12 anos mais tarde quando o MIT (Massachusetts Institute of Technology) desenvolveu o primeiro processo de leito de pó usando os cabeçotes de uma impressora jato de tinta, o que estimulou o termo “impressão 3D” (Ferramental, 2020).

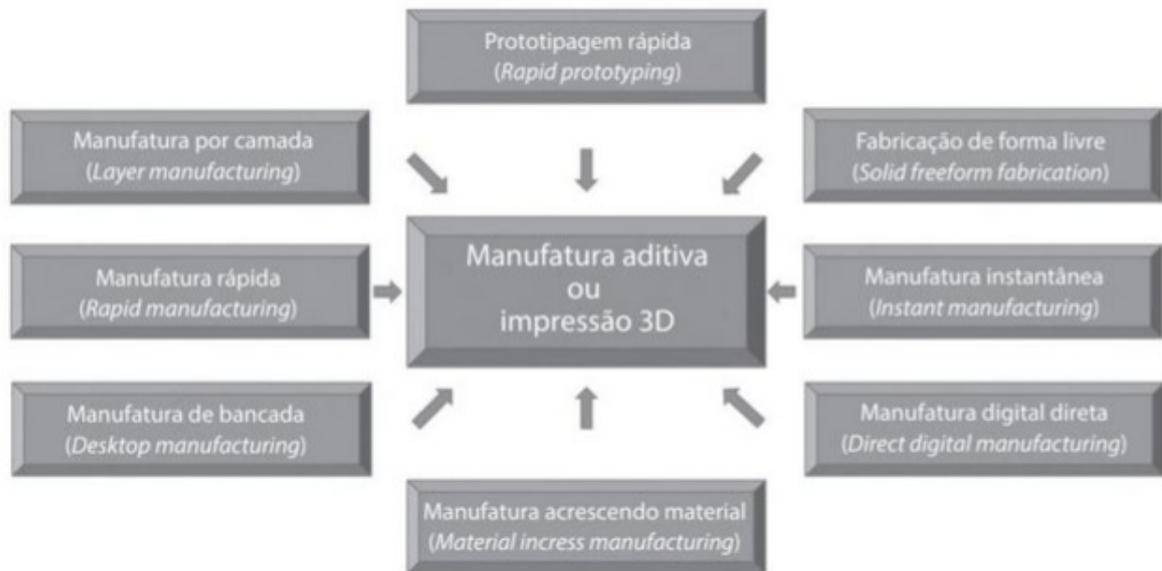
De acordo com Schotte (2019), alguns anos depois, a estereolitografia (SLA) foi patenteada por Charles Hull, criando modelos curando uma resina fotopolimérica líquida usando lasers UV (Ultra Violeta). Hull mais tarde comercializou o primeiro sistema de prototipagem rápida, o que trouxe uma redução significativa no tempo e complexidade para a engenharia criar conceitos e protótipos 3D. Paralelamente, Scott Crump criava a tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM) e à patenteou em 1989.

O início do século XXI foi um período fantástico para a tecnologia aditiva, com avanços na impressão que trouxeram a primeira máquina de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) comercialmente viável, além do desenvolvimento de máquinas uma que podem misturar vários materiais, permitindo que as peças possam ser criadas com diferentes propriedades de material em diferentes seções da construção. Ademais, esse período trouxe a fundação de empresas que conseguiram diminuir consideravelmente o custo de uma impressora 3D, trazendo impressão FDM de desktop para as massas que, em muitos casos fizeram dela uma fonte de renda.

Atualmente, a MA está em um pico que parece continuar crescendo, com a tecnologia PolyJet que continua a melhorar ano após ano. O processo PolyJet inclui um carro que injeta fotopolímeros na placa de construção. Em seguida, uma luz UV cura o material. Isso permite a criação de materiais rígidos e flexíveis em uma única construção. Para qualquer geometria complexa, a impressora cria uma substância semelhante a um gel para atuar no material de suporte, que é facilmente removido na conclusão da construção. Essa tecnologia permite a criação de peças de alta resolução com recursos detalhados que podem imitar a estética de resolução final desejada para usos de marketing e prototipagem (Schotte, 2019).

Quando falamos da nomenclatura desse processo, a denominação que persistiu até recentemente foi a de Prototipagem Rápida, que surgiu pelo fato de, inicialmente, ele ser aplicado principalmente na produção rápida de protótipos físicos (uma materialização de ideias, sem muitas exigências de precisão e resistência). Como o processo evoluiu, podendo fabricar peças para o uso como um produto final, a comunidade científica tem feito um esforço na direção de melhor caracterizar esse princípio de adição como um importante processo de fabricação. Assim, a denominação que melhor descreve o processo e que vem sendo aceita pela academia e parte da indústria, inclusive normas técnicas, é a de manufatura aditiva. Observa-se, no entanto, que com a popularização de algumas tecnologias, o termo impressão 3D tem sido adotado pela sociedade em geral (usuários e algumas empresas do setor). Acredita-se que isso se deve, principalmente, pela facilidade deste em transmitir o princípio fundamental do processo. Portanto, muitas vezes esses termos são utilizados como sinônimos. A Figura 7 apresenta algumas das nomenclaturas mais utilizadas atualmente.

Figura 7 - Nomenclaturas da Manufatura Aditiva



Fonte: Volpato (2017)

2.2.2 Tipos de M.A.

Segundo Paiva e Nogueira (2021), existem vários tipos de tecnologias que podem ser utilizadas por impressoras 3D e a cada ano que passa surgem outras novas. Dentre elas, as mais utilizadas são: FDM ou FFF, SLA e SLS. As diferenças entre esses tipos de tecnologia estão no material que elas utilizam e na maneira como são construídas as camadas, para formas os objetos impressos. O tópico a seguir aborda características das impressoras do tipo FDM, o qual será utilizado neste trabalho.

2.2.2.1 FDM – Fused Deposition Modeling

O FDM é um processo de impressão 3D desenvolvido pela Scott Crump, e depois implementado pela Stratasys Ltd., nos anos 80. Assim ele utiliza materiais plásticos térmicos de qualidade de produção para imprimir objetos 3D. FDM é um dos tipos de impressão 3D que usa termoplásticos adequados para produção, portanto, os itens impressos têm excelentes atributos mecânicos, térmicos e químicos (Cardoso, 2018).

Antes do início do processo de impressão do FDM, o usuário precisa dividir os dados de seu modelo 3D em várias camadas usando um software fatiador. Então os dados CAD cortados vão para a impressora para serem impressos.

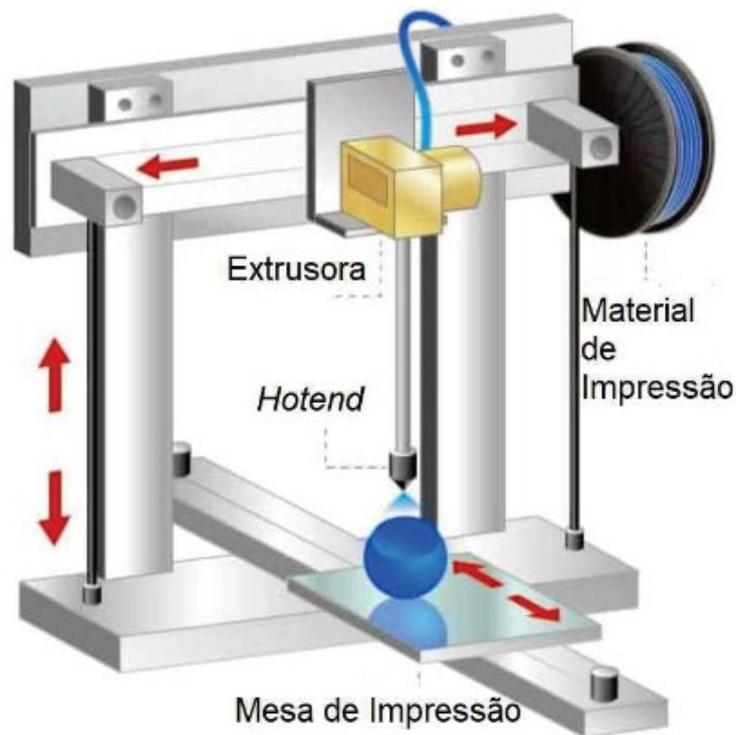
Figura 8 - Etapas da impressão 3D

			
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada

Fonte: Volpato (2017)

Um carretel de filamento é carregado na impressora 3D e alimentado através de um bico no cabeçote de extrusão. O bico da impressora é aquecido a uma determinada temperatura. Então um motor empurra o filamento através do bico aquecido, fazendo com que derreta. A impressora move a cabeça de extrusão ao longo das coordenadas especificadas, depositando o material fundido na mesa de impressão, onde resfria e solidifica. Quando uma camada é concluída, a impressora continua a fazer a próxima camada. Esse processo de impressão de seções é repetido, construindo camada sobre camada, até que o objeto esteja totalmente formado. Dependendo da geometria do objeto, às vezes é necessário adicionar estruturas de suporte, por exemplo, se um modelo tiver partes salientes inclinadas (Cardoso, 2018).

Figura 9 - Modelo esquemático de uma impressora 3D



Fonte: Antonelli (2019)

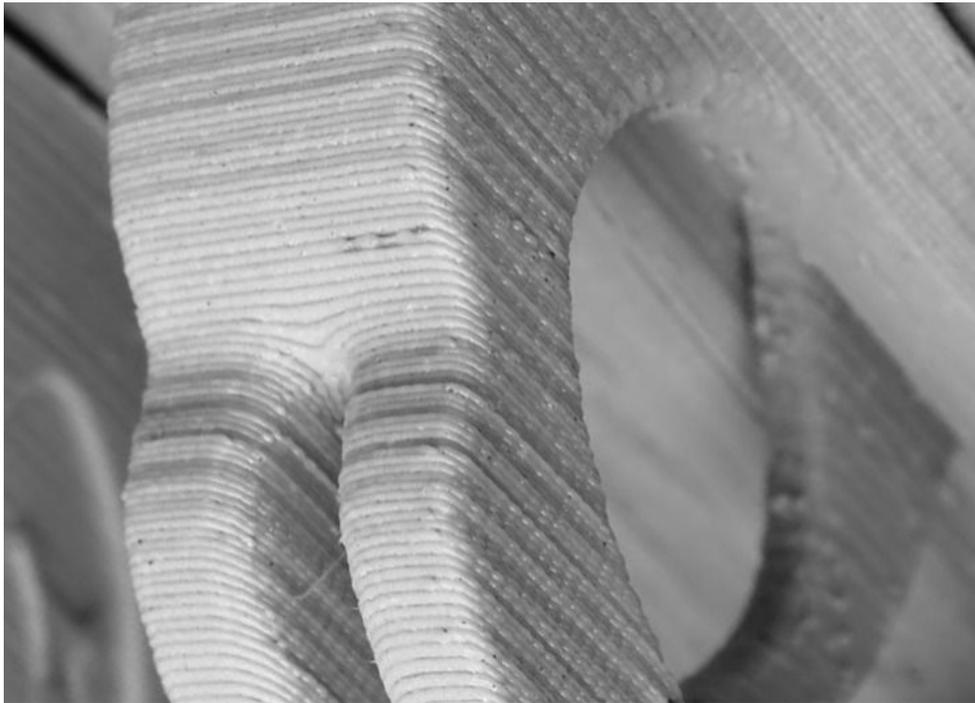
Peças fabricadas por FDM podem mostrar linhas de camadas razoavelmente visíveis em alguns objetos. Elas obviamente precisarão de lixamento manual e acabamento após a impressão, afim de obter um produto final suave com uma superfície uniforme.

Algumas das vantagens do método FDM quando comparado a outros métodos de impressão são o custo, uma vez que um dos mais baratos, a facilidade de uso onde não requer um conhecimento técnico avançado para manusear, como acontece em outros modelos. Além disso, uma das maiores vantagens da impressão 3D FDM é a escalabilidade, sendo que ela pode ser facilmente dimensionada para qualquer tamanho. Isso ocorre porque a única restrição no tamanho de uma área de construção é o movimento de cada pórtico, fazendo os trilhos do pórtico mais longos a área de construção pode ser maior. Outra vantagem é a flexibilidade do material. Em qualquer impressora FDM, uma grande variedade de materiais termoplásticos e filamentos exóticos podem ser impressos com relativamente poucas atualizações e modificações, algo que não pode ser dito de outros estilos em que um material deve ser uma resina ou um pó fino (Engiprinters, 2021).

Existem também, pontos negativos na impressão FDM, de acordo com Printit3D (2021), alguns deles são a qualidade de impressão, já que devido à sua baixa resolução de

impressão, pode aparecer uma laminação na superfície do objeto impresso (Figura 10) e isto requer polimento adicional e moagem de peças para fazer o acabamento superficial de partes altas. Além disso, em alguns casos existe uma alteração na dimensão durante o processo de impressão pois ele é propenso a flutuações de temperatura, resultando em arrefecimento mais lento ou mais rápido de materiais de filamento termoplástico.

Figura 10 - Laminação na superfície do objeto impresso



Fonte: Printit3D (2021)

2.2.3 Tipos de impressoras FDM

Atualmente existem variados modelos de impressoras que utilizam o método FDM de impressão. Nos tópicos seguintes serão abordados os tipos de impressoras FDM mais utilizadas, sendo elas a Cartesiana, a CoreXY e a Delta.

2.2.3.1 Cartesiana

É sem dúvida o tipo de impressora FDM mais comum do mercado. Eles recebem esse nome devido ao sistema que utilizam de coordenadas dimensionais, o cartesiano. Consiste em três eixos ortogonais – os eixos X, Y e Z – que são usados para determinar onde e como a

cabeça de impressão deve se mover nas três dimensões corretamente e, assim, corrigir a direção do movimento. Dependendo do modelo e do fabricante da impressora, a mesa de impressão desta máquina ficará encarregada do eixo Z, deixando a extrusora posicionada nos eixos X e Y, de forma que possa se mover nas quatro direções. Nesta categoria encontramos algumas das marcas mais conhecidas do setor, embora praticamente todos os fabricantes desenvolvam este tipo de impressora 3D FDM. A sua principal vantagem está na facilidade de utilização, por ser o tipo de impressora com a mecânica mais simples, são as mais fáceis de calibrar e corrigir os erros que possam surgir durante o uso (Jonalelite, 2020).

Figura 11 - Impressora 3D Cartesiana



Fonte: Creality3D (2022)

As impressoras cartesianas utilizam um hardware capaz de realizar o movimento mecânico nos eixos de coordenadas X, Y e Z, ou seja, cada eixo conta com um motor responsável apenas por movimentar naquela direção, possibilitando maior precisão na construção de peças e protótipo, assemelhando-se aos mecanismos existentes em máquinas CNC (Bell, 2015).

2.2.3.2 CoreXY

Segundo Thomazetti (2019), semelhante às cartesianas, as impressoras 3D coreXY apresentam volume cúbico, porém a principal diferença entre as duas é que a coreXY possui motores que são responsáveis por realizar o movimento no plano X e Y em conjunto, enquanto os movimentos no eixo Z são realizados de maneira independentes por outro motor, enquanto nas impressoras cartesianas cada plano possui um motor independente responsável por realizar esses movimentos.

