

JHONATAN DE OLIVEIRA SILVA

**AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA DIMENSIONAL EM
PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA EM
PETG EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO BICO
EXTRUSOR**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA FACULDADE DE
ENGENHARIA MECATRÔNICA

2023

JHONATAN DE OLIVEIRA SILVA

**AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA DIMENSIONAL EM
PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA EM
PETG EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO BICO
EXTRUSOR**

Projeto de Fim de Curso apresentado
à Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para a
obtenção do título de graduado em
Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

Uberlândia

2023

AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA DIMENSIONAL EM PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA EM PETG EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO BICO EXTRUSOR

Projeto de Fim de Curso apresentado à Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

Eng. Aer. Lohanna Ferreira Paiva

Uberlândia, 23 de junho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, em especial à minha mãe que diante de todas as dificuldades sempre fez o possível e o impossível para garantir a continuidade dos meus estudos.

À minha avó Ilma, minhas irmãs, meus tios, primos e namorada que sempre me apoiaram.

Aos meus amigos Rodrigo Rocha, Eduardo Santos, Lucas Eduardo, Arthur Santiago, Amanda Rodovalho, Thiago Augusto, Guilherme Oliveira, Rafael Goularte e vários outros com quem passei dias e noites em estudo.

Ao professor Alexandre Zuquete, por toda a ajuda e paciência na realização deste trabalho.

À equipe Cerrado mini-baja por ter me proporcionado a melhor experiência e aprendizado durante o período da graduação.

E à Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade e recursos.

SILVA, J. O. **Avaliação da tolerância dimensional de peças produzidas por manufatura aditiva em PETG em função da temperatura do bico extrusor.** 2023. 62 folhas. Projeto de Fim de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

RESUMO

A Indústria 4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, se baseia na transformação que ocorre da revolução digital, caracterizada pela convergência de tecnologias inovadoras, como por exemplo a Manufatura Aditiva (MA). Essa trouxe uma ampla lista de vantagens sobre a manufatura convencional, o que possibilita a fabricação de peças sendo produzidas em baixa escala com baixo custo. Além disso, uma das maiores vantagens é sua o desenvolvimento rápido de projetos e produtos através de uma visualização facilitada do produto final, além da fácil reprodução de geometrias complexas em uma única etapa, associando diferentes materiais e etapas. No entanto, é fundamental a busca pela evolução dos métodos de controle de qualidade dos produtos impressos, principalmente no que diz respeito à otimização das características dimensionais e, conseqüentemente, maior qualidade do produto final. Diante disso, foi elaborado um conjunto de procedimentos experimentais com a finalidade de ampliar o entendimento sobre a qualidade dimensional de produtos impressos utilizando da técnica de Fabricação com Filamento Fundido (FFF - *Fused Filament Fabrication*), buscando verificar quais são os parâmetros que trarão maior influência nos padrões de tolerância dimensional das peças ao mudar a temperatura de extrusão. Inicialmente foi desenvolvido um corpo de prova que foi impressos 3 temperaturas diferentes três vezes em uma impressora Creality Ender-3®. Estas dimensões foram verificadas com um paquímetro da fabricante Mitutoyo. Os corpos de prova não apresentaram grandes variações dimensionais ou de rugosidade superficial relevantes. Dentre os seis valores parâmetros mensurados (Altura 1, Altura 2, Largura, Profundidade, Diâmetro Interno, Diâmetro Externo) dentro dos valores de temperatura estabelecidos nesta pesquisa (225°C, 240°C e 255°C), a Largura e a Profundidade foram as que apresentaram menor desvio dimensional, os desvios variando entre 0,03 % á 0,19 % e a que apresentou o maior foi a do Diâmetro interno, com desvios variando entre 1,29 % á 3,42 %.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; PETG; Tolerância dimensional; Fabricação.

SILVA, J. O. **Evaluation of dimensional tolerances of additive manufactured parts in PETG as a function of the nozzle temperature.** 2023. 62 pages. Final Course Project (Undergraduate in Mechatronics Engineering), 2023.

ABSTRACT

Industry 4.0, also known as the fourth industrial revolution, is based on the transformation that occurs through the digital revolution, characterized by the convergence of innovative technologies, such as Additive Manufacturing (AM). AM has brought a wide range of advantages over conventional manufacturing, enabling the production of low-volume parts at a low cost. Additionally, one of the major advantages is the rapid development of projects and products through enhanced visualization of the final product, as well as the ability to reproduce complex geometries in a single step, involving different materials and processes. However, it is essential to strive for the evolution of quality control methods for printed products, particularly in terms of optimizing dimensional characteristics and ultimately improving the quality of the final product. In light of this, a set of experimental procedures was developed to enhance the understanding of dimensional quality of printed products using *Fused Filament Fabrication* (FFF) have the greatest influence on dimensional tolerance patterns of the parts when changing the extrusion temperature. Initially, a test specimen was designed and printed at three different temperatures, repeated three times, using a Creality Ender-3® printer. The dimensions were measured using a Mitutoyo caliper. The test specimens did not exhibit significant dimensional variations or relevant surface roughness. Among the six measured parameter values (Height 1, Height 2, Width, Depth, Internal Diameter, External Diameter) within the temperature range established in this research (225°C, 240°C, and 255°C), Width and Depth were the ones that presented the smallest dimensional deviation, the deviations ranging from 0.03% to 0.19% and the one that presented the greatest was the Internal Diameter, with deviations ranging from 1.29 % to 3.42 %.

Keywords: additive manufacturing; PETG; dimensional tolerance; Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Revoluções Industriais..... | 14 |
| Figura 2 – Esquema da Fotopolimerização em Cuba | 17 |
| Figura 3 – Esquema Fusão em Leito de Pó..... | 18 |
| Figura 4 – Esquema Jato de Material..... | 19 |
| Figura 5 – Funcionamento da tecnologia extrusão de material | 19 |
| Figura 6 – Esquema Jato de Ligantes..... | 20 |
| Figura 7 – Esquema adição de lâminas..... | 21 |
| Figura 8 – Esquema Deposição Direta de Energia | 22 |
| Figura 9 – Exemplo de planejamento de manufatura em etapas | 23 |
| Figura 10 – Demonstração gráfica das formas de deposição de material | 25 |
| Figura 11 – Variação Altura de Camada x Tempo de Impressão..... | 26 |
| Figura 12 – Diferentes espessuras de parede..... | 27 |
| Figura 13 – Diferentes preenchimentos..... | 28 |
| Figura 15 – Geometria e dimensões do corpo de prova | 31 |
| Figura 16 – Impressora Creality Ender-3®..... | 32 |
| Figura 17 – Filamentos do fornecedor 3D Fila® e suas respectivas temperaturas de impressão | 34 |
| Figura 18 – Modelo 3D do protótipo no software Ultimaker Cura®..... | 34 |
| Figura 19 – Corpos de ensaio impressos | 35 |
| Figura 20 – Partes fragilizadas nos corpos de prova..... | 36 |
| Figura 21 – Vista lateral do corpo de prova a 255 °C..... | 36 |
| Figura 22 – Evolução do aumento de finos filamentos ao redor da peça | 37 |
| Figura 20 – Medições das peças em 225 °C | 38 |
| Figura 21 – Medições das peças em 240 °C | 39 |
| Figura 22 – Medições das peças em 255°C..... | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Faixa de temperatura de impressão para os materiais mais utilizados | 29 |
| Tabela 3 – Valores das dimensões do corpo de prova..... | 31 |
| Tabela 2 – Parâmetros de impressão | 33 |
| Tabela 4 – Média e desvio padrão das dimensões dos corpos de prova | 40 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|------|-------------------------------------|
| MA | Manufatura Aditiva |
| FDM | <i>Fused Deposition Modeling</i> |
| FFF | <i>Fused Filament Fabrication</i> |
| STL | Estereolitografia |
| FLP | Fusão em Leito de Pó |
| 3DP | <i>Three-Dimensional Printing</i> |
| LENS | <i>Laser Engineered Net Shaping</i> |
| DMD | <i>Directed Energy Deposition</i> |
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> |
| CAM | <i>Computer Aided Manufacturing</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

© *Copyright*

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 Objetivo geral | 15 |
| 1.1.1 Objetivos específicos | 15 |
| 1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 13 |
| 2.1. Indústria 4.0 | 13 |
| 2.2. Manufatura aditiva..... | 15 |
| 2.2.1 Cuba de Fotopolimerização (Vat Photopolymerization) | 17 |
| 2.2.2 Fusão em Leito de Pó (<i>Powder Bed Fusion</i>)..... | 18 |
| 2.2.3 Jato de Material (<i>Material Jetting</i>)..... | 18 |
| 2.2.4 Extrusão de Material (<i>Material Extrusion</i>)..... | 19 |
| 2.2.5 Jato de Aglutinante (<i>Binder Jetting</i>) | 20 |
| 2.2.6 Laminação de Folhas (<i>Sheet Lamination</i>) | 21 |
| 2.2.7 Deposição direta de energia (<i>Directed Energy Deposition</i>)..... | 21 |
| 2.3 Software de CAD..... | 22 |
| 2.4 Software de planejamento de manufatura..... | 23 |
| 2.5 Parâmetros de Impressão | 24 |
| 2.5.1 Temperatura da mesa..... | 24 |
| 2.5.2 Temperatura da extrusão bucal..... | 25 |
| 2.5.3 Orientação da Impressão | 25 |
| 2.5.4 Altura entre Camadas..... | 26 |
| 2.5.5 Preenchimento | 26 |
| 2.5.6 Preenchimento | 27 |
| 2.6 PETG | 28 |
| 2.7 Temperatura de impressão | 29 |
| 3. METODOLOGIA | 30 |
| 3.1. Caracterização geométrica..... | 30 |

| | |
|--|----|
| 3.2. Planejamento da impressão 3D..... | 31 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 38 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 43 |
| REFERÊNCIAS..... | 45 |
| ANEXO A | 52 |
| ANEXO B | 54 |
| B.1. Corpos de prova a 225 °C | 54 |
| B.2. Corpos de prova a 240 °C | 55 |
| B.3. Corpos de prova a 255 °C | 56 |
| ANEXO C | 57 |

1. INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial, chamada de Indústria 4.0, está baseada na transformação que está acontecendo através da revolução digital, caracterizada pela convergência de tecnologias inovadoras como robótica avançada, inteligência artificial, internet das coisas, MA, entre outras. (WEF, 2017; SALESFORCE, 2018; RUBMANN, 2015).

Segundo Moncalvo (2016), o processo conhecido como MA trata da produção por adição de material, ao invés da remoção utilizada nos processos convencionais de fabricação. Com este tipo de tecnologia, a fabricação mecânica ganhou uma importante alternativa para solução de diversas limitações dos processos de manufatura existentes, ganhou-se na redução do tempo de produção, facilidade na utilização, visualização rápida do produto final, além da produção facilitada de qualquer tipo de geometria.

Neste contexto, a MA apresenta grande potencial para desencadear uma nova revolução industrial, e suas características econômicas são tão distintas que as decisões de investimento são altamente estratégicas (WELLER; KLEER; PILLER, 2015). Com isso, a MA não pretende substituir os métodos convencionais de produção, no entanto tende a revolucionar áreas de nicho (ATTARAN, 2017).

Em geral, o processo convencional de manufatura, envolvendo metalurgia e usinagem, tem custos fixos, como ferramental e espaço de fabril, mais elevados, no entanto seus custos variáveis como matéria-prima são inferiores aos da manufatura aditiva, o que faz com que a manufatura aditiva tenha seu uso avaliado para cada modelo de negócio, e tendo como uso preferencial em produção de pequenos lotes. Outro valor a ser considerado se refere a velocidade, versatilidade e adaptabilidade, onde a manufatura aditiva permite a fabricação just-in-time, sendo este um valor não quantitativo (FRAZIER, 2014).

Em contrapartida, este processo precisa de um nível de controle mais rigoroso quanto às características de seus produtos. Peças produzidas por essa técnica possuem menor precisão dimensional, bem como a qualidade de sua superfície é menor se comparadas a peças produzidas por processos de usinagem (CHUA *et al.*, 2010).

Isso se deve a vários fatores que podem influenciar no resultado do processo de fabricação, a exemplo da influência da umidade, que se acumula na estrutura do

filamento (HENTON *et al.*, 2005). Durante o processo de extrusão e consequente aquecimento do filamento a umidade tende a sair deste e gerar bolhas, isto causa defeitos estruturais na peça, devido à ausência do material ocasionado pela ocupação das bolhas (COSTA, 2015).

Dessa forma, visando contribuir para uma lacuna de literatura ainda em aberto, percebeu-se que a avaliação dimensional de processos MA se apresenta como um dos *hot topics* de grande relevância no universo da manufatura, devido ao seu caráter pouco investigado. Segundo Jurrens (1999), um padrão de referência genérico aos processos MA, ainda não está disponível na literatura atual para usuários e empresas. Porém, sabe-se que é extremamente difícil projetar um padrão de teste que seja universal para a otimização dos processos, em decorrência da grande variedade de processos existentes que norteiam a base da tecnologia MA (REBAIOLI; FASSI, 2017).

Diante os aspectos levantados, o presente estudo focou na avaliação da precisão dimensional de uma série de corpos de prova confeccionados por MA.

1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral avaliar a precisão dimensional do processo de MA por *Fused Filament Fabrication*, ou Modelagem por Fusão e Deposição (FFF).

1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, esta pesquisa possui os seguintes objetivos específicos:

- a. Pesquisar os diferentes processos de MA;
- b. Identificar na literatura as principais características, limitações e possibilidades de uso da MA nos processos de fabricação;
- c. Planejar os experimentos para avaliação dimensional dos padrões de teste;
- d. Criar estratégias de medição;
- e. Medir e avaliar os erros dimensionais das peças, determinando suas causas.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos que norteiam o tema da pesquisa, com intuito de embasar o estudo e facilitar sua compreensão e apoio as conclusões. Inicialmente são apresentados conceitos sobre a processos de fabricação mecânica, e a indústria 4.0 e suas tecnologias, e após uma contextualização mais específica em relação a MA, tema que norteia esta pesquisa.

