



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

IGOR JOSÉ GOMES HOLANDA

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DIMENSIONAL DE UMA IMPRESSORA 3D
TIPO CORE XY NA PRODUÇÃO DE FUROS CIRCULARES NA POSIÇÃO
VERTICAL

RUSSAS-CE

2023

IGOR JOSÉ GOMES HOLANDA

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DIMENSIONAL DE UMA IMPRESSORA 3D TIPO
CORE XY NA PRODUÇÃO DE FUROS CIRCULARES NA POSIÇÃO VERTICAL

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. George Luiz Gomes de
Oliveira.

RUSSAS-CE

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)

H669a Holanda, Igor José Gomes..

Análise da confiabilidade dimensional da impressora 3D tipo core xy na produção de furos circulares / Igor José Gomes. Holanda. – 2023.

56 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. George Luiz Gomes de Oliveira.

1. Manufatura Aditiva. 2. FDM. 3. Metrologia. 4. Confiabilidade Dimensional. 5. Furos Circulares. I. Título.

CDD 620.1

IGOR JOSÉ GOMES HOLANDA

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DIMENSIONAL DE UMA IMPRESSORA 3D TIPO
CORE XY NA PRODUÇÃO DE FUROS CIRCULARES NA POSIÇÃO VERTICAL.

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter protegido a todos nesses tempos difíceis e por ter dado forças durante toda a fase acadêmica.

Aos meus pais, por todo o apoio e amor durante todo esse período, pois sem eles esse momento não estaria sendo concretizado.

A minha namorada, por todo o amor, motivação e auxílio durante o período de graduação.

A minha família, por todo o incentivo para a realização desse momento.

Aos meus orientadores, Dr. George Luiz Gomes de Oliveira e Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro, por toda a dedicação e suporte durante a elaboração do trabalho.

A todos os professores e técnicos que estiveram presentes nessa caminhada de formação acadêmica.

RESUMO

Os processos de impressão 3D estão se tornando cada vez mais conhecidos e utilizados, sendo a modelagem por deposição fundida (FDM) uma das mais comuns. Nesse contexto, a manufatura aditiva tem evoluído bastante em função de suas vantagens se comparada aos processos de fabricação tradicionais, tais como a possibilidade de confecção de peças com geometrias complexas e redução da perda de material. Na mesma comparação, uma das desvantagens do processo de impressão 3D, especificamente com tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição), está relacionada à precisão e exatidão. Desta maneira, os produtos confeccionados por essas máquinas podem vir a ter várias diferenças, dentre elas, dimensionais e de acabamentos superficiais. Diante disso, é por meio da área metrológica como o controle de qualidade e a utilização de instrumentos de medições que podemos obter informações mais detalhadas acerca da precisão do método FDM. Com isso, o objetivo dessa avaliação foi avaliar a precisão dimensional da impressora Core XY na fabricação de furos circulares na posição vertical. Nas indústrias, a metrologia é uma das áreas mais importantes, pois é indispensável tanto para quem fabrica, quanto para o consumidor. Ter um bom processo metrológico significa que a indústria preza pela qualidade dos produtos e conseqüentemente dá uma visão diferenciada no mercado. A primeira etapa do presente trabalho consistiu no estudo histórico da manufatura aditiva e da metrologia. Na segunda parte houve a definição da peça padrão e dos tamanhos dos diâmetros que seriam impressos além dos parâmetros de impressão de acordo com o que foi material utilizado. Na etapa seguinte os corpos de prova foram confeccionados e logo após foram feitas as medições com o equipamento adequado e na seção final houve a análise visual e estatística. Verificou-se que a impressora obteve um bom desempenho de acabamento superficial apresentando baixos níveis de erros. Diante da análise estatística percentual concluímos que o erro diminuiu de acordo com o aumento do diâmetro. Já para a análise numérica em mm, o erro teve um comportamento inverso, ou seja, quanto maior o diâmetro maior o erro (mm). Com isso, por meio do estudo da curva erros foi observado o erro máximo da impressora dentro da faixa de impressão que foi definida para os corpos de prova.

Palavras-chave: manufatura aditiva; FDM; impressoras 3D; metrologia; confiabilidade dimensional; erros; furos circulares.

ABSTRACT

3D printing processes are becoming increasingly known and used, with fused deposition modeling (FDM) being one of the most common. In this context, additive manufacturing has evolved a lot due to its advantages compared to traditional manufacturing processes, such as the possibility of making parts with complex geometries and reducing material loss. In the same comparison, one of the disadvantages of the 3D printing process, specifically with FDM (fusion and deposition modeling) technology, is related to precision and accuracy. In this way, the products made by these machines may have several differences, among them, dimensional and surface finishes. Therefore, it is through the metrological area such as quality control and the use of measuring instruments that we can obtain more detailed information about the accuracy of the FDM method. Thus, the objective of this evaluation was to evaluate the dimensional accuracy of the Core XY printer in the manufacture of circular holes in the vertical position. In industries, metrology is one of the most important areas, as it is indispensable both for those who manufacture and for the consumer. Having a good metrological process means that the industry values the quality of the products and consequently gives a differentiated view in the market. The first stage of this work consisted of the historical study of additive manufacturing and metrology. In the second part there was the definition of the standard part and the sizes of the diameters that would be printed in addition to the printing parameters according to the material used. In the next step, the specimens were made and soon after measurements were made with the appropriate equipment and in the final section there was a visual and statistical analysis. It was verified that the printer obtained a good surface finish performance, presenting low levels of errors. In view of the percentage statistical analysis, we concluded that the error decreases according to the increase in diameter. For the numerical analysis in mm, the error had an inverse behavior, that is, the larger the diameter, the greater the error (mm). With this, through the study of the error curve, the maximum error of the printer was observed within the printing range that was defined for the test specimens.

Keywords: additive manufacturing; FDM; 3D printers; metrology; dimensional reliability; errors; circular holes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração da impressão 3D	14
Figura 2 - Verificação dimensional de uma peça fabricada pelo método FDM.....	15
Figura 3 - Curvas de erro de um sistema de medição.....	23
Figura 4 - Modelo de funcionamento da impressão FDM.....	28
Figura 5 - Bobina de filamento ABS	31
Figura 6 - Impressora 3D GTMax H5	32
Figura 7 - Paquímetro digital.....	33
Figura 8 - Desenho técnico do CP	34
Figura 9 - Modelagem pronta do CP	37
Figura 10 - Interface do ultimaker cura	37
Figura 11 - Etapas do processo de fabricação das peças	38
Figura 12 - Impressão dos CPs.....	39
Figura 13 - Disposição das direções de medição.....	39
Figura 14 - Corpo de prova impresso com destaque na parte	41
Figura 15 - Corpos de prova com furo de 30 mm	42
Figura 16 - Corpos de prova com furo de 40 mm	42
Figura 17 - Corpos de prova com furo de 50 mm	42
Figura 18 - Corpos de prova com furo de 75 mm	42
Figura 19 - Corpos de prova com furo de 100 mm	43
Figura 20 - Corpos de prova com furo de 150 mm	43
Figura 21 - Análise visual do corpo de prova de 30 mm.....	44
Figura 22 - Gráfico de erro percentual (%) x medida teórica (mm).....	46
Figura 23 - Gráfico de erro médio absoluto (mm) x medida teórica (mm).....	47
Figura 24 - Gráfico de erro percentual (%) x posição de medida (mm).....	48
Figura 25 - Demonstração da ação da gravidade.....	49
Figura 26 - Curvas de erro.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens da metrologia	18
Tabela 2 - Parâmetros de impressão utilizados	34
Tabela 3 - Medidas dos furos	35
Tabela 4 - Dimensões para cada CP fabricado	36
Tabela 5 - Médias por posição de medida para cada diâmetro de furo	44
Tabela 6 - Média por cada diâmetro fabricado	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Aplicações da manufatura aditiva	26
Gráfico 2 - Arrecadação em US\$ do mercado de impressão 3D.....	26
Gráfico 3 - Tipos de impressoras 3D mais utilizadas na manufatura	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.2	Objetivos específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Metrologia e Engenharia	17
2.2	Erros de medição	18
2.2.1	<i>Erro sistemático</i>	19
2.2.2	<i>Erro aleatório</i>	20
2.2.3	<i>Erro percentual</i>	22
2.3	Curva de erros	22
2.4	Manufatura aditiva	23
2.5	Aplicações da manufatura aditiva e métodos	25
2.6	FDM - Fused Deposition Modeling	27
2.7	Materiais de fabricação 3D	29
2.7.1	<i>Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS</i>	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Filamento de impressão	31
3.2	Impressora 3D	31
3.3	Equipamentos de medição	32
3.4	Parâmetros de impressão	33
3.5	Criação do modelo geométrico	34
3.6	Procedimento de impressão 3D	36
3.7	Procedimentos de medição	39
4	RESULTADOS	41
4.1	Análise qualitativa dos corpos de provas	41
4.3	Curva de erros	49
5	CONCLUSÃO	51
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
	REFERÊNCIAS	53
	ANEXO A – TABELA DE COEFICIENTE T DE STUDENT	56

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a impressão 3D tem ganhado muita relevância no mercado industrial. Desse modo, a impressão 3D se trata de uma tecnologia que transforma projetos digitais em objetos físicos, através de softwares de modelagem e fatiamento 3D. Categorizada como tecnologia aditiva, ao contrário de outros métodos, é uma forma de criar objetos rapidamente, depositando o material camada sobre camada, a partir de um arquivo tridimensional e uma série de comandos executados pela Impressora 3D.

Os processos de manufatura passaram por muitas mudanças, com a busca contínua pela otimização, qualidade e confiabilidade dos produtos. Segundo Donatelli et al. (2005), a evolução tecnológica dos produtos tem gerado uma permanente redução das tolerâncias geométricas, acompanhada por uma diminuição da variabilidade nos desvios das peças fabricadas, bem como pela redução da incerteza com que pode ser realizada as medições.

Diante disso, a precisão dimensional é extremamente importante para a fabricação de peças em impressoras 3D. O controle dimensional é um método capaz de verificar de modo eficiente as características dimensionais de peças, subconjuntos ou equipamentos, de modo a garantir a montagem, o bom funcionamento, a manutenção e a intercambialidade de peças e componentes. Trata-se de uma aplicação específica da metrologia dimensional e dos conceitos de confiabilidade metrológica aos componentes dos equipamentos, em um enfoque voltado para o controle da qualidade.

Importante destacar que todas as operações de controle dimensional são realizadas por meio de aparelhos e instrumentos específicos que, evidentemente, também precisam ser controlados e aferidos periodicamente.

A exatidão das medidas depende da qualidade dos instrumentos de medição empregados, que precisam estar devidamente aferidos e com um grau de precisão que permita avaliar a grandeza em questão, sempre dentro dos padrões exigidos.

Além do instrumento, o operador é um elemento importante, de cuja habilidade depende, em grande parte, conseguir-se a precisão exigida. Por outro lado, não existe um processo de produção capaz de produzir um número ilimitado de peças com exatidão absoluta, ou seja, todas com exatamente as mesmas dimensões, iguais às especificadas no projeto.

Existem muitas fontes de erro que podem ter impacto na precisão, desde os componentes até a calibragem. Em definitiva, a melhor maneira de avaliar uma impressora 3D é inspecionar peças reais contra teóricas.

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.

Quais são as fontes para que esses erros venham a acontecer? Fontes de erros podem ser internas ao sistema de medição ou externas a ele, podem decorrer da interação entre o sistema e o mensurando ou entre o sistema e o operador. Ademais, dentre esses erros, podemos ter como exemplo: o desgaste do próprio instrumento, assim como um erro na execução da medição, como sendo uma fonte interna e como fonte externa podemos mencionar a influência das condições climáticas, entre outras.

Muitas empresas de engenharia trabalham com instrumentos de medição, como balanças, aparelhos de pressão, entre outros. Entretanto, para garantir a qualidade dos resultados é necessário identificar quando acontece um erro de medição.