Figura 12 - Impressora 3D CoreXY



Fonte: Sethi3D (2022)

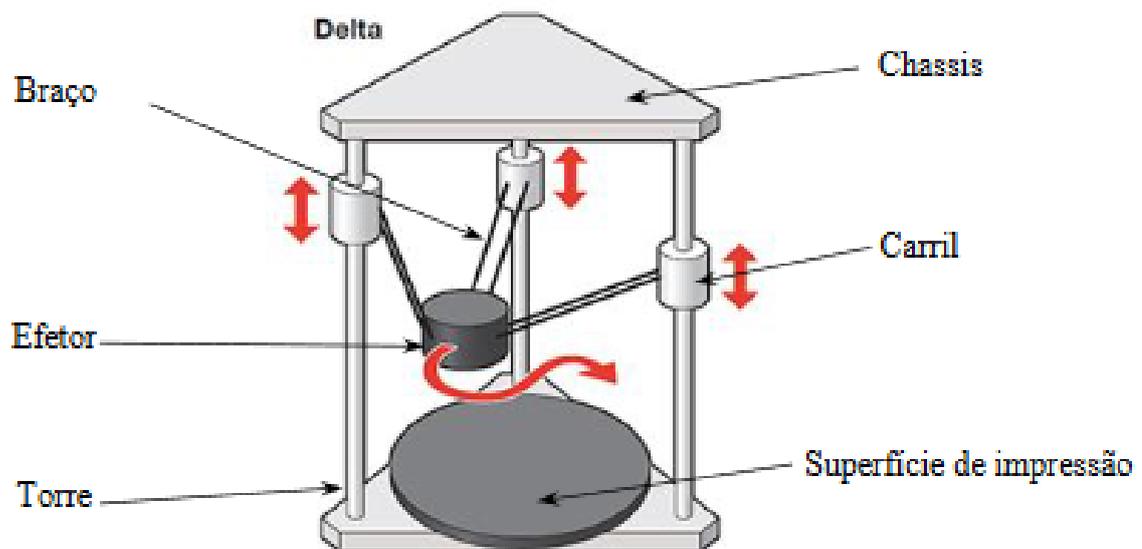
Esse sistema possui uma vantagem em relação ao cartesiano, pois quando está bem calibrado pode ter um processo mais estável e mais rápido (Razgriz; Paiotti, 2020).

2.2.2.3 Delta

Estas impressoras, apesar da sua cinemática complexa, trabalham com um sistema de eixos cartesiano. Para tal, o sistema de controle tem que ser capaz de converter a posição desejada do extrusor em posições equivalentes dos três carris verticais. O ponto de coordenadas

(0,0,0), num espaço cartesiano, é frequentemente considerado o centro da base circular de impressão. À parte do sistema de movimentação, que é único para as impressoras delta, os restantes componentes como os rolamentos lineares, sistemas de transmissão, tipo de construção dos chassis e eletrônica de controlo são semelhantes aos restantes tipos de impressoras (Abreu, 2017).

Figura 13 - Desenho esquemático de uma impressora 3D Delta



Fonte: Engiprinters (2022, com adaptações)

2.2.4 Materiais para impressão 3D

A indústria está experimentando e desenvolvendo novas abordagens. Desde termoplásticos baseados em fibras de vegetais como o amido de milho, cana de açúcar e beterraba, até compostos com metal. A lista de produtos confeccionados por meio da impressão 3D é gigantesca. Consequentemente, a expansão dos materiais utilizados em uma impressora 3D para essa produção também cresce a cada dia. Assim sendo, nos tópicos seguintes estão listados os materiais mais comuns para impressão 3D quando se trata de polímeros e suas características (MUV, 2022).

Figura 14 - Materiais usados na impressão 3D



Fonte: Guey (2020)

2.2.4.1 PLA – Ácido Poli Lático

O ácido polilático (PLA), é o principal filamento utilizados nas impressoras 3D, ele possui uma temperatura de impressão menor que acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), por isso não necessita de mesa aquecida para impressão.

Segundo Brito et al. (2011), o poli (ácido lático) – PLA é um poliéster alifático, termoplástico, semicristalino ou amorfo, bi compatível e biodegradável, sintetizado a partir do ácido lático obtido de fontes renováveis. As fontes renováveis de onde é derivado o PLA são oriundas do amido de milho, cana-de-açúcar, raízes de tapioca e amido de batata. Não é tóxico, e por ser um termoplástico biodegradável, o torna mais ecológico do que a maioria dos filamentos de impressoras 3D.

Quando aquecido para sua extrusão, sente-se um leve aroma doce, tem a capacidade de degradar-se em ácido lático, é inofensivo ao organismo humano e devido a esta propriedade é usado na medicina em suturas e implantes cirúrgicos. O material é higroscópico e necessita na maioria dos casos de secagem antes do processamento. Quando exposto por um certo período ao ar atmosférico ele absorve a água presente no ar afetando diretamente na qualidade da impressão.

O PLA é quebradiço, portanto, deve-se evitar de usá-lo em peças que requer resistência mecânica, e em peças com exposições a temperaturas em torno de 60°C ou mais. Têm maior facilidade para entupir o bico do extrusor e seu armazenamento requer um cuidado maior devido ao fato do PLA absorver facilmente umidade (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

2.2.4.2 ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

O segundo filamento mais utilizado em impressão 3D é o ABS, um copolímero obtido a partir de reações de três monômeros diferentes, sendo eles acrilonitrilo, butadieno e estireno. sua impressão requer mais conhecimento técnico e necessita de mesa aquecida.

O ABS é superior ao PLA em relação às suas propriedades mecânicas, é durável, forte e é considerado leve. Suporta temperaturas mais elevadas, é ligeiramente flexível.

A desvantagem do ABS é uma pequena geração de fumaça durante o processo de impressão e esta é considerada tóxica, por isso, deve-se operar a impressora 3D em uma área ventilada. O ABS é derivado de petróleo e conseqüentemente não é um material biodegradável assim como o PLA. Necessita de maior temperatura para atingir seu ponto de fusão, e pode deformar durante e depois do processo de impressão, por isso é indicado mesa de aquecimento e o uso em impressoras fechadas (Besko; Bilyk; Sieben, 2017)..

2.2.4.3 PETG – Polietileno Tereftalato Glicol

O Polietileno Tereftalato (PET) é considerado o plástico mais utilizado no mundo, e seu uso em garrafas de água e de refrigerantes o torna o mais conhecido pela população. O PET “bruto” não é muito usado em impressão 3D, mas este possui um derivado conhecido como polietileno tereftalato modificado com glicol ou PETG, sendo este considerado por alguns como um bom meio termo entre o PLA e o ABS onde é mais durável e flexível que o PLA, e mais fácil de imprimir do que o ABS (Besko; Bilyk; Sieben, 2017)..

A modificação em sua composição com o uso do glicol teve como resultado um filamento mais claro, menos frágil e, mais importante, mais fácil de usar do que a forma base (Clark, 2022).

Assim como o PLA, o PETG é higroscópico, portanto, seu armazenamento deve ser em local fresco e seco, é pegajoso durante a impressão e arranha mais facilmente do que o ABS.

A Figura 15 mostra uma comparação de algumas propriedades e respectivos desempenhos dos principais materiais aqui citados.

Figura 15 - Propriedades e desempenhos do PLA e do ABS

PROPRIEDADE/DESEMPENHO	MENOR	MÉDIO	MAIOR
BRILHO	ABS	PLA	
TRANSPARÊNCIA	ABS	PLA	
RIGIDEZ/DUREZA		ABS	PLA
RESISTÊNCIA A IMPACTOS	PLA	ABS	
FLEXIBILIDADE	PLA	ABS	
CONTRAÇÃO/WARP	PLA		ABS
PRECISÃO EM DETALHES E CANTOS	ABS		PLA
ECOLÓGICO	ABS		PLA
QUALIDADE DE SUPERFÍCIE DA PEÇA	ABS		PLA
RESISTÊNCIA A ATRITOS	PLA	ABS	
RESISTÊNCIA QUÍMICA	ABS	PLA	
RESISTÊNCIA A ALTAS TEMPERATURAS	PLA		ABS
FACILIDADE DE PÓS-PROCESSAMENTO	PLA		ABS
USINABILIDADE	PLA		ABS
DENSIDADE	ABS	PLA	
PREÇO POR CM³/GRAMA/HORA	PLA	ABS	

Fonte: 3DFacil (2022)

2.2.5 Principais Parâmetros de impressão

Existem diversos parâmetros que influenciam o resultado de uma impressão 3D. Alguns dos principais e mais relevantes dentre esses parâmetros serão abordados nos tópicos seguintes.

2.2.5.1 Altura de Camada

A altura da camada, ou resolução, diz respeito à espessura de filamento que será depositado durante o processo de impressão. No modelo mais comum, o material é colocado camada após camada de maneira uniforme. A máquina insere filamento num nível inteiro e repete este passo até a finalização do projeto (3DLAB, 2019b).

Geralmente, camadas mais finas permitem melhores acabamentos, contudo, aumentam exponencialmente o tempo de impressão, uma vez que são inversamente proporcionais (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Efeito da altura de camada sob o tempo de impressão



Fonte: 3DFILA (2021)

Normalmente, quando se fala em altura da camada de impressão, estamos nos referindo diretamente à qualidade superficial da peça a ser impressa. As impressoras 3D do mercado normalmente conseguem imprimir entre a altura da camada de 0,05 milímetros e 0,4 milímetros, mantendo o mesmo bico de impressão (3DLAB, 2017).

Figura 16 - Efeito da altura de camada no acabamento superficial

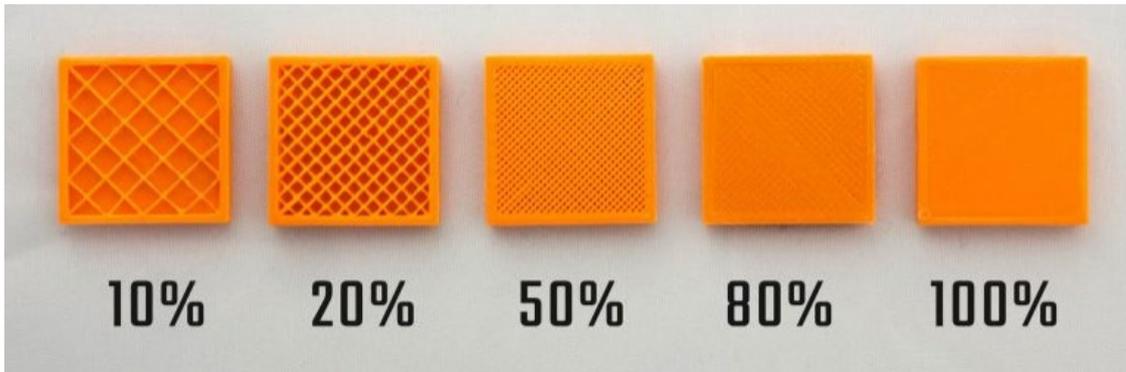


Fonte: 3DLAB (2017, com adaptações)

2.2.5.2 Densidade e Tipos de Preenchimento

Segundo Kurmann (2019), a densidade de preenchimento, também chamada de “infill”, é toda a parte interna da impressão 3d. Ela varia de projeto para projeto e está associada diretamente à resistência, peso e duração do objeto impresso. O infill é extrudado em uma porcentagem e padrão designados e definido no software de fatiamento. Esta é uma das configurações mais importantes no processo de criação de um projeto na impressora 3D, pois é o que define a quantidade de plástico que irá dentro do objeto impresso. Uma densidade de preenchimento mais alta significa que há mais plástico no interior da sua impressão, fazendo com que o objeto seja mais forte. De um modo geral, quanto maior a porcentagem de preenchimento, mais forte será a impressão, porém mais tempo será necessário para imprimir. Na maioria dos casos, o preenchimento de 10% a 20% é suficiente. O preenchimento de 100% é muito raramente usado.

Figura 17 - Densidade de preenchimento

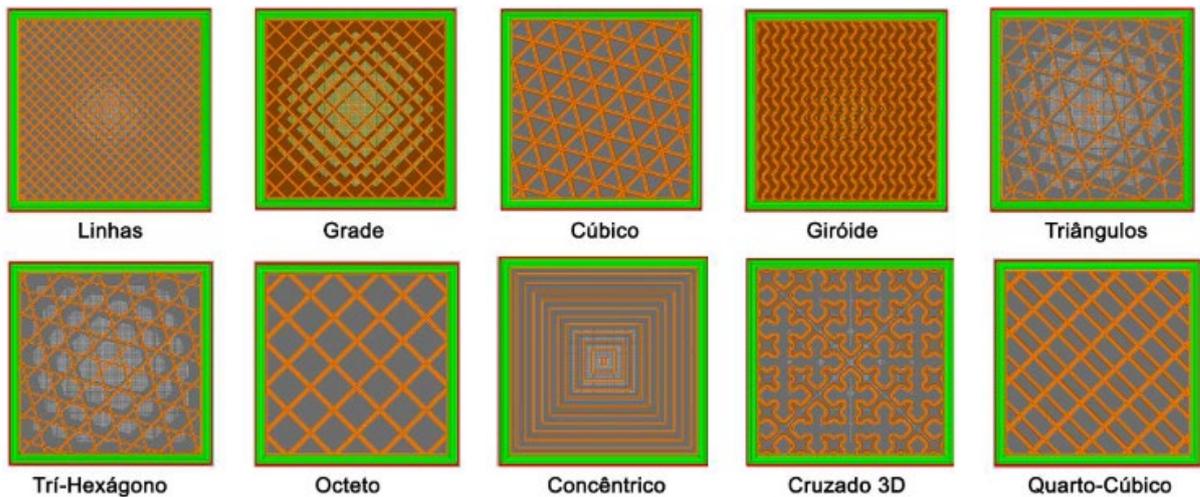


Fonte: 3DPortugal (2021, com adaptações)

O tipo de preenchimento representa a forma do material e a estrutura dentro de um objeto. Que pode variar de estruturas simples formadas por linhas a formas geométricas mais complexas, os diversos tipos de preenchimento podem afetar o peso, o tempo de impressão e a resistência de uma peça. Alguns padrões de preenchimento são melhores que outros para determinadas funções (O'connell, 2022).

A Figura 18 ilustra alguns tipos padrões de preenchimento que são disponibilizados pelo software Ultimaker Cura®.

Figura 18 - Tipos de preenchimento disponíveis no Ultimaker Cura



Fonte: Campos (2022)

2.2.5.3 Velocidade de impressão

A velocidade de impressão é a principal configuração de velocidade que influenciará no processo de impressão 3D. Como fica explícito no próprio nome, esse parâmetro determina a rapidez com que os motores da impressora se movem. Isso inclui os motores que controlam os eixos X e Y, bem como o motor extrusor (Kondo, 2021).

De acordo com Wishbox (2020), esse parâmetro está diretamente relacionado ao tempo de impressão e à qualidade do acabamento superficial da peça impressa. Uma velocidade de impressão muito lenta pode causar deformação na impressão devido ao bocal ficar muito tempo no plástico. Contudo, quando muito rápida, pode haver outros problemas como um resfriamento insuficiente, ocasionando superaquecimento, adesão de camada fraca, entre outros que influenciarão fortemente o acabamento final da peça. A velocidade ideal é particular de cada aplicação, e vai depender de quanta qualidade de impressão será necessária, associando ao tempo requerido para imprimir a peça em tal velocidade.

Figura 19 - Efeito da velocidade de impressão no acabamento superficial



Fonte: Wishbox (2020)

Segundo Fernandes (2016), a velocidade de impressão é dividida em cinco tipos de velocidades diferentes, sendo:

- Velocidade da primeira camada: esta não deve ser muito elevada, para proporcionar uma boa adesão do material à camada de impressão;
- Velocidade de enchimento: corresponde à velocidade de impressão das estruturas de enchimento. Esta pode ser um pouco mais elevada;
- Velocidade das paredes de topo e de fundo: esta pode ser igual à da primeira camada;
- Velocidade da parede lateral exterior: é aquela referente ao perímetro exterior da espessura da parede lateral. Esta não deve ser muito elevada, para se obter uma boa qualidade superficial;
- Velocidade da parede lateral interior: é aquela referente aos perímetros interiores que formam o resto da espessura da parede lateral. Esta deve estar compreendida entre a velocidade de enchimento e a velocidade da parede lateral exterior.

2.2.5.4 Temperatura do bico de extrusão

Para Sousa (2022), é o parâmetro responsável por ajustar a temperatura do bico de extrusão até uma temperatura que é capaz de fundir o material que está sendo extrudado, essa temperatura deve ser ajustada de acordo com as especificações do fabricante e da composição do material a ser utilizado, uma vez que eles possuem temperaturas de fusão diferentes.