2.1. Indústria 4.0

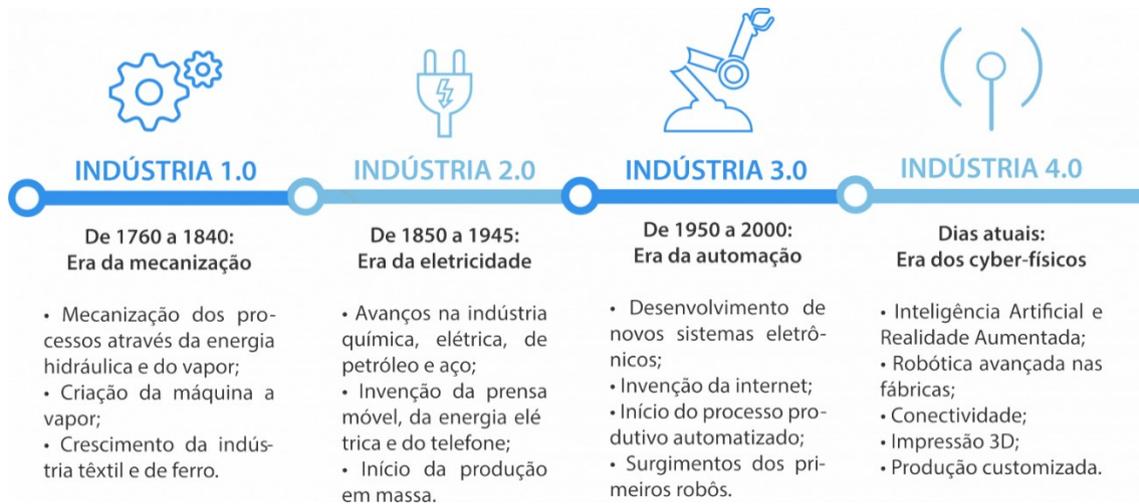
Como o foco das revoluções sempre foi o aumento da produtividade, as tecnologias trazidas pela Primeira Revolução foram suficientes até certo momento para suprir a demanda da época. Entretanto, conforme a sociedade foi evoluindo e se modernizando, surgiram novas exigências tecnológicas, que levaram à Segunda Revolução Industrial a partir 1870. Essa revolução foi marcada pela facilidade de produção devido ao uso da energia elétrica, divisão do trabalho, uso da metalurgia, modernização dos meios de transportes e de comunicação, além de ter dado início a um dos sistemas de produção mais utilizados, o Fordismo, conhecido também como produção em massa (SAKURAI; ZUCHI, 2018).

A Terceira Revolução industrialde acordo com Sachon (2017),destacou-se por uma série de avanços. 1971 foram os processadores Intel. A possibilidade de integrar máquinas e robôs ao processo de unidades de controle, enquanto o computador controla a inteligência e flexibilidade das máquinas. A capacidade de lidar com várias máquinas foi diminuída, ao mesmo tempo em que, a necessidade de trabalhadores, o que dava mais ênfase a orientação do aumento dos trabalhadores em busca do conhecimento.

Segundo Lee *et al.* (2015), o termo Indústria 4.0 ou Quarta Revolução industrial, foi utilizado pela primeira vez na Alemanha, em 2011. O termo fazia referência ao conjunto de inovações tecnológicas que seriam responsáveis por um salto tecnológico que garantiria a automatização de todos os processos de produção.

Dessa forma, a quarta revolução baseia-se na revolução digital. Teve seu início do fim dos anos 90 com a evolução a internet e surgimento de inteligência artificial. As tecnologias de software estão se tornando mais sofisticadas e transformando a sociedade e economia. Surge o conceito de fábricas inteligentes, onde os sistemas físicos e virtuais cooperam entre si. (SCHWAB, 2016; SACOMANO *et al.*, 2018). A Fig. 1 ilustra um resumo da evolução histórica da produção industrial.

Figura 1 – Revoluções Industriais



Fonte: SENAI, 2019

Além disso, a Indústria 4.0 possui nove pilares, que são as tecnologias responsáveis por fazer com que o sistema produtivo alcance o padrão 4.0. De acordo com Cardoso (2016), são eles:

- Internet das Coisas;
- Big Data;
- Robótica Autônoma;
- MA;
- Computação nas Nuvens;
- Cyber Segurança;
- Simulação;
- Realidade Aumentada;
- Integração de Sistemas.

Com isso, segundo o mesmo autor, a MA aparece como um pilar da Indústria 4.0 porque representa a busca por excelência operacional, viabilizando projetos de manufaturas que tradicionalmente demandariam muito tempo e trabalho, resultando em um alto custo. E, por ser objeto desta pesquisa, este tema será tratado de forma mais abrangente no próximo capítulo.

2.2. Manufatura aditiva

Segundo Beaman (1997), os pilares da MA atual podem ser divididos em duas áreas técnicas: a fotoescultura e a topografia.

A ideia da fotoescultura é de criar réplicas idênticas dos mais diversos itens. Segundo Beaman (1997), a técnica desenvolvida pelo francês Frenchman François Willème no século XIX consistia em posicionar 24 câmeras ao redor do item a ser copiado com distribuição uniforme e acionamento simultâneo, no centro de uma sala circular. Posteriormente em artista esculpiria a todas as vinte e quatro imagens da porção cilíndrica da figura.

Já a topografia, que teve seu surgimento no final do século XIX, trouxe o conceito de camadas para representar o relevo topográfico na terceira dimensão. Desenvolvida por Blather (1892) sugeriu um método por camadas para a fabricação de molde para mapas topográficos. O método consistia em imprimir contornos topográficos em uma série de discos de cera e cortar os discos no formato dessas linhas. Após empilhar e alisar essas seções de cera, se obtia um modelo tridimensional positivo e negativo do terreno. Então com o devido tratamento dessas superfícies, um mapa impresso de papel era prensado entre os moldes para criar um modelo topográfico com profundidade (BEAMAN, 1997).

Em 1972, Matsubara, da Mitsubishi Motors, propôs um método de construção a partir de uma resina fotopolimerizável. A resina em questão era coberta com partículas refratárias (por exemplo: pó de grafite ou areia) e curada a partir da emissão de uma fonte de luz coerente, no caso específico uma lâmpada de vapor de mercúrio, a qual era seletivamente projetada, provocando o endurecimento de uma determinada região. As finas camadas formadas a partir do método proposto eram sobrepostas sequencialmente, constituindo-se

posteriormente em um modelo de fundição (VOLPATO, 2007).

De acordo com Volpato (2018), a MA é definida como um processo de fabricação por adição de material em camadas, de forma sucessiva, a partir de um modelo geométrico 3D digital, desenvolvido através de um sistema de desenho assistido por computador. Essa tecnologia visa a confecção automatizada de peças, permitindo a produção de peças personalizadas permitindo a construção de peças com geometrias complexas e alta precisão, em um curto período de tempo.

Segundo Filippini *et al.* (2004), o desenvolvimento de produto de maneira rápida tem se tornado prioridade nas organizações, para atender as necessidades dos clientes de forma competitiva na comercialização.

Segundo Anna (2022), a MA oferece vantagens como customização de produtos, já que a sobreposição de material em camadas permite a obtenção de formas variadas. Além disso, ela permite precisão, consistência e isotropia excepcionais nas peças, que podem contar com detalhes de menos de 50 micrômetros e serem feitas em materiais de alta precisão. Essa tecnologia, também possibilita diminuir o tempo de montagem e a ampliação da produtividade, sendo possível ainda associar esse processo a uma redução de custos associados.

Além das vantagens já citadas pela MA, alguns outros pontos podem fazer a diferença na outra de definir qual tecnologia de fabricação deve ser utilizada. Algumas mais que podemos citar são:

- Fabricação em uma única etapa, dependendo da tecnologia;
- Dispensa dispositivos de fixação;
- Pode misturar diferentes materiais, dependendo da tecnologia;
- Dispensa a troca frequente de ferramentas;
- Dispensa cálculos de trajetórias de ferramentas;
- Possibilita produção de peças finais.

Entretanto, vale destacar que existem também as limitações que esse tipo de tecnologia:

- A precisão e o acabamento das peças geradas, em geral, são inferiores ao das peças fabricadas por processos tradicionais;
- Na fabricação de grandes lotes, o processo ainda é mais lento e caro que os demais;

- As propriedades dos materiais e, conseqüentemente, das peças fabricadas pela MA se diferem das fabricadas por processos tradicionais;
- Possui limitação quanto à escolha dos materiais que podem ser utilizados.

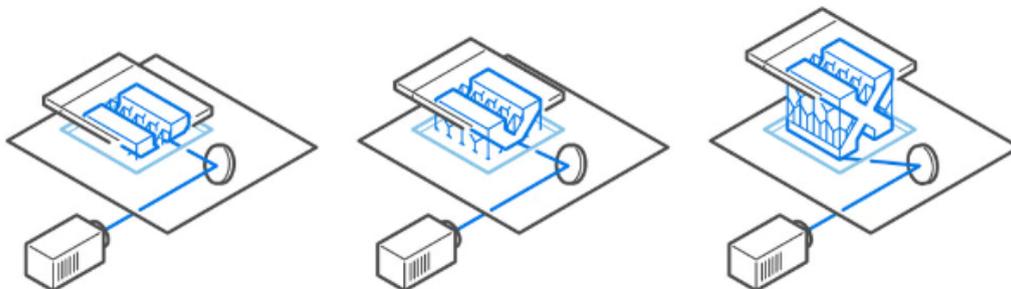
Em 2015, o padrão ISO/ASTM 52900 foi criado com o objetivo de padronizar toda a terminologia e classificar cada um dos diferentes tipos de impressoras 3D. No total, sete categorias de processos de MA foram identificadas e estabelecidas até o momento. Esses sete processos de impressão 3D trouxeram muitos tipos diferentes de tecnologias de impressão 3D que as impressoras 3D usam hoje (All3DP, 2019), que serão descritos na próxima seção.

2.2.1 Cuba de Fotopolimerização (Vat Photopolymerization)

A estereolitografia (STL) foi o primeiro processo de MA disponível comercialmente, apresentado em 1988. Este processo é baseado na cura de uma resina polimérica por meio de um feixe de laser (SOLIS, 2015).

Segundo mesmo autor, o processo começa com uma cuba de resina polimérica líquida fotocurável e uma mesa de elevação posicionada na superfície da resina. O computador controla um conjunto de espelhos que direciona o foco do laser sobre a resina que cura e solidifica, gerando uma camada 2D referente a base da peça. A mesa desce e uma nova camada de resina líquida cobre a parte já solidificada. O processo se repete até completar todas as camadas. A Figura 2 mostra esquematicamente o processo SL.

Figura 2 – Esquema da Fotopolimerização em Cuba

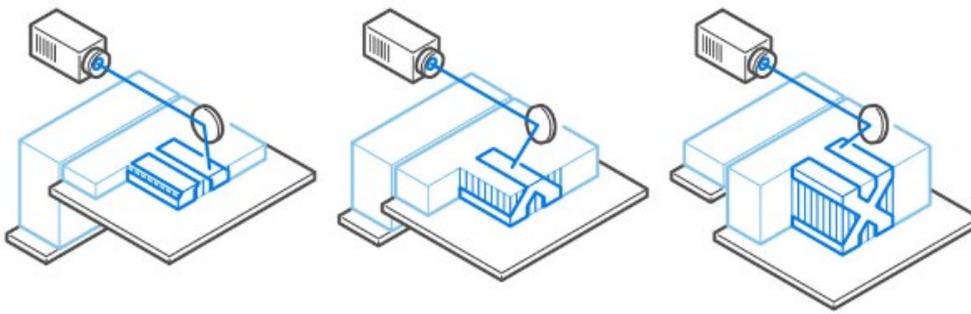


Fonte: All3DP (2019)

2.2.2 Fusão em Leito de Pó (*Powder Bed Fusion*)

Os processos de fusão em leito de pó (FLP) caracterizam-se por utilizar uma fonte de calor, geralmente laser ou feixe de elétrons, para fundir partículas de pó em camadas. Esta técnica permite a fabricação de uma vasta gama de produtos de geometrias complexas. Neste processo um laser de alta potência interage com a superfície de um leito de pó em atmosfera de argônio e funde seletivamente uma camada por vez (GIBSON, 2015). Um exemplo de um típico sistema FLP é esquematizado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema Fusão em Leito de Pó



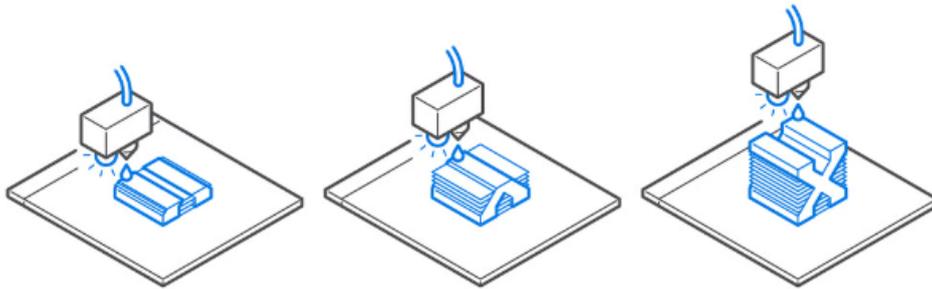
Fonte: All3DP (2019)

2.2.3 Jato de Material (*Material Jetting*)

Material Jetting ou Jateamento de Material é o processo em que ocorre a deposição seletiva de material na forma de gotículas, normalmente fotopolímeros e termoplásticos, através de um cabeçote de impressão, para a fabricação de objetos 3D tridimensionais. O bico do cabeçote ejeta pequenas gotículas à medida que se move horizontalmente pela plataforma de construção. Após a deposição do material, este é solidificado com uma luz UV ou temperatura ambiente, conforme exemplifica a Fig. 4 (SANTOS, 2018; YARAGATTI; PATNAIK, 2020).

Assim, a tecnologia permite ótima qualidade superficial e a produção de peças com múltiplas cores e materiais. Frequentemente compara-se esta técnica ao processo de jateamento de tinta 2D (FERNANDES, 2019). A Polyjet e a Impressão por múltiplos jatos (MJP) são exemplos que utilizam o conceito.

Figura 4 – Esquema Jato de Material



Fonte: All3DP (2019)

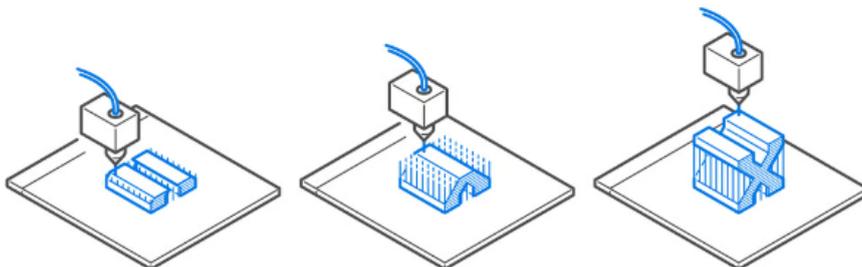
2.2.4 Extrusão de Material (*Material Extrusion*)

A impressão por Extrusão de Material é a mais comum encontrada comercialmente devido à sua acessibilidade e geralmente é utilizado polímeros como material de construção (SANTOS, 2018).

