

AVALIAÇÃO DE ERROS DIMENSIONAIS DE UMA PEÇA PADRÃO EM DIFERENTES MÁQUINAS GERADAS PELO PROCESSO DE MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA

EVALUATION OF DIMENSIONAL ERRORS OF A STANDARD PIECE IN DIFFERENT MACHINES GENERATED BY THE PROCESS OF FUSED DEPOSITION MODELING

Beatriz Aruk da Silva
Carlos Maurício Sacchelli

RESUMO

Nos dias de hoje os processos de manufatura aditiva estão se tornando cada vez mais populares, sendo a Modelagem por Deposição Fundida (FDM) um dos mais utilizados, principalmente nas áreas: médica, automotiva, arquitetônica, biomédica, entre outras. Os equipamentos utilizados neste processo comercialmente denominadas de impressoras 3D são de diversos portes, desde máquinas profissionais até máquinas de médio e baixo custo. Desta maneira, os produtos oriundos destas máquinas podem ter várias diferenças, entre elas dimensionais e de acabamento superficial. Com isso surge a necessidade de avaliar quais os desvios nas peças produzidas entre estes equipamentos, para apoiar uma melhor tomada de decisão quando da confecção de peças por este processo. Este trabalho tem como objetivo realizar a avaliação dos erros dimensionais entre quatro tipos de impressoras 3D. Para a comparação foi desenvolvido, uma peça padrão, construída nas diferentes impressoras, para posterior medição e análise, sendo constatado que as peças apresentam diferenças significativas entre as máquinas.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Modelagem por Deposição Fundida, Precisão Dimensional.

ABSTRACT

Nowadays, additive manufacturing processes are becoming more popular, with Fusion Deposition Modelling (FDM) one of the most used, mainly in the areas of: medical, automotive, architectural, biomedical, among others. The equipment used in this process commercially called 3D printers are of various sizes, from professional machines to medium and low cost machines. In this way, the products from these machines can have several differences, including dimensional and surface finish. With this, it is necessary to evaluate the deviations in the pieces produced between these equipments, to support a better decision making process when making pieces by this process. The aim of this work is to evaluate dimensional errors between four types of 3D printers. For the comparison was developed, a standard part, built in the different printers, for further measurement and analysis. The pieces present significant differences between the machines, being verified that the pieces present significant differences between the machines.

Key words: Additive Manufacturing, Fusion Deposition Modeling, Dimensional Accuracy.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com a economia globalizada é de grande interesse para as empresas produzir utilizando menos recursos, de maneira mais rápida e eficiente, evitando desperdícios. Por esse motivo, o processo de desenvolvimento de produtos vem sendo difundido muito nos últimos anos, surgindo cada vez mais métodos de produção. A manufatura aditiva é um método que foi desenvolvido na década de 80 e vem sendo aprimorado desde então se tornando cada vez mais popular. Também conhecida como impressão 3D é definida como o processo de unir materiais com o intuito de criar objetos diretamente, a partir de modelos 3D, geralmente camada sobre camada (CONSHOCKEN, 2012).

Por ser uma maneira rápida e que possibilita a criação de peças com forma livre, traz vantagens na flexibilidade do projeto e na produção de baixo volume. A manufatura aditiva desta maneira, é um dos processos que mais cresce nos últimos anos. Estima-se que o mercado global para protótipos rápidos e peças funcionais tenha uma taxa de 20% de crescimento (KIANIAN, 2017).

Suas áreas de atuação são amplas, sendo utilizados nos setores médico, arquitetônico, automotivo, aeroespaciais, moda e em indústrias no geral. Dados apontam que em 2014, 67% dos fabricantes industriais dos EUA usaram a manufatura aditiva de alguma forma e outros 25% pretendem utilizá-la no futuro (PRICEWATERHOUSE, 2014).