Apesar do fato de que quase todo filamento atualmente em uso é um polímero, cada um tem seus próprios parâmetros de temperatura. Isso porque os filamentos possuem composições químicas muito diferentes. Alguns, como o PLA, são feitos de amido de milho, enquanto outros, como o ABS, têm composição à base de petróleo. Quando a temperatura de extrusão é muito baixa, o filamento não flui adequadamente. Isso causa lacunas entre as camadas e até mesmo fazer com que as camadas se separem. Se aumentar excessivamente a temperatura, o filamento pode se degradar e mesmo que a peça seja impressa ela será extremamente frágil (3DLAB, 2019).

Tabela 1 - Temperatura de extrusão recomendada para PLA, ABS e PETG

Material	Temperatura de extrusão recomendada
PLA	De 195 a 220°C
ABS	De 220 a 240°C
PETG	De 245 a 260°C

Fonte: 3DLAB (2019, com adaptações)

2.2.5.5 Temperatura da mesa de impressão

Alguns filamentos requerem uma temperatura específica de aquecimento de mesa. Quando eles esfriam contraem e deformam. Uma mesa aquecida permite que eles resfriem mais lentamente quando extrudados, de modo que a deformação é minimizada e seus efeitos não sejam visíveis na peça.

Uma mesa aquecida também fornece aderência adicional, garantindo que a primeira camada fique bem firme e que a peça não se solte durante a impressão.

Corroborando com isso, Flynt (2021) afirma que o objetivo de uma mesa aquecida é manter a camada de base da impressão logo abaixo da temperatura de transição vítrea do material. A alta temperatura aumenta a adesão a mesa e mantém o material dúctil o suficiente para que o estresse térmico possa ser redistribuído.

Tabela 2 - Temperatura da mesa de impressão recomendada para PLA, ABS e PETG

Material	Temperatura da mesa de impressão
PLA	Ambiente de até 70°C
ABS	110°C com aplicação de adesivo fixador
PETG	85°C com aplicação de adesivo fixador

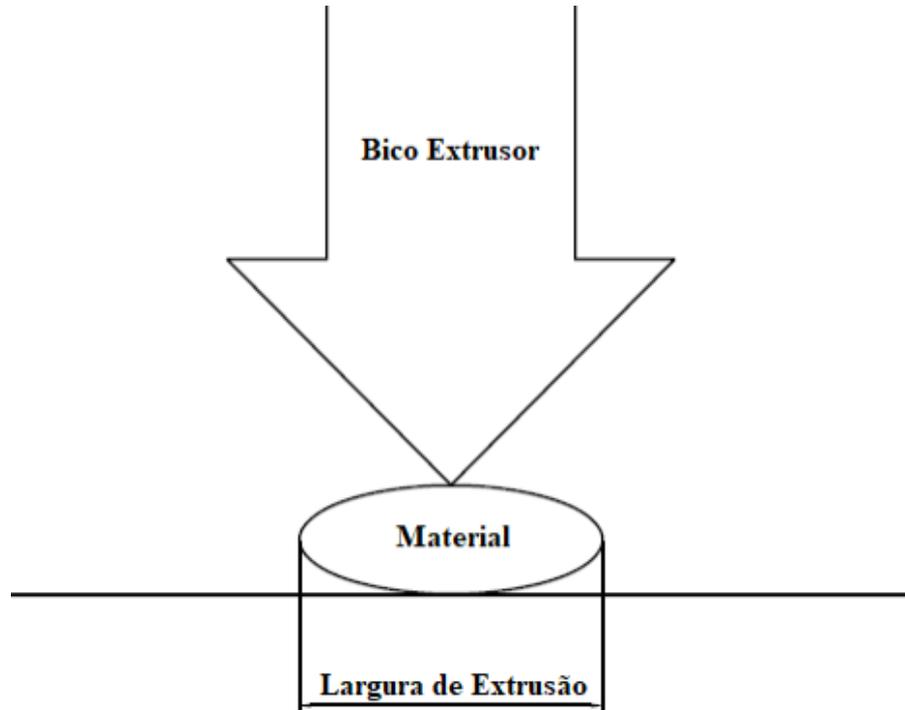
Fonte: 3DLAB (2019, com adaptações)

2.2.5.6 Largura de extrusão

Outra configuração para verificar antes de imprimir é a largura de extrusão. Cada extrusora pode ter a sua própria largura de extrusão exclusiva. Se a largura da extrusão for significativamente menor que o diâmetro do seu bico, isso poderá causar problemas de extrusão. Como regra geral, a largura da extrusão deve estar entre 100-150% do diâmetro do bico. Se a

largura da sua extrusão estiver muito abaixo do diâmetro do bico (por exemplo, uma largura de extrusão de 0,2 mm para um bico de 0,4 mm), a extrusora não poderá impulsionar um fluxo consistente de filamento (Electrofun, 2019).

Figura 20 - Desenho esquemático da largura de extrusão



Fonte: Autor (2023)

Ademais, outros parâmetros de impressão podem influenciar a largura de extrusão como afirma (Gibson et al., 2015), que para que o filamento depositado apresente um diâmetro (ou largura) constante, é necessário que a velocidade do bico extrusor e a pressão no material também sejam constantes. Com isso, a variação desses parâmetros provoca uma variação na largura do filamento depositado.

2.2.6 Manufatura aditiva x Manufatura subtrativa

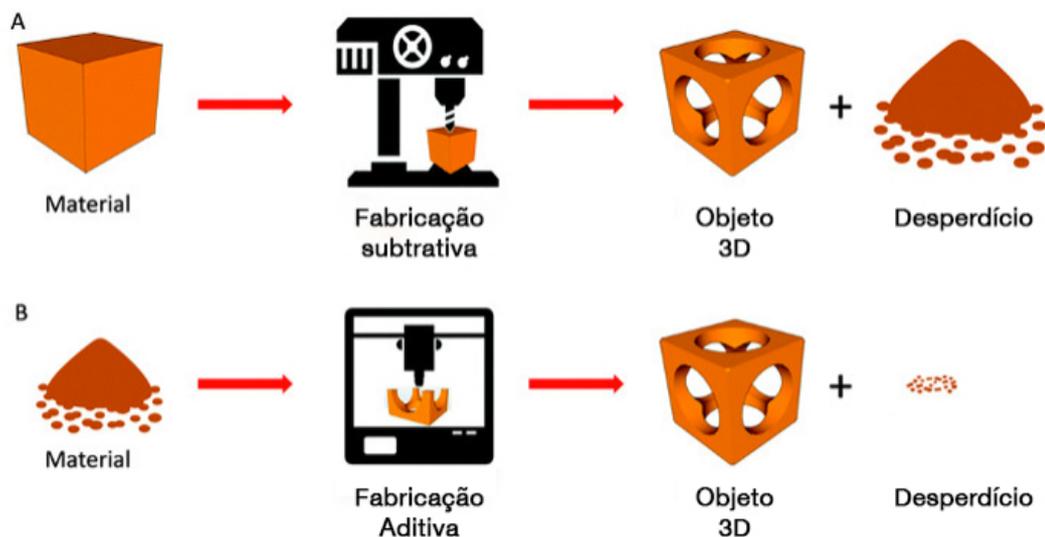
De acordo com Raseira (2013), as tecnologias subtrativas são caracterizadas basicamente pela remoção de material para a obtenção do produto desejado e são muito utilizadas no processo de desenvolvimento de produtos. Esse tipo de material é extraído através de perfuração, corte, mandrilhamento ou retificação. A sua fabricação, por décadas, está sendo aperfeiçoada e possui uma aplicação mais ampla do que manufatura aditiva. Todos os

processos dentro da manufatura subtrativa são executados de modo manual ou pelo controle numérico por computador (CNC) que é fornecido na instrução da máquina.

Então, os processos subtrativos passam a ser a maior referência para aplicações que exigem geometrias e tolerâncias com um alto índice de produtividade, custo, repetibilidade e mais atrativos em altas produções.

Dentro desta tecnologia existem limites que estão no fato da liberdade do design ir ao encontro dos recursos de produção existentes e conhecidos no mercado. Normalmente, são aplicadas nas estruturas retilíneas e mais planas, seguindo o padrão de fabricação.

Figura 21 - Comparativo entre manufatura subtrativa e aditiva



Fonte: Enginprinters (2020)

Tanto a impressão 3D quanto a usinagem CNC são compatíveis com uma ampla variedade de materiais, incluindo plásticos e metais. No entanto, a impressão 3D está mais focada nos plásticos em geral, embora isso esteja mudando rapidamente, já que melhores e mais acessíveis formas de impressão 3D de metal estão sendo desenvolvidas por fabricantes como 3D Systems, Arcam, Desktop Metal e Markforged (Enginprinters, 2020).

A Manufatura Aditiva é conhecida por ser mais simples de usar do que a usinagem CNC. Isso porque, uma vez que o arquivo esteja preparado, basta escolher a orientação da peça, preencher e suportar, se necessário. Em seguida, uma vez iniciada a impressão, nenhum supervisor é necessário e a impressora pode ser deixada até que a peça seja concluída. Os requisitos de pós-processamento dependem da tecnologia. No entanto, a usinagem CNC é um

processo muito mais trabalhoso. Um operador experiente é obrigado a escolher entre diferentes ferramentas, velocidades de rotação de ferramentas, o caminho de corte e qualquer reposicionamento do material de onde a peça está sendo criada. Existem também técnicas de pós-processamento que podem exigir mais tempo. O CNC exige um operador, enquanto a impressão 3D pode ser deixada sozinha durante a impressão.

2.2.6.1 Vantagens e Limitações

Volpato (2017), afirma que quando comparados aos processos de fabricação tradicionais, em especial com a usinagem CNC, os processos de Manufatura Aditiva apresentam tanto vantagens como também limitações.

Algumas das principais vantagens podem ser sintetizadas como:

- Grande liberdade geométrica na fabricação, isto é, independência da complexidade da peça. Geometrias normalmente impossíveis de serem fabricadas por outros processos podem ser obtidas por MA (figura).
- Pouco desperdício de material e utilização eficiente de energia. Na maioria das tecnologias aditivas o material gasto para fabricar um componente equivale a aproximadamente ao volume de material da peça.
- Não requer dispositivos de fixação. Geralmente as peças são fixadas nas plataformas de construção por materiais depositados pela própria tecnologia, que servem de apoio e são removidos facilmente ao final do processo, dispensando o projeto de qualquer dispositivo específico.
- Não é necessária a troca de ferramentas durante a fabricação do componente, como no caso de máquinas CNC. Normalmente, um único meio de processamento do material é utilizado do início ao fim do processo.
- Não são necessários cálculos complexos das trajetórias das ferramentas. Quando se trabalha com camadas planas, o planejamento de processo é bastante simplificado, pois os cálculos se restringem à obtenção de trajetórias no plano 2D e, por isso, são realizadas de forma praticamente automática por sistemas de planejamento de processo.
- Rapidez na obtenção de baixa quantidade de componentes quando comparados aos processos tradicionais. Em especial, destaca-se a vantagem na obtenção de protótipos físicos, principalmente os mais complexos.

- Possibilidade de produção de peças finais, em especial por meio das tecnologias baseadas em materiais metálicos ou polímeros de engenharia. A flexibilidade para produzir peças para variadas aplicações e com grande diversidade geométrica é também uma grande vantagem quando se trata da produção de componentes finais.
- Em relação à produção, existe uma quantidade de peças de um lote que estabelece o ponto de equivalência de custo em relação aos processos tradicionais. Assim, o custo por MA é menor que o tradicional quando a demanda está abaixo dessa quantidade e maior, quando acima dela.
- Algumas tecnologias têm o potencial de misturar materiais diferentes, ou mesmo mudar a densidade do material durante o processamento, o que permite criar materiais com gradação funcional, variando as propriedades (resistência, dureza, porosidade, flexibilidade, etc.) ao longo da peça.

Figura 22 - Peças fabricadas por manufatura aditiva



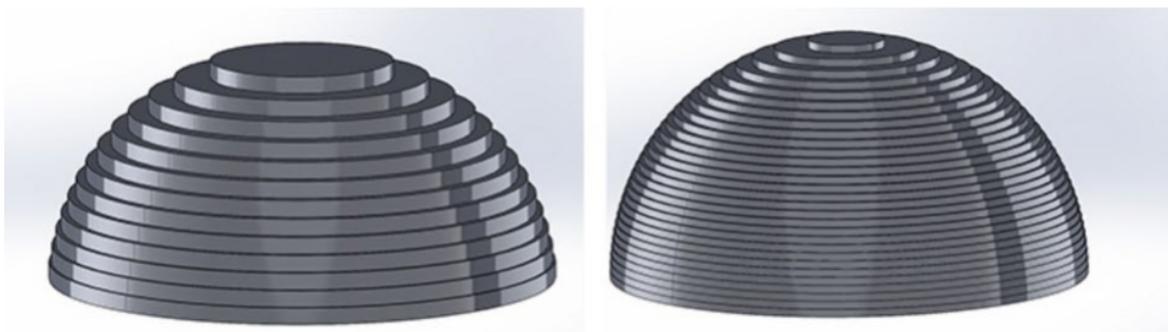
Fonte: Berwanger (2022)

Algumas das limitações ou deficiências atuais da Manufatura Aditiva como processo de fabricação, são:

- Em geral, as propriedades dos materiais obtidos por impressão 3D não são as mesmas dos materiais processados de forma tradicional. Isso decorre do fato de a fabricação ser por adição de camadas, que faz com que o material possua, em geral, propriedades anisotrópicas. Isso implica em algumas limitações na aplicação de peças produzidas por esses processos;

- A precisão e o acabamento superficial são inferiores aos das peças obtidas por processos convencionais, como a usinagem. Isso também se deve ao princípio de adição de camadas, que dá origem aos degraus de escada Figura 23 nas superfícies de regiões inclinadas e curvas;
- A maioria das tecnologias possuem limitações quanto à escolha de materiais que podem ser empregados. Em muitos casos, somente estão disponíveis alguns materiais proprietários, desenvolvidos especificamente para uma dada tecnologia;
- No caso de tecnologias de MA de porte industrial o custo envolvido é elevado, principalmente de aquisição e operação do equipamento, incluindo materiais e insumos nos processos. No entanto, com o advento das impressoras 3D de baixo custo, esse cenário vem se alterando. Já na produção de componentes finais ou em que os componentes tenham alto valor agregado, o emprego da MA tem se justificado;
- Problemas como distorções e empenamento do material podem ser observados em alguns processos, se não totalmente sob controle e calibrados, em virtude da natureza térmica/química do processo de adesão utilizado. Cada vez mais esses problemas vêm sendo minimizados com a evolução das tecnologias aditivas;
- Considerando a fabricação de lotes grandes, a MA é ainda mais lenta e mais cara se comparada aos processos tradicionais;
- Também existe uma limitação quanto ao seu volume de construção em relação à processos tradicionais de fabricação. Mesmo as tecnologias com volumes de construção maiores não podem competir com o CNC em termos de tamanho máximo das peças produzidas.