Na impressão por Extrusão de Material é utilizado material termoplástico na forma de filamento, que é empurrado através de um bocal aquecido, fundindo o material e extrudando-o, camada por camada, como mostrado na Fig. 5. O material é depositado na plataforma de construção, por meio de mecanismos que movimentam o bocal no eixo y e x em um caminho predeterminado.

O filamento de material fundido e extrudado resfria e solidifica para formar o objeto desejado. A técnica normalmente é chamada de *Fused Deposition Modeling* (FDM), termo registrado pela Stratasys, ou *Fused Filament Fabrication* (FFF) (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Figura 5 – Funcionamento da tecnologia extrusão de material



Fonte: All3DP (2019)

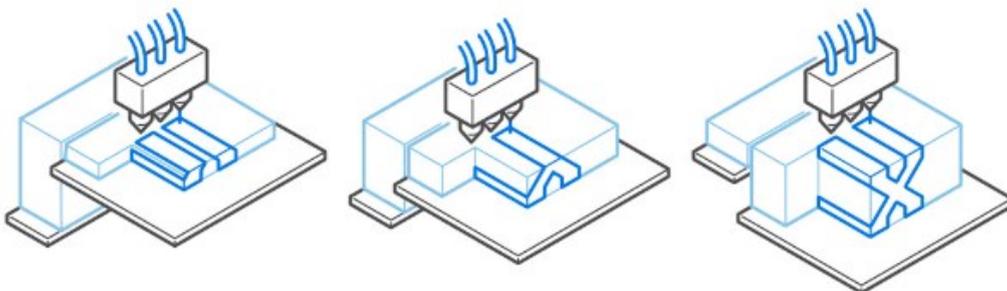
2.2.5 Jato de Aglutinante (*Binder Jetting*)

Desenvolvida no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) no começo da década de 1990, o nome original para BJ era Three-Dimensional Printing (3DP) e foi licenciada para mais de cinco empresas para comercialização (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

O Jateamento de aglutinante, que pode ser entendido como um híbrido entre os métodos de fusão de leito de pó e jateamento de material, ocorre quando uma camada é formada de particulado e esse é unido quimicamente por um agente ligante líquido, que posteriormente é jateado sobre áreas específicas da camada, formando assim o sólido. Para isso é utilizado um cabeçote de impressão que se move horizontalmente nos eixos x e y e deposita o material aglutinante sobre leito de pó disposto na área de trabalho (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2021).

Os materiais em pó são a base de cerâmica ou metal. O cabeçote se move cartesianamente sobre a plataforma depositando as “gotículas” aglutinantes. Após conclusão de cada camada, a plataforma move-se para baixo e espalha-se material sobre a área., Fig. 6 Após fabricação, as peças exigem pós-processamento adicional e em alguns casos adiciona-se outros aglutinantes visando melhores propriedades mecânicas (Fernandes, 2019).

Figura 6 – Esquema Jato de Ligantes

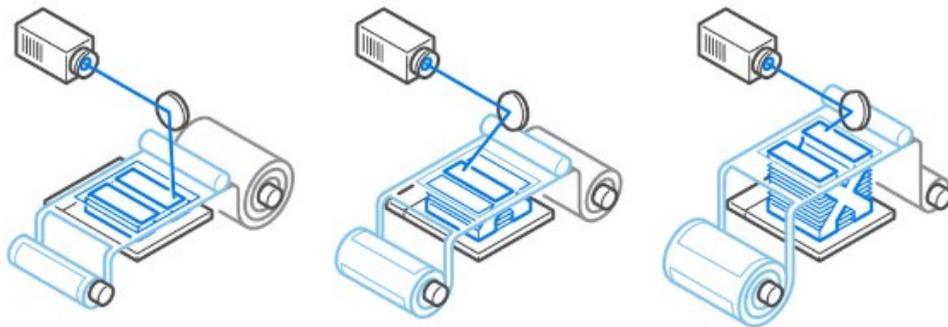


Fonte: All3DP (2019)

2.2.6 Laminação de Folhas (*Sheet Lamination*)

A adição de lâminas ocorre quando lâminas recortadas de material são unidas para a formação de um objeto (ASTM, 2012). Basicamente, neste método, a peça é construída por meio de adição de material laminado, os quais são subsequentemente cortados nas dimensões requeridas por um LASER de alta precisão. Como pode ser visualizado na Fig. 7, a adição e remoção do papel laminado são realizadas por dois rolos, um responsável por adicionar material e outro em recolher as partes que não serão utilizadas na peça. A espessura de cada camada é igual a espessura da lâmina de material depositado, cada lâmina adicionada possui superfície adesiva originada de uma cola que é ativada pelo calor. Após o material de sobra ser recolhido, a plataforma em que a peça está apoiada é rebaixada e se inicia um novo ciclo de processo de fabricação de camada (BOURELL *et al.*, 2017; BIKAS *et al.*, 2014; YAN *et al.*, 1996).

Figura 7 – Esquema adição de lâminas



Fonte: All3DP (2019)

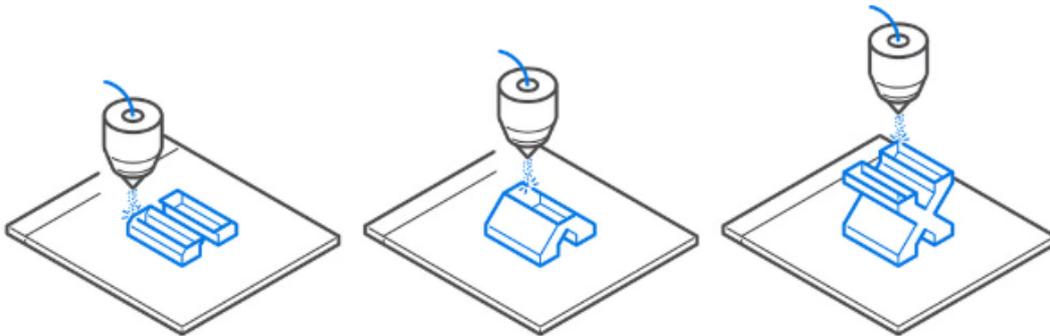
2.2.7 Deposição direta de energia (*Directed Energy Deposition*)

Por fim, temos a deposição com energia direcionada, que ocorre com a energia térmica sendo utilizada para a fundição de materiais à medida que esses são depositados, como pode ser visto no esquema da Fig. 8. A *Laser engineered net shaping* ou Formação de Pó a Laser (LENS) e a *Directed Energy Deposition* ou Deposição Direta de Energia (DMD) são exemplos do conceito.

A vantagem deste processo é poder utilizar matérias-primas muito

resistentes, como titânio, e aço inoxidável. Até que os processos com metal fossem inventados, as grandes indústrias não levaram muito a sério a impressão 3D, por trabalhar apenas com polímeros, porém quando este tipo de impressão foi validado, indústrias como a aeroespacial e automotiva prontamente se interessaram em obtê-lo. A tecnologia LENS hoje é utilizada para fabricar peças em metais duros, como hélices de turbinas, canais de refrigeração internos, dentre outros (LIPSON, KURMAN, 2013; MONTEIRO, 2015).

Figura 8 – Esquema Deposição Direta de Energia



Fonte: All3DP (2019)

2.3 Software de CAD

Ao contrário do que se pode imaginar, o sistema CAD não surgiu recentemente. Inicialmente foi usado na engenharia e, em 1971, foi inserido na Odontologia. Desde então tem sofrido modificações constantes na busca pela execução de uma melhor performance (BERNARDES, 2012).

O termo CAD vem do inglês *Computer Aided Design* e *Computer Aided Manufacturing*, que em português significa, respectivamente, desenho ou projeto assistido por computador e fabricação assistida por computador.

O sistema CAD tem como principais objetivos a automatização, agilidade e controle dos processos de fabricação. Tal sistema tem como princípios básicos o escaneamento de objetos reais através da captação por feixes de luz ou por contato, gerando a digitalização das estruturas desenhadas. Após o escaneamento, as imagens são transferidas para um software, onde poderão ser manipuladas, estudadas e planejadas. Por fim, as imagens são enviadas do software para o sistema de manufatura, que realizará a materialização do que foi planejado (ROCHA, 2019).

Na arquitetura, sistemas CAD são utilizados para criar projetos 3D (em três dimensões) de objetos variados, com alta precisão de detalhes e fidelidade nas dimensões, que podem ser transformados em objetos sólidos (HILGERT, CALAZANS; BARATIERI, 2005). Na engenharia mecânica, ele é utilizado para a manufatura de peças, possibilitando aos engenheiros efetuar alterações e corrigir erros antes da fabricação das mesmas.

Os sistemas CAD foram desenvolvidos pela indústria aeronáutica e automobilística e é encontrado em diversos campos da medicina. Esta tecnologia foi introduzida na odontologia na década de 70, sendo o Cerec (Sirona®, Alemanha), introduzido em 1987 por Duret. O primeiro sistema CAD a ser comercializado. Posteriormente, novos sistemas foram sendo desenvolvidos e aprimorados (ANDREIOTELLI, KAMPOSIORA, PAPAVALIIOU, 2013).

2.4 Software de planejamento de manufatura

Após finalizar o projeto da peça a ser fabricada no software de CAD, é necessário o uso de algum software para o fatiamento. Para isso, orienta-se o projeto em relação a uma superfície que simula a mesa de impressão e o fatia em várias camadas perpendiculares à superfície, como pode ser visto na Fig. 9. Quanto mais fina for a camada, melhor será a resolução do objeto impresso.

Figura 9 – Exemplo de planejamento de manufatura em etapas



Fonte: RIBEIRO (2022)

Nesses softwares costuma-se se ter a possibilidade de girar a peça, alterar seu posicionamento, estabelecer o material, cortar e definir parâmetros de impressão como: altura da camada, preenchimento, temperatura do bico e da

mesa, etc. Entre os mais comuns de código aberto estão Slic3r, Cura e Pronterface, que possuem interface bem amigável e são simples de se utilizar.

Ao concluir a operação de fatiamento, o software devolve um arquivo .gcode, que nada mais é que um código de máquina utilizado pela impressora para entender e executá-lo. Tal linguagem se diferencia das outras por possuir comandos representados por letras e números, e um conhecimento básico sobre a mesma pode permitir ao usuário corrigir falhas ou defeitos que poderiam vir a ocorrer no momento da impressão.

2.5 Parâmetros de Impressão

Segundo Cunico (2015), a orientação, a espessura de camada e da parede (VISHWAS *et al.* 2018), o preenchimento (ROSA *et al.*, 2019; JEREZ-MESA *et al.*, 2017; MIRANDA *et al.*, 2019), a velocidade de extrusão (GOMES *et al.*, 2021), a temperatura do bico de extrusão (PERES *et al.*, 2021; MIRANDA *et al.*, 2019), entre outros, são parâmetros que devem ser definidos para que o processo ocorra como o planejado. Caso contrário, o projetista pode ter surpresas na hora dos custos, da qualidade superficial, na resistência mecânica (seja ela de qualquer tipo), etc.

2.5.1 Temperatura da mesa

Para boa parte dos materiais a serem extrudados, a temperatura da mesa da mesa é um importante fator a ser definido, alguns inclusive requerem uma temperatura específica. Quando esses materiais se esfriam eles sofrem com o chamado *warping*, onde eles se contraem e se deformam. Portanto, uma mesa aquecida na temperatura correta os permite resfriar de maneira mais lenta, reduzindo a deformação. Ainda, a mesa aquecida auxilia na aderência da primeira camada da peça a ela, evitando que a peça não se solte durante a impressão (3DLAB, 2019).

Peças produzidas com o filamento de ABS são afetadas significativamente pelos valores da temperatura da mesa, sendo o principal método de evitar a geração, propagação de trincas e distorção da peça. Peças

produzidas com PLA são menos suscetíveis a variação térmica, sendo possível fabricar peças com a temperatura da mesa igual à temperatura ambiente (GAJDOS *et al.*, 2013).

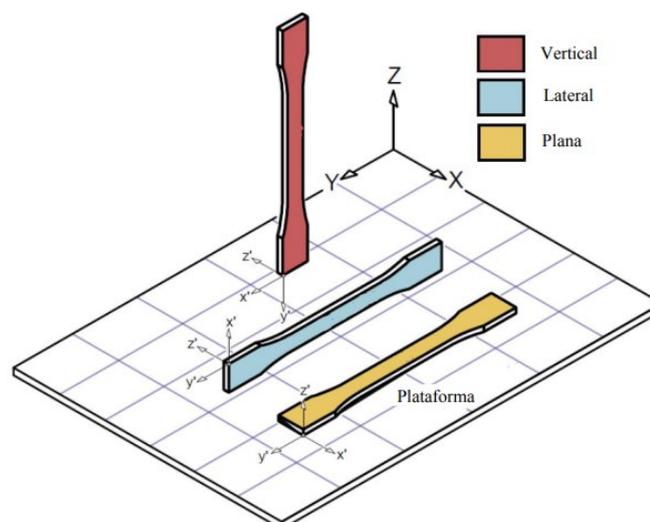
2.5.2 Temperatura da extrusão bucal

Outra temperatura que é dada como um parâmetro para o momento da fabricação é a temperatura do bico (ou extrusor). Temperaturas errôneas para determinado tipo de material podem trazer problemas como vazamento, *oozing* e subextrusão. Bem como podem vir a trazer desperdício de energia caso esteja mais alta que o necessário.

2.5.3 Orientação da Impressão

A escolha correta deste parâmetro depende diretamente da forma de aplicação dos esforços sobre o corpo, estando relacionado com as características anisotrópicas do material (CROUCILLO *et al.*, 2017; CHACÓN *et al.*, 2017). Os três tipos possíveis de orientações são plana (*flat*), lateral (*on-edge*) e vertical (*upright*), as quais são exibidas na Fig. 10. É necessário considerar possíveis variações de espessura de contorno, base e topo quando for modificado este parâmetro.