A Figura 1 a seguir ilustra a impressão 3D, a qual utiliza polímeros, resinas, metal e muitos outros materiais para diversas aplicações, algumas das principais são: Prototipagem de produtos; Peças de reposição para máquinas; Produtos Finais; Moldes; Ferramentas Leves; Gabaritos, entre outros

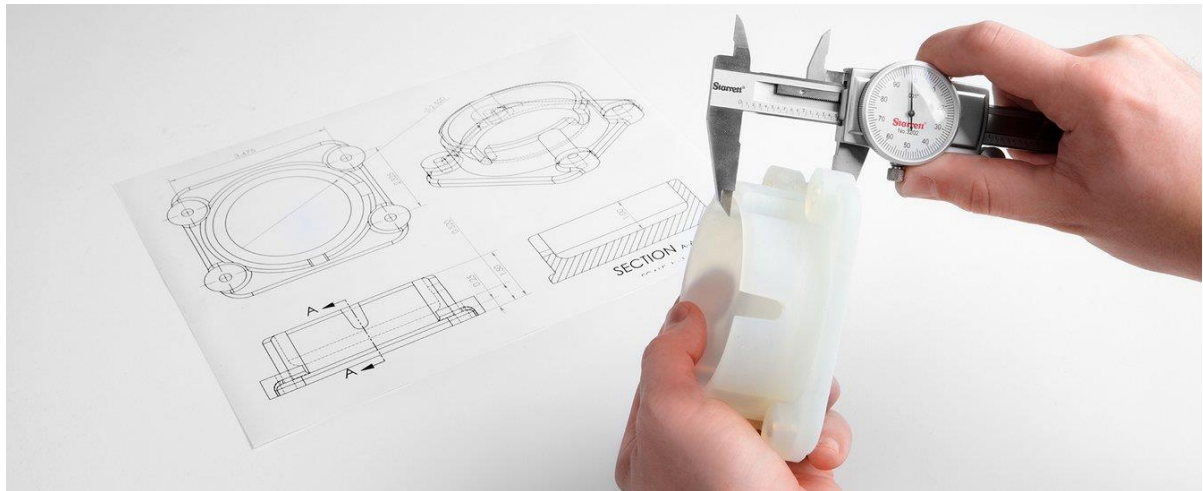
Figura 1 - Demonstração da impressão 3D



Fonte: Revista ferramental (2020)

Portanto, muitas das tecnologias de MA ainda precisam de ajustes para conseguir fabricar uma peça dentro dos limites de tolerância aceitáveis, em casos que exigem, por exemplo, precisão dimensional e/ou geométrica, principalmente quando há intercambialidade de peças (possibilidade de montar um conjunto mecânico, sem ajuste posterior, de modo que o sistema cumpra a função para a qual foi projetada). Partindo dessa explanação, nesse trabalho teve como inspiração uma análise da precisão na fabricação de peças com furos circulares pelo método de impressão FDM, para avaliação metrológica através de um planejamento experimental.

Figura 2 - Verificação dimensional de uma peça fabricada pelo método FDM



Fonte: Filament2print (2020).

1.1 Objetivos

Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo estudar a confiabilidade dimensional na confecção de corpos de provas com furos circulares de diferentes diâmetros fabricados na impressora 3D na orientação vertical.

1.2 Objetivos específicos

- a) realizar um estudo teórico sobre manufatura aditiva e erros metrológicos, por meio de livros e artigos da área;
- b) avaliar as possíveis dimensões para confecção de todos os corpos de prova, de maneira que sejam fabricados com uma boa qualidade;
- c) construir o desenho gráfico dos corpos de prova no software;
- d) definir os parâmetros de impressão e qual orientação de confecção das peças;
- e) fabricação dos corpos de provas na impressora;
- f) avaliar os resultados das medições e calcular os erros metrológicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Metrologia e Engenharia

A metrologia é uma palavra de origem grega (*metron*: medida; *logos*: ciência), pode ser definida como uma ciência que estuda as medições, abrangendo todos os aspectos teóricos e práticos. (CNI, 2002, p. 6).

Segundo o Vim (2008, p. 25), especificamente, a metrologia compreende todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o domínio de aplicação.

Silva e Costa (2010, p. 1), definem como uma ciência de medição que abrange os aspectos teóricos e práticos que asseguram a exatidão nos processos produtivos e na transferência de custódia.

Basicamente, a metrologia está dividida em três grandes áreas:

- a) metrologia científica;
- b) metrologia industrial;
- c) metrologia legal.

A Metrologia Científica se utiliza de instrumentos laboratoriais e das pesquisas e metodologias científicas que têm por base padrões de medição nacionais e internacionais para o alcance de altos níveis de qualidade metrológica.

Já a Metrologia Industrial é aquela cujo sistemas de medição controlam processos produtivos industriais e são responsáveis por avaliar o controle dos processos produtivos em geral, garantindo assim a qualidade e a segurança dos produtos finais. Exemplo: dimensionamento de componentes.

Por fim, a Metrologia Legal está relacionada a sistemas de medição usados nas áreas de saúde, segurança e meio ambiente como, por exemplo, as medidas de carga em portos.

Diante disso, segundo o INMETRO os objetivos da metrologia são:

- d) traduzir a confiabilidade nos sistemas de medição;
- e) garantir que especificações técnicas, regulamentos e normas existentes;
- f) proporcionem as mesmas condições de perfeita aceitabilidade na montagem e encaixe de partes de produtos finais, independentemente de onde sejam produzidas.

A Tabela 1 resume as principais vantagens do uso da metrologia segundo o Centro Integrado de Capacitação em Metrologia e Avaliação da Conformidade (CICMAC).

Tabela 1 - Vantagens da metrologia

Garante a qualidade do produto final
Favorece as negociações pela confiança do cliente
Diferenciador tecnológico e comercial para as empresas
Reduz o consumo e o desperdício de matéria prima, devido à calibração de componentes e equipamentos
Aumento da produtividade
Elimina a possibilidade de rejeição do produto
Evita desgastes que podem comprometer sua imagem no mercado

Fonte: CICMAC (2021).

No mundo da engenharia é importante saber quais são as operações metrológicas básicas, tais que são elas (ENGENHARIA360, 2022):

- a) ajustes, que se referem ao conjunto de operações que são realizadas sobre um instrumento de medida com a finalidade de proporcionar indicações precisas, assim como correspondentes aos valores da magnitude que será medida;
- b) verificação, que contribui com a evidência objetiva e necessária de que um dado elemento satisfaça aos requisitos específicos. Neste sentido, é importante contar com um documento que sirva de base para realizar a verificação, como uma norma, um regulamento, ou um documento técnico facilitado pelo fabricante;
- c) calibração, operação de metrologia industrial, garante que a relação entre os valores e as incertezas de medição associadas esteja em boas condições. Ou seja, trata-se de uma operação anterior à medição propriamente dita, já que servirá para garantir que esta medição seja realizada nas condições adequadas e necessárias para obter os resultados corretos.

2.2 Erros de medição

Segundo João Cirilo (2012), as medições estão sempre sujeitas a erros, porque muitos fatores podem interferir nos resultados. Até as condições ambientais podem afetar o

resultado de uma medição. Imagine o risco de confiar em um instrumento defeituoso. Por isso, é necessário certificar-se de que o sistema de medição é confiável antes de considerar que uma medida está correta. Como, em geral, uma medição não está isenta de imperfeições, o estudo dos erros de medição deve ser valorizado na Metrologia. Na prática, essa realidade nem sempre é observada, porque os próprios operadores desconhecem os fundamentos básicos dos erros de medição.

Diante disso, atualmente tem sido prática corrente a utilização dos conceitos de exatidão e precisão para caracterizar o grau de rigor com que uma medição é efetuada. Deste modo, entende-se por exatidão a maior ou menor aproximação entre o resultado obtido e o valor verdadeiro. Já a precisão está associada à dispersão dos valores resultantes da repetição das medições.

O erro de medição é a diferença entre o valor indicado pelo sistema de medição e o valor verdadeiro do mensurando (Albertazzi,2008). Matematicamente o erro de medição pode ser calculado pela seguinte Equação 1:

$$E (\text{Erro})= I (\text{Indicação}) - VV (\text{Valor Verdadeiro}) \quad (1)$$

Quando conhecemos a natureza e a ordem de grandeza de um erro de medição, podemos limitá-lo em valores que tornem a medida confiável. O operador deve dominar pelo menos dois tipos de erro que provocam influência aditiva no erro de medição:

- **erro sistemático:** “média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando” (VIM INMETRO, 2007a, p.31);
- **erro aleatório:** “resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando efetuadas sob condições de repetitividade” (VIM INMETRO, 2007a, p.31).

2.2.1 Erro sistemático

Albertazzi & Sousa (2008) fala que é possível estimar o erro sistemático. Para isso, precisam ser efetuadas medições repetitivas de uma mensurando cujo valor verdadeiro é conhecido. Quanto maior o número de medições repetitivas, melhor será a estimativa do erro sistemático. Sendo esse calculado pela Equação 2 abaixo:

$$E_s = \bar{I}_\infty - VV \quad (2)$$

Sendo:

- \bar{I}_∞ - média de um número infinito de medições;
- VV - Valor verdadeiro.

Porém, essa equação não se torna útil, pois não há tempo para realizar infinitas medições e calcular sua média e também por não conhecer exatamente o valor verdadeiro do mensurando. Com isso, realiza-se uma estimativa aproximada do erro sistemático, chamada de tendência representada pela Equação 3 (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

$$T_d = \bar{I} - VVC \quad (3)$$

Onde:

- \bar{I} - Média de um número finito de medições;
- VVC - Valor verdadeiro convencional.

Existe também a correção, que é definida como a constante que deve ser adicionada à indicação para corrigir os erros sistemáticos do sistema de medição. A mesma é calculada pela Equação 4:

$$C = - T_d = VVC - \bar{I} \quad (4)$$

Sendo:

- C – Correção;
- T_d – Tendência;
- VVC – Valor verdadeiro do mensurando;
- \bar{I} – Média das indicações.

2.2.2 Erro aleatório

João Cirilo (2012) diz que o erro aleatório se distribui em torno do valor médio das indicações. O valor individual do erro aleatório (E_{a_i}) da i -ésima indicação (I_i) pode ser expresso pela Equação 5:

$$Ea_i = I_i - \bar{I} \quad (5)$$

Onde:

- I_i - i-ésima indicação
- \bar{I} – média das indicações

Para um número grande de medições observam-se variações em torno de um valor médio que se manifesta de forma imprevisível. Como na prática o número de medições é finito, é possível apenas estimar o erro aleatório. Os fatores que contribuem para o aparecimento do erro aleatório podem ser devido a atritos, vibrações, folgas, flutuações de rede, instabilidade interna, condições ambientais, etc.

O erro aleatório pode ser quantitativamente determinado através da repetitividade ($Re\bar{I}$). A repetitividade (Equação 6) de um instrumento de medição é uma faixa simétrica de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatística definida, se situa o erro aleatório.

$$Re\bar{I} = \frac{Re}{\sqrt{n}} = \frac{t \cdot u}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Sendo:

- $Re\bar{I}$ - Repetitividade da média de “n” indicações de medidas repetidas
- t - Coeficiente de student (Tabela em anexo)
- u - incerteza padrão
- n – número de medições repetitivas usadas para calcular a média

O desvio padrão de uma distribuição é uma medida do seu grau de dispersão. É utilizada para caracterizar quantitativamente a intensidade da componente aleatória do erro de medição. Já a incerteza padrão, trata-se do valor do desvio padrão do erro aleatório de medição, é uma medida de intensidade da componente aleatória do erro de medição.

Segundo Albertazzi & Sousa (2008) quando calculada a partir de um conjunto de medições repetidas, a incerteza-padrão corresponde ao desvio-padrão da amostra. Desde modo o desvio padrão da amostra pode ser calculada pela Fórmula (7).

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad (7)$$

- u – incerteza padrão;
- I_i – i -ésima indicação;
- \bar{I} – Média de todas as indicações;
- n – número de medições repetitivas efetuadas.

2.2.3 Erro percentual

O erro percentual calculado pelo Formula 8 a seguir, em geral, consiste em comparar uma estimativa ou um valor estimado com um valor exato para encontrar a porcentagem ou a proporção de um erro em qualquer cálculo.

$$E\% = Td / \bar{I} \quad (8)$$

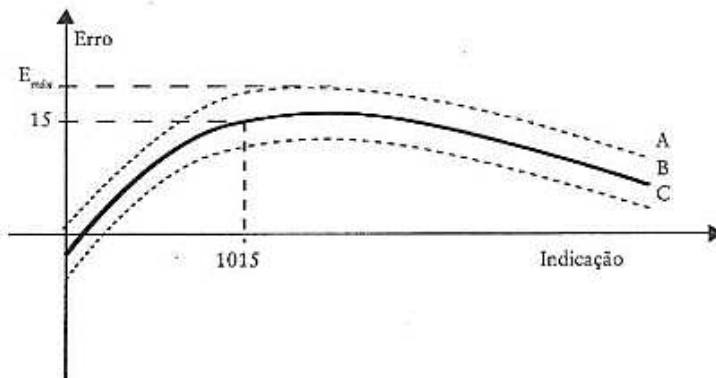
Onde:

- Td – Tendência.
- \bar{I} – Média das indicações.

2.3 Curva de erros

A curva de erros contém as informações necessárias para determinar a correção e a repetitividade para cada valor indicado pelo sistema de medição. Essa curva é formada por três linhas: a linha central (A), que contém os valores da tendência, o limite superior da faixa (B), que contém os erros, calculado pela soma da tendência com a repetitividade e o limite inferior da faixa (C), que contém os erros, calculado subtraindo-se a repetitividade da tendência (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

Figura 3 - Curvas de erro de um sistema de medição



Fonte: Albertazzi & Sousa (2008).