Figura 23 - Efeito degraus de escada produzido pela adição de camadas



Fonte: Fablab (2017)

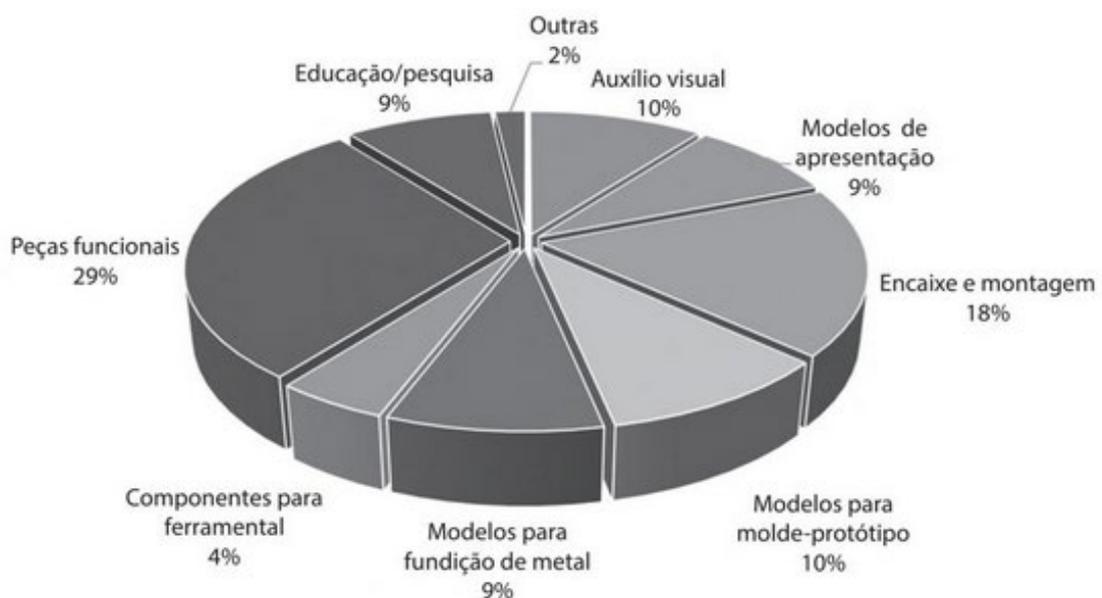
2.2.7 Principais Aplicações

De acordo com a Mais Polímeros (2020), a tecnologia de impressão 3D tem revolucionado a indústria, especialmente no que se refere a criação de protótipos, que podem ser produzidos com muito mais velocidade e precisão a partir dessa ferramenta. Antes disso, para se produzir um protótipo, a peça deveria ser moldada manualmente a fim de se obter uma matriz, o que demandava tempo e abria brechas para muitos erros. Essas máquinas de impressão 3D também oferecem a possibilidade de se fabricar peças ou produtos sob medida, diretamente para o cliente final.

Sendo assim, observa-se que a aplicação da MA se iniciou no projeto e foi estendida, primeiramente, para engenharia, análise e planejamento e, depois, para etapas de manufatura e ferramental.

Segundo Volpato (2017), um levantamento recente realizado com 127 empresas que são usuárias das tecnologias de manufatura aditiva apresentou uma distribuição geral de onde estão sendo utilizadas (Figura 24). Ressalta-se que mais de um terço das aplicações (36,8%) concentra-se em modelagem e prototipagem (auxílio visual, modelos de apresentação e encaixe e montagem). Aplicações em manufatura final chegam a 29%, e aplicações em ferramental, a 23% (modelos para molde-protótipo, modelos para fundição de metal e componentes para ferramental).

Figura 24 - Distribuição de onde está sendo usada a manufatura aditiva



Fonte: Volpato (2017)

Muitas empresas já utilizam a impressão 3D, incluindo setores aeroespacial, automotivo, design industrial, engenharia, arquitetura, medicina e design de produtos. A tecnologia permite que as empresas criem ferramentas, gabaritos e acessórios impressos em 3D de forma rápida e em grande escala. Isso significa que, uma vez que as impressoras são configuradas, o processo de fabricação de peças é simplificado e o número de variações e erros diminuem significativamente. Um exemplo do uso da impressão 3D na indústria são as montadoras de carro que utilizam componentes produzidos por meio da tecnologia em suas linhas de montagem, como representado na Figura 25.

Figura 25 - Mancal de alternador veicular fabricado por impressora 3D

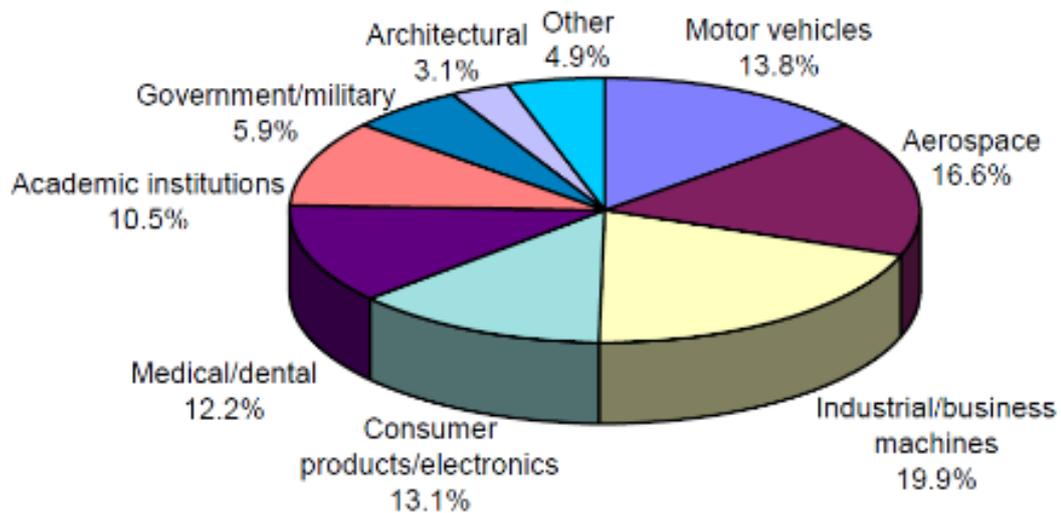


Fonte: Novasilk (2021)

Para a arquitetura, uma das vantagens da impressão 3D é que as empresas podem criar modelos de seus projetos, para mostrar aos clientes ou revisar e refinar suas ideias.

A impressão 3D está transformando também a área de saúde, seja criando próteses personalizadas ou ajudando a explicar procedimentos cirúrgicos para pacientes. A tecnologia também é bastante utilizada na odontologia em restaurações, próteses e até mesmo as cirurgias buco-maxilo-faciais já estão sendo amparadas pela impressão 3D (3DLAB, 2020).

Figura 26 - Setores que utilizam a manufatura aditiva



Fonte: Kianian (2016)

No Brasil, existe uma disposição de aumento do uso da impressão 3D nas indústrias. Atualmente, esse procedimento já é utilizado pelos segmentos automotivo e aeroespacial por causa da sua contribuição para a produção em série. Isso porque a impressão 3D acelera e barateia as despesas com a elaboração de protótipos. Desse modo, há uma economia com o uso de moldes, o que causa bem menos perdas e erros nos processos de fabricação. A redução de custos ocorre com a dispensa de confecção desses moldes, uma vez que o design dos objetos é criado no computador, onde eles ficam armazenados em arquivos digitais (Suprivix, 2022).

Segundo Ferreira (2020), a equipe belga Heli Racing teve problemas mecânicos em um de seus veículos. Durante uma corrida, o coletor turbo diesel de quatro cilindros de sua BMW série 1 explodiu, estourando ao longo de uma solda feita por ultrassom que mantinha unidas as duas metades do coletor. A equipe tentou reforçar a solda, mas quando o carro voltou à pista, no meio da corrida, houve um novo estrondo, uma perda de potência e um *pit stop* para substituir o coletor. Isso causou frustrações para a equipe. Em 2018, a Heli decidiu levar o problema para uma empresa belga que fabrica peças usando a Impressão 3D. Em sua primeira corrida com o novo coletor de admissão impresso em 3D em nylon PA 12, a peça suportou tranquilamente a corrida e a equipe Heli conseguiu a terceira colocação. Esse mesmo coletor durou até que o carro foi aposentado no início de 2020.

Figura 27 - Coletor de admissão impresso em 3D para a equipe belga Heli Racing



Fonte: Ferreira (2020)

2.2.8 Precisão dimensional na Manufatura Aditiva

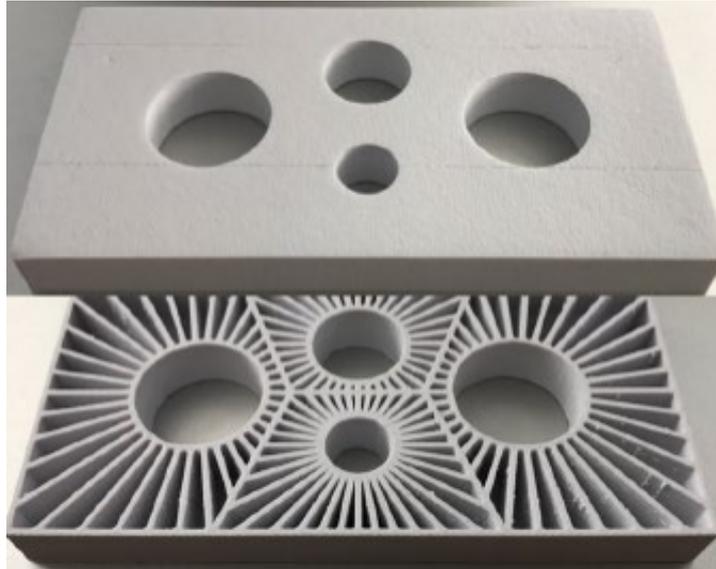
Mesmo apresentando várias inovações o processo de modelagem por deposição fundida sofre desvantagem em alguns aspectos como velocidade de processo relativamente lenta, precisão limitada em alguns casos e propriedades mecânicas relativamente menores, o que dificulta seu uso industrial, sendo mais utilizado para protótipos e peças que não necessitem de grandes propriedades mecânicas ou grande exatidão (Hongyao et al., 2018).

Segundo Yaman (2018), um dos desafios de aumentar a porcentagem dos produtos finais com Manufatura Aditiva na indústria é uma melhor precisão dimensional dessas tecnologias em comparação com os processos de fabricação subtrativa (torneamento, fresamento, perfuração, brocagem, perfuração, retificação, etc.)

Devido a sua vasta aplicação muitos estudos são destinados a melhorar o desempenho dos variados requisitos deficientes da impressão 3D (principalmente a precisão dimensional, propriedades mecânicas e qualidade do material impresso) (Silva; Scchelli, 2019).

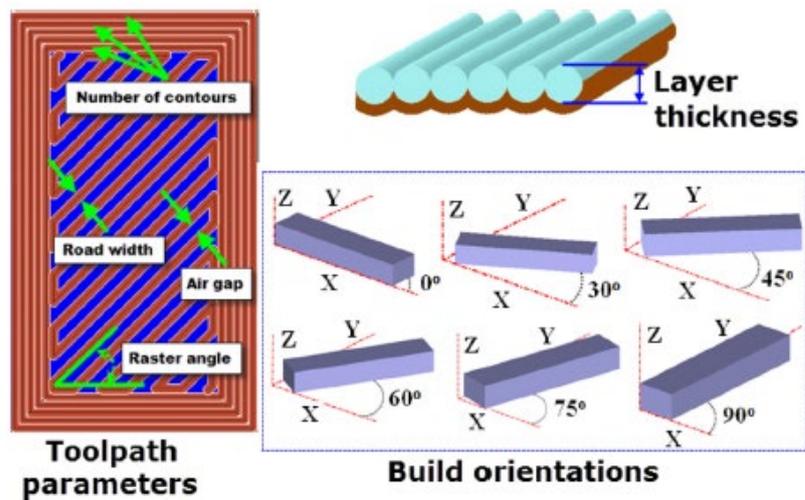
Visando sempre o aprimoramento desse processo Yaman (2018) e Mohamed et al. (2017), estudaram como diminuir o erro dimensional em furos (Figura 28) e quais parâmetros da máquina afetavam a qualidade de impressão (Figura 29).

Figura 28 - Corpos de prova impressos no estudo feito por Yaman em 2018



Fonte: Yaman (2018)

Figura 29 - Estudo feito por Mohamed em 2017



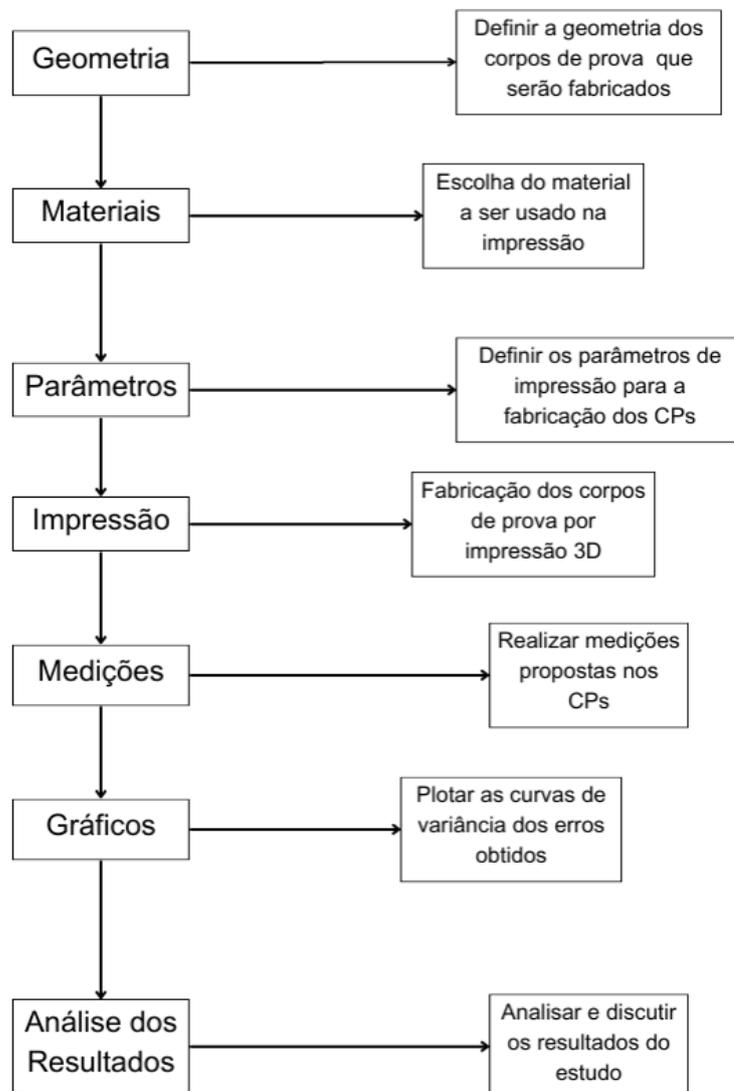
Fonte: Mohamed et al. (2017)

A conclusão destes dois estudos foi que é possível diminuir o encolhimento utilizando o próprio encolhimento com linhas e que as técnicas de RSM e otimização gráfica IV podem ser aplicadas com sucesso para obter uma melhora de peças fabricadas com MA.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo como finalidade analisar a precisão dimensional de peças produzidas por impressão 3D, foi utilizado o método de pesquisa descritiva, apresentando uma revisão bibliográfica composta de artigos e livros atuais sobre o tema. O intuito do estudo é analisar os desvios dimensionais que as peças fabricadas pela impressora terão em relação ao seu modelo CAD. O fluxograma da Figura 30 descreve as metodologias aderidas neste trabalho, onde cada etapa será melhor abordada nos tópicos seguintes.

Figura 30 - Fluxograma metodológico

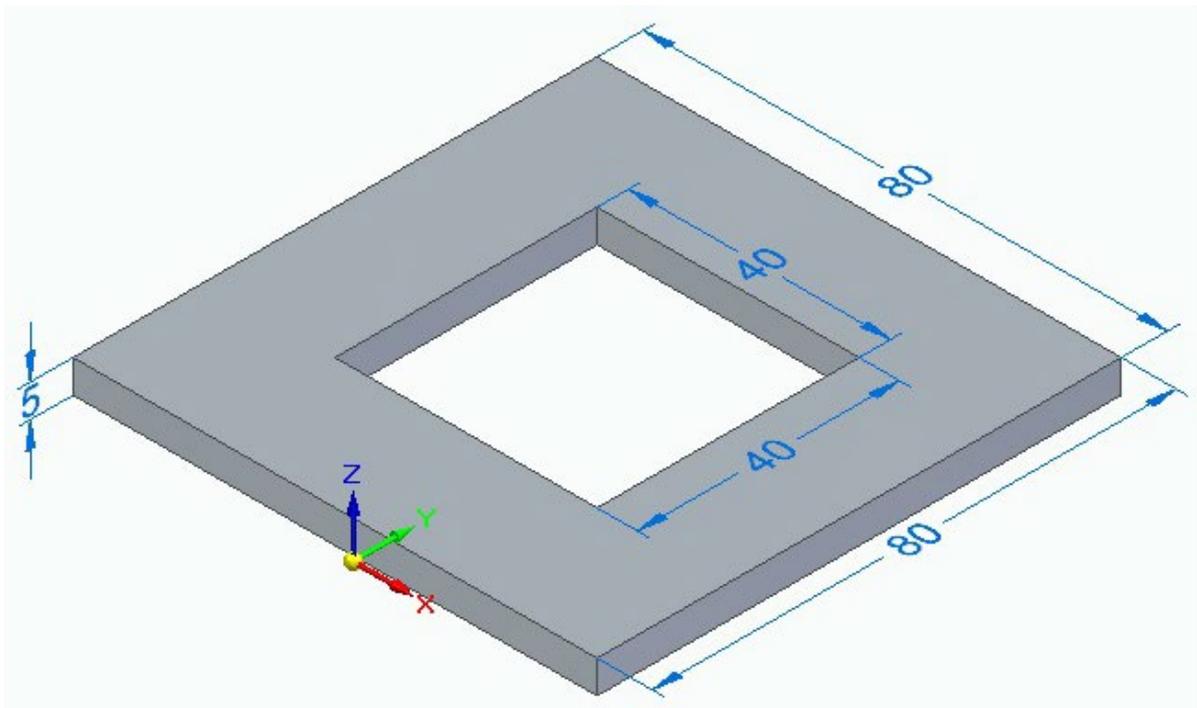


Fonte: Autor (2022)

3.1 Geometria

A geometria dos corpos de prova adotada nesse estudo é representada pela Figura 31. As peças foram impressas em 8 tamanhos diferentes, sendo 3 unidades de cada tamanho, mantendo constante a altura igual à 5mm, variando o comprimento e a largura (ambos com valores iguais) nas medidas de 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120 e 160 milímetros. O furo quadrado no centro possui lado medindo sempre a metade (50%) do lado externo. Após definida a geometria, cada peça foi desenhada com o auxílio do software CAD da Siemens, o SolidEdge®.