Figura 10 – Demonstração gráfica das formas de deposição de material



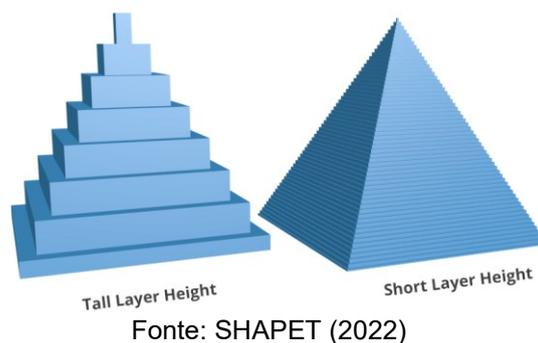
Fonte: Adaptado de CHACÓN *et al.* (2017)

Nesse sentido, na pesquisa de Peres et al. (2021), mostrou-se que mesmo que a influência da temperatura do bico na largura e no comprimento são muito semelhantes, mas a dimensão do comprimento foi aproximadamente 13 % mais precisa. Essa diferença provavelmente se deve à orientação da camada que difere da largura para o comprimento.

2.5.4 Altura entre Camadas

Notavelmente é a configuração mais conhecida, pois altera de maneira significativa a qualidade, aparência e resistência da peça, ou seja, ela determina a resolução da impressão (PERES *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2021; MIRANDA *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2019). Quanto menor a camada, mais “lisa” será a superfície, em contrapartida o tempo total de impressão será maior. Segundo bibliografias a altura típica da camada encontrada geralmente varia de 50 a 400 μm , sendo mais comum utilizar 200 μm (3D HUBS, 2022), vide Fig. 11.

Figura 11 – Variação Altura de Camada x Tempo de Impressão



2.5.5 Preenchimento

A espessura de parede, é o quanto o objeto consegue suportar de peso, tanto em tração quanto compressão, será função de quão grossas suas paredes são. Na Figura 12 é possível ver alguns exemplos de diferentes tipos de espessuras de parede.

Figura 12 – Diferentes espessuras de parede



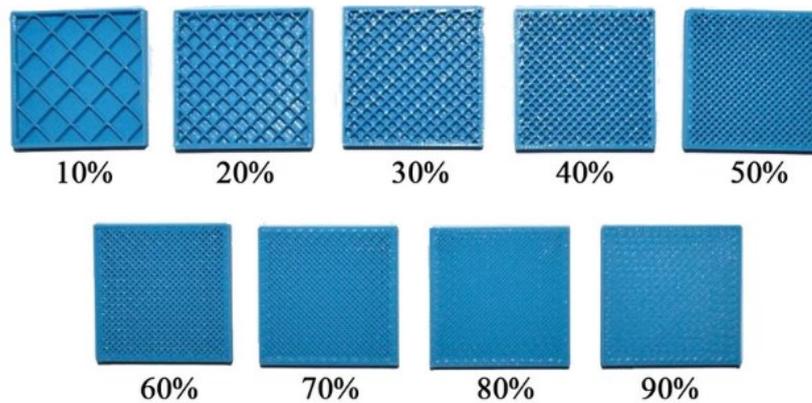
Fonte: MUTHE; PICKERING; GAUSS (2022)

A espessura da parede nada mais é que a quantidade de camadas na parede externa da peça fabricada. Ela influencia também a quantidade de material necessário para a processo e, conseqüentemente, no tempo de produção e em seus custos.

2.5.6 Preenchimento

A forma de preenchimento é um dos parâmetros com maior influência nas propriedades mecânicas, geralmente a escolha correta deste parâmetro pode gerar um aumento expressivo na resistência mecânica (KANTAROS *et al.*, 2016; YOON *et al.*, 2014; MIRANDA *et al.*, 2019).

Os modelos impressos na maioria dos casos não são totalmente sólidos, evitando desperdício e diminuindo o tempo de impressão. Em muitos casos, o slicer gera preenchimentos na ordem de 40 % do volume a ser preenchida, para dar uma boa resistência mecânica (FERNANDES, 2019), vide Fig. 13.

Figura 13 – Diferentes preenchimentos.

Fonte: HANON *et al.* (2020)

O preenchimento pode variar de 0 % até 100 % e indica a quantidade de material presente no padrão de preenchimento.

2.6 PETG

Atualmente um material que vem ganhando espaço entre os usuários da comunidade de impressão 3D e produtores de filamentos é o já mencionado PETG, principalmente quando se há a necessidade de construir peças flexíveis e duráveis. Dupaix e Boyce (2005) descrevem o PETG como um polímero de característica amorfa não cristalina, utilizado vastamente para aplicações de componentes termo-formados. O PETG combina as vantagens do ABS e do PLA por ser capaz de produzir materiais resistentes e mais flexíveis (HANON *et al.*, 2019)

Neste cenário, é anunciado como um filamento que reúne as melhores qualidades do ABS (resistente e dúctil) com a facilidade de impressão que o PLA oferece. Caracteriza-se por ser uma versão modificada do PET, na qual o “G” significa “glicol modificado”, sendo adicionado à composição do material durante a polimerização. O resultado deste processo é um filamento mais transparente, menos rígido, e mais fácil de ser utilizado do que a sua forma base, o PET. O PETG, quimicamente descrito como poly(ethylene terephthalate-co-1, 4-cyclohexylenedimethylene terephthalate), é um polímero amorfo, o qual mantém seu estado semissólido quando aquecido, o que o torna adequado para a Impressão 3D. É aplicado na produção de garrafas de água, embalagens de alimento, entre outros itens de plástico (ALL3DP, 2017; MATTERHACKERS,

2017; ALZHRANI, 2017).

2.7 Temperatura de impressão

Para otimizar a qualidade dos corpos de prova fabricados com o processo MA, o ajuste dos parâmetros de fabricação pode trazer melhorias significativas na qualidade do corpo de prova sem a necessidade de gastos adicionais com melhorias de software e hardware (SOOD et al., 2009). A literatura apresenta diversos trabalhos sobre a melhoria das propriedades mecânicas através de ajustes nos parâmetros de fabricação (RIBEIRO et al., 2019; PERES et al., 2021; GOMES et al., 2021; MIRANDA et al., 2019).

Segundo O'Connel (2021), a temperatura do bico deve ser o primeiro parâmetro a ser ajustado sempre que um novo filamento é usado em uma impressão. Os ajustes de temperatura podem ser feitos imprimindo torres de temperatura para ver quais valores funcionam melhor para a situação. A extrusão excessiva de bolhas de ar pode resultar de temperaturas do bocal muito altas. Por outro lado, uma temperatura muito baixa pode levar à subextrusão, ou seja, nem todas as camadas são totalmente impressas.

Em altas temperaturas, grande parte dos polímeros se degradam rapidamente, podendo obstruir o bico de impressão ou contaminar o material. Dessa forma, a temperatura dentro da câmara deve ser ajustada para ficar a mais baixa possível, mas ainda possibilitando a extrusão do material. Além do que, com altas temperaturas os objetos resfriam de maneira mais lenta ficando passíveis de erros de forma (CASAGRANDE, 2013).

A Tabela 1 apresenta uma faixa de temperatura de impressão para os materiais mais utilizados na impressão 3D.

Tabela 1 – Faixa de temperatura de impressão para os materiais mais utilizados

| Material | Temperatura de impressão |
|-----------------|---------------------------------|
| ABS | 220 a 240°C |
| PLA | 195 a 220°C |
| PETG | 245 a 260°C |

Fonte: 3DLAB (2019)

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização geométrica

A escolha da geometria utilizada na impressão 3D deste trabalho consiste em um quadrado com um cilindro em cima e um furo passante, pois essa configuração permite avaliar diversas distâncias e dimensões, tanto verticais quanto horizontais. O quadrado proporciona a medição da altura e largura, enquanto o cilindro permite a análise do diâmetro interno e externo. O furo passante é importante para verificar a integridade e precisão da impressão nessa região.

Além disso, essa geometria foi selecionada por oferecer a possibilidade de avaliar um conjunto de parâmetros relevantes para a qualidade dimensional das peças impressas. Medir as distâncias de diâmetro interno e externo é fundamental para verificar a precisão das dimensões da peça. A altura do quadrado e a altura total fornecem informações sobre a uniformidade do processo de impressão em diferentes alturas. A largura e o comprimento são parâmetros essenciais para avaliar a geométricaidade geral da peça.

A escolha desses parâmetros de medição foi baseada na necessidade de avaliar a qualidade dimensional dos produtos impressos e determinar quais parâmetros são mais influenciados pelas variações de temperatura do bico extrusor. Ao medir esses parâmetros-chave, é possível obter uma visão abrangente da qualidade das peças impressas em diferentes temperaturas.

Para cada temperatura estudada adotada neste estudo, foram fabricadas três peças impressas em 3D. Essa quantidade de amostras permite obter resultados mais representativos e confiáveis. Além disso, foram realizadas cinco medições para cada uma das dimensões em cada peça, a fim de obter uma média precisa e minimizar possíveis variações individuais.

Foram coletadas medidas da altura do quadrado (A1), altura até o topo do cilindro (A2), largura (L), profundidade (P), diâmetro externo (\varnothing_{ext}) e diâmetro interno (\varnothing_{int}). Todos os ensaios dimensionais foram realizados a 24 ± 1 °C com auxílio de um paquímetro Mitutoyo calibrado (ANEXO A). Antes das medições os corpos de prova e o paquímetro foram deixados durante duas horas em uma sala

aclimatada. Para cada dimensão, cinco medições são feitas alternadamente para cada corpo de prova e sempre na mesma posição para reduzir o erro devido a desvio de planicidade.

Na Figura 15 pode ser visualizada a geometria e as dimensões dos corpos de prova, na Tab. 3, todos identificados em milímetros.

Figura 14 – Geometria e dimensões do corpo de prova

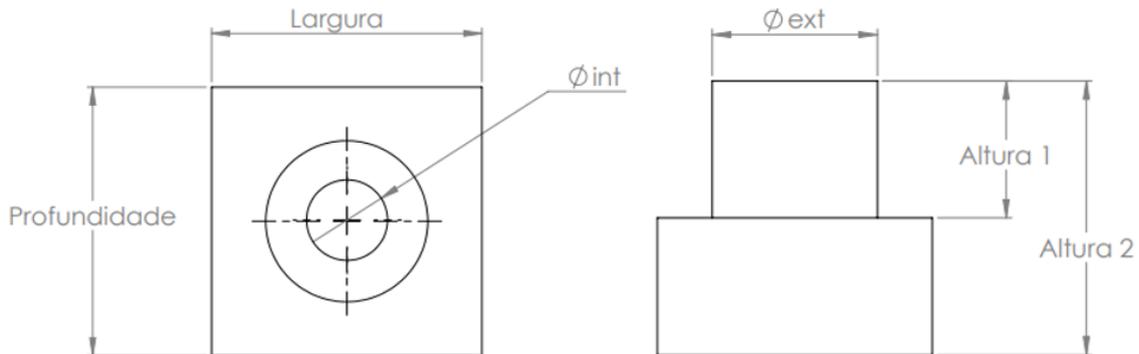


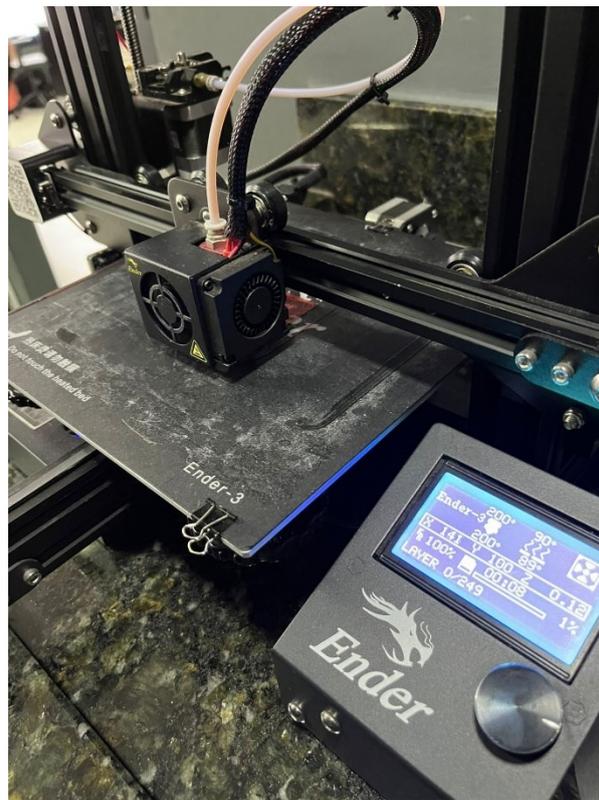
Tabela 2 – Valores das dimensões do corpo de prova

| Parâmetro | Dimensão |
|--|-----------------|
| Altura do quadrado (A1) | 25,00 mm |
| Altura até o topo do cilindro (A2) | 50,00 mm |
| Largura (L) | 50,00 mm |
| Profundidade (P) | 50,00 mm |
| Diâmetro externo (\varnothing_{ext}) | 30,00 mm |
| Diâmetro interno (\varnothing_{int}) | 15,00 mm |

3.2. Planejamento da impressão 3D

Foi utilizada a impressora 3D do tipo FFF da fabricante Creality® modelo Ender-3®, Fig. 16, e o programa fatiador Ultimaker Cura® (versão 5.3.0). A impressora também conta com uma área de impressão de até 220 x 220 x 250 mm. O envio de arquivos para impressão podem ser via Cartão SD ou Universal Serial Bus (USB), o que deixa o modo de impressão mais prático.

Figura 15 – Impressora Creality Ender-3®



Antes do experimento, foi necessário fazer uma calibração do equipamento utilizando o “Visual Method” descrito no site Prusa 3D (2022). Nele, observa-se se o corpo de prova impresso teve algum tipo de subextrusão ou se não está liso, com isso definiu-se os parâmetros na Tab. 2 a seguir.

Para extrusão de filamento de PETG da 3DFila® vermelho de 1,75 mm de diâmetro, alterando-se o parâmetro de impressão de temperatura de extrusão (TE) e fixando outros exigidos pela máquina. As temperaturas escolhidas (225, 245 e 255°C) são os valores máximo e mínimo recomendados pelo fabricante, e um valor intermediário, como pode ser visto na Fig. 17.