2.4 Manufatura aditiva

Embora a prototipagem rápida tenha se popularizado apenas há poucos anos, podem ser encontrados registros dela desde a década de 70. Esta popularização ocorreu devido, principalmente, ao barateamento da tecnologia (tanto dos equipamentos, quanto dos insumos), porque as primeiras patentes passaram a ser de domínio público, o que favoreceu a criação de máquinas e tecnologias genéricas com preços mais acessíveis. Essa redução de preço possibilitou mais investimentos de empresas, inclusive as pequenas e médias, na área. (VOLPATO, 2007)

A Manufatura Aditiva, como o próprio nome diz adiciona matéria prima no processo de fabricação, ou seja, faz uso de uma quantidade de matéria prima muito próxima da quantidade necessária para confeccionar o objeto. Em geral a matéria prima é depositada sobre uma plataforma para formar o objeto a cada camada.

A prototipagem rápida aditiva é baseada no uso das máquinas de impressão 3D (Yongnian *et al.*, 2009). Como falado anteriormente, a impressora 3D mais utilizada e difundida no mundo é baseada em um sistema de extrusão de plásticos moldados a altas temperaturas (termoplásticos), conhecida como FDM (*Fused Deposition Modeling*) que é o processo de deposição do material termoplástico fundido sobre uma mesa de impressão no qual é construída camada por camada do objeto (CANCIGLIERI, *et al.*, 2015, BAK *et al.*, 2013 e GOLDBERG, 2014).

A matéria prima utilizada em máquinas FDM para construção de um objeto é disponibilizada na forma de um cordão de filamento plástico bobinado em carretéis de

aproximadamente 1kg, com espessura de 1,75 mm de diâmetro, e os tipos de plásticos mais comuns são o ABS (*Crylonitrile Butadiene Styrene*) e o PLA produzidos em várias cores diferentes conforme a necessidade. O termoplástico mais custo/benefício é o PLA (*Polylactic Acid*), ambos produzidos em várias cores diferentes conforme a necessidade.

A MA, por adicionar apenas a quantidade útil de matéria prima para construir um objeto é mais econômica e rápida. Isto porque o uso da matéria prima é menor do que a manufatura tradicional subtrativa, e mais rápida do que a formativa, dado que a mesma necessita de manufatura aditiva ou subtrativa na construção do molde. O PLA é o termoplástico mais fácil de se utilizar e com melhor custo /benefício, sendo este biodegradável, além de poder ser reaproveitado na confecção de novos filamentos para impressão 3D (CHUA, 2010) e (VOLPATO, 2007).

Apesar do tempo de manufatura da prototipagem rápida aditiva não ser curto como o desejado, ainda sim é uma opção mais rápida e de menor custo (incluindo o material) do que outros processos de manufatura tradicionais.

Máquinas de prototipagem rápida aditiva desenvolvidas até hoje atendem aos três principais tipos de clientes: amadoras que fazem uso de impressoras pessoais ou Home Office de pequeno porte e custo reduzido, os pequenos e médios empresários que fazem uso de produção de até 2.000 (duas mil) peças por mês, chamadas de impressoras profissionais ou comerciais e por fim, as impressoras industriais de grande porte e alto custo geralmente empregadas em grandes centros de usinagem no qual, a aplicação não é exatamente na produção, mas para o desenvolvimento de protótipos e matrizes utilizadas para acelerar a produção de manufatura tradicional (ZAPAROLLI, 2019).

A seguir é citada algumas vantagens e desvantagens da impressão 3D.

Vantagens:

- a) maior liberdade no design: a impressão 3D permite a produção de peças complexas, muitas das quais não podem ser produzidas por outros métodos de fabricação;
- b) criação de protótipos: com a manufatura aditiva, existe a possibilidade de criar apenas uma peça como forma de pilotagem, conforme as exigências do projeto, antes de dar andamento à produção em série;
- c) baixo custo: a manufatura aditiva trabalha com matérias-primas mais acessíveis do que as tradicionais, bem como baixos custos de logística, maquinário,

montagem e alta produtividade impactam em menores investimentos na operação.

Desvantagens:

- d) normalmente há limitação do tamanho do item;
- e) exige conhecimentos técnicos que não estão ao alcance de qualquer utilizador;
- f) as peças geralmente não têm resistência, resistência ao calor ou acabamento superficial necessário para as peças finais.

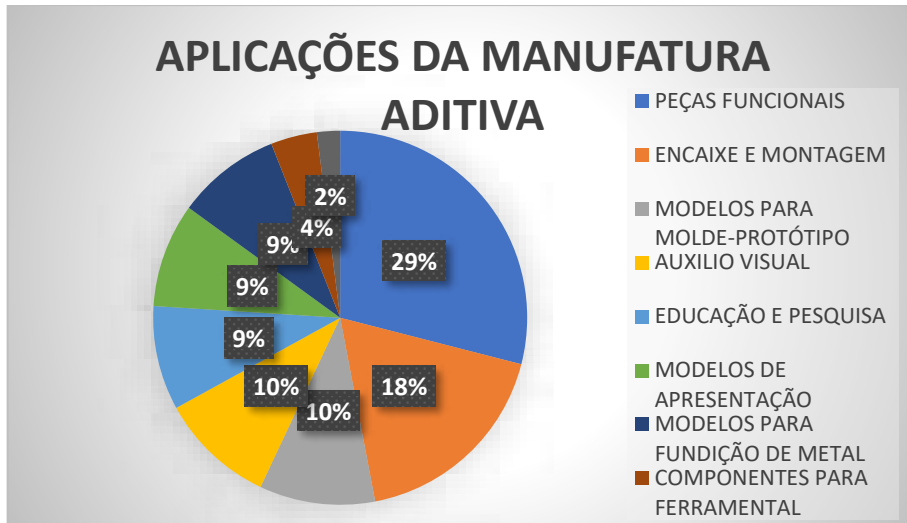
2.5 Aplicações da manufatura aditiva e métodos

As primeiras tecnologias de manufatura aditiva (MA) possibilitavam, principalmente, a obtenção de protótipos para visualização, com menores exigências em termos de materiais, precisão dimensional e desempenho (função). A aplicação se restringia aos estágios iniciais do PDP (Processos de desenvolvimento de produto). Com o aumento da percepção do potencial oferecido pela MA, o campo de aplicações foi se ampliando consideravelmente. Isso passou a exigir mais dos processos em termos de melhoria geral da qualidade dos componentes produzidos, novos materiais e funcionalidade.

Em resposta a todas essas inovações, as tecnologias de MA começaram a evoluir e novos processos foram surgindo. Primeiramente, foram estendidas para a engenharia, análise e planejamento e posteriormente para etapas de manufatura e ferramental.

Um levantamento recente realizado com 127 empresas usuárias das tecnologias MA apresentou uma distribuição geral de onde estas estão sendo utilizadas (VOLPATO, 2017).

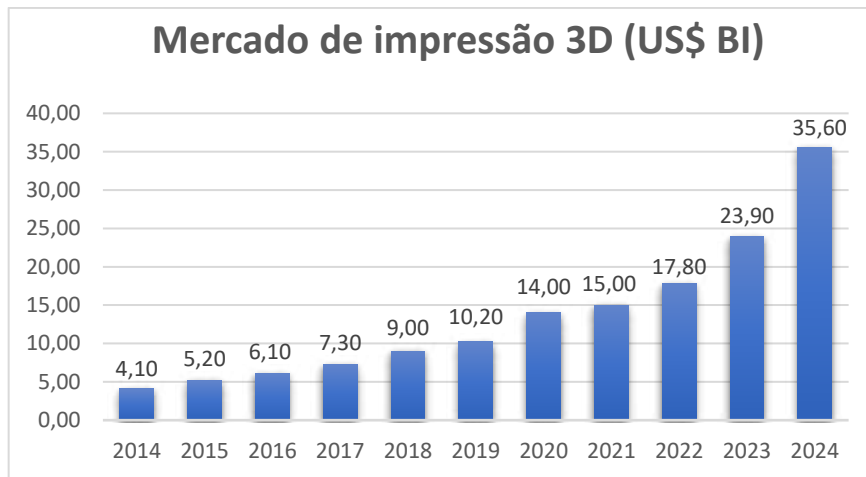
Gráfico 1 - Aplicações da manufatura aditiva



Fonte: Adaptado de Volpato (2017).

Esse crescimento na utilização de impressoras 3D nas indústrias, também refletiram em um crescimento nas receitas. Observa-se no Gráfico 2 abaixo que o mercado de Impressoras 3D tem projeção de arrecadar cerca de US\$ 35,6 bilhões em 2024, comparando ao ano de 2014, haverá um acréscimo de mais de 800% nos lucros advindos desse mercado.

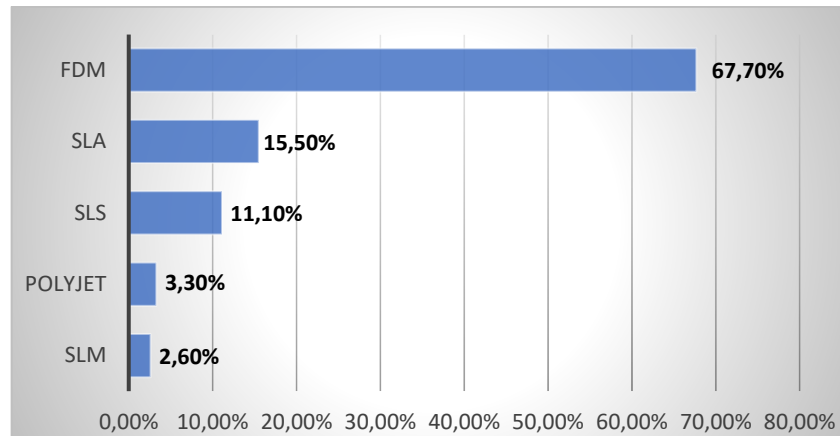
Gráfico 2 - Arrecadação em US\$ do mercado de impressão 3D



Fonte: Adaptado 3D HUBS adaptado (2019)

Segundo a 3D HUBS (2019), especialista na área de manufatura aditiva e CNC, afirma que dentre todas as máquinas utilizadas no mundo todo a FDM ocupa o topo das impressoras mais utilizadas com uma margem de mais de 65% como mostrado no gráfico abaixo.

Gráfico 3 - Tipos de impressoras 3D mais utilizadas na manufatura aditiva



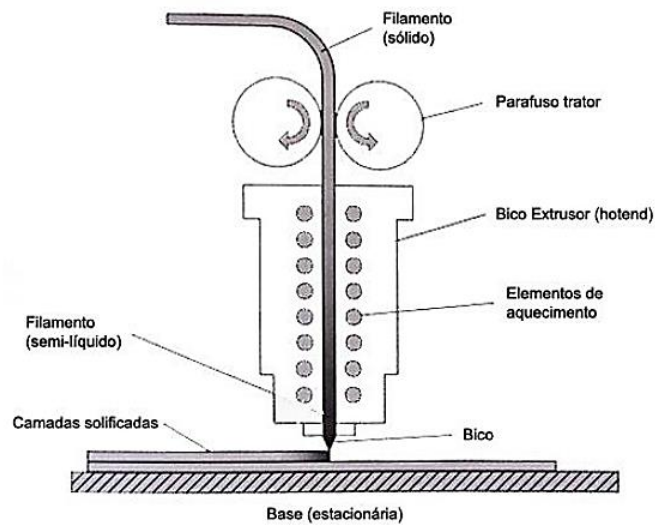
Fonte: Adaptado 3D HUBS (2018).

2.6 FDM - *Fused Deposition Modeling*

A FDM é uma das técnicas mais utilizadas para fabricação de protótipos através do método de extrusão de polímeros, desenvolvida em 1988, patenteada e comercializada em 1992 pela empresa Stratasys® (GIBSON, ROSEN, STUCKER, 2010; VOLPATO et al., 2017).

A FDM (Fused Deposition Modeling) como o próprio nome sugere, deve ser um processo de modelagem baseada na deposição do fundido de um material inicialmente sólido. De fato, segundo Chua *et al.* (2010), um material termoplástico em forma de filamento é derretido em um cabeçote e extrudado em um bocal para dar forma às camadas criadas no fatiamento. Repara-se na figura que o material deixa o extrusor em estado semilíquido, permitindo que ele se solidifique ao entrar em contato com a base e com o ar.

Figura 4 - Modelo de funcionamento da impressão FDM



Fonte: Adaptado de Chua *et al.* (2010).