Figura 31 - Geometria do corpo de prova



Fonte: Autor (2023)

Dessa forma, analisaremos a confiabilidade metrológica da impressora nos eixos X e Y da peça impressa, seja nas medidas externas bem como nas medidas internas no furo quadrado.

3.2 Materiais e equipamentos

Os tópicos a seguir contemplam os materiais e equipamentos utilizados na realização deste trabalho.

3.2.1 Filamento de impressão 3D

O filamento escolhido para fabricar os corpos de prova foi o PLA, com 1,75 mm de espessura. Como já abordado nesse trabalho, o PLA é um dos filamentos mais utilizados na impressão 3D atualmente. Pelo fato de não ser tóxico e biodegradável tem diversas aplicações, dentre elas o setor da medicina onde é usado em suturas e até implantes cirúrgicos, o que torna necessária uma boa confiabilidade metrológica durante sua fabricação. A Figura 32 apresenta o filamento utilizado.

Figura 32 - Filamento de PLA



Fonte: Autor (2023)

3.2.2 Impressora 3D

Para imprimir as peças foi utilizada a impressora do laboratório da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas. Ela é uma Core XY, modelo Core H5 da GTMax3d, que possui tecnologia FDM/FFF (fabricação por filamento fundido), área de impressão (XYZ) de 300mm x 300mm x 500mm e mesa aquecida, podendo chegar até 135°C. Podemos visualizar a impressora utilizada na Figura 33. O bico de extrusão usado em todas as impressões foi de 0,4mm de diâmetro.

Figura 33 - Impressora GTMax3D H5



Fonte: GTMAX3D (2023)

3.2.3 Instrumento de medição

Para realizar as medições nos corpos de prova, que posteriormente servirão de dados para calcular a confiabilidade metrológica das peças, foi utilizado um paquímetro digital da marca Zias (Figura 34) de 200mm, com resolução de 0,01mm e exatidão de $\pm 0,02$ mm, pertencente ao laboratório da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas.

Figura 34 - Paquímetro digital



Fonte: Autor (2023)

3.2.3 Termo-higrômetro

De acordo com a Intrutherm (2022), o termo-higrômetro é um instrumento de medição que agrega duas funções principais: aferição de temperatura e de umidade relativa do ar. Alguns termo-higrômetros medem a temperatura externa também, além da interna em ambientes fechados. Diante disso, foi utilizado um termo-higrômetro Figura 35 para monitorar a umidade relativa da sala na qual estava a impressora durante todo o processo de impressão, uma vez que o PLA é higroscópico, ou seja, absorve umidade naturalmente, o que pode trazer problemas na qualidade da impressão.

Figura 35 - Termo-higrômetro

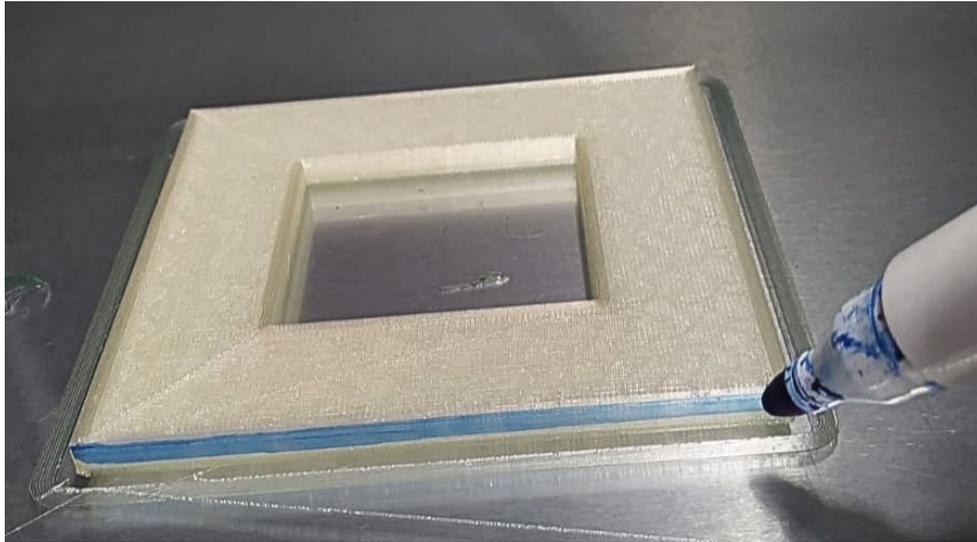


Fonte: Autor (2023)

3.2.4 Marcador permanente

Com o auxílio de um marcador permanente podemos pintar a face frontal da peça impressa (Figura 36) afim de referenciar e padronizar os lados que serão realizadas as medições. Além disso, numerar as peças por ordem de fabricação com intuito de facilitar a identificação de cada uma.

Figura 36 - Referenciando a face frontal



Fonte: Autor (2023)

3.3 Parâmetros de impressão

Os parâmetros de impressão usados nesse trabalho (Tabela 3) foram estabelecidos a partir de testes, visando um equilíbrio entre a economia de material, uma boa rigidez para realizar as medições, suficiente para que não houvesse deformação na peça ao posicionar o paquímetro, bem como o acabamento superficial, minimizando a ocorrência de imperfeições na superfície da peça, que pudessem contribuir nos erros de medição.

Diante disso, para os demais parâmetros não citados, foram usados os valores padrão da impressora. Todos os parâmetros relacionados a impressão foram mantidos constantes para todas as peças.

Tabela 3 - Parâmetros de impressão

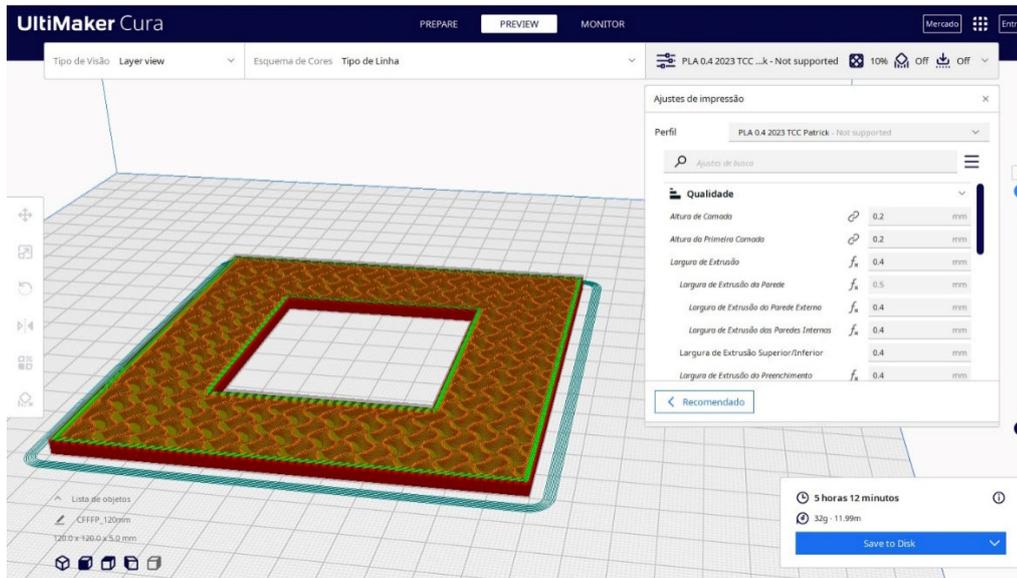
Parâmetro	Valor estabelecido
Altura de camada	0,2 mm
Largura de extrusão	0,4 mm
Número de filetes da parede	4
Ordem de parede	De dentro para fora
Camadas da superfície superior	4
Camadas da superfície inferior	5
Padrão das superfícies superior e inferior	Linhas
Direção de linha superior/inferior	[0,90]
Densidade do preenchimento	10%
Tipo de preenchimento	Giróide
Temperatura de impressão	210°C
Temperatura da mesa de impressão	60°C
Velocidade de impressão	20 mm/s
Refrigeração	Habilitada 100%
Diâmetro do bico extrusor	0,4 mm
Diâmetro do filamento	1,75 mm

Fonte: Autor (2023)

3.4 Impressão dos corpos de prova

Para imprimir as peças foi necessário importar os desenhos CAD feitos no SolidEdge em um software fatiador. Esse vai gerar o G-Code, que é a linguagem de programação da impressora. Para isso foi usado o software Ultimaker Cura® (Figura 37).

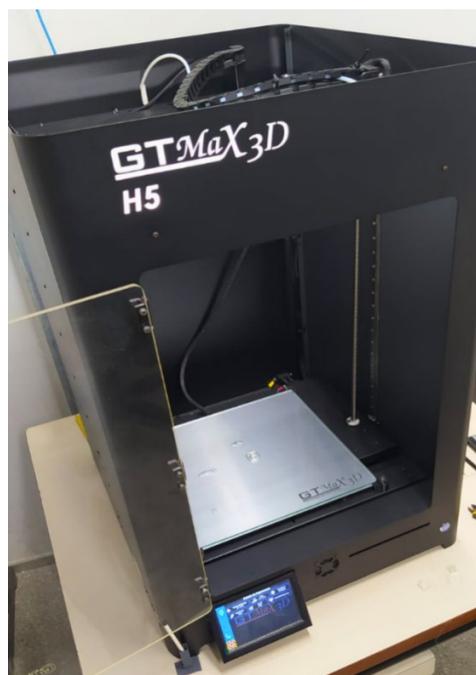
Figura 37 - Interface do software Ultimaker Cura



Fonte: Autor (2023)

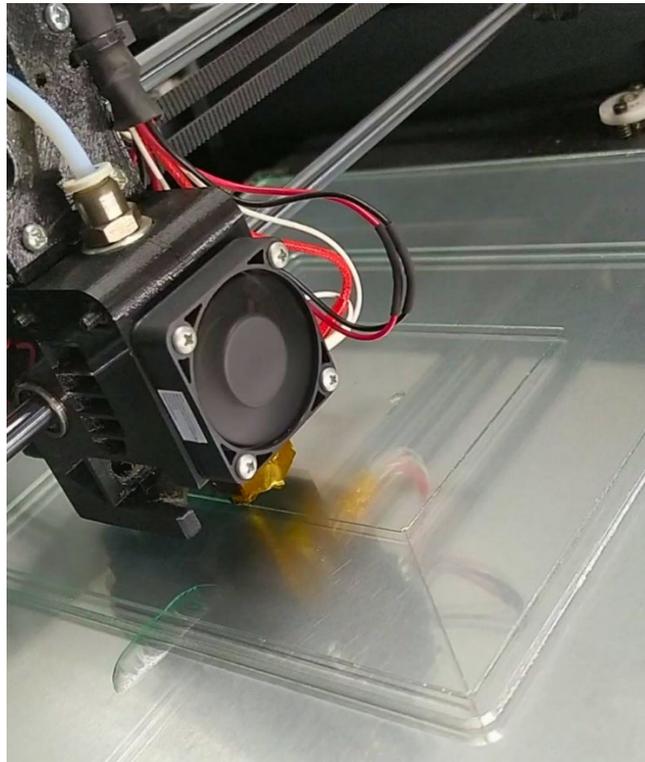
Após gerar o arquivo G-Code, preparamos a impressora para começar a imprimir inserindo o filamento de PLA, abrindo a porta e a tampa superior (Figura 38), o que é necessário para impressão com PLA. Logo após, importamos o arquivo na impressora para dar início à impressão (Figura 39 e Figura 40). Assim, foram impressas as 24 peças repetindo o mesmo processo.

Figura 38 - Impressora com a tampa superior e porta abertas



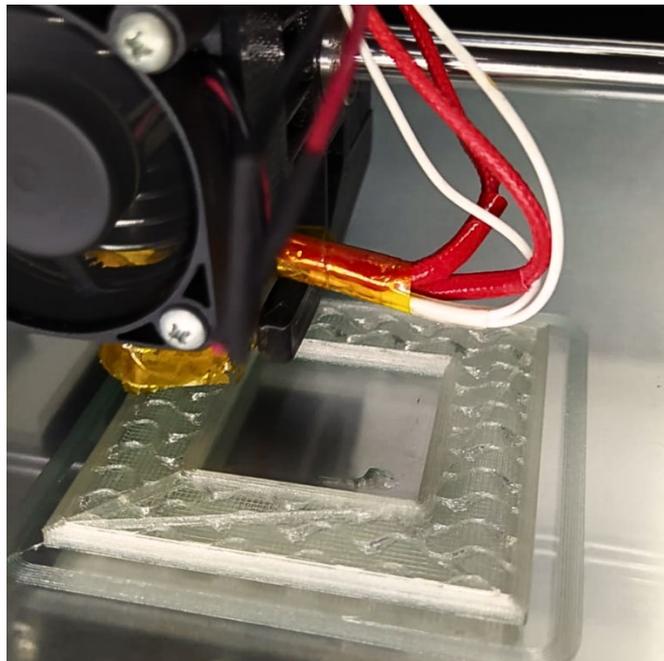
Fonte: Autor (2023)

Figura 39 - Primeira camada da peça de 160mm



Fonte: Autor (2023)

Figura 40 - Impressão da peça de 40mm

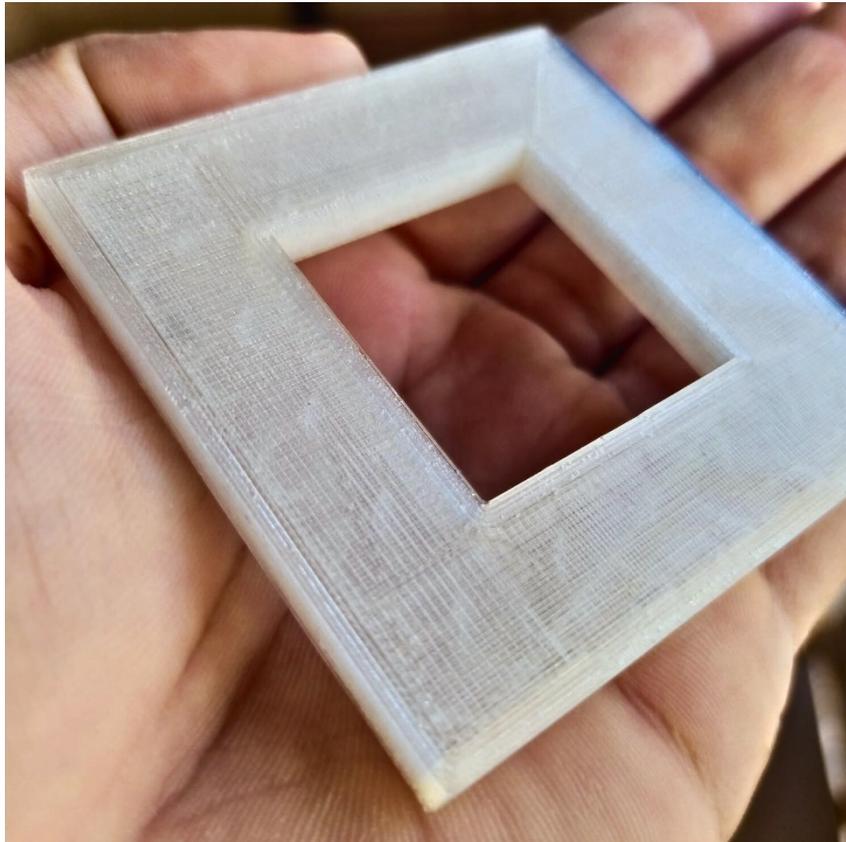


Fonte: Autor (2023)

3.5 Análise qualitativa dos CPs impressos

Concluído o processo de impressão, foi de extrema importância realizar uma análise visual das peças. Nessa inspeção pode ser constatada alguma irregularidade na peça produzida, principalmente no acabamento superficial, durante o processo de impressão. Dessa forma, podemos minimizar a ocorrência de alguma imperfeição que pudesse influenciar na precisão dimensional da peça no momento da medição.