Tabela 3 – Parâmetros de impressão

| Parâmetros variáveis | |
|-------------------------------------|---------------------|
| Temperatura de impressão (°C) | 225, 240 e 255 |
| Parâmetros fixos | |
| Top Bottom | |
| Espessura superior/inferior | 0,72 mm |
| <i>Espessura superior</i> | 0,72 mm |
| <i>Camadas Superiores</i> | 4 |
| Espessura inferior | 0,72 mm |
| <i>Camadas Inferiores</i> | 4 |
| Preenchimento | |
| Densidade de preenchimento | 20 % |
| Padrão de Preenchimento | Cúbico |
| Qualidade | |
| Altura da Camada | 0,2 mm |
| Altura inicial da camada | 0,12 mm |
| Paredes | |
| Espessura da parede | 0,6 mm |
| <i>Contagem de linhas de parede</i> | 3 |
| Expansão horizontal | 0,0 mm |
| Viagem | |
| Ativar retração | Yes |
| Distância de retração | 5,0 mm |
| Resfriamento | |
| Ativar resfriamento de impressão | Sim |
| Velocidade do ventilador | 100,00 % |
| Velocidade inicial do ventilador | 0,0 % |
| Suporte | |
| Gerar suporte | Yes |
| Colocação de suporte | Em todos os lugares |
| Ângulo de Saliência de Suporte | 45,0° |
| Material | |
| Temperatura da placa de construção | 90,0 °C |
| Fluxo | 100,0 % |
| Velocidade | |
| Velocidade de impressão | 150 mm/s |
| Velocidade de Viagem | 250,0 mm/s |
| Velocidade Inicial da Camada | 50,0 mm/s |

Figura 16 – Filamentos do fornecedor 3D Fila® e suas respectivas temperaturas de impressão

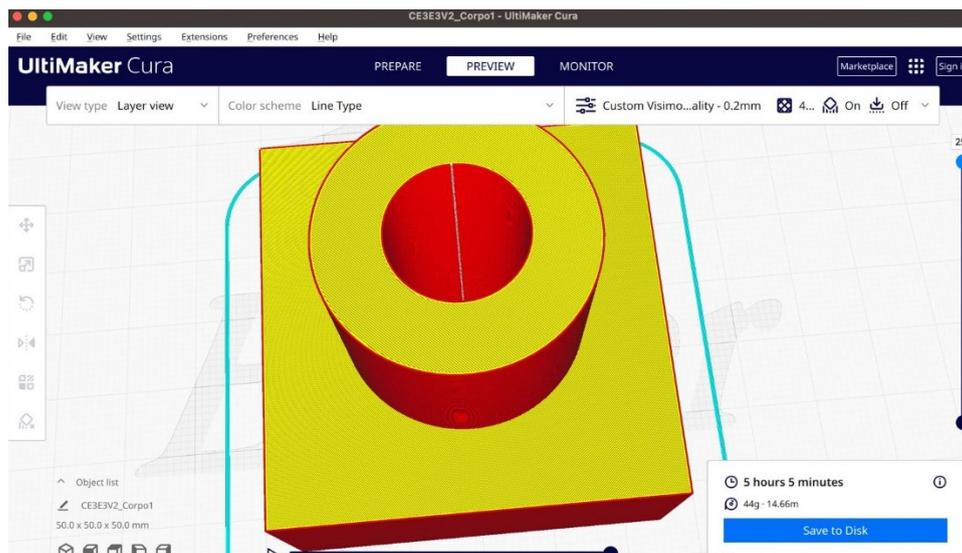
Filamentos • Filaments

| | ABS | ASA | CONDUCTIVE | FLEX | FRP |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| TEMPERATURA DE IMPRESSÃO PRINTING TEMPERATURE | 225 - 260°C 435 - 500°F | 245 - 260°C 475 - 500°F | 245 - 260°C 475 - 500°F | 235 - 255°C 455 - 490°F | 225 - 260°C 435 - 500°F |
| TEMPERATURA DE MESA BED TEMPERATURE | 110°C 230°F | 110°C 230°F | 110°C 230°F | FRIA COLD | 90°C 195°F |
| | NIPS | PETG | PLA BASIC | PLA EASYFILL | TRITAN |
| TEMPERATURA DE IMPRESSÃO PRINTING TEMPERATURE | 230 - 240°C 445 - 465°F | 225 - 255°C 435 - 490°F | 180 - 220°C 355 - 430°F | 180 - 220°C 355 - 430°F | 260 - 275°C 500 - 530°F |
| TEMPERATURA DE MESA BED TEMPERATURE | 60 - 110°C 140 - 230°F | 80 - 90°C 175 - 195°F | 45 - 60°C 115 - 140°F | 60°C 140°F | 110 - 120°C 230 - 250°F |



Os corpos de prova foram modelados no software SolidWorks® 2021, e exportados como arquivo STL para o software Ultimaker Cura® para fatiamento, assim, o software carrega as informações de impressão do produto juntamente com as informações de temperatura, dimensões do produto, escolha do filamento de impressão, tempo estimado de impressão, peso do protótipo, custo de impressão, comprimento do filamento gasto etc. O software juntamente com o modelo 3D carregado, podem ser vistos na Fig. 18 abaixo.

Figura 17 – Modelo 3D do protótipo no software Ultimaker Cura®

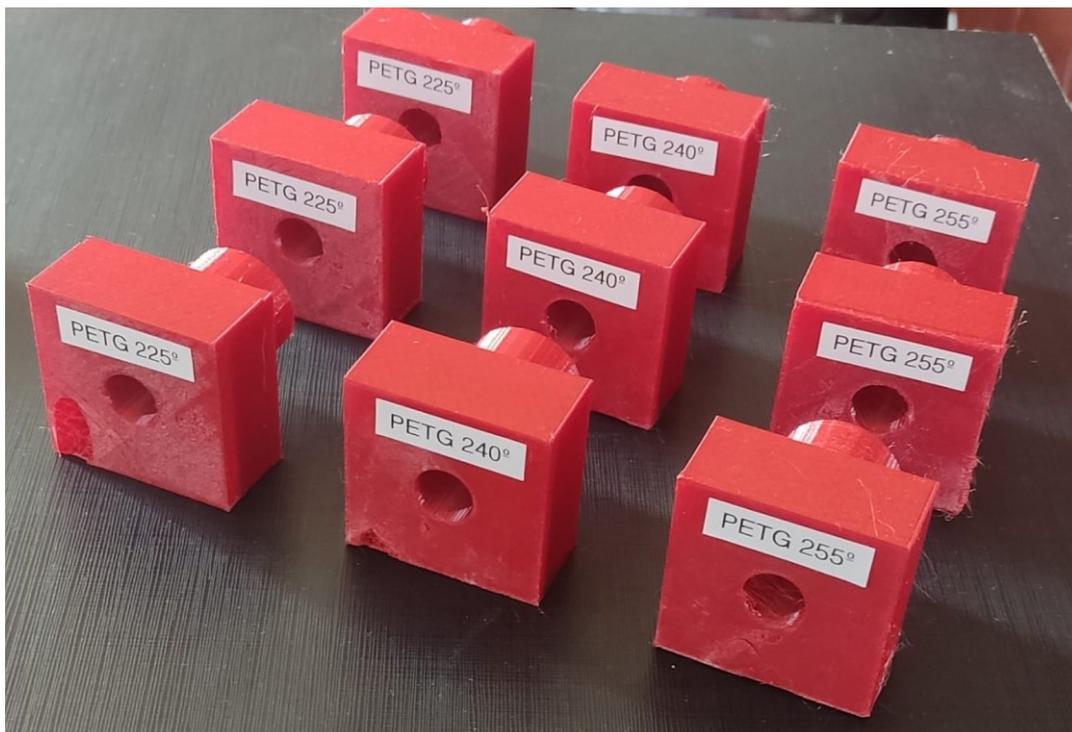


Antes do início da fabricação de cada corpo de prova foi realizado, respectivamente, o pré-aquecimento do bocal a 200°C e plataforma de deposição a 90°C, referenciamento dos eixos e nivelamento da mesa. Spray adesivo foi aplicado antes da impressão sobre a plataforma de deposição de vidro para aumentar a adesão do PETG.

De acordo com a simulação, Fig. 18, estima-se que são necessários quase 44 g de filamento para a fabricação de cada um dos nove corpos de prova e aproximadamente 45h45min para completar o trabalho. As peças são impressas no centro da mesa, uma de cada vez, no mesmo horário do dia, para que não tenha grandes flutuações da temperatura ambiente.

A extrusora da impressora então vai fazendo movimentos lineares nos três eixos, dando assim tamanho e formato ao protótipo camada por camada. O resultado final do protótipo pode ser visto na Fig. 19. Fotos mais detalhadas estão apresentadas no Anexo B.

Figura 18 – Corpos de ensaio impressos



Apesar de não possuir grandes diferenças dimensionais ainda foi possível visualizar algumas falhas em duas peças em particular na Fig. 20. Isso se deve ao fato que a peça ficou frágil naquele local e se partiu ao retirar da mesa de

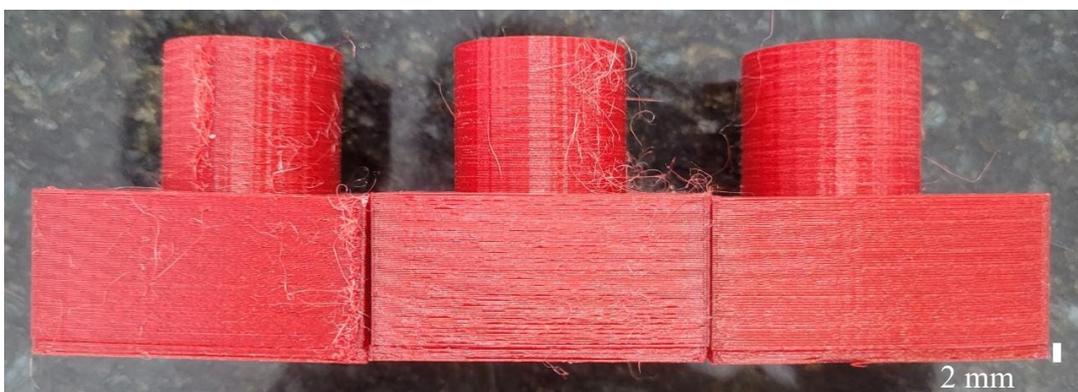
impressão. Essa fragilidade da peça é ocasionada por tentar retirar a peça ainda com a mesa de impressão estando aquecida.

Figura 19 – Partes fragilizadas nos corpos de prova



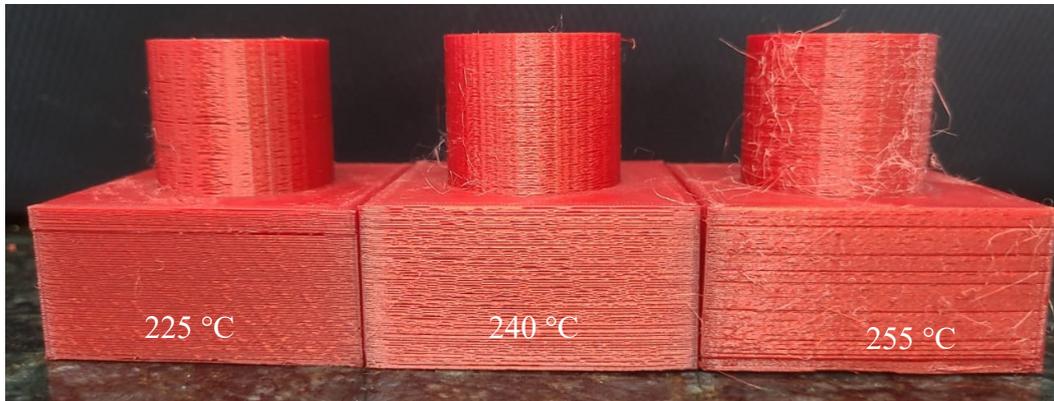
Entranto, apesar da pequena diferença dimensional, é possível visualizar que em todos os casos impressos a 255°C, os dois primeiros milímetros a partir da base estão levemente deslocados do restante do corpo de prova, como mostrado na Fig. 21. Isso ocorre pelo fato de que em temperaturas mais altas a adesão entre o plástico e o adesivo seja geralmente maior, a força real da camada adesiva começará a diminuir. A maioria dos adesivos e até mesmo as superfícies das placas de construção são feitas de polímeros que amolecem à medida que a temperatura aumenta.

Figura 20 – Vista lateral do corpo de prova a 255 °C



Outro detalhe observado devido ao aumento da temperatura do bico, é o aumento de “teias de aranha”, o que prejudica o acabamento da peça mas não suas dimensões de uma forma geral. Na Figura 22 é possível visualizar a evolução destes fios.

Figura 21 – Evolução do aumento de finos filamentos ao redor da peça



Assim que os corpos de ensaio foram impressos, os mesmos foram conservados em sílica para evitar absorção de água.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstraram que a variação da temperatura do bico extrusor durante a impressão 3D de peças em PETG não resultou em grandes diferenças nas medições relacionadas ao escoamento e adesão das peças. Nas Fig. 20, 21 e 22 é possível visualizar os valores das medições comparadas ao valor nominal. No Anexo A esta disponibilizado todas as medições. As médias e desvio-padrões estão apresentadas nas Tab. 4, 5 e 6.