Em síntese, a impressão 3D FDM pode ser classificada em três categorias quanto ao tipo de impressora. Tais como:

- a) cartesiana:
 - configuração mais simples;
 - os três eixos são independentes, ou seja, cada eixo tem o seu motor;
 - apresentam baixo custo e fácil manutenção.
- b) core XY:
 - configuração mais complexa;
 - contém um eixo independente (eixo Z) e dois conjugados (eixos X e Y);
 - o eixo Z é responsável pela altura da mesa e os eixos X e Y definem em qual sentido o carro de impressão irá se movimentar;
 - apresenta velocidades superiores às cartesianas.
- c) delta:
 - configuração mais complexa em relação as demais;
 - possuem os 3 eixos conjugados, garantindo livre movimentação do carro de impressão em qualquer um dos eixos.

2.7 Materiais de fabricação 3D

A FDM utiliza como matéria prima os polímeros termoplásticos na forma de filamentos enrolados em uma bobina. Estes são compostos por cadeia de moléculas, as quais quando submetidas a elevadas temperaturas tomam determinadas formas que são estabilizadas em temperatura ambiente. (PARENTE, 2006; SANTOS, 2006; HAMOD, 2014).

Entre os materiais mais utilizados neste processo são: Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poli Ácido Lático (PLA) e o Poli Tereftalato de Etileno (PET).

2.7.1 *Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS*

- composto de petróleo;
- é inflamável quando exposto a altas temperaturas;
- possui uma grande durabilidade;
- é um dos polímeros mais utilizados devido suas propriedades mecânicas de flexibilidade e resistência
- as peças impressas com este material podem ser lixadas, coladas e pintados oferecendo um ótimo acabamento final do objeto;
- a temperatura de derretimento sugerida para este material é aproximadamente entre 220 a 250 °C.

2.7.2 *Poli Ácido Lático – PLA*

- termoplástico, é um material biodegradável e sua composição é feita pela extração do milho, trigo ou cana de açúcar, passando por várias etapas na produção;
- é extremamente vantajoso no quesito sustentável em relação a degradação na natureza;
- desperta-se muito interesse devido as suas propriedades mecânicas biodegradáveis, rígidas, resistentes e aptas para moldar peças no processo de extrusão, injeção, dentre outros tipos;
- são considerados os insumos mais fáceis para trabalhar no processo da manufatura aditiva;
- ponto de extrusão entre 160 a 220 °C.

2.7.3 *Poli Tereftalato de Etileno– PET*

- é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo, devido as suas propriedades mecânicas, térmicas e o baixo custo;
- suporta altas resistências quanto ao impacto, é resistente a altas temperaturas, boa transparência, estabilidade dimensional, facilidade no manuseio, isolando até mesmo odores do produto;
- é uma matéria prima não muito utilizada nesta tecnologia;
- a temperatura de extrusão ideal é de 245° c e a temperatura da mesa aquecida é de 70 °C.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Filamento de impressão

Os Corpos de Prova (CPs) foram produzidos utilizando filamentos ABS. Como já citado anteriormente é o filamento que mais é utilizado atualmente, além de possuir excelentes propriedades mecânicas, como ductilidade, impacto e resistência ao desgaste. O ABS é indicado para produção de peças que exijam maior resistência ao impacto e alta temperatura, além de peças que necessitem de certa flexibilidade para encaixes. Deve-se tomar cuidado ao fato de que durante a impressão o ABS emite gases que podem ser prejudiciais à saúde.

Figura 5 - Bobina de filamento ABS

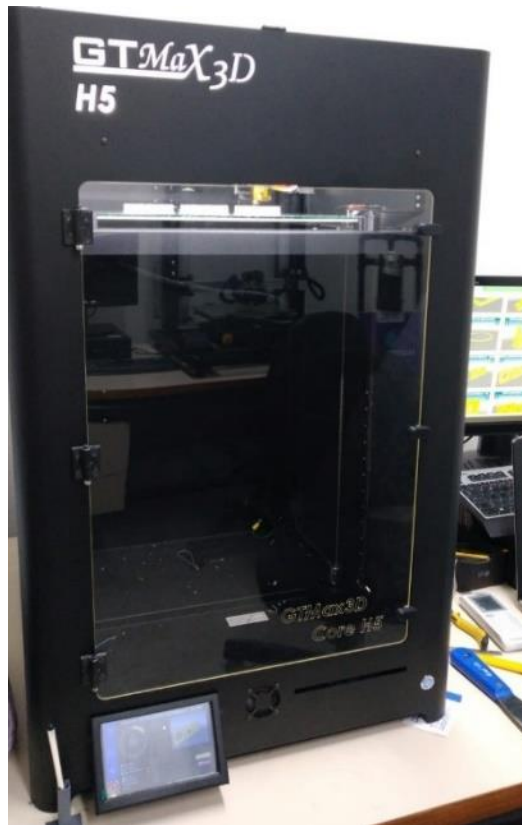


Fonte: 3D Prime (2022).

3.2 Impressora 3D

Para esse trabalho, foi utilizada a máquina de impressão 3D do laboratório de mecânica da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas. A impressora utilizada é uma Core XY, tendo como característica sua tecnologia de impressão em FDM, ou seja, utiliza-se da deposição de filamentos fundidos para construção das geometrias desejadas. A Figura 6 retrata a impressora utilizada no processo.

Figura 6 - Impressora 3D GTMax H5



Fonte: Autor (2023).

3.3 Equipamentos de medição

Para a medição dos respectivos furos das peças fez-se necessário a utilização de um paquímetro digital apresentado na Figura 7, com faixa de medição de 0-150 mm.

Figura 7 - Paquímetro digital



Fonte: Autor (2023).

3.4 Parâmetros de impressão

Os parâmetros de impressão foram definidos a partir de um estudo preliminar exploratório juntamente com os técnicos e o responsável do laboratório de impressão 3D da UFC campus Russas. Foram realizados testes de impressão para diferentes diâmetros e espessuras de 5 e 10 mm, e também para sentidos distintos de impressão em relação a mesa da impressora, horizontal e vertical.

A Tabela 2 a seguir mostra os parâmetros de impressão utilizados na produção dos corpos de prova. Identificar quais parâmetros terão maior influência nas propriedades das peças impressas é de suma importância, além de ajustá-los para níveis adequados para que promovam resultados desejáveis, tanto no aspecto superficial quanto melhorando as propriedades mecânicas do material.

Tabela 2 - Parâmetros de impressão utilizados

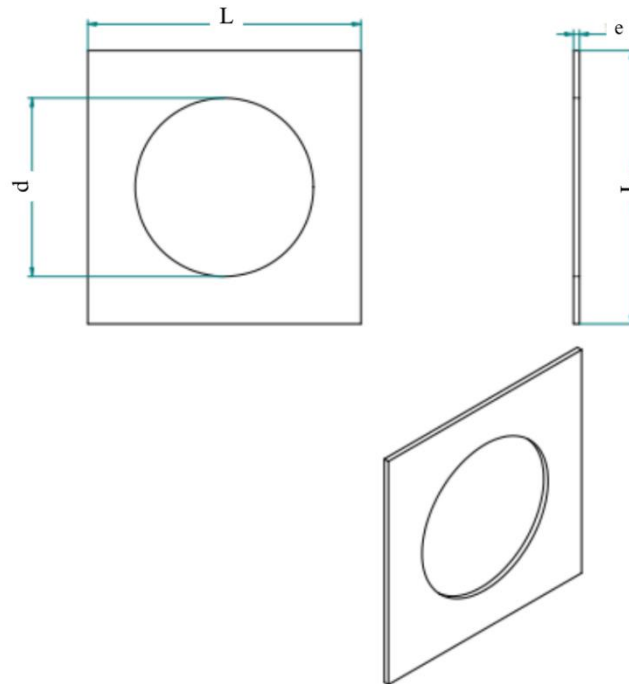
Parâmetros de impressão	
Velocidade de impressão	50 mm/s
Temperatura de extrusão	228 °C
Temperatura da mesa	100 °C
Diâmetro do bico	0,5 mm
Altura de camada	0,2 mm
Largura de camada	0,5 mm
Nº de filetes da parede	3

Fonte: Autor (2023).

3.5 Criação do modelo geométrico

A Figura 8 a seguir ilustra o esboço do modelo de corpo de prova utilizado como base para a fabricação. Nesse desenho técnico é ilustrado as vistas com suas respectivas indicações de medidas.

Figura 8 - Desenho técnico do CP



Fonte: Autor (2023).

Onde:

- d – diâmetro do furo;
- L – comprimento;
- e – espessura do cubo = 5 mm.

Foram definidas 9 medidas de furos para impressão do protótipo mostrada na Tabela 3. Essas medidas foram baseadas na análise do tempo de impressão, capacidade máxima da mesa e também a quantidade de material que seria utilizado.

Tabela 3 - Medidas dos furos

MEDIDAS DOS FUROS (mm)		
5	10	20
30	40	50
75	100	150

Fonte: Autor (2023).

Para os furos de 5 mm, 10 mm, 20 mm foram adotadas as seguintes medidas de comprimento (L) a seguir:

$$L = d \times 2 \quad (8)$$

$$e = 5 \text{ mm}$$

Logo, podemos observar que o comprimento (L) será o dobro do diâmetro do furo. Para os demais tamanhos (30, 40, 50, 75, 100, 150) o valor de L será calculado a partir da seguinte equação:

$$L = d \times 1.5 \quad (9)$$

Alguns valores de L foram arredondados para valores próximos a fim de obter uma melhor leitura por parte da impressora e dos cálculos.

Tabela 4 - Dimensões para cada CP fabricado

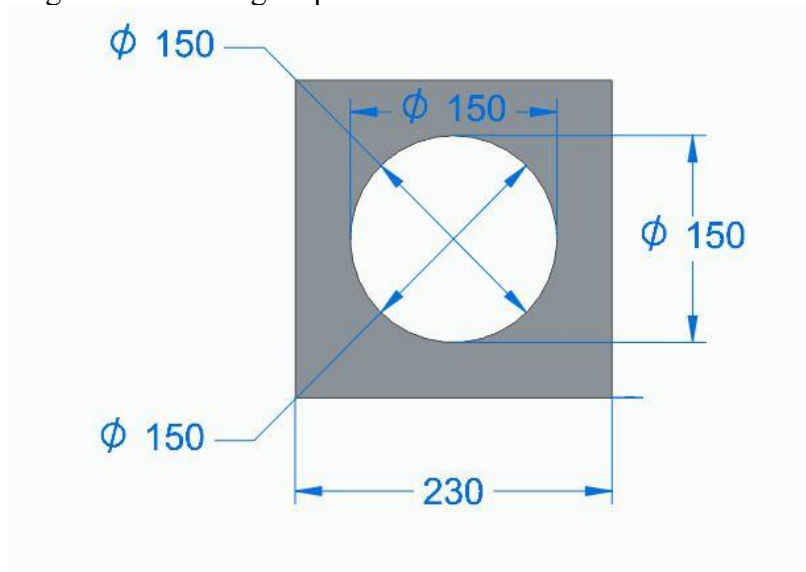
d- Diâmetro do furo	L - Comprimento
5 mm	10 mm
10 mm	20 mm
20 mm	40 mm
30 mm	45 mm
40 mm	60 mm
50 mm	75 mm
75 mm	110 mm
100 mm	150 mm
150 mm	230 mm

Fonte: Autor (2023).

3.6 Procedimento de impressão 3D

Para fabricação dos corpos de prova utilizou-se o software de CAD para realizar a modelagem do corpo de prova como ilustrado na Figura 9, sendo exportado para o formato STL – *Standard Template Library*, formato padrão de leitura do software da impressora 3D utilizada.

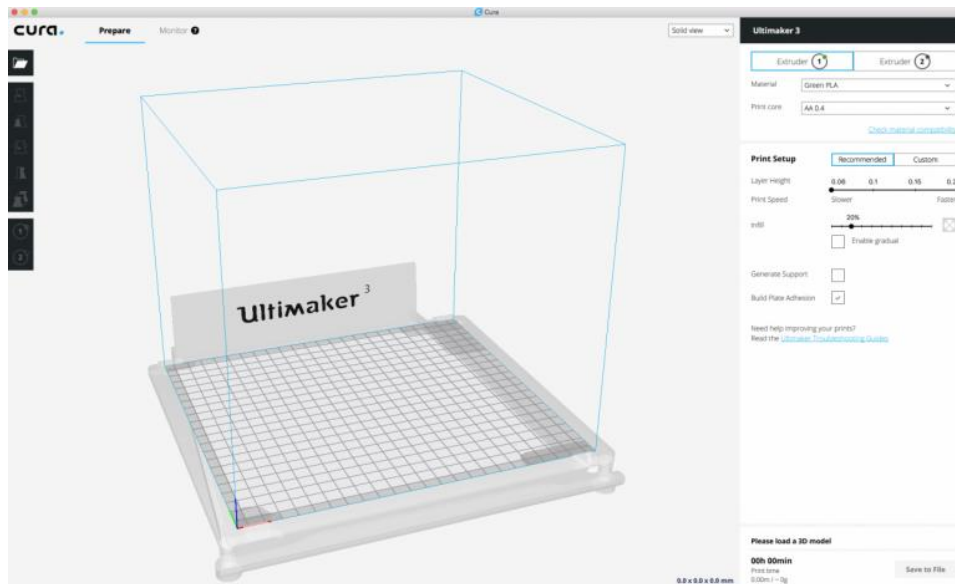
Figura 9 - Modelagem pronta do CP



Fonte: Autor (2023).