Figura 41 - Detalhe da superfície do corpo de prova pronto

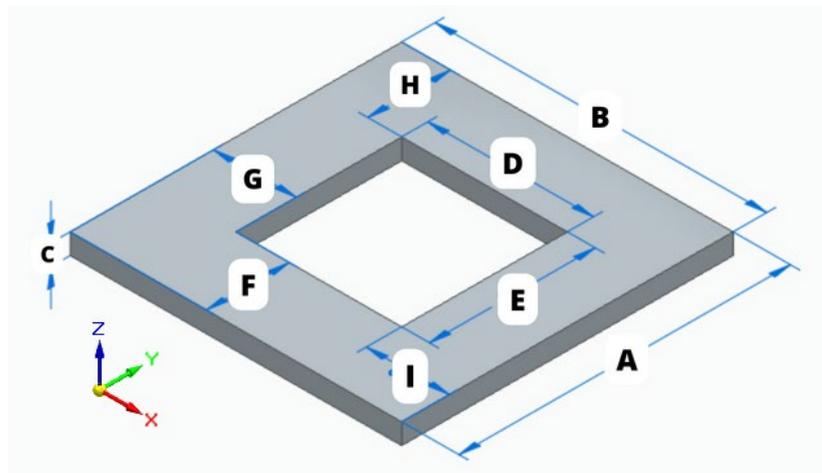


Fonte: Autor (2023)

3.6 Medições dos corpos de prova

Com o auxílio do paquímetro digital, foram analisadas 9 dimensões de cada peça, sendo A, B, C, D, E, F, G, H e I, assim como mostrado na Figura 42. Cada uma delas foi medida 3 vezes, todas nas mesmas coordenadas da peça, sempre no centro do lado que está sendo medido. Com isso, totalizando 27 medições em cada corpo de prova. Logo, para cada tamanho foi realizado um total de 81 medições.

Figura 42 - Lados que foram medidos



Fonte: Autor (2023)

Todas as medidas realizadas foram sendo armazenados em uma tabela. A Figura 43 mostra o modelo de tabela aonde foram registrados os valores das medições feitas.

Figura 43 - Tabela com registros das medições dos CPs de 10mm

Peça 10-1				
Lado	VVC	Medida		
		1	2	3
A	10	10,08	9,98	10,00
B	10	10,06	10,03	10,03
C	5	5,07	5,06	5,07
D	5	4,94	4,93	4,96
E	5	4,86	4,89	4,92
F	2,5	2,60	2,55	2,58
G	2,5	2,58	2,57	2,59
H	2,5	2,59	2,61	2,60
I	2,5	2,55	2,57	2,58

Peça 10-2				
Lado	VVC	Medida		
		1	2	3
A	10	10,00	9,98	10,05
B	10	10,00	10,00	10,03
C	5	5,05	5,08	5,07
D	5	5,02	5,02	4,99
E	5	4,99	4,99	4,98
F	2,5	2,61	2,57	2,54
G	2,5	2,55	2,54	2,54
H	2,5	2,61	2,60	2,57
I	2,5	2,58	2,59	2,58

Peça 10-3				
Lado	VVC	Medida		
		1	2	3
A	10	10,02	10,02	10,00
B	10	10,01	9,99	9,99
C	5	5,11	5,10	5,07
D	5	4,99	4,95	4,99
E	5	4,99	4,98	4,99
F	2,5	2,57	2,60	2,53
G	2,5	2,53	2,61	2,54
H	2,5	2,59	2,57	2,62
I	2,5	2,58	2,55	2,53

Fonte: Autor (2023)

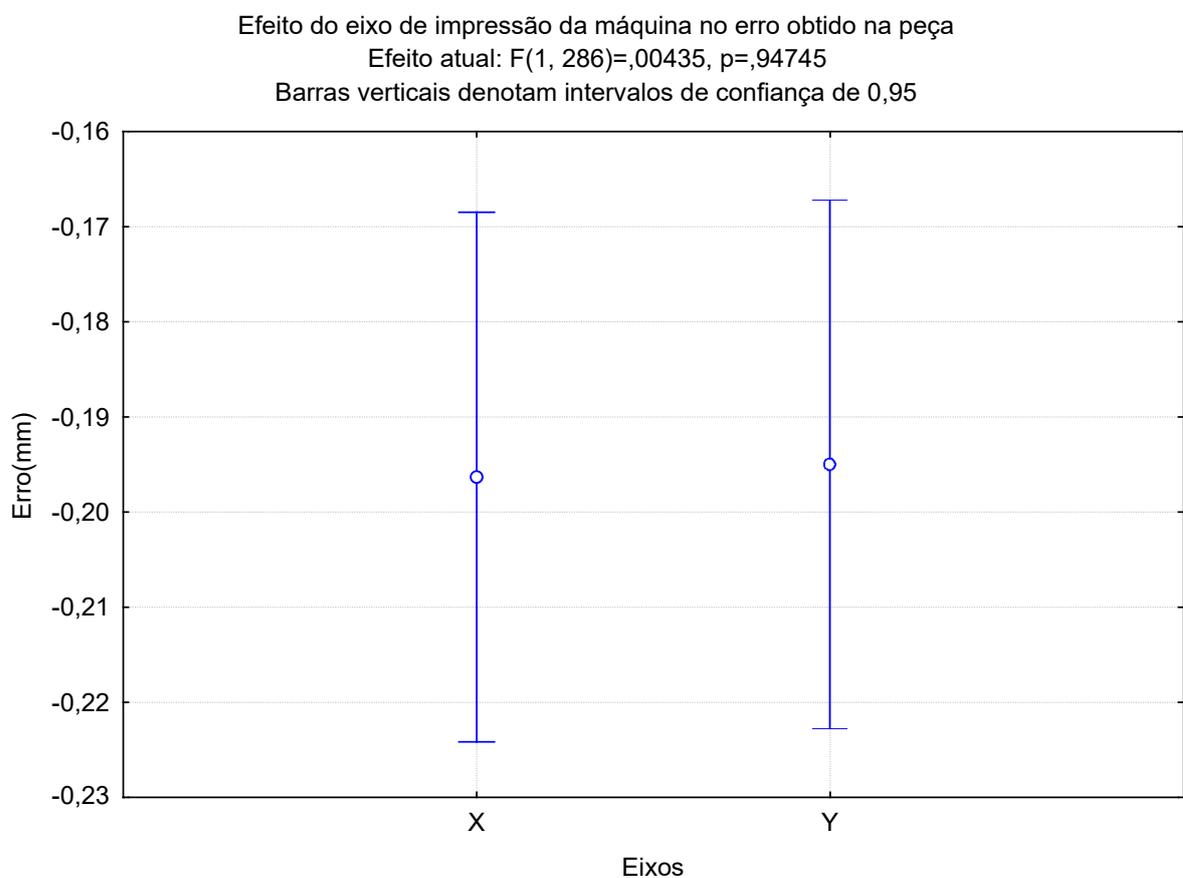
Através da ferramenta de Análise de Variância (ANOVA), foi possível elaborar gráficos que possibilitassem a análise do quanto o tamanho da peça influencia na precisão dimensional da impressora 3D. Todos os gráficos gerados utilizaram um intervalo de confiança de 95%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.2 Análise do erro nos eixos X e Y

Após serem realizadas todas as medições, a primeira análise a ser feita é se existe algum erro associado ao sentido de impressão da máquina, ou seja, se existe maior precisão na impressão de um eixo em relação ao outro. A Figura 44 mostra a análise de variância dos erros associados ao eixo de impressão.

Figura 44 - ANOVA dos erros com relação aos eixos X e Y de impressão



Fonte: Autor (2023)

A partir dessa análise, obtemos um nível de significância $p \gg 0,05$, o que nos leva a concluir que, estatisticamente, não há diferença significativa entre a precisão dimensional dos eixos X e Y de impressão na fabricação dos CPs.

4.3 Análise do erro nas medidas externas dos CPs

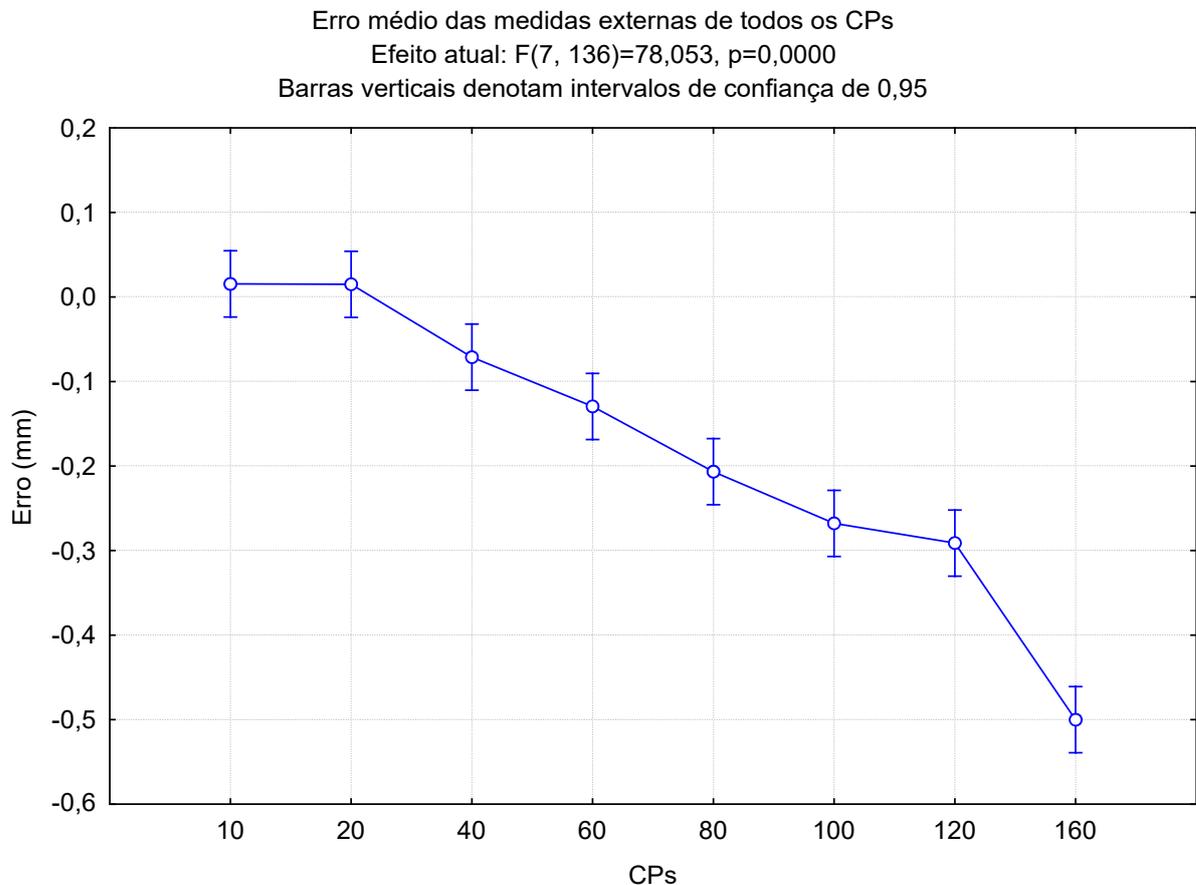
Uma vez constatado que não há diferença significativa entre os erros de ambos os

eixos de impressão, partimos para uma análise do erro de cada corpo de prova em relação às medidas de seus lados externos (A e B).

4.3.1 Erro médio das medidas externas

A Figura 45 traz uma análise de variância feita a partir dos erros médios das medidas externas dos CPs de todos os tamanhos.

Figura 45 - ANOVA dos erros médios das medidas externas dos CPs



Fonte: Autor (2023)

Por meio da ANOVA é possível observar a influência do tamanho do corpo de prova no erro dimensional. Quanto maior for o tamanho da peça, maior é o erro associado às medidas externas dela. A diferença entre os erros de cada tamanho é considerada estatisticamente significativa uma vez que o nível de significância $p < 0,05$.

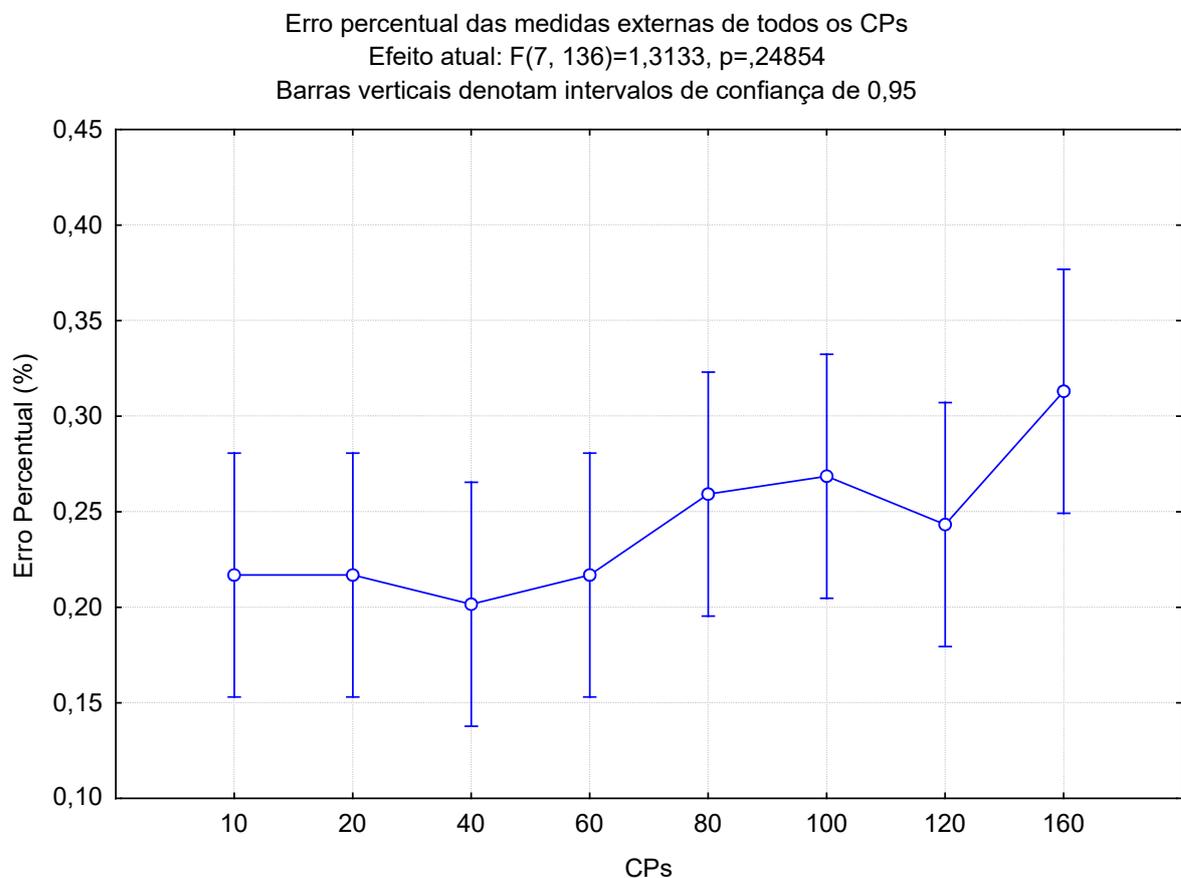
É possível observar, também, uma tendência de erro negativo a partir do CP de 40mm, sendo, em módulo, crescente de acordo com o aumento das dimensões da peça. Diante disso, temos uma propensão a ter peças com dimensões externas ligeiramente menores em

comparação ao projeto, o que pode estar associado à retração do material durante o resfriamento da peça.