Figura 22 – Medições das peças em 225 °C

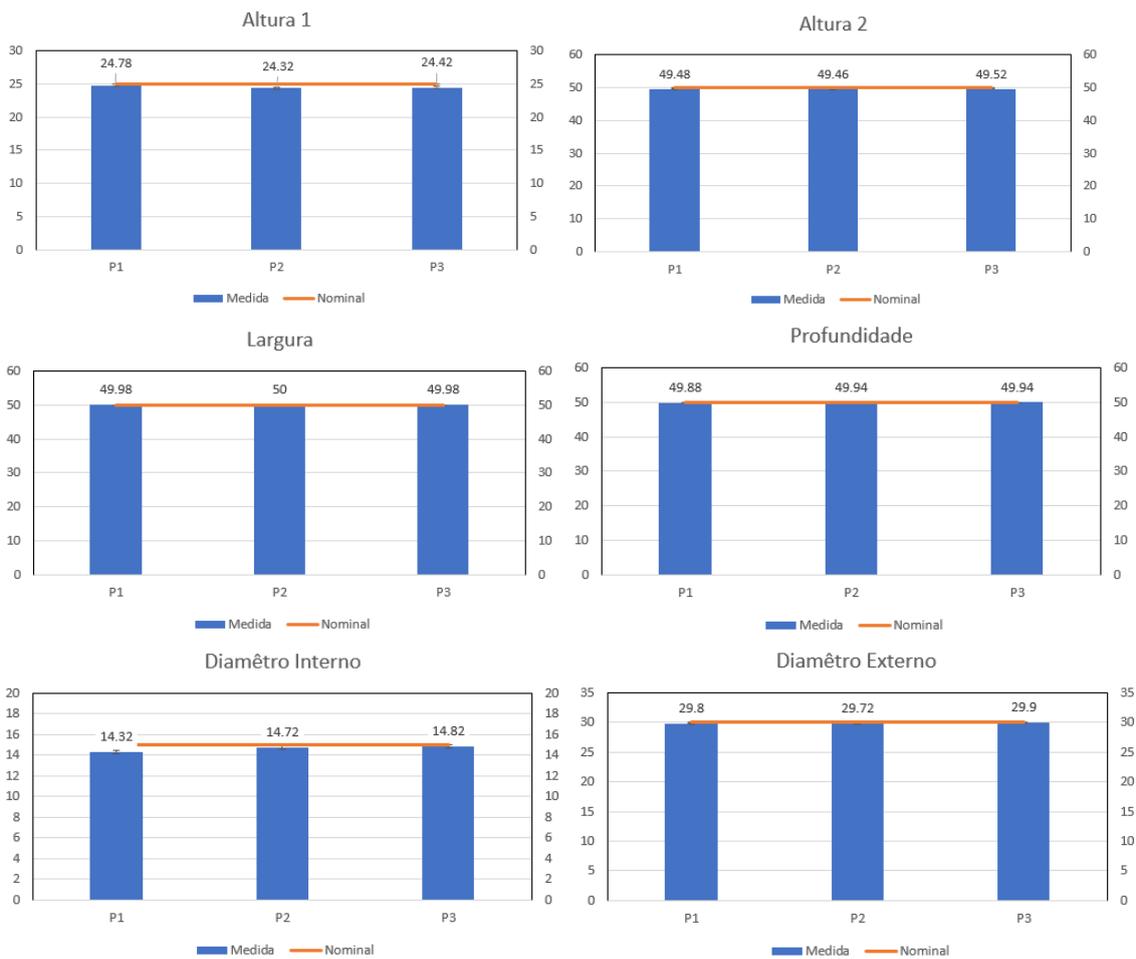


Figura 23 – Medições das peças em 240 °C

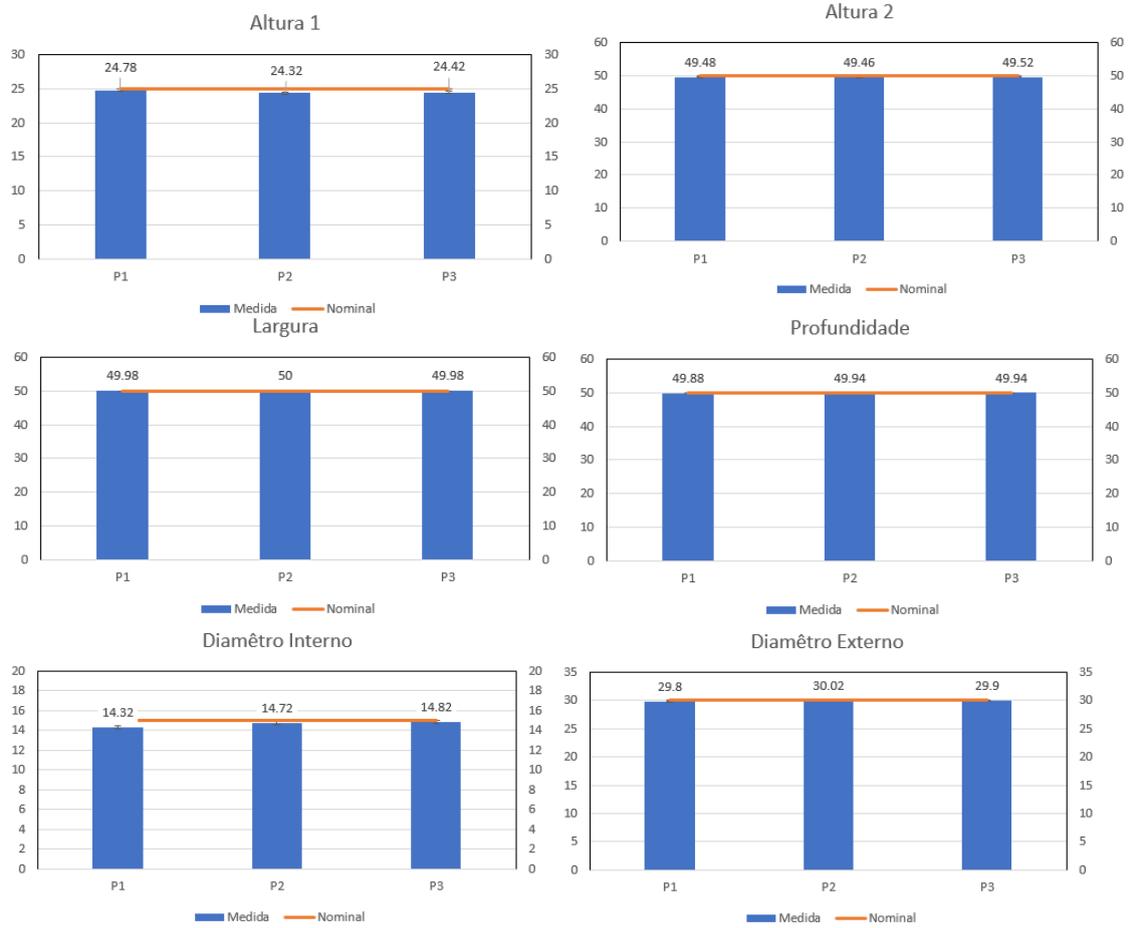


Figura 24 – Medições das peças em 255°C

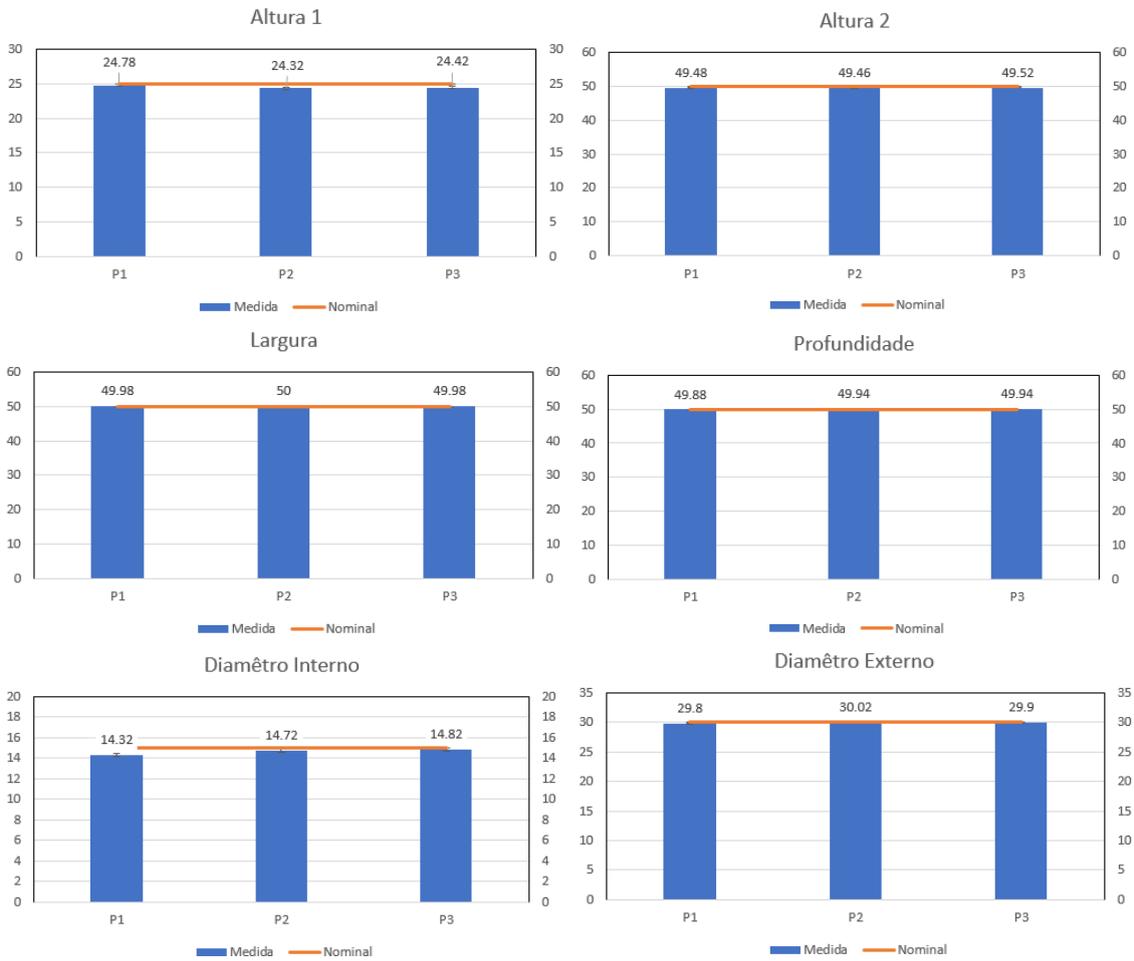


Tabela 4 – Média e desvio padrão das dimensões dos corpos de prova

| Dimensões | | 225°C | | 240°C | | 255°C | |
|---------------|----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| Altura 1 | 25,00 mm | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | 24,5066 | 0.1560 | 24.5733 | 0.0949 | 24.8867 | 0.0683 |
| Altura 2 | 50,00 mm | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | 49.4867 | 0.0726 | 49.6733 | 0.0760 | 50.0200 | 0.0332 |
| Largura | 50,00 mm | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | 49.9867 | 0.0298 | 49.9067 | 0.1907 | 50.0067 | 0.0365 |
| Profundidade | 50,00 mm | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | 49.9200 | 0.0875 | 49.9467 | 0.0894 | 49.9467 | 0.0779 |
| Diam. Interno | 30,00 mm | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | 14.6200 | 0.1267 | 14.8067 | 0.0733 | 14.4867 | 0.0896 |
| Diam. Externo | 15,00 mm | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | 29.8067 | 0.1395 | 29.7933 | 0.0665 | 29.9333 | 0.1111 |

Dessa forma, observa-se no parâmetro Altura 1 uma evolução de uma redução de dimensão de quase 1,97 % para 0,05 % com o aumento da temperatura, mostrando uma melhora na precisão. Já para Altura 2, a média

passou de 1,03 % para 0,65 %, e acabou passando a dimensão nominal em 0,04% na temperatura de 255 °C.

Analisando a Largura, as médias de desvio foram 0,03 %, 0,19 %, e 0,04 %, sendo os melhores valores nos extremos das temperaturas. Para Profundidade, os desvios dimensionais foram praticamente os mesmos, cerca de 0,11 %. Tanto a Largura quanto a Profundidade, apresentaram os menores desvios dos parâmetros analisados.

Para o Diâmetro Interno, as dimensões médias foram de 2,53 %, 1,2 % e de 3,42 % mostrando uma piora na temperatura máxima deste estudo de 255°C, sendo a melhor a média. É importante salientar que os maiores desvios são desse parâmetro devido as imperfeições geradas dentro do furo, como pode ser visualizado no Anexo C. Por fim, o Diâmetro Externo apresentou 0,64 %, 0,69 % e 0,22 % de desvio quando comparado ao nominal.

No geral, com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a variação das temperaturas testadas (225°C, 240°C e 255°C) não promoveu um impacto significativo no escoamento e adesão das peças impressas em PETG neste estudo específico, mesmo nos valores fora do intervalo ótimo de impressão (245 até 260°C) apresentados na Fig. 17 e Tab. 1.

Isso sugere que o PETG utilizado neste estudo possui uma janela de temperatura relativamente ampla, na qual mantém suas propriedades de fluxo de forma consistente. Essa estabilidade no escoamento é um indicativo da qualidade e consistência do material utilizado.

Quanto à adesão das peças, também não foram observadas grandes variações dimensionais entre as temperaturas testadas nas peças que foram manufaturadas com sucesso. A adesão adequada das camadas é essencial para garantir a integridade estrutural das peças impressas em 3D, e os resultados indicam que as temperaturas utilizadas proporcionaram uma adesão consistente e satisfatória. Esses achados são encorajadores, pois sugerem que é possível obter peças de qualidade com adesão adequada usando uma faixa de temperatura relativamente ampla.

Essas descobertas podem ser úteis para orientar futuras pesquisas e configurações de impressão em PETG, fornecendo uma faixa de temperatura confiável para obter peças de qualidade e com boa adesão.

É importante destacar que, embora não tenham sido observadas

diferenças significativas nas medições entre as diferentes temperaturas, é recomendável realizar estudos mais abrangentes e considerar outros parâmetros de impressão, como velocidade de impressão, resfriamento, fabricante, cor, entre outros, para uma análise mais completa do processo de impressão em PETG.

No geral, com base nos resultados obtidos (ANEXO C), pode-se concluir que a variação dimensional das temperaturas testadas (225°C, 240°C e 255°C) não teve um impacto significativo no escoamento e adesão das peças impressas em PETG neste estudo específico, já que todas as variações foram inferiores a 3,5 %. Essas descobertas podem ser úteis para orientar futuras pesquisas e configurações de impressão em PETG, fornecendo uma faixa de temperatura confiável para obter peças de qualidade e com boa adesão.

5. CONCLUSÃO

Neste projeto de fim de curso, foi investigada a variação dimensional de peças impressas em 3D devido a variação de temperatura de bico. Foram testadas três temperaturas diferentes: 225°C, 240°C e 255°C, e analisadas as medições relacionadas ao escoamento e adesão das peças.

Dentre os parâmetros analisados, a maior variação dimensional foi de aproximadamente 3,5 % no Diâmetro interno devido a maior quantidade de “teias de aranha” no furo pasante da peça, entretanto, na temperatura média da faixa de impressão observou-se que esse número foi maior do que analisando seus extremos. Também, o menor valor de variação foram o de Largura e Profundidade, apresentando os menores desvios dos parâmetros analisados, sendo ambos inferiores a 0,12 %.

Das três temperaturas analisadas a que obteve valores médios dimensionais mais próximos ao valor nominal e menor desvios-padrão foi a da maior temperatura. Isso se deve a uma melhor adesão das camadas desse material em temperaturas mais altas, resultando em uma maior resistência estrutural e redução de possíveis delaminações, e menor retração e deformação, minimizando problemas como o empenamento (*warping*) e a deformação da peça durante o processo de resfriamento.