A Figura 10 mostra a interface do software Ultimaker Cura® 4.6.2. Onde nele é realizado o processo de pré-fabricação dos objetos a serem impressos, visto que, é possível ajustar os parâmetros de impressão de modo que atenda às necessidades do operador.

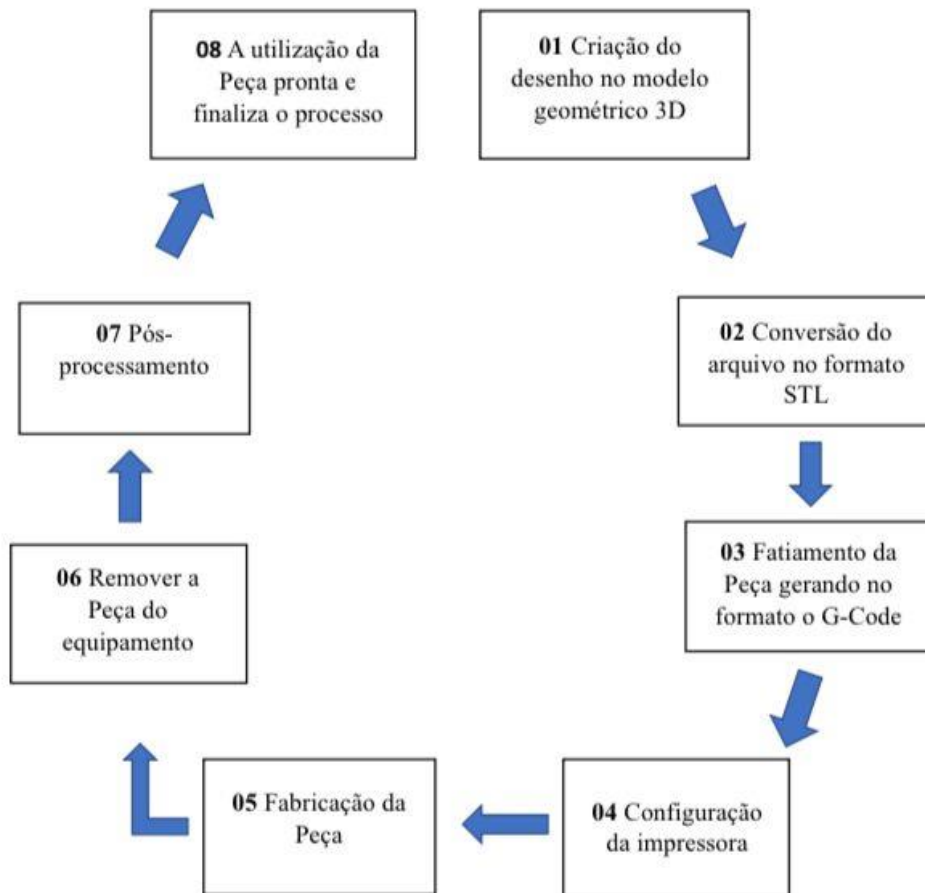
Figura 10 - Interface do ultimaker cura



Fonte: Autor (2023).

A Figura 11 ilustra resumidamente o passo a passo da impressão 3D realizado no trabalho.

Figura 11 - Etapas do processo de fabricação das peças

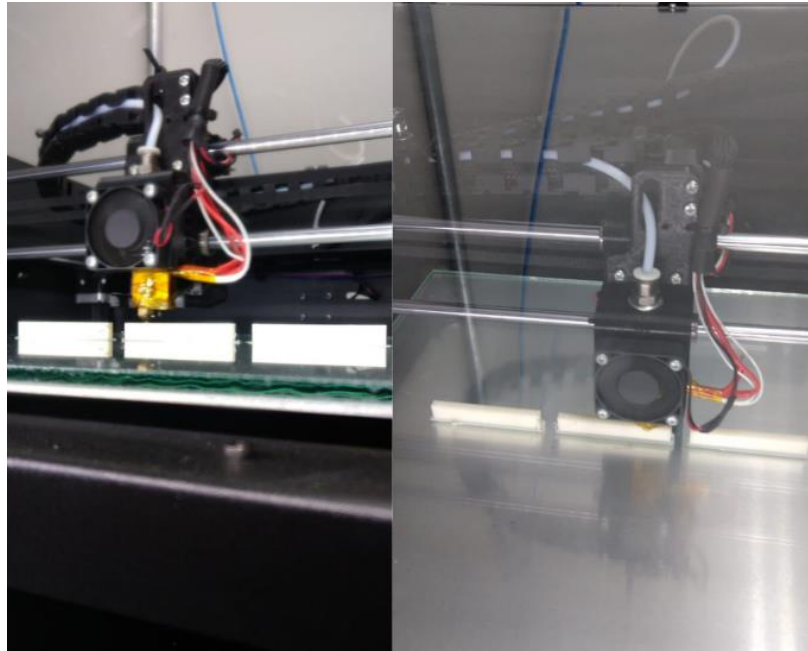


Fonte: Autor (2023).

É importante relatar, que na etapa exploratória de parâmetros foram realizados testes em relação ao sentido de fabricação dos corpos de prova. Eles foram impressos tanto no sentido horizontal como no sentido vertical em relação a mesa de impressão. A partir disso, foi decidido tornar como foco de estudo os corpos de provas impressos na vertical, pois foi neles que se observou maiores variações dimensionais durante a impressão. Com isso, os resultados em relação a confiabilidade das medidas seriam mais expressivos.

Diante disso, foram impressos três corpos de prova para cada diâmetro de furo evidenciado na Figura 12, totalizando 27 amostras fabricadas e medidas posteriormente.

Figura 12 - Impressão dos CPs

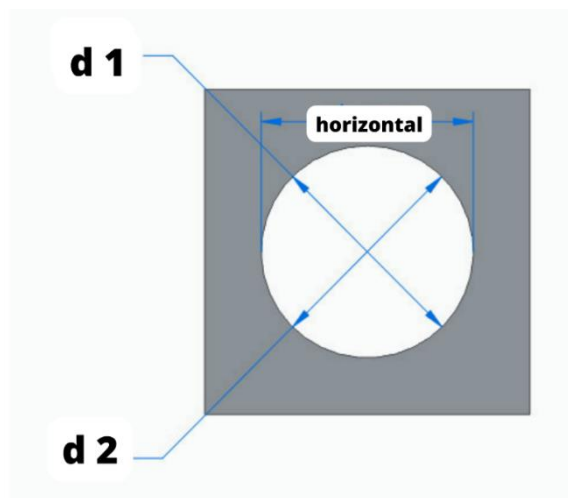


Fonte: Autor (2023).

3.7 Procedimentos de medição

O processo de medição das peças foi realizado em temperatura ambiente, onde foram definidas três direções de medidas mostradas na Figura 13, sendo ela horizontal e as duas diagonais.

Figura 13 - Disposição das direções de medição



Fonte: Autor (2023).

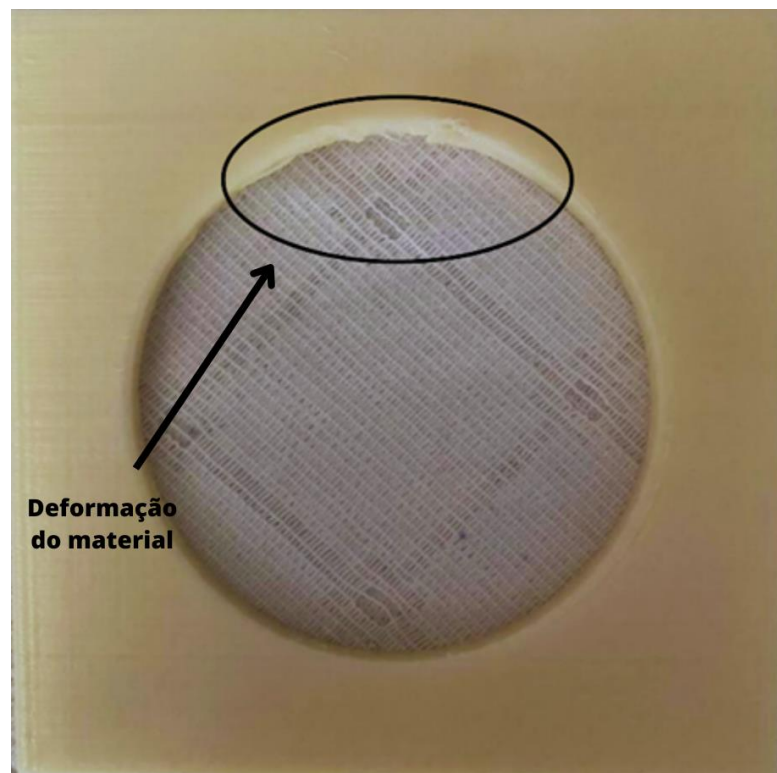
Vale a pena ressaltar, que após realizadas as medições, foi utilizada a ferramenta de análise de variância, ANOVA, onde foi possível elaborar gráficos que possibilitassem uma melhor organização dos resultados sobre as variáveis de respostas previamente definidas. Todos os gráficos gerados utilizaram um intervalo de confiança de 95%.

4 RESULTADOS

4.1 Análise qualitativa dos corpos de provas

Após a definição dos parâmetros e confecção dos corpos de prova pode ser observado que estes obtiveram bom aspecto superficial, com um bom acabamento. Porém como apresentado anteriormente na Figura 14 houve um pequeno ressalvo na parte superior do furo que pode estar associado a falta de um suporte. Este é adicionado no fatiamento da peça no software Cura para melhorar a adesão e evitar o deslizamento do material fundido para a porção central do furo.

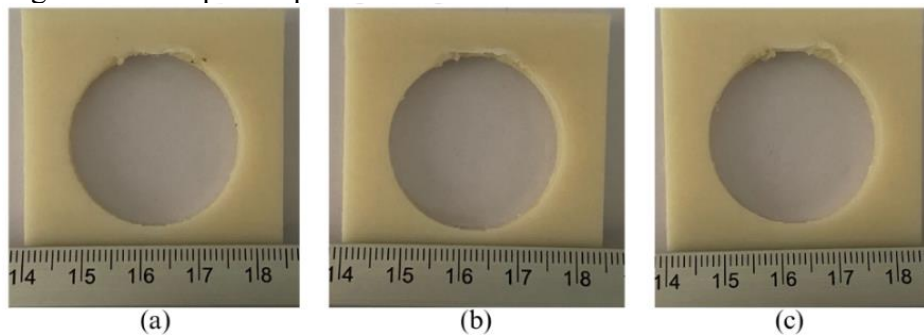
Figura 14 - Corpo de prova impresso com destaque na parte superior do furo



Fonte: Autor (2023).

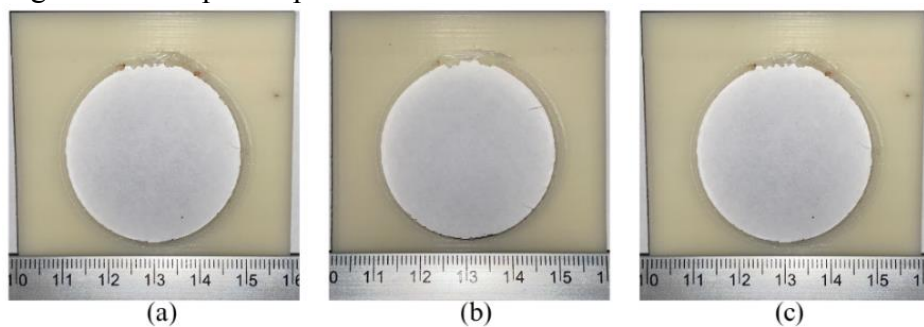
Entretanto, esse suporte não foi utilizado para intensificar a influência do efeito nos diâmetros que foram gerados. Ademais, como pode ser visto da Figura 15 à Figura 20, foram tiradas fotografias de todos os corpos de prova com uma escala de referência para uma análise visual destes.