4.3.2 Erro percentual das medidas externas

A Figura 46 ilustra o comportamento, através da análise de variância, do erro, das medidas externas, de forma percentual em relação a cada tamanho dos corpos de prova.

Figura 46 - ANOVA dos erros percentuais das medidas externas



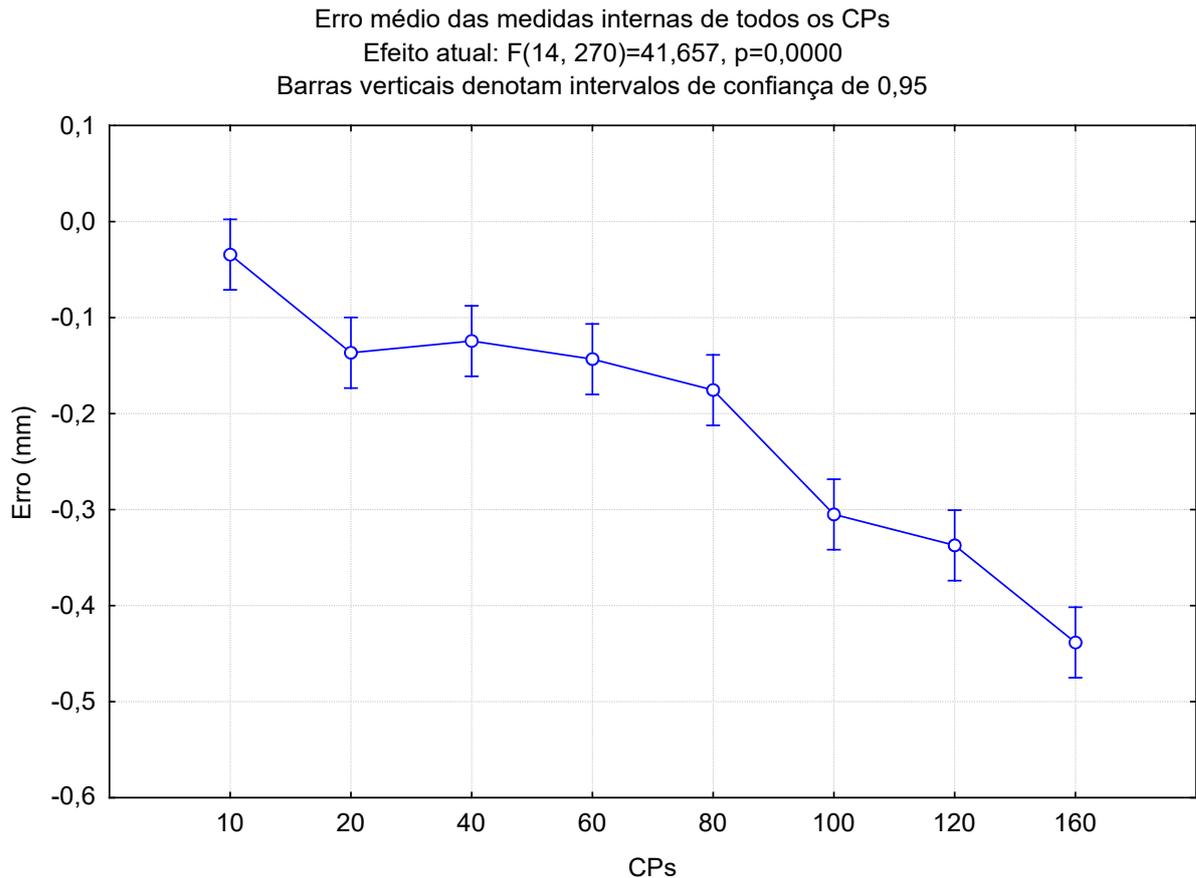
Fonte: Autor (2023)

De acordo com a análise de variância apresentada na Figura 45, podemos observar que apesar de o erro médio apresentar maior magnitude para os CPs de maiores dimensões, ao se fazer uma relação proporcional entre o erro e o tamanho da peça, através do percentual de erro (Figura 46), temos resultados similares para todos os tamanhos de CPs. O que é constatado pelo nível de significância $p \gg 0,05$, evidenciando que estatisticamente não há uma diferença significativa.

4.4 Análise do erro nas medidas internas dos CPs

Por meio da análise de variância também é possível analisar o comportamento dos erros das medidas internas da peça impressa (lados D e E). A Figura 47 mostra o resultado da ANOVA para essas medidas.

Figura 47 - ANOVA dos erros médios das medidas internas dos CPs



Fonte: Autor (2023)

Assim sendo, podemos observar um comportamento similar ao gráfico das medidas externas, com erro negativo e de forma crescente, em módulo, de acordo com o aumento do tamanho da peça, bem como uma diferença significativa entre eles ($p < 0,05$). Esse resultado é de suma importância uma vez que diversas peças fabricadas atualmente são projetadas para trabalhar em conjunto com outra peça, seja com interferência ou com folga. Logo, esse erro deve ser levado em consideração ao projetar um componente com fabricação por impressão 3D.

Diante dos resultados das medidas externas e internas constatamos que ambas possuem semelhança no comportamento dos erros em relação aos tamanhos das peças. Esse fato, pode ser associado ao deslocamento do cabeçote extrusor da impressora, que pode

apresentar uma maior precisão dimensional para pequenos deslocamentos e, conseqüentemente, para deslocamentos maiores ser menos preciso, seja por característica de construção ou qualquer outro motivo, este a ser estudado.

4.5 Curva de Erros

Para traçar a curva de erros para os corpos de prova produzidos nesse estudo, faz-se necessário calcular a tendência (Equação 2) a partir da média das indicações (\bar{I}). Uma vez que já foi evidenciado que não existe diferença significativa entre o erro quanto ao sentido de impressão, X e Y, podemos usar as medições do lado A e do lado B de forma conjunta, aumentando assim a amostra e obtendo um resultado mais satisfatório. O valor obtido para a tendência corresponde à parcela sistemática do erro, ou seja, a parte previsível do erro. Através dela obtemos também a correção (Equação 3) para esse erro sistemático.

A outra parte do erro, a parcela aleatória, é determinada a partir do cálculo da incerteza padrão (Equação 4) e da repetitividade (Equação 6), que é a faixa dentro da qual são esperados os erros aleatórios das indicações.

A Tabela 4 mostra os valores obtidos após calcular a tendência, a incerteza padrão e a repetitividade para os corpos de prova de todos os tamanhos.

Tabela 4 – Tendência (Td), Incerteza padrão (u) e Repetitividade (Re) para cada CP

Valor Verdadeiro Convencional (VVC)	Média das indicações (\bar{I})	Tendência (Td)	Correção (C)	Graus de liberdade (v)	Incerteza Padrão (u)	Repetitividade (Re)
10	10,02	0,02	-0,02	17	0,0008	0,0018
20	20,05	0,05	-0,05	17	0,0035	0,0080
40	39,95	-0,05	0,05	17	0,0055	0,0128
60	59,87	-0,13	0,13	17	0,0046	0,0105
80	79,79	-0,21	0,21	17	0,0216	0,0498
100	99,75	-0,25	0,25	17	0,0058	0,0133
120	119,73	-0,27	0,27	17	0,0122	0,0282
160	159,49	-0,51	0,51	17	0,0050	0,0116

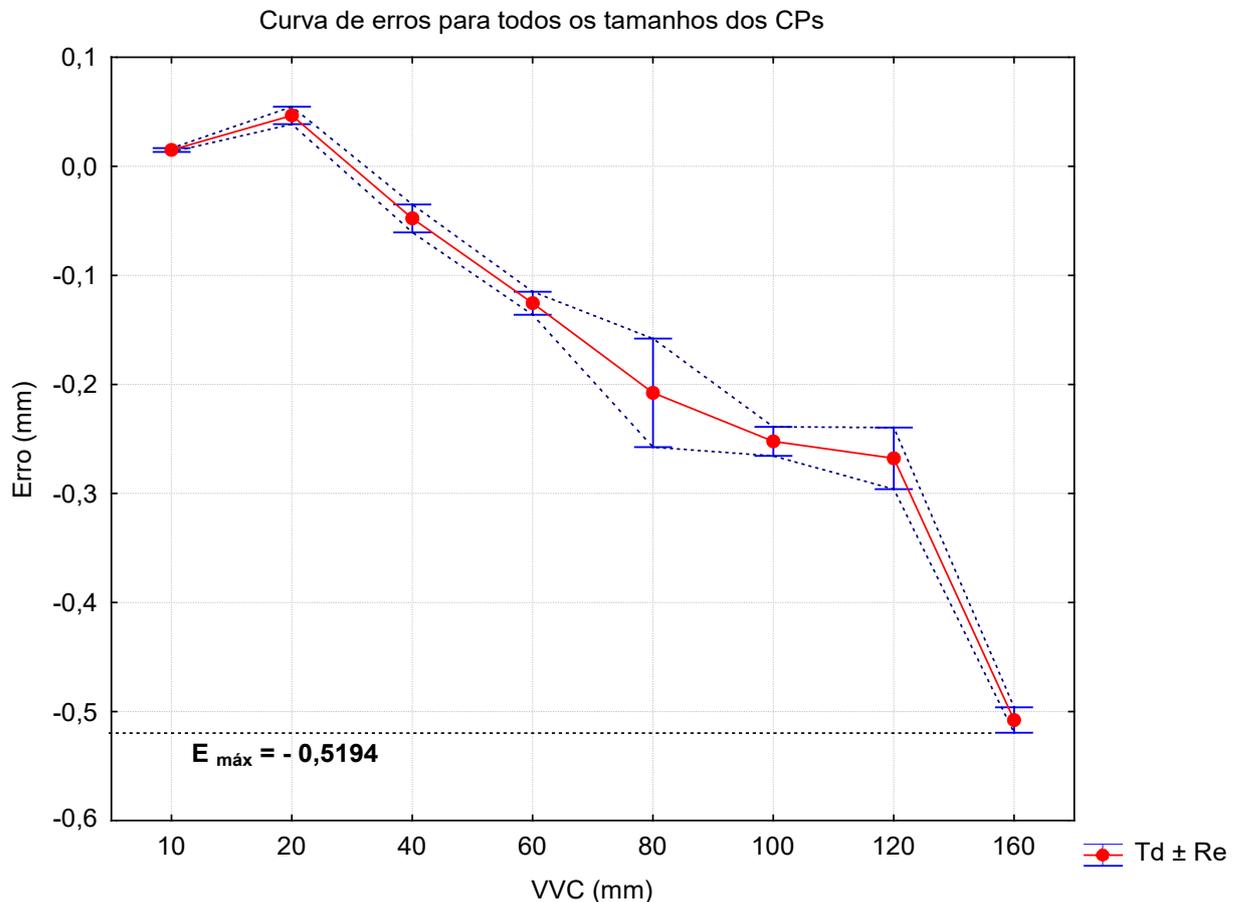
Fonte: Autor (2023)

Essa tabela, além de mostrar variáveis necessárias para a construção da curva de erro, ela é de suma importância já que traz a variável de Correção (C), que representa, como o

próprio nome já diz, a correção que deve ser aplicada na hora de imprimir, afim de eliminar o erro sistemático (parcela previsível do erro), restando apenas o erro aleatório, o qual não podemos prever.

A partir disso, é possível plotar a curva de erros onde a linha central corresponde à tendência (T_d), a linha superior representa o limite superior da faixa que contém os erros, calculado pela tendência somada à repetitividade ($T_d + Re$), e a linha inferior equivale ao limite inferior da faixa que contém os erros, sendo a tendência menos a repetitividade ($T_d - Re$). A Figura 48 mostra a curva de erros gerada para todos os tamanhos dos CPs.

Figura 48 - Curva de Erros



Fonte: Autor (2023)

Após plotar a curva de erros podemos observar que apenas os CPs de 10 e 20mm apresentaram erros positivos, ou seja, uma tendência de a peça produzida ser ligeiramente maior do que no projeto CAD. Ao contrário destes, todos os demais tamanhos apresentaram erros

negativos, demonstrando uma tendência de a peça fabricada ser ligeiramente menor do que a dimensão projetada.

Além disso, vemos que o erro sistemático tende a aumentar, em módulo, proporcionalmente ao aumento de tamanho do corpo de prova. Com isso, ponto de erro máximo, destacado na curva, ocorre na peça de 160mm.

Apesar de apresentar um grande erro sistemático, a peça de 160mm tem pouca dispersão. Ao contrário dela, a peça de 80mm apresenta a maior dispersão dentre todos os CPs impressos, ou seja, apresenta o maior erro aleatório.

Destaca-se, também, o corpo de prova de 10mm como sendo o de menor erro, tanto sistemático quanto aleatório. Isso vai de encontro com o que foi falado anteriormente sobre o cabeçote extrusor apresentar uma maior precisão em pequenos deslocamentos.

4.6 Possíveis causas de erro dimensional

Perante os resultados obtidos, podemos destacar alguns fatores que podem possivelmente terem causados os erros dimensionais nos CPs. Além do erro inerente associado ao sistema de medição, existem outros pontos importantes a serem considerados.

O primeiro deles é o deslocamento do cabeçote extrusor, uma vez que, diante dos resultados, apresenta-se ser mais preciso para pequenos deslocamentos, como na fabricação da peça de 10mm, e para deslocamentos maiores apresentar uma menor precisão, culminando no maior erro sistemático no maior CP (160mm).

Outro fator importante a ser levado em consideração, é a possível retração do material durante o resfriamento da peça, fazendo com que os CPs apresentem medidas ligeiramente menores do que o projetado, o que foi constatado nesse estudo tanto para medidas externas, como também para medidas internas.

Além disso, é indispensável associarmos os erros obtidos a máquina utilizada na impressão das peças, uma vez que a impressora é composta por inúmeros componentes mecânicos como rolamentos, correias, fusos, entre outros. Cada um desses componentes da máquina está sujeito a desgaste, falta de lubrificação, defeitos, e tudo isso pode acabar gerando um erro indesejado na fabricação.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a precisão dimensional de peças fabricadas por impressão 3D, mais precisamente pelo processo FDM (Fused Deposition Modeling), utilizando o filamento de PLA (Ácido Poli Lático), verificando, principalmente, o efeito das dimensões do corpo de prova no erro gerado na impressão, afim de obter resultados que contribuam na escolha da correção aplicada ao realizar a impressão.

Diante dos resultados e discussões apresentadas nesse trabalho, foi possível concluir que:

A partir de uma análise qualitativa, de forma visual, os corpos de prova apresentaram um ótimo acabamento superficial, o que minimizou o risco de um erro de medição devido alguma irregularidade na superfície do CP.

Por meio da análise de variância (ANOVA), foi possível obter resultados satisfatórios durante todo o estudo. Um deles foi a evidência que o sentido de impressão, X e Y, não influenciou, estatisticamente, de forma significativa no erro dimensional dos CPs.

Além disso, foi constatada, estatisticamente, a influência das dimensões da peça com relação ao erro produzido na fabricação, tanto nas medidas externas, quanto nas medidas internas dos CPs. Quanto maior era o corpo de prova, maior foi o erro dimensional observado nele. Ademais, foi possível identificar uma tendência de erro negativo a partir do CP de 40mm, indicando que essas peças fabricadas tendem a ser ligeiramente menores do que as dimensões projetadas.