Entretanto, é importante mencionar que, devido ao baixo número de corpos de prova, não é possível afirmar estatisticamente que o resultado obtido se deve exclusivamente ao parâmetro temperatura do bocal e é provável que haja uma parcela de influência dos demais parâmetros na resultado final. Assim, mais estudos com um número maior de espécimes são necessários.

Além disso, é recomendável realizar estudos mais abrangentes e considerar outros parâmetros de impressão, como velocidade de impressão, resfriamento, entre outros, para uma análise mais completa do processo de impressão em PETG.

Também recomenda-se que estudos adicionais sejam realizados para explorar outras variáveis de impressão e avaliar o desempenho do PETG em diferentes condições. A compreensão mais aprofundada desses parâmetros ajudará a otimizar ainda mais o processo de impressão em PETG, visando obter peças com propriedades mecânicas superiores e uma qualidade de impressão

aprimorada.

No geral, este trabalho contribui para o conhecimento e entendimento da influência da temperatura do bico extrusor na impressão 3D de peças em PETG, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações dessa tecnologia promissora.

REFERÊNCIAS

3D Hubs. Introduction FDM 3D Printing. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>>. Acesso em: 21 nov. 2022

A indústria 4.0 chegou no Brasil?. SENAI, 2019. Disponível em: <<https://www.sesirs.org.br/industria-inteligente/industria-40-chegou-no-brasil>>. Acesso em: 22 nov. 2021

ALL3DP. 2019. Disponível em: <<https://all3dp.com>>. Acesso em: 22. nov. 2022.

ANATOL LOCKER, ALL3DP, 2017, <https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>. Acessado em mar. 2023.

ALZHRANI, M., Modification of recycled poly(ethylene terephthalate) for FDM 3D-printing applications, Tese de M.Sc, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2017.

ANDREIOTELLI, M., KAMPOSIORA, P., PAPAVALIIOU, G. Digital Data Management for CAD/CAM Technology. An Update of Current Systems. Eur J Prosthodont Restor Dent; v. 21, p.9-15, 2013.

ANNA, J. P. S. Impressão 3D – Potencial de mercado é grande no país. Plástico.com.br. Disponível em: < <https://www.plastico.com.br/impressao-3d-potencial-de-mercado-e-grande-no-pais/>>. Acesso em: 20 nov. 2022

ATTARAM Mohsen. The rise of 3d printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business Horizons, v60, p. 677-688, 2017.

ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. Available on: <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>.

BEAMAN J J, BARLOW J W, BOURELL D L, BARLOW J W, CRAWFORD R H, MCALEA K P. Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1997, 25–49.

BIKAS, H., STAVROPOULOS, P., CHRYSSOLOURIS, G., Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. Int. J. Adv. Manuf. Technol., v. 83, pg. 389–405, 2016.

BOURELL, D., KRUTH, J.P., LEU, M., LEVY, G., ROSEN, D., BEESE, A.M., CLARE, A., Materials for additive manufacturing. *Manufacturing Technology*, v. 66, pg. 659–681, 2017.

CASAGRANDE, M. V. S. Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida fdm. 2013. Projeto de Graduação - Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

CARDOSO, M. de O. Indústria 4.0: A Quarta Revolução Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

CATAPAN, M. F. Apostila de desenho mecânico 1 Parte I. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2016.

CHACÓN, J.M.; CAMINERO, M. A.; GARCIA-PLAZA, E.; LÓPEZ, P. J. N., Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process 68 parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, v. 124, pp. 143–157, 2017.

CHUA, C.K., Leong, K.F., Lim, C.S., 2010 “Rapid Prototyping: Principles and Applications”. 3rd ed. Singapore: World Scientific Publishing Company, 165–171.

COSTA, G.M., 2015, “Controle de diâmetro na produção de filamento para impressoras 3D”. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Departamento de Engenharia Mecatrônica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET - MG, Divinópolis. Disponível em: . Acesso em: 19 nov. 2022.

CROUCILLO, A. P. R., ARRUDA, J. D., FRANCO, L. J. V., LEITE, J. F., CARVALHO, M. R., Avaliação das características mecânicas do PLA, impressa em 3D, para aplicação em próteses em animais de pequeno e médio porte, *Tecnol. Metal. Mater. Miner*, v. 15, pg. 221–225, 2017.

Extrusion multiplier calibration. Prusa Research, Prusa 3D, 2022. Disponível em: <https://help.prusa3d.com/article/extrusion-multiplier-calibration_2257>. Aceso em: 12/07/2023.

F42 Committee. ISO/ASTM52900 Additive Manufacturing – General Principles – Terminology [Internet]. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2015. Available from: <https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm>

FILIPPINI *et al.* Product Development Time Performance: Investigating

the Effect of Interactions between Drivers. *Journal of Product Innovation Management*. 2004.

FERNARDES, S.R; TIOSSI, R; SARTORI, IAM; THOMÉ, G. Tecnologia CAD/CAM aplicada a prótese dentária e sobre implantes: o que é, como funciona, vantagens e limitações. Revisão crítica da literatura. *Jornal ILAPEO*, v.6, n.1, p.813, 2012.

FRAZIER, W. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering & Performance*, v. 23, n. 6, p. 1917-1928, jun. 2014.

GAJDOS, I., SLOTA, J., Influence of printing conditions on structure in FDM prototypes. *Tehnički vjesnik*, v. 20, pg.231-236, 2013.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies. 2 ed. New York: Springer, 2015.

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

LEE, Jay, et. al. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0 based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, v3, p18–23. Jan. 2015.

GOMES, L. R.; PERES, J. G. de F., GUARATO, A. Z. Influence of nozzle temperature on dimensional tolerances of specimens produced with material extrusion manufacturing. *In: COBEM*, 26, 2021, Florianópolis, SC.

HANON, Muammel M.; MARCZIS, Róbert; ZSIDAI, László. Anisotropy evaluation of different raster directions, spatial orientations, and fill percentage of 3D printed PETG tensile test specimens. *In: Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2019. p. 167-173.

HILGERT, L.A.; CALAZANS, A.; BARATIERI, N.L. Restaurações CAD/CAM: O sistema CEREC3. *Rev. Clinica International journal of Brazilian dentistry*. v.3 n.2, p. 199-209, Fev.2005.

HENTON, D.E., GRUBER, P., LUNT, J., RANDALL, J., 2005, "Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites". *Polylactic Acid Technology* In: Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal, editors. CRC press; 2005. pp. 555– 562.

HORVATH, J., 2014, "Mastering 3D printing", Apress, 207 p

KANTAROS, A., CHATZIDAI, N., KARALEKAS, D., 3D printing-assisted design of scaffold structures. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 82, pg. 559–571, 2015.

KEAVENEY, Shane; CONNOLLY, Pat; O'CEARBHAILL, Eoin D. Kinematic error modeling and error compensation of desktop 3D printer. *Nanotechnology and Precision Engineering*, v. 1, n. 3, p. 180-186, 2018.

LAMAS, M. L., 2015, "Bio Scaffolds Poliméricos Para Construção de Estruturas Celulares", Dissertação (Mestrado) – Engenharia Biomédica, Universidade de Coimbra, Coimbra.

LIM, L.-T., AURAS, R., RUBINO, M., 2008, "Processing Technologies for Poly(lactic acid)", *Progress in Polymer Science*, Vol. 33, No. 8, pp. 820-852.

LIPSON, Hod; KURMAN, Melba. *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Indianápolis: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. About Additive Manufacturing Binder Jetting, 2021. Disponível em: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>. Acesso em: 13 nov. 2022.

MANUAL DO SLIC3R. Available on: <https://manual.slic3r.org/expert-mode/printsettings#infill-patterns>.

MATHIAS, R. F. Análise experimental de amostras produzidas por manufatura aditiva em pla através de ensaio de tração. 2019. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

MatterHackers, MATTERHACKERS, 2017, <https://www.matterhackers.com/news/how-to-succeedwhen-printing-with-petg-filament>. Acessado em mar. 2023.

MIRANDA, M. F. O. de, RIBEIRO, F. J. O., GUARATO, A. Z., SAAD, N. dos S. Experimental analysis on the mechanical properties of petg parts made with fused deposition-modeling manufacturing. In: COBEM, 25, 2019, Uberlândia, MG.

MONCALVO, F.C., 2016, "Análise dimensional para capacidade de uma máquina de FDM". TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10018246.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2022.

MONTEIRO, Marco T. F.. A IMPRESSÃO 3D NO MEIO PRODUTIVO E O DESIGN: um estudo na fabricação de jóias. 2015. 129 f. Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Minas Gerais, Programa de Pós-

Graduação em Design, Belo Horizonte, UFMG, 2015.

MUTHE, L. P., PICKERING, K., GAUSS, C. A Review of 3D/4D Printing of Poly-Lactic Acid Composites with Bio-Derived Reinforcements, *Composites Part C: Open Access*, Volume 8, 2022, 100271, ISSN 2666-6820, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100271>.

O'CONNELL, J. The Most Important 3D Printer Slicer Settings. All3DP. 2021. Disponível em: . Acesso em: 13 mai. 2023.

O QUE É quarta revolução industrial? In: Salesforce. San Francisco, c2016. Disponível em: <https://www.salesforce.com/br/blog/2018/Janeiro/O-que-e-QuartaRevolucao-Industrial.html>. Acesso em: 19 nov. 2022

PERES, J. G. de F, GOMES, L. R., GUARATO, A. Z. Influence of nozzle temperature on dimensional tolerances of specimens produced with material extrusion manufacturing. *In: COBEM*, 26, 2021, Florianópolis.

PETG vs. PLA: Differences and Comparison. Xometry, 2022. Disponível em: < <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/petg-vs-pla-3d-printing/> >. Acesso em 24. Maio 2023.

Qual a influência da temperatura na impressão 3D? 3DLAB. Disponível em: . Acesso em: 26 abr. 2023

REBAIOLI, L., FASSI, I. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 93, Number 5-8, Page 2571, 2017.

REDWOOD, B.; SCHFFER, F.; GARRET, B. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. 3D Hubs, 2017.

RIBEIRO, A. Fatiador 3D: programas e principais configurações. Filipeflop, 2022. Disponível em: < <https://www.filipeflop.com/blog/fatiador-3d-programas-e-principais-configuracoes/> >. Cesso em: 20 nov. 2022

ROCHA, GLP; ABREU, CW. Tecnologia CAD/CAM (Desenho Assistido por Computador/Manufatura assistida por computador) aplicada à prótese dentária: estado atual. *Revista Eletrônica Acervo Saúde*, v.22, n.77, 2019.

ROSA, I. C. de C., OLIVEIRA, G. A., FIOCCHI, A. A., ALVEZ, D. A. C., GUARATO, A. Z., SAAD, N. dos S. Effect infill and number of parts per cycle on mechanical properties of extruded PLA by additive manufacturing. *In: COBEM*, 25, 2019, Uberlândia, MG.

RUBMANN, R. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. *In: The Boston Consulting Group (BCG)*. Boston, 2015.

SANTOS, L. C. P. de, BRAGA, S. L., GUARATO, A. Z.. Metal as built additive manufacturing roughness parameters evaluated to be used as intraosseous dental implants. In: COBEM, 25, 2019, Uberlândia, MG.

SANTOS, F. P. Futuras Tecnologias Aplicadas À Arquitetura: Do Digital Para O Material. Tese (Mestrado). Universidade de Coimbra. Departamento de Arquitetura, 2018.

SACOMANO, José Benedito. et. al. Indústria 4.0: Conceitos e Fundamentos. 1 ed. São Paulo. Blucher. 2018

SACHON, H.; KARRER, C. "Hella: 4.0 Indústria na China". IESE, P-1163-E, 2017.

SAKURAI, Ruudi; ZUCHI, Jederson Donizete. A REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS ATÉ A INDUSTRIA 4.0. Revista Interface Tecnológica, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 480-491, 30 dez. 2018. Interface Tecnológica. <http://dx.doi.org/10.31510/infa.v15i2.386>.

SCHWAB, Klaus. A Quarta revolução industrial. Tradução: Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.

SOLIDWORKS CORPORATION. SolidWorks 2021 Plus Getting Started. United States: [s.n.], c2021. ca. 700 p.

SOLIS, Daphene Marques. Análise de Molde-Protótipo Fabricado em Digital ABS por Manufatura Aditiva. 2015. 76 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

SOUSA, A.R. Padrões Corporificados e a Tecnologia de Medição por Coordenadas Inovando a Qualificação Geométrica de Centros de Usinagem. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000

VISHWAS, M., BASAVARAJ, C. K., VINYAS, M., 2018. Experimental Investigation using Taguchi Method to Optimize Process Parameters of Fused Deposition Modeling for ABS and Nylon Materials. Materials Today: Proceedings, Vol. 5, No. 2, 7106–7114.

VOLPATO, N. Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D. São Paulo : Blucher, 2018.

VOLPATO, N. Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações. 1ª Edição. São Paulo. Editora

What is accuracy in 3d printing? Shapet, 2022. Disponível em: <

<https://www.shapet.com/knowledge-base/dlp-printer/what-is-accuracy-in-3d-printing->>. Acesso em: 15 nov. 2022

WEF. Impact of the Fourth Industrial Revolution on Supply Chains. Genebra, Suíça: WEF, 2017.

WELLER, Christian; KLEER, Robin; PILLER, Frank. Economic Implications of 3D printing: Market Structure Models in light of additive manufacturing revisited. *Int.nProduction Economics*. v.164. p.43-56. 2015.

YAN, X., GU, P., A review of rapid prototyping technologies and systems. Elsevier, v. 28, pg. 307-318, 1996.

YARAGATTI, N.; PATNAIK, A. A review on additive manufacturing of polymers composites. *Materials Today: Proceedings*, 2020.