Figura 15 - Corpos de prova com furo de 30 mm



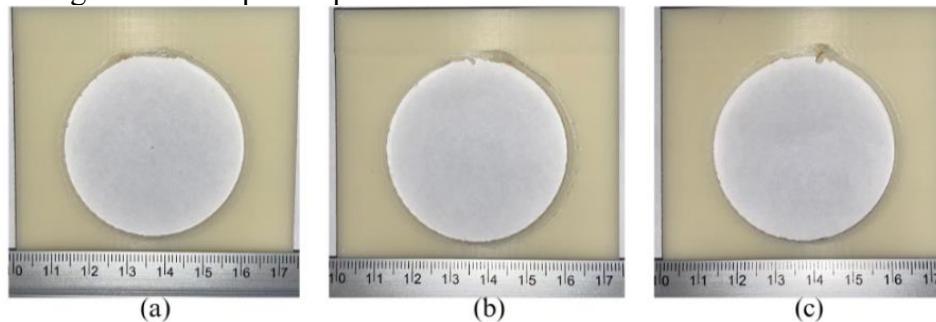
Fonte: Autor (2023).

Figura 16 - Corpos de prova com furo de 40 mm



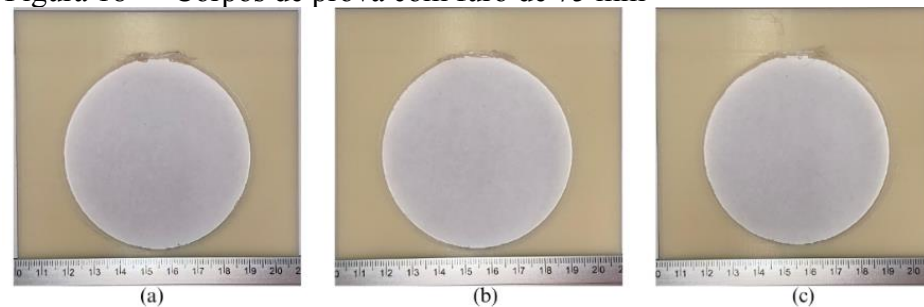
Fonte: Autor (2023).

Figura 17 - Corpos de prova com furo de 50 mm



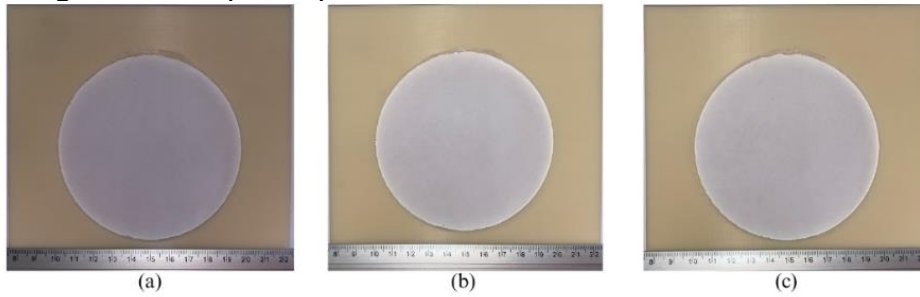
Fonte: Autor (2023).

Figura 18 - - Corpos de prova com furo de 75 mm



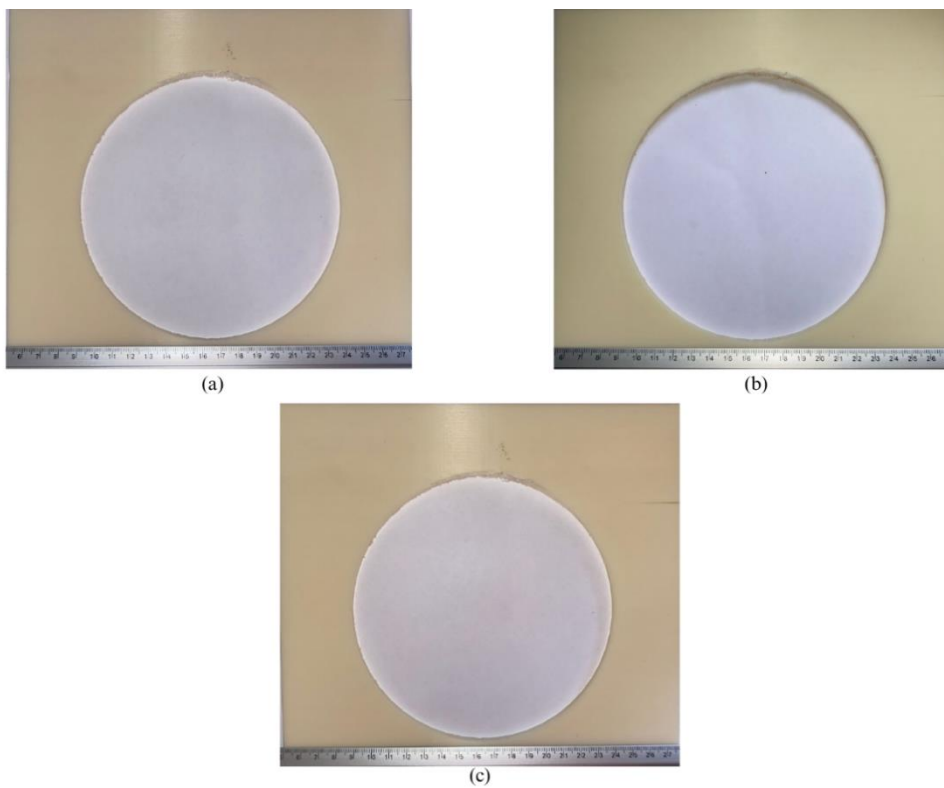
Fonte: Autor (2023).

Figura 19 - Corpos de prova com furo de 100 mm



Fonte: Autor (2023).

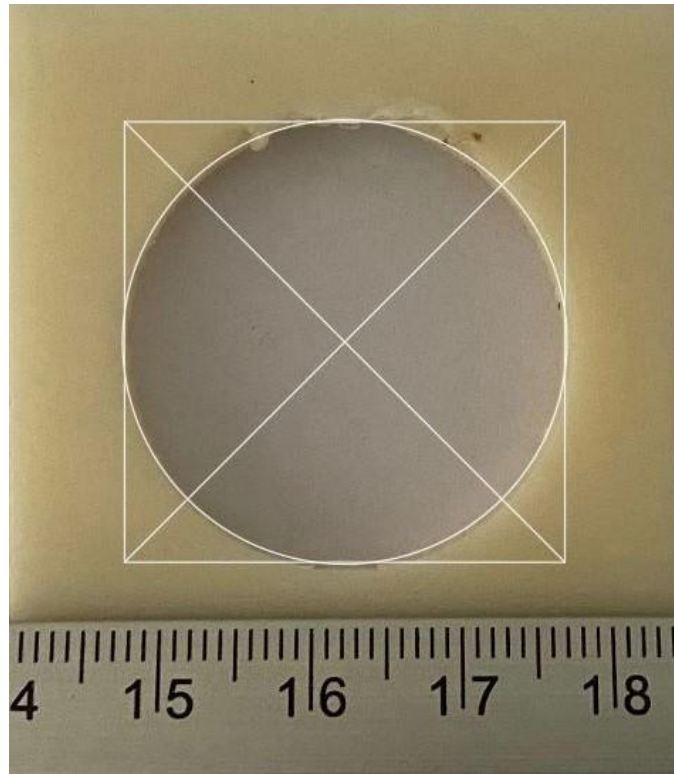
Figura 20 - Corpos de prova com furo de 150 mm



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 21 é mostrada uma análise visual do corpo de prova de 30 mm, onde foi sobreposto o desenho de um círculo na peça com o objetivo de verificar se o furo do corpo de prova estava dentro do padrão dimensional que foi definido para o trabalho. Após isso, pode ser observado que houve pequenas diferenças entre o desenho do círculo sobreposto e o furo da peça que não tiveram resultados expressivos para a conclusão de dados do estudo visual.

Figura 21 - Análise visual do corpo de prova de 30 mm



Fonte: Autor (2023).

4.2 Análise estatística das medições

A Tabela 5 mostra as médias por posição de medida para cada diâmetro de furo, onde foram cálculos a média da indicação, o erro médio, o desvio padrão, a repetitividade e o erro percentual.

Tabela 5 - Médias por posição de medida para cada diâmetro de furo

Posição	Medida teórica	Média da Indicação	Erro médio	Erro absoluto	Desvio padrão	Repetitividade	Erro %
h	5,0	4,513	-0,487	0,487	0,087	0,167	10,8%
d1	5,0	4,627	-0,373	0,373	0,021	0,040	8,07%
d2	5,0	4,513	-0,487	0,487	0,021	0,040	10,8%
h	10,0	9,483	-0,517	0,517	0,093	0,177	5,45%
d1	10,0	9,643	-0,357	0,357	0,119	0,228	3,70%
d2	10,0	9,747	-0,253	0,253	0,168	0,321	2,60%
h	20,0	19,560	-0,440	0,440	0,040	0,076	2,25%
d1	20,0	19,600	-0,400	0,400	0,040	0,076	2,04%
d2	20,0	19,517	-0,483	0,483	0,060	0,115	2,48%

h	30,0	29,603	-0,397	0,397	0,006	0,011	1,34%
d1	30,0	29,630	-0,370	0,370	0,087	0,165	1,25%
d2	30,0	29,710	-0,290	0,290	0,096	0,184	0,98%
h	40,0	39,597	-0,403	0,403	0,064	0,121	1,02%
d1	40,0	39,727	-0,273	0,273	0,202	0,386	0,69%
d2	40,0	39,770	-0,230	0,230	0,159	0,303	0,58%
h	50,0	49,397	-0,603	0,603	0,045	0,086	1,22%
d1	50,0	49,433	-0,567	0,567	0,023	0,044	1,15%
d2	50,0	49,397	-0,603	0,603	0,055	0,105	1,22%
h	75,0	74,470	-0,530	0,530	0,036	0,069	0,71%
d1	75,0	74,463	-0,537	0,537	0,049	0,094	0,72%
d2	75,0	74,487	-0,513	0,513	0,067	0,127	0,69%
h	100,0	99,530	-0,470	0,470	0,035	0,066	0,47%
d1	100,0	99,470	-0,530	0,530	0,026	0,051	0,53%
d2	100,0	99,533	-0,467	0,467	0,029	0,055	0,47%
h	150,0	149,440	-0,560	0,560	0,010	0,019	0,37%
d1	150,0	149,507	-0,493	0,493	0,040	0,077	0,33%
d2	150,0	149,530	-0,470	0,470	0,070	0,134	0,31%

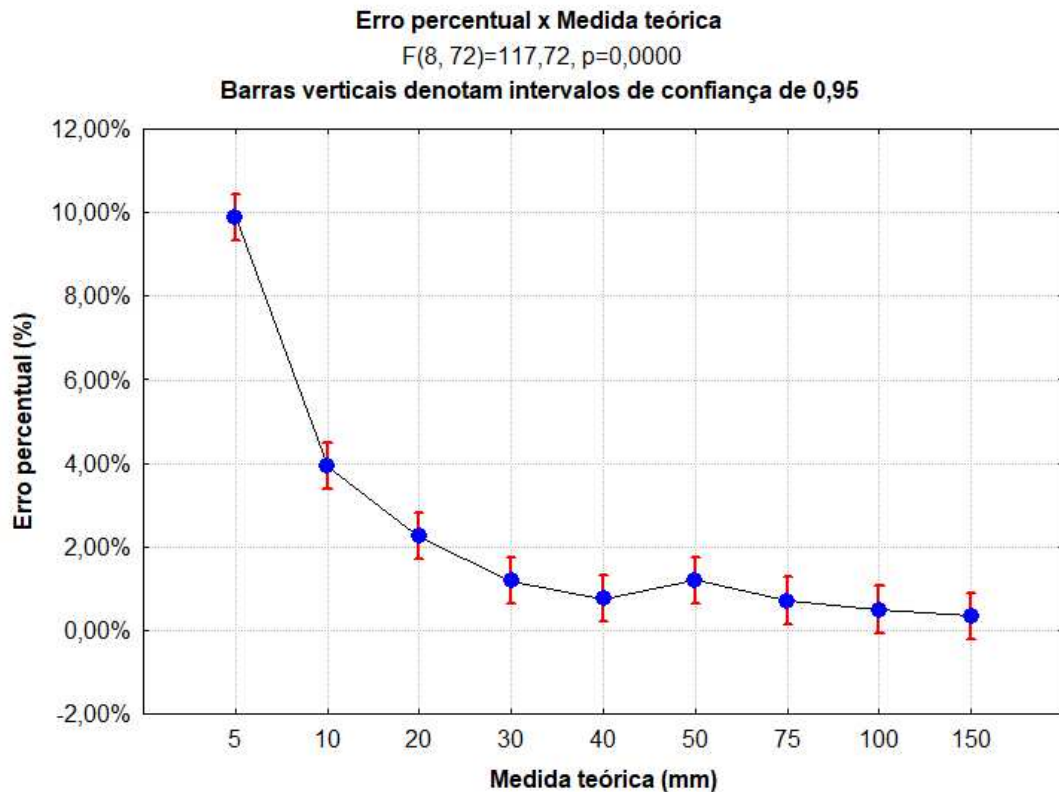
Fonte: Autor (2023).