Também através do ANOVA, pôde-se fazer uma análise proporcional do erro em relação ao tamanho da peça produzida. Isso se deu por meio do erro percentual, de forma que a partir dele podemos evidenciar, estatisticamente, que de forma proporcional, os erros de todos os CPs são bem aproximados, uma vez que o nível de significância $p \gg 0,05$. Esse resultado é interessante pois de forma proporcional, o erro obtido é insignificante, estatisticamente.

Paralelamente, a curva de erros foi plotada após calcular a tendência, incerteza padrão e a repetitividade, a partir das indicações obtidas com as medições feitas nos corpos de prova. Na curva foi possível identificar o ponto de erro máximo nesse estudo, que ocorreu na peça de 160mm, que possui o maior erro sistemático, apesar de apresentar pouca dispersão. Já a peça de 80mm foi a que apresentou a maior dispersão, ou seja, o maior erro aleatório, dentre todos os CPs. Destacou-se também o CP de 10mm por apresentar o menor erro tanto sistemático quanto aleatório, ou seja, o mais próximo de zero e com a menor dispersão nas indicações.

Outro ponto importante a ser ressaltado, é que através da Tabela 4, podemos

catalogar as correções a serem aplicadas para essas condições de impressão, visando eliminar o erro sistemático, restando apenas o erro aleatório, o qual não podemos prever, apenas estabelecer a faixa dentro da qual são esperados os valores (repetitividade).

Por fim, podemos concluir que o objetivo proposto no trabalho foi alcançado, de forma a contribuir com diversos campos de atuação da engenharia, uma vez que muitas peças são fabricadas com o propósito de trabalhar em conjunto acoplada em outra peça, seja com interferência ou folga, logo o estudo dos erros dimensionais é de suma importância para projetos que visam utilizar peças fabricadas por impressão 3D com esses acoplamentos.

6 SUJESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a precisão dimensional de uma peça fabricada por impressão 3D quanto à altura da peça, ou seja, quanto ao eixo Z de impressão da máquina.
- Analisar a confiabilidade metrológica para outros matérias de impressão, como o PETG, por exemplo.
- Analisar a precisão dimensional de corpos de prova produzido por outros métodos de impressão como o SLA, por exemplo.
- Realizar um estudo da influência dos parâmetros de impressão na precisão dimensional das peças produzidas.
- Realizar um estudo para a mesma geometria, imprimindo a peça na orientação vertical.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. T. F. DE. Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta. fev. 2017.
- AKKARI, A. C. S. **Metrologia e controle geométrico**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional, 2017.
- ALBERTAZZI, A. G. JR.; SOUSA, A. R. DE. **Metrologia científica e industrial**. 1ª Edição ed. Barueri: Manole, 2008.
- ANTONELLI, L. A. IMPRESSORA 3D DE BAIXO CUSTO. 2019.
- BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociais**. 7 ed ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2010.
- BELL, C. **3D Printing with Delta Printers**. [s.l.] Apress, 2015.
- BERWANGER, E. **As 9 Melhores Impressoras 3D para comprar em 2023**. Disponível em: <https://geek360.com.br/melhores-impressoras-3d/>. Acesso em: 7 set. 2023.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gest. Tecnol. Inov**, v. 01, n. 3, 2017.
- BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. 31 set. 2011.
- CAMPOS, L. V. D. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO NÍVEL E DO TIPO DE PREENCHIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS POR IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO O MATERIAL ABS. 2022.
- CAMPOS, R.; SILVA, E. A. DA. A IMPORTÂNCIA DA METROLOGIA NA GESTÃO EMPRESARIAL E NA COMPETITIVIDADE DO PAÍS. 2001.
- CANEVO. **Volkswagen Metrology Training**. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/804877764643856929/>. Acesso em: 27 mar. 2022.
- CARDOSO, S. **Tipos de Impressão 3D: conheça os seus benefícios!** Disponível em: <https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/>. Acesso em: 9 ago. 2022.
- CLARK, E. **3D Printer Filament Types And Uses Comparison Guide (Sep. 2023)**. Disponível em: <https://www.allthat3d.com/3d-printer-filament/>. Acesso em: 18 set. 2022.
- Conheça os diferentes tipos de materiais para impressão 3D FDM**. 3DFACIL. Disponível em: www.impressao3dfacil.com.br/conheca-os-diferentes-tipos-de-materiais-para-impressao-3d-fdm/. Acesso em: 29 out. 2022.
- CONMETRO. **Resolução do Conmetro nº 1 – Diretrizes Estratégicas para a Metrologia Brasileira 2018-2022**. | ASMETRO-SI. Disponível em: <https://asmetro.org.br/portalsn/2017/07/28/resolucao-do-conmetro-no-1-diretrizes-estrategicas-para-a-metrologia-brasileira-2018-2022/>. Acesso em: 18 out. 2023.
- COSTA, L. H. W. **Manufatura aditiva: conheça a tecnologia e suas vantagens - CERTI Insights**. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/manufatura-aditiva-conheca-a-tecnologia-e-suas-vantagens/>. Acesso em: 7 set. 2023.
- CREALITY3D. **CR-6 SE 3D Printer**. Disponível em: <https://www.creality.com/products/cr-6-se-3d-printer>. Acesso em: 1 set. 2022.

Decidindo a altura de camada para Impressora 3D. 3DFILA. Disponível em: <https://3dfila.com.br/blog/decidindo-a-altura-de-camada-para-impressora-3d/>. Acesso em: 26 out. 2022.

ELECTROFUN. Problemas Impressão 3D - Extrusão inconsistente. Disponível em: <https://www.electrofun.pt/blog/problemas-impressao-3d-extrusao-inconsistente/>. Acesso em: 29 out. 2022.

ENGIPRINTERS. Impressão 3D X Usinagem CNC: Qual é O Melhor Para Prototipagem?. Disponível em: <https://engiprinters.com.br/impressao-3d-x-usinagem-cnc-qual-e-o-melhor-para-prototipagem/>. Acesso em: 31 ago. 2022.

ENGIPRINTERS. O Que é E Como Funciona A Impressão 3D FDM? Disponível em: <https://engiprinters.com.br/impressao-3d-fdm-o-que-e-e-como-funciona-d58/>. Acesso em: 28 mar. 2023.

ENGIPRINTERS. O Que é E Como Funciona A Impressão 3D FDM? Disponível em: <https://engiprinters.com.br/impressao-3d-fdm-o-que-e-e-como-funciona-d58/>. Acesso em: 14 set. 2022.

FABLAB. GUIA: A tecnologia de impressão 3D. Disponível em: <https://medium.com/bsbfablab/guia-a-tecnologia-de-impress%C3%A3o-3d-2d8b6b8cb5e5>. Acesso em: 31 ago. 2022.

FERNANDES, J. F. M. Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA. [s.l: s.n.].

FERRAMENTAL. Um pouco da história da Manufatura Aditiva. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/historia-da-manufatura-aditiva/>. Acesso em: 8 ago. 2022.

FERREIRA, A. C. et al. A IMPORTÂNCIA DA ESTATÍSTICA NA METROLOGIA – ERRO DE MEDIÇÃO. v. Vol 2, 2018, 2018.

FERREIRA, S. Impressão 3D de Peças Automotivas: Presente na F1 e Cada Vez Mais Próxima das Montadoras. Disponível em: <https://rescanm.com.br/impressao-3d-de-pecas-automotivas-nas-montadoras/>. Acesso em: 26 mar. 2023.

FLYNT, J. What Is the Optimal Ambient Temperature for 3D Printing? Disponível em: <https://3dinsider.com/ambient-temperature-3d-printing/>. Acesso em: 29 out. 2022.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies. 2ª ed. New York, NY: Springer New York, 2015.

GTMAX3D. Impressora 3D Pro - GTMax3D Core H5 + Software Simplify3D - GTMax3D. Disponível em: https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-h5-simplify3d?gclid=Cj0KCCQiA_bieBhDSARIsADU4zLc6LVYUi9ZopiNEUg0z5z0Kd7TaiUBVGj0a9rR19t-cY9UmLnaw0xAaAv1XEALw_wcB. Acesso em: 26 mar. 2023.

GUEY, W. Tipos de materiais de Impressão 3D e suas aplicações. Disponível em: <https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-materiais-de-impress%C3%A3o-3d-e-suas-aplica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 18 set. 2022.

HONGYAO, S.; XIAOXIANG, Y.; JIANZHONG, F. Research on the flexible support platform for fused deposition modeling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 97, n. 9–12, p. 3205–3221, 23 ago. 2018.

Impressão 3D na indústria: principais usos e benefícios. 3DLAB. Disponível em: <https://3dlab.com.br/impressao-3d-na-industria/>. Acesso em: 31 ago. 2022.

Impressões 3D mais resistentes: influência da altura das camadas. 3DLAB. Disponível em: <https://3dlab.com.br/impressoes-3d-mais-resistentes/>. Acesso em: 26 out. 2022b.

INFOENG. **Você sabe o que é e pra que serve a Metrologia?** Disponível em: <https://infoeng.com.br/conteudo/voce-sabe-o-que-e-e-para-que-serve-a-metrologia.html>. Acesso em: 27 mar. 2023.

INMETRO. **EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO POR LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO.** 2011.

INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia. 2012.

INSTRUTHERM. **O que é e para que serve o termo-higrômetro?** Disponível em: <https://www.instrutherm.com.br/blog/o-que-e-e-para-que-serve-o-termo-higrometro>. Acesso em: 28 mar. 2023.

JORNALELITE. **Tipos de Impressoras 3D FDM: Delta, Cartesiano, Polar e Braço Robótico.** Disponível em: <https://www.jornaltropadeelite.com.br/tipos-de-impressoras-3d-fdm-delta-cartesiano-polar-e-braco-robotico/>. Acesso em: 1 set. 2022.

KIANIAN, B. Wohlers Report 2016: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report : Chapter title: The Middle East. **Wohlers Report 2016**, p. 355, 5 abr. 2016.

KONDO, H. **The Best 3D Print Speed Settings for PLA & More.** Disponível em: <https://all3dp.com/2/3d-printing-speed-optimal-settings/>. Acesso em: 29 out. 2022.

KURMANN, C. **Infill na Impressão 3D: o que é.** Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/infill-na-impressao-3d-o-que-e/>. Acesso em: 28 out. 2022.

LIRA, F. A. DE. **Metrologia Dimensional: Técnicas de Medição e Instrumentos para Controle e Fabricação Industrial.** São Paulo: Érica, 2015.

MAISPOLIMEROS. **Impressão 3D na Indústria 4.0: Entenda essa Revolução Tecnológica.** Disponível em: <https://maispolimeros.com.br/2020/01/30/impressao-3d/>. Acesso em: 9 dez. 2022.

MEDE. **A origem da metrologia.** Disponível em: <https://www.medeinstrumentos.com.br/a-origem-da-metrologia/>. Acesso em: 19 set. 2022.

MERCADO LIVRE. **Aparelho Medidor De Pressão Arterial Digital De Braço G-tech La800.** Disponível em: https://www.mercadolivre.com.br/aparelho-medidor-de-preso-arterial-digital-de-braco-g-tech-la800/p/MLB19444422?pdp_filters=category:MLB269517#searchVariation=MLB19444422&position=8&search_layout=stack&type=product&tracking_id=1804f552-8d7a-4cec-ac75-392b3e07837d. Acesso em: 8 set. 2023.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Experimental investigation for dynamic stiffness and dimensional accuracy of FDM manufactured part using IV-Optimal response surface design. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 4, p. 736–749, 20 jun. 2017.

MUV. **Quais são os materiais utilizados na Impressão 3D?** Disponível em: <https://blog.muv.ind.br/materiais-impressao-3d/>. Acesso em: 18 set. 2022.

NETO, J. C. DA S. Estudo do erro sistemático ou tendência e repetitividade de um instrumento de medição. 2015.

NOVASILK. **Impressora 3D Systems ProX SLS 500.** Disponível em: <https://novasilk.com.br/impressora-3d-systems/prox-sls-500/>. Acesso em: 9 ago. 2022.

O'CONNELL, J. **3D Printing Infill: The Basics for Perfect Results.** Disponível em: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>. Acesso em: 29 out. 2022.

O que é o Preenchimento de uma Impressão 3D?. 3DPORTUGAL. Disponível em: <https://impressao3dportugal.pt/o-que-e-o-preenchimento-de-uma-impressao-3d/>. Acesso em: 28 out. 2022.

PAIVA, T. N.; NOGUEIRA, C. C. ESTUDO COMPARATIVO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D NO BRASIL. **Facit Business and Technology Journal**, v. 1, n. 24, p. 193–212, 9 abr. 2021.

PORTELA, S. **O que é Impressão 3D? Conteúdo completo sobre essa tecnologia!** Disponível em: <https://3dlab.com.br/impressao-3d-o-que-e/>. Acesso em: 7 set. 2023.

PRINTIT3D. **Impressão 3D FDM vs SLA - Vantagens e desvantagens de cada um.** Disponível em: <https://www.printit3d.com.br/post/impress%C3%A3o-3d-fdm-vs-sla-vantagens-e-desvantagens-de-cada-um>. Acesso em: 28 mar. 2023.

Qual a influência da temperatura na impressão 3D? 3DLAB. Disponível em: <http://www.3dlab.com.br/temperatura-na-impressao-3d/>. Acesso em: 29 out. 2022a.

Qual é a influência da altura da camada em suas peças 3D. 3DLAB. Disponível em: <http://www.3dlab.com.br/altura-da-camada-na-impressao-3d/>. Acesso em: 26 out. 2022.

RASEIRA, C. B. **Design e tecnologia aplicados a resíduos de madeira: especificações para o processo de corte a laser em marçhetaria.** 2013.

RAZGRIZ, GUILHERME.; PAIOTTI, RENATO. O XYZ das Impressão 3D Tudo o Que Você Gostaria de Saber Sobre Impressão 3D e Não Tinha a Quem Perguntar. 2020.

SCHOTTE, G. **A Brief History of Additive Manufacturing.** Disponível em: <https://trimech.com/blog/a-brief-history-of-additive-manufacturing>. Acesso em: 8 ago. 2022.

SETHI3D. **Impressora Sethi3D FARM.** Disponível em: https://www.sethi3d.com.br/impressora-sethi3d-farm?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant&gclid=CjwKCAjwsfuYBhAZEiwA5a6CDIT12VnNbQqt9o6Lo7kLT2XTZUMyRP-VfhqXndxkc0jlseuh4UVL7hoCKeMQAvD_BwE. Acesso em: 12 set. 2022.

SILVA, B. A.; SCHELLI, C. M. **AValiação de Erros Dimensionais de uma Peça Padrão em Diferentes Máquinas Geradas pelo Processo de Modelagem por Deposição Fundida.** 2019.

SILVA, J. H. D. DA. Precisão, Exatidão e a terminologia das Medições. **The Physics Teacher**, 2011.

SOUSA, J. G. Q. **EFEITO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE PEÇAS IMPRESSAS COM FILAMENTO ABS.** 2022.

SUPRIVIX. **Conheça 5 tendências da impressão 3D e suas aplicações.** Disponível em: <https://www.suprivix.com.br/blog/impressao-3d/>. Acesso em: 1 set. 2022.

TEODORO, G. **Não é só para medir! Entenda os tipos de metrologia e suas aplicações.** Disponível em: <https://engenharia360.com/metrologia-tipos-de-medicao/>. Acesso em: 27 mar. 2023.

THOMAZETTI, J. L. S. **INTEGRAÇÃO ELETROELETRÔNICA EM IMPRESSORA 3D COM CINEMÁTICA DELTA INVERTIDA.** dez. 2019.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: Blucher, 2017.

WISHBOX. **Veja as melhores configurações para velocidade de impressão 3D.** Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/velocidade-de-impressao-3d/>. Acesso em: 29 out. 2022.

YAMAN, U. Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 5–8, p. 2187–2197, 6 fev. 2018.

ZEISS, C. I. **O que é a metrologia industrial e quais as suas aplicações?** Disponível em: <https://www.intermetal.pt/Artigos/356838-O-que-e-a-metrologia-industrial-e-quais-sao-as-suas-aplicacoes.html>. Acesso em: 27 mar. 2023.