YOON, Y. J., MOON, S.K.; HWANG, J. J., 3D printing as an efficient way for comparative study of biomimetic structures — trabecular bone and honeycomb *Mech Sci Technol.*, v. 28, pg. 4635, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-1031-4>

ANEXO A

|  | Certificado de Calibração | | Laboratório Medição Uberlândia | | <small>*Ver observações gerais</small> | |
|---|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--|----------|
| | Certificado: 55873/23 | Data Calibração: 13/03/2023 | Validade: 03/2024 | | OS: 831081-A/2023 | |
| 1 / 2 | | | | | | |
| Solicitante: | | | | | | |
| Contratante: | | | | | | |
| Características do Instrumento | | | | | | |
| Descrição: PAQUIMETRO | | Identificação: GI-210 | | | | |
| Marca: MITUTOYO | Modelo: - | | | | | |
| Nº Série: 22001074 | | | | | | |
| Condições Ambientais | | | | | | |
| Serviço executado nas instalações permanentes do Laboratório. | | | | | | |
| Temperatura: 22.2 °C ± 1.0 °C | | Umidade: 56.0 %ur ± 5.0 %ur | | | | |
| Procedimentos | | | | | | |
| Calibração Executada conforme: | | ITTEC006 | | Revisão: 3 | | |
| Padrões | | | | | | |
| Identificação: | Marca: | Certificado: | Calibrado por: | Validade: | | |
| PTM-0680 ANEL LISO CILINDRICO PADRÃO | DIGIMESS | S004688/2023 | K&L | 01/2026 | | |
| PTM-0682 BLOCO PADRÃO (200) | MITUTOYO | 05874/21 | MITUTOYO | 12/2024 | | |
| PTM-0685 JOGO DE BLOCO PADRAO | DIGIMESS | J034684/2020 | K&L-CAL0065 | 08/2023 | | |
| PTO-0617 TERMOHIGRÔMETRO PADRÃO | | 2259PTO-0617011222 | MEDICÇÃO | 12/2024 | | |
| Resultados Obtidos | | | | | | |
| BATENTE | | | | | | |
| Faixa de Uso: | | 0,00 a 200,00 mm | | Resolução: 0,05 mm | | |
| Faixa de Indicação: | | 0,00 a 200,00 mm | | | | |
| V.R | V.I | Erro de Medição | Incerteza Expandida | Incerteza Expandida + Erro | (k) | Veff |
| mm | mm | mm | mm | mm | | |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 2,00 | Infinito |
| 20,50 | 20,50 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 2,00 | Infinito |
| 50,00 | 50,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 2,00 | Infinito |
| 100,00 | 100,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 2,00 | Infinito |
| 150,00 | 150,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 2,00 | Infinito |
| 200,00 | 200,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 2,00 | Infinito |
| ENCOSTO | | | | | | |
| Faixa de Uso: | | 0,00 a 200,00 mm | | Resolução: 0,05 mm | | |
| Faixa de Indicação: | | 0,00 a 200,00 mm | | | | |
| V.R | V.I | Erro de Medição | Incerteza Expandida | Incerteza Expandida + Erro | (k) | Veff |
| mm | mm | mm | mm | mm | | |
| 50,00 | 50,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 2,00 | Infinito |

| MEDICÇÃO | | Certificado de Calibração | | | | |
|---|-------|--------------------------------|---------------------|----------------------------|--|----------|
| SOLUÇÕES METROLÓGICAS INTEGRADAS | | Laboratório Medição Uberlândia | | | | |
|  | | Certificado: 55873/23 | | | Data Calibração: 13/03/2023 | |
| | | | | | *Ver observações gerais Validade: 03/2024 | |
| | | | | | OS: 831081-A/2023 | |
| 2 / 2 | | | | | | |
| ORELHA | | | | | | |
| Faixa de Uso: | | 0,00 a 200,00 mm | | Resolução: 0,05 mm | | |
| Faixa de Indicação: | | 0,00 a 200,00 mm | | | | |
| V.R | V.I | Erro de Medição | Incerteza Expandida | Incerteza Expandida + Erro | (k) | Veff |
| mm | mm | mm | mm | mm | | |
| 50,00 | 50,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 2,00 | Infinito |
| VARETA | | | | | | |
| Faixa de Uso: | | 0,00 a 200,00 mm | | Resolução: 0,05 mm | | |
| Faixa de Indicação: | | 0,00 a 200,00 mm | | | | |
| V.R | V.I | Erro de Medição | Incerteza Expandida | Incerteza Expandida + Erro | (k) | Veff |
| mm | mm | mm | mm | mm | | |
| 50,00 | 50,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 2,00 | Infinito |
| Observações Gerais | | | | | | |
| NÃO HOUVE AJUSTE | | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> - V.R: Valor de Referência na unidade de medição do padrão. - V.I: Valor médio indicado no instrumento na unidade de medição do mesmo. - A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. - A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02. - A condição de Aprovado/Reprovado se restringe apenas as grandezas metrológicas do instrumento, sendo que o limite de erro especificado para esta condição é de responsabilidade do Cliente. - A operação de ajuste / regulagem não faz parte do escopo dos serviços. - A validade de calibração do instrumento, quando apresentada neste certificado, é de responsabilidade do cliente. - Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. | | | | | | |
| Endereço de Emissão: Rua Nicolândia, 1300 - Bairro: Tibery - Uberlândia - Minas Gerais Data de emissão: 13 de Março de 2023 | | | | | | |
| Assinado Eletronicamente _____ Gerente Técnico | | | | | | |

ANEXO B

B.1. Corpos de prova a 225 °C



Vista inferior



Vista superior



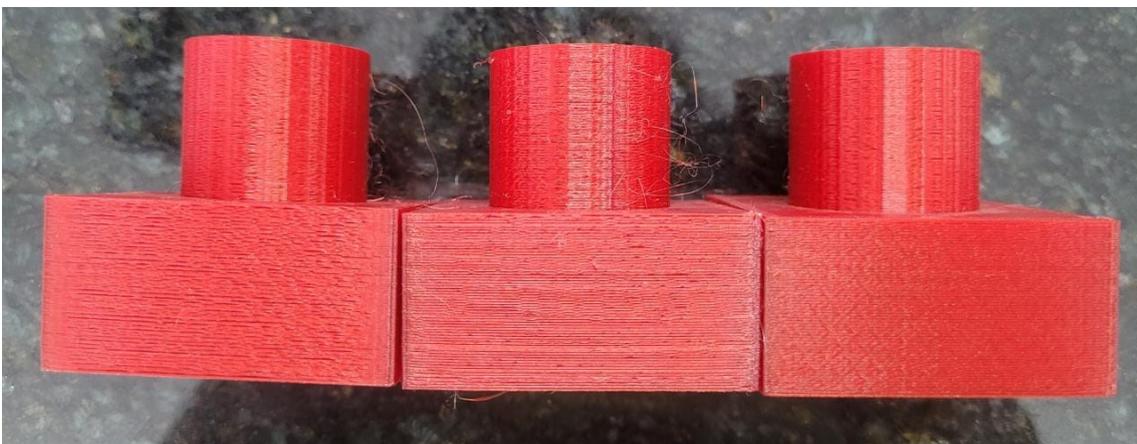
Vista lateral

B.2. Corpos de prova a 240 °C

Vista inferior



Vista superior



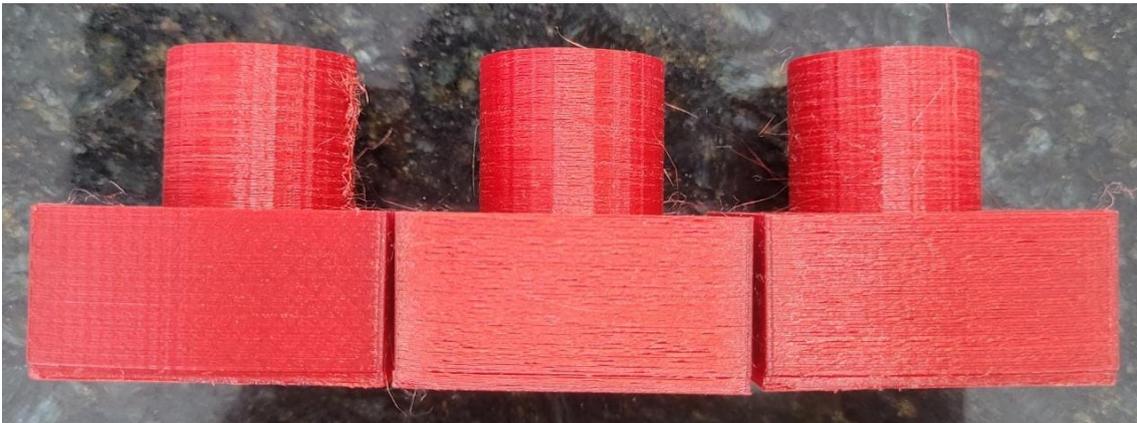
Vista lateral

B.3. Corpos de prova a 255 °C

Vista inferior



Vista superior



Vista lateral

ANEXO C

| Temp. | Peça | Altura 1 | | Altura 2 | | Largura | | Profundidade | | Diam. Interno | | Diam. Externo | | |
|-------|------|----------|--------|----------|--------|---------|--------|--------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|--------|
| 225°C | P1 | 25 | | 49.5 | | 50 | | 49.9 | | 14.5 | | 30 | | |
| | | 24.8 | | 49.5 | | 49.9 | | 49.9 | | 14.5 | | 29.5 | | |
| | | 25 | | 49.5 | | 50 | | 49.8 | | 14.3 | | 30 | | |
| | | 24.5 | | 49.4 | | 50 | | 50 | | 14 | | 30 | | |
| | | 24.6 | | 49.5 | | 50 | | 49.8 | | 14.3 | | 29.5 | | |
| | | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | | 24.78 | 0.2280 | 49.48 | 0.0447 | 49.98 | 0.0447 | 49.88 | 0.0837 | 14.32 | 0.2049 | 29.8 | 0.2739 |
| | P2 | 24.1 | | 49.5 | | 50 | | 50 | | 14.8 | | 29.7 | | |
| | | 24.4 | | 49.3 | | 50 | | 50 | | 14.5 | | 29.8 | | |
| | | 24.3 | | 49.5 | | 50 | | 49.8 | | 14.7 | | 29.7 | | |
| | | 24.4 | | 49.5 | | 50 | | 50 | | 14.8 | | 29.7 | | |
| | | 24.4 | | 49.5 | | 50 | | 49.9 | | 14.8 | | 29.7 | | |
| | | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | | 24.32 | 0.1304 | 49.46 | 0.0894 | 50 | 0 | 49.94 | 0.0894 | 14.72 | 0.1304 | 29.72 | 0.0447 |
| | P3 | 24.5 | | 49.6 | | 50 | | 50 | | 14.8 | | 29.8 | | |
| 24.5 | | | 49.5 | | 50 | | 49.8 | | 14.8 | | 29.9 | | | |
| 24.3 | | | 49.4 | | 50 | | 49.9 | | 14.8 | | 30 | | | |
| 24.3 | | | 49.5 | | 49.9 | | 50 | | 14.9 | | 30 | | | |
| 24.5 | | | 49.6 | | 50 | | 50 | | 14.8 | | 29.8 | | | |
| | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | |
| | | 24.42 | 0.1095 | 49.52 | 0.0837 | 49.98 | 0.0447 | 49.94 | 0.0894 | 14.82 | 0.0447 | 29.9 | 0.1000 | |
| 240°C | P1 | 25 | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.9 | | 29.7 | | |
| | | 25 | | 50 | | 49.9 | | 50 | | 14.9 | | 29.8 | | |
| | | 25 | | 50 | | 48.8 | | 49.8 | | 14.9 | | 29.8 | | |
| | | 25 | | 50.1 | | 50 | | 50 | | 14.8 | | 29.8 | | |
| | | 24.9 | | 50.1 | | 50 | | 50 | | 14.9 | | 29.7 | | |
| | | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | | 24.98 | 0.0447 | 50.04 | 0.0548 | 49.74 | 0.5273 | 49.96 | 0.0894 | 14.88 | 0.0447 | 29.76 | 0.0548 |
| | P2 | 25 | | 50 | | 50 | | 49.9 | | 14.7 | | 30 | | |
| | | 25 | | 50.1 | | 50 | | 49.8 | | 14.7 | | 30 | | |
| | | 25 | | 50 | | 50.1 | | 50 | | 14.8 | | 30.1 | | |
| | | 25 | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.7 | | 30 | | |
| | | 24 | | 50 | | 50 | | 49.9 | | 14.9 | | 30 | | |
| | | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | | 24.8 | 0.4472 | 50.02 | 0.0447 | 50.02 | 0.0447 | 49.92 | 0.0837 | 14.76 | 0.0894 | 30.02 | 0.0447 |
| | P3 | 25 | | 49.9 | | 50 | | 49.9 | | 14.7 | | 29.8 | | |
| 25 | | | 50 | | 49.8 | | 49.9 | | 14.7 | | 29.8 | | | |
| 25 | | | 50 | | 50 | | 49.8 | | 14.7 | | 29.8 | | | |
| 25 | | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.8 | | 29.9 | | | |
| 25 | | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.7 | | 30 | | | |
| | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | |
| | | 25 | 0.0000 | 49.98 | 0.0447 | 49.96 | 0.0894 | 49.92 | 0.0837 | 14.72 | 0.0447 | 29.86 | 0.0894 | |
| 255°C | P1 | 24.8 | | 50.1 | | 50 | | 50 | | 14.9 | | 30 | | |
| | | 24.8 | | 50 | | 49.9 | | 49.9 | | 14.9 | | 29.8 | | |
| | | 24.8 | | 50.1 | | 50 | | 50 | | 14.8 | | 29.9 | | |
| | | 24.9 | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.9 | | 30 | | |
| | | 24.8 | | 50 | | 49.9 | | 49.9 | | 14.8 | | 30 | | |
| | | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | | 24.82 | 0.0447 | 50.04 | 0.0548 | 49.96 | 0.0548 | 49.96 | 0.0548 | 14.86 | 0.0548 | 29.94 | 0.0894 |
| | P2 | 25 | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.5 | | 30 | | |
| | | 25 | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.3 | | 30 | | |
| | | 24.8 | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.3 | | 29.8 | | |
| | | 24.9 | | 50 | | 50 | | 49.9 | | 14.4 | | 30 | | |
| | | 25 | | 50.1 | | 50 | | 49.8 | | 14.6 | | 29.8 | | |
| | | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| | | | 24.94 | 0.0894 | 50.02 | 0.0447 | 50 | 0.0000 | 49.94 | 0.0894 | 14.42 | 0.1304 | 29.92 | 0.1095 |
| | P3 | 24.9 | | 50 | | 50.1 | | 50 | | 14.1 | | 30 | | |
| 24.8 | | | 50 | | 50.1 | | 49.9 | | 14.2 | | 29.7 | | | |
| 24.9 | | | 50 | | 50.1 | | 49.8 | | 14.1 | | 30 | | | |
| 24.9 | | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.3 | | 30 | | | |
| 25 | | | 50 | | 50 | | 50 | | 14.2 | | 30 | | | |
| | | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | |
| | | 24.9 | 0.0707 | 50 | 0.0000 | 50.06 | 0.0548 | 49.94 | 0.0894 | 14.18 | 0.0837 | 29.94 | 0.1342 | |