Após as medidas serem realizadas, foram calculadas levando em consideração a análise por posições, as seguintes medidas de dispersões: o erro médio calculado pela média dos erros de cada corpo de prova, o desvio padrão (Equação 7) e o erro percentual. Estes parâmetros foram utilizados para determinar a tendência, utilizando a Equação 3, sendo está uma estimativa do erro médio e a repetitividade, que é a estimativa do erro aleatório utilizando a Equação 6.

Por conseguinte, utilizando o ANOVA foram plotados gráficos onde observou-se a confiabilidade dimensional da impressora 3D. Na construção gráfica foram utilizados os valores do erro absoluto para melhor organização e entendimento dos gráficos dispostos pelo ANOVA.

A Figura 22 apresenta o gráfico do erro percentual (%) em relação a medida teórica (mm).

Figura 22 - Gráfico de erro percentual (%) x medida teórica (mm)



Fonte: Autor (2023).

De início podemos levar em conta que este gráfico exibe resultados significativos de acordo com o valor do p informado abaixo do título. Esse p na análise de variância nos informa o quanto as informações apresentadas nos gráficos são significativas. Para valores de $p < 0,05$ temos que os valores são relevantes para o estudo.

Nessa figura 22, foi observado que os corpos de prova com os furos de menores diâmetros obtiveram maiores erros percentuais quando comparados aos CPs de diâmetros maiores.

Esse resultado pode estar diretamente relacionado ao diâmetro do bico extrusor, que é de 0,5 mm. O bico extrusor possui a função de depositar o material fundido sobre a mesa. As peças com diâmetros maiores, em especial 75,100,150 mm apresentaram proporcionalmente melhor desempenho, com maiores níveis de resolução e acabamento superficial e ainda, com estimativa de erro bem próximos de 0%.

Podemos citar também a limitação do equipamento de medição utilizado. Principalmente para os corpos de prova de 5 mm que é a faixa mínima da medição onde

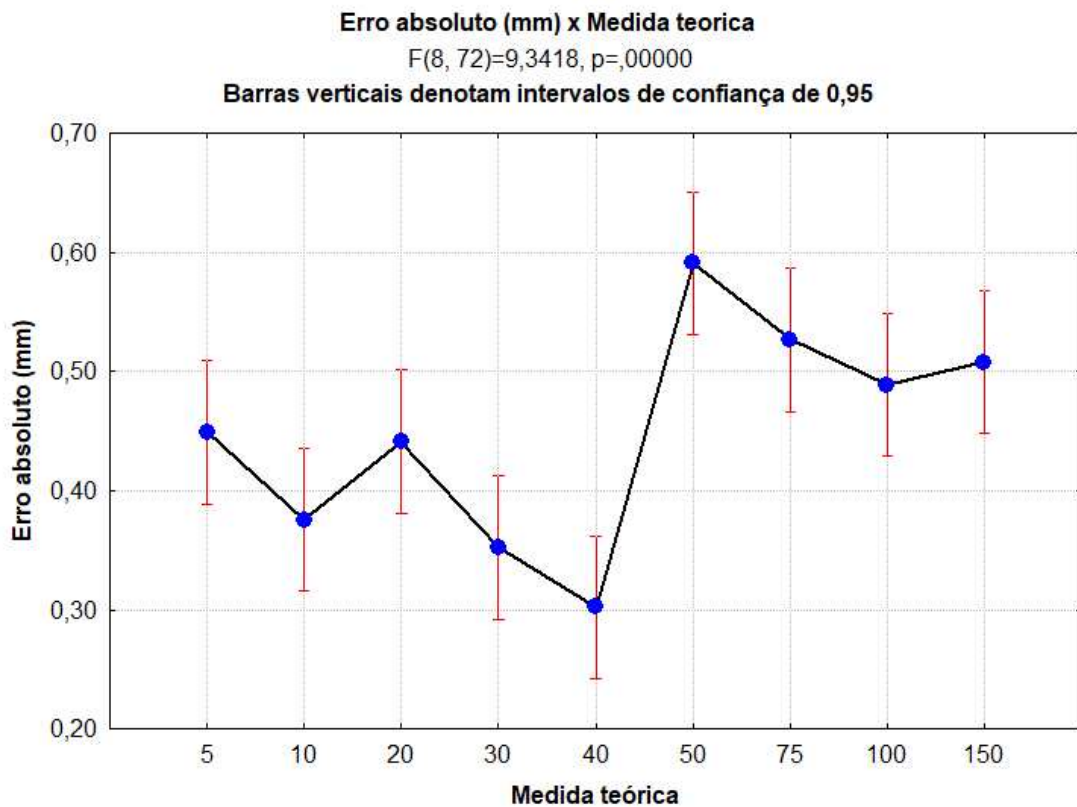
apresentou dificuldades na hora da medição e conseqüentemente a leitura por parte do paquímetro.

Diante disso, a solução para melhor detalhamento e redução do erro para as peças de 5,10 mm de furo seria a utilização de um bico extrusor com diâmetros menores do que o utilizado de 0,5 mm, com a finalidade de obter peças com melhor processamento de detalhes e conseqüentemente taxas de erros baixas. Já, em relação ao sistema de medição utilizado para os corpos de prova menores, poderia ser utilizado equipamento capaz de medir com melhor condição os furos como por exemplo um micrômetro.

Vale a pena ressaltar, que tanto nesse gráfico da Figura 23 como nos demais gráficos posteriores apresentaram bons resultados. Com níveis de erros baixos para todos os diâmetros mesmo sem a presença do uso do suporte durante a impressão.

A Figura 23 apresenta o gráfico da relação entre o erro médio (mm) e o diâmetro teórico dos corpos de prova. As barras vermelhas está representando o intervalo de confiança das medições.

Figura 23 - Gráfico de erro médio absoluto (mm) x medida teórica (mm)



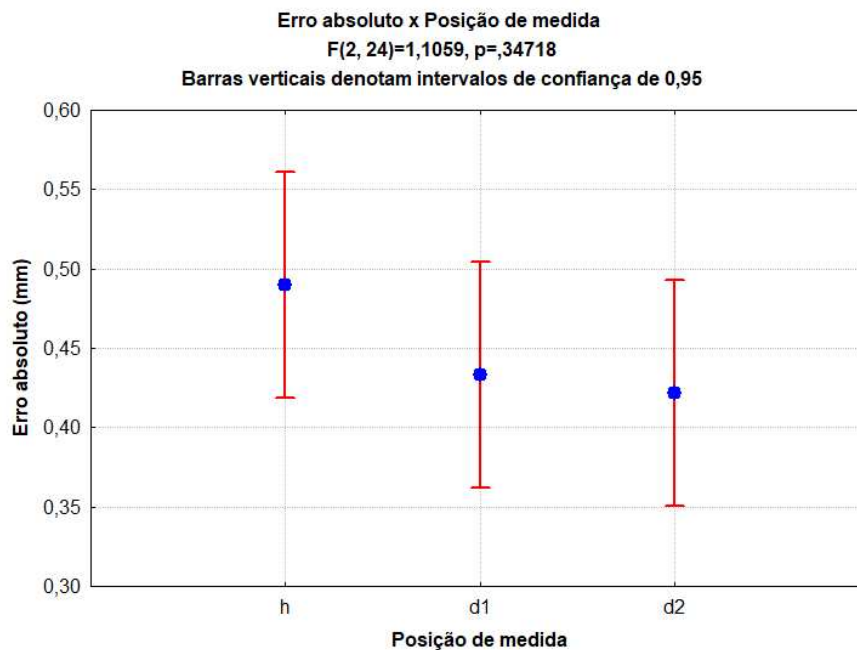
Fonte: Autor (2023).

Nesse gráfico pode ser observado que a faixa de diâmetros de 5 a 40 mm apresenta um erro menor quando comparada à faixa de diâmetros de 50 a 150 mm, este comportamento é acompanhado de uma tendência de queda do erro absoluto em relação ao aumento do diâmetro. A última faixa de diâmetros, de 50 a 150 mm, pode ser vista em um patamar superior de erro, porém com uma tendência descendente similar a faixa anterior.

Este resultado pode estar associado ao deslocamento do cabeçote extrusor, que por características de construção, como por exemplo a falta de um controle sinérgico de fabricação dos corpos de prova, apresenta uma maior confiabilidade dimensional para deslocamentos menores do cabeçote. Assim para corpos de prova na faixa de diâmetros de 50 a 150 mm esses erros absolutos foram mais significativos.

Nas Figuras 23 e 24 foram apresentados os gráficos do erro percentual (%) e do erro médio absoluto (mm), em relação as posições de medidas.

Figura 24 - Gráfico de erro percentual (%) x posição de medida (mm)

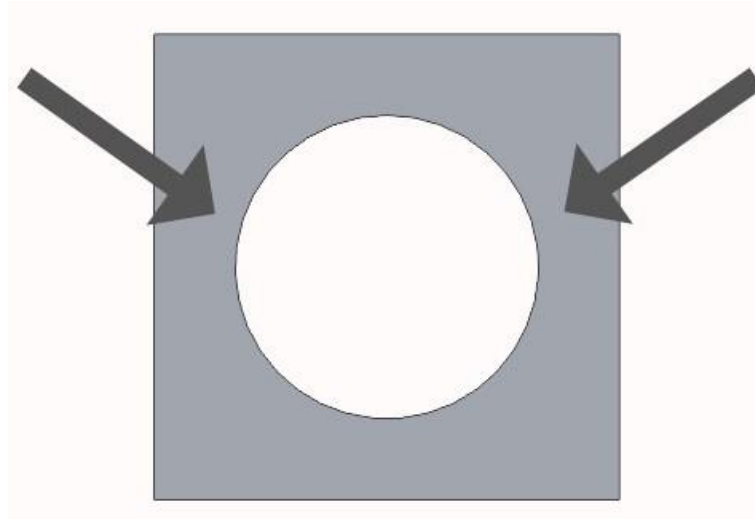


Fonte: Autor (2023).

Nesses gráficos foram observados que os valores apresentados não foram significativos para tirarmos como conclusões pois o valor de p gerado pelo ANOVA foi maior que 5%. Em geral, a posição horizontal apresentou os maiores erros quando comparada as outras duas posições estudadas, as diagonais.

Este erro maior na posição de medida horizontal pode estar associado a gravidade e também a ausência do suporte falado anteriormente, fazendo com que haja escoamento de material para faixa central do corpo de prova ilustrado na figura 25 e assim pode ser a fonte geradora desses erros.

Figura 25 - Demonstração da ação da gravidade



Fonte: Autor (2023).

4.3 Curva de erros

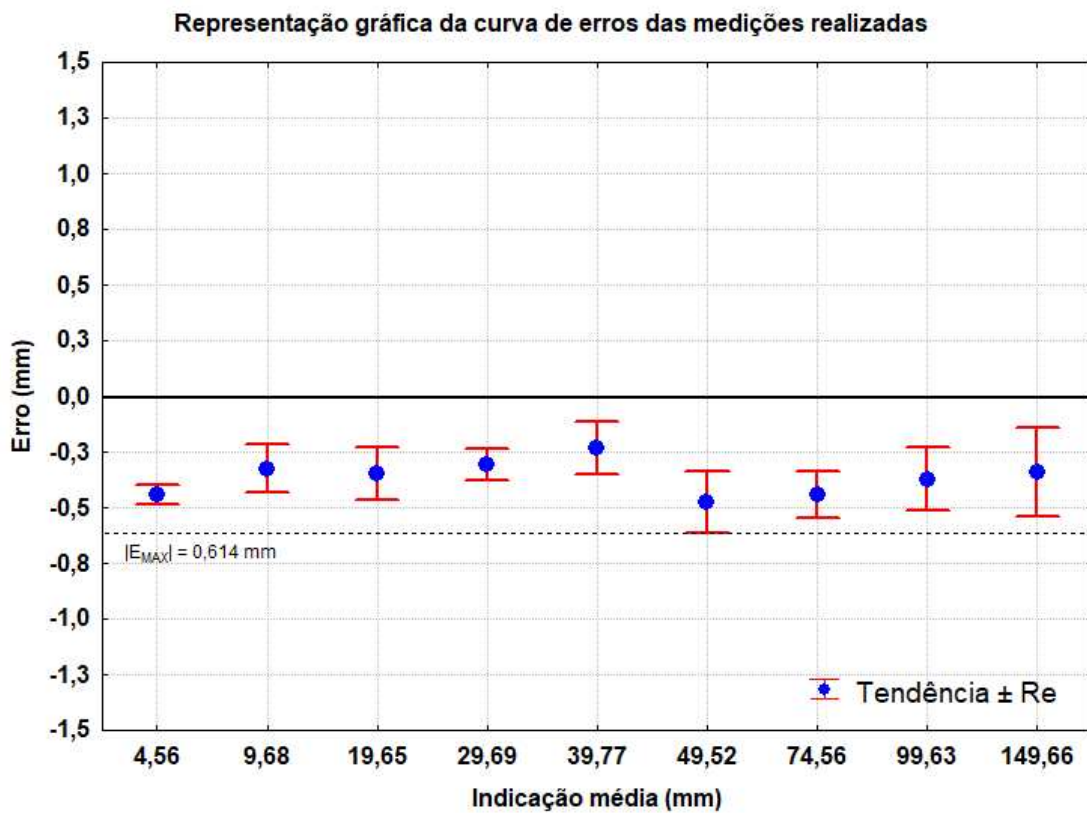
Tabela 6 - Média por cada diâmetro fabricado