Volpato (2007) define as principais técnicas de manufatura aditiva, sendo elas:

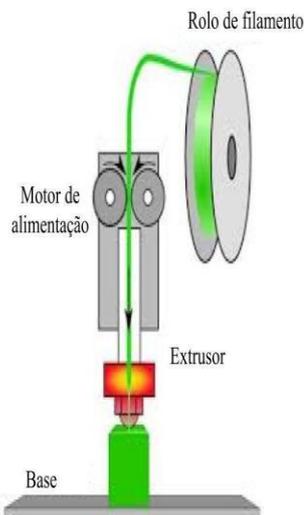
- a) **Sinterização a Laser:** O processo consiste em um laser CO_2 que sinteriza um material em forma de pó. A construção da peça se dá pelo material sendo espalhado e nivelado por um rolo na câmara de construção, que é aquecida até uma temperatura um pouco abaixo do ponto de fusão do material. O processo inicia quando o feixe de laser passa sobre o material espalhado fornecendo energia restante para sinterizar as partículas criando uma camada. A plataforma que suporta a peça em seguida desce possibilitando a criação de uma nova camada;
- b) **Modelagem por Fusão e Deposição:** Constrói um protótipo a partir da deposição de um material extrudado. O cabeçote de extrusão normalmente move-se nos eixos X-Y sobre uma mesa com movimentação no eixo Z, recebe na forma de um fio o material que é aquecido até o ponto de extrusão;
- c) **Estereolitografia:** foi o primeiro processo de manufatura aditiva disponível comercialmente, utiliza uma resina líquida fotocurável a partir do laser UV (ultravioleta). A resina é inserida em um recipiente que contém uma plataforma móvel, o laser reproduz a geometria da peça 3D para uma camada 2D. Assim que o feixe do laser atinge a resina ela se solidifica criando uma camada, logo após a plataforma desloca-se para baixo possibilitando a criação da próxima camada;
- d) **Fabricação de objetos laminados:** Se baseia na deposição sucessiva de folhas de materiais contendo adesivo em um dos lados. Após a deposição de uma folha, um rolo aquecido passa por cima da superfície ativando o adesivo e unindo as camadas. Um laser de CO_2 é direcionado para cortar o perfil da geometria da peça na camada atual. A plataforma então desce e uma nova seção do material avança.

O mais conhecido e utilizado processo de manufatura aditiva é a Modelagem por Deposição Fundida. O material extrudado normalmente é um polímero na forma de filamento, que alimenta o bico de extrusão aquecido. A criação de peça se dá pela sobreposição das camadas de filamento extrusadas na mesa de trabalho seguindo os contornos do modelo digital proposto (EVANS, 2012).

O contorno proposto da peça é acompanhado pela mesa de trabalho a cada camada, normalmente se movimentando na direção z.

A Figura 1 apresenta um modelo básico de impressora 3D por FDM. O filamento é inserido no bico de extrusão, ocorrendo o aquecimento do material que depois é depositado na mesa de impressão.

Figura 1 - Esquema construtivo de uma impressora técnica de modelagem por deposição fundida



Fonte: Fused Filament Fabrication (2019).

A manufatura aditiva destacou-se na última década como uma ferramenta de prototipagem rápida no desenvolvimento de novos produtos, assim, preenche as necessidades da indústria atual de acordo com Boparai et al. (2016). É utilizada universalmente para diferentes propósitos devido a fácil acessibilidade e por possuir matéria-prima de baixo custo (HOFMANN, 2014). A principal característica da manufatura aditiva é reproduzir geometrias complexas de maneira simples, possibilitando a criação de peças personalizadas, sem necessidade de um molde ou de uma linha de produção muito complexa, diferente dos processos de manufatura tradicionais.

Mesmo apresentando várias inovações o processo de modelagem por deposição fundida sofre desvantagem em alguns aspectos como velocidade de processo relativamente lenta, precisão limitada em alguns casos e propriedades mecânicas relativamente menores, o que dificulta seu uso industrial, sendo mais utilizado para protótipos e peças que não necessitem de grandes propriedades mecânicas ou grande exatidão (HONGYAO et al, 2017).

Um dos desafios de aumentar a porcentagem dos produtos finais com Manufatura Aditiva na indústria é uma melhor precisão dimensional dessas tecnologias em comparação

com os processos de fabricação subtrativa (torneamento, fresamento, perfuração, brocagem, perfuração, retificação, etc.) (YAMAN, 2018).

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

Visando sempre o aprimoramento desse processo Mohamed (2017), Miah e Nsengimana (2019), Garg, Bhattacharya e Batish (2016), Kumar, Singh e Ahuja (2015), Singh, Signh e Singh (2017), Queral, Rincon