Média da Indicação	Tendência (Td)	Repetitividade	Td +Re	Td -Re
4,56	-0,442	0,042	-0,399	-0,484
9,68	-0,325	0,108	-0,217	-0,433
19,65	-0,347	0,117	-0,229	-0,464
29,69	-0,307	0,071	-0,236	-0,377
39,77	-0,233	0,119	-0,114	-0,352
49,52	-0,477	0,138	-0,339	-0,614
74,56	-0,441	0,104	-0,337	-0,545
99,63	-0,372	0,141	-0,231	-0,513
149,66	-0,342	0,198	-0,143	-0,540

Fonte: Autor (2023)

Diante dos resultados apresentados na Tabela 6 foi possível construir a curva de erros ilustrada na Figura 26 abaixo. Nessa curva foi possível estimar a parcela sistemática do erro de medição pela tendência e estimar a faixa dentro da qual é esperado o erro aleatório, conhecida com o desvio padrão.

Figura 26 - Curvas de erro



Fonte: Autor (2023)

Assim podemos concluir que esta curva de erros tem comportamento semelhante ao gráfico da Figura 26. Diante disso, a faixa de indicação média de 4,56 a 39,77 mm apresentou erros menores quando comparadas a faixa de 49,52 a 149,66 mm que apresentou um patamar superior de erro. Porém, ambas as faixas foram observadas uma queda do erro de acordo com o aumento dos diâmetros.

Com isso, observando a curva de erros podemos concluir que dentro da faixa de indicação média de 4,56 a 149,66 o erro máximo no processo de fabricação nas impressões será de 0,614 mm.

5 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi alcançado com sucesso ao utilizar a técnica de impressão FDM para fabricação de corpos de prova com furos circulares, os quais apresentaram baixos níveis de erros nas dimensões definidas. A definição das medidas necessárias e a impressão dos corpos de prova com furos circulares na faixa de 5 a 150 mm de diâmetro foram possíveis graças ao estudo dimensional e desenho gráfico.

A análise dos resultados, realizada por meio da medição e avaliação utilizando a análise de variância (ANOVA), forneceu dados relevantes. Os gráficos dos erros percentuais e dos erros absolutos mostraram que o valor de p foi inferior a 5%, o que indica uma significância estatística nos resultados.

Ao observar os erros percentuais, notou-se que houve uma diminuição conforme o diâmetro aumentava. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, para as peças menores, a vazão do bico extrusor e o limite do equipamento de medição contribuíram para as maiores taxas de erro.

Por outro lado, os erros absolutos em milímetros mostraram-se inversamente proporcionais ao diâmetro, ou seja, à medida que o diâmetro aumentava, o erro também crescia. Especialmente na faixa de 50 a 150 mm, esse comportamento foi mais evidente.

Quanto às posições de medidas, os resultados não foram considerados significativos e, portanto, não permitiram conclusões relevantes sobre essa variável específica.

A análise da curva de erros revelou que o erro máximo do método de impressão utilizado no trabalho foi de 0,614 mm, o que representa uma precisão aceitável para o propósito do estudo.

Em suma, o estudo demonstrou que a técnica de impressão FDM é eficiente na fabricação de corpos de prova com furos circulares e que a análise dos erros proporcionou valiosas informações sobre o desempenho do método utilizado. Esses resultados contribuem para o avanço e aprimoramento da utilização da impressão FDM em aplicações que requerem precisão dimensional.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise da construção de furos por outros materiais, como PLA e o PETG;
- Análise da construção de corpos de prova com furos circulares pelo método de impressão SLA;
- Análise da influência dos parâmetros para possível redução do erro dimensional.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. De. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri, 1ª Edição:Manole, 2008.
- BIJARIMI, M.; AHMAD, S.; RASID, R. Mechanical, thermal and morphological properties of PLA/PP melt blends. In: **International Conference on Agriculture, Chemical and Environmental Sciences**. Dubai, 2012. p. 6-7. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/159179051.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2023.
- ELETROGATE. Impressoras 3D: tipos e funcionamento. **Blog Eletrogate**. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/impressoras-3d-como-funcionam-e-quais-os-tipos-existentis/>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- ENGENHARIA de medição. O que é erro de medição e como identificá-lo?. Engenharia de Medição. **ACC Metrologia**. Disponível em: <https://accmetrologia.com.br/o-que-e-erro-de-medicao-e-como-identifica-lo/>. Acesso em: 12 jan. 2023.
- FRACASSO, P. T.; SILVA, B. C; COSTA, A. H. R. Calibração de Medidores de vazão utilizando um controlador PID neural. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA. **Anais - Bonito**, Mato Grosso do Sul, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277142795_CALIBRACAO_DE_MEDIDORES_D_E_VAZAO_UTILIZANDO_UM_CONTROLADOR_PID_NEURAL. Acesso em: 03 mar. 2023.
- HAMOD, Haruna. **Suitability of Recycled HDPE for 3D printing filament**. 2014. Degree Thesis – Degree Program: Plastics Technology, Arcada University of Applied Science, Finlandia, 2014.
- IMPRESSÃO 3D. O Que É Impressão 3D? Para Que Serve Uma Impressora 3D?. **Oaloo Impressão 3D**. 2021. Disponível em: <https://www.oaloo.com.br/impressao-3d-vantagensdesvantagens/#:~:text=A%20impress%C3%A3o%203D%20permite%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20pe%C3%A7as%20complexas%20muitas,geometrias%20mais%20complexas%20e%20detalhadas>. Acesso em: 23 dez. 2022.
- INMETRO. **Conceito de metrologia**. Desenvolvido por CISMAC – INMETRO. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2006. Disponível em: http://www.inmetro.rs.gov.br/cismac/material_didatico/polig_conceito_metrologia.pdf. Acesso em: 12 jan. 2023.
- ISOLDI, A. B. G.; SILVA, L. G. de A e. Estudo do Efeito da Dose de Radioesterilização sobre as Propriedades do Poli (Tereftalato de Etileno) -PET-Reciclado. **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, São Paulo, 2003. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2002/ENAN/E11/E11_438.PDF. Acesso em: 10 mar. 2023.

LABONE. Manufatura Aditiva: O que é e como implementar?. **Labone Consultoria**. 2023. Disponível em: <https://www.laboneconsultoria.com.br/manufatura-aditiva/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

LAUERS, J. S. **Valiação da influência das variáveis altura da camada, padrão de preenchimento e pigmentação no processo de manufatura aditiva por fusão e deposição de material (FDM) utilizando poliácido láctico (PLA)**. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal do Espírito Santos, Vitória, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/965>. Acesso em: 05 abr. 2023.

LIRA, F. A. de. **Metrologia na Indústria**. 3. ed. São Paulo: Erica, 2015.

LOCKER, A. **PETG filament guide 2018**: Explaine, compared & reviewed. All 3 DP, 2018. Disponível em: <https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/#section-petg-filament-explained-and-compared>. Acesso em: 10 mar. 2023.

LOPES, L. F. D. et al. Uma análise do ambiente mercadológico de uma empresa do setor metal mecânico sob as perspectivas de Porter. **Rev. Adm. UFSM**, Santa Maria, v.6, p.103–118, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reaufsm/article/download/2966/pdf>. Acesso em: 20 dez. 2022.

MATTERHACKERS. **HOW TO SUCCEED WHEN PRINTING IN PLA**. 2013. Disponível em: <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-in-pla>. Acesso em: 02 jun. 2023.

METROLOGIA – Curiosidades. **K&L - Laboratórios de metrologia**. 2023. Disponível em: <http://kellab.com.br/noticias/metrologia-curiosidades/>. Acesso em: 15 jan. 2023.

MORAIS, S. K A. de. et al. A metrologia como ferramenta para o controle de qualidade em uma indústria de eletrodomésticos. In: **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**. Ponta Grossa, 2019. Disponível em: https://aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/09302019_210953_5d92991570089.pdf. Acesso em: 20 fev. 2023.

OSEJOS, J. V. M. **Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes**. Dissertação de Mestrado. Quito, 2016. Disponível em: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13064>. Acesso em: 15 abr. 2023.

REGADAS, J. J. L. M. Otimização de uma impressora 3D Delta e desenvolvimento da impressão simultânea de 3 cores. **Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto – FEUP. Porto, 2017. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/105218/2/199523.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2023.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. A.; PAULI, M. A de. Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Seção Técnica**, Polímeros, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/M977rShFktsw4DpHbqk6KYN/#>. Acesso em: 12 abr. 2023.

SALDANHA, L. Manufatura Aditiva, Impressão 3D ou Prototipagem Rápida?. **Manufatura Digital**. 2021. Disponível em: <https://www.manufaturadigital.com/manufatura-aditiva-impressao-3d-ou-prototipagem-rapida/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

SILVA, B. A. da S. **Critérios para geração de casos de teste baseados em modelos descritos em pcml**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/232539>. Acesso em: 09 fev. 2023.

SOARES, F. C. **Laminados de Poli(Ácido Láctico)/Amido termoplástico recobertos com quitosana reticulada**: obtenção e avaliação das propriedades físico – químicas. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/96237>. Acesso em: 12 mar. 2023.

SOARES. História da Impressão 3D - saiba como tudo começou. **3D data**. 2021. Disponível em: <https://3ddata.com.br/historia-da-impressao-3d/#:~:text=Apesar%20de%20terem%20existido%20tentativas,sua%20m%C3%A1quina%20SLA%20em%201983>. Acesso em: 23 jan. 2023.

STEINLE, P. Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings. **Journal of occupational and environmental hygiene**, v. 13, n. 2, p. 121-132, 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26550911/>. Acesso em: 13 abr. 2023.

TEODORO, G. Metrologia: entenda o que é e qual a sua importância na Engenharia. **Engenharia 360**. Jul 2020. Disponível em: <https://engenharia360.com/o-que-e-metrologia-na-engenharia/>. Acesso em: 15 jan. 2023.

VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA. **Conceitos básicos, conceitos gerais, termos associados**. 95 f. 3. ed. Caparica: IPQ. Nov, 2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/vim-brasil-portugal.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida**: tecnologias e aplicações. São Paulo: Editora Blücher, 2007.

ZAPAROLLI, D. Canteiros de obra high tech. **Engenharia Inovação Tecnologia**. Edição 278. abr. 2019./

ANEXO A – TABELA DE COEFICIENTE T DE STUDENT

Coeficientes t de Student^{3†}

Graus de liberdade	Faixa de abrangência / probabilidade				
	σ 68,27%	1,96 σ 95%	2,00 σ 95,45%	2,58 σ 99,00%	3,00 σ 99,73%
1	1,837	12,706	13,968	63,656	235,811
2	1,321	4,303	4,527	9,925	19,206
3	1,197	3,182	3,307	5,841	9,219
4	1,142	2,776	2,869	4,604	6,620
5	1,111	2,571	2,649	4,032	5,507
6	1,091	2,447	2,517	3,707	4,904
7	1,077	2,365	2,429	3,499	4,530
8	1,067	2,306	2,366	3,355	4,277
9	1,059	2,262	2,320	3,250	4,094
10	1,053	2,228	2,284	3,169	3,957
11	1,048	2,201	2,255	3,106	3,850
12	1,043	2,179	2,231	3,055	3,764
13	1,040	2,160	2,212	3,012	3,694
14	1,037	2,145	2,195	2,977	3,636
15	1,034	2,131	2,181	2,947	3,586
16	1,032	2,120	2,169	2,921	3,544
17	1,030	2,110	2,158	2,898	3,507
18	1,029	2,101	2,149	2,878	3,475
19	1,027	2,093	2,140	2,861	3,447
20	1,026	2,086	2,133	2,845	3,422
25	1,020	2,060	2,105	2,787	3,330
30	1,017	2,042	2,087	2,750	3,270

(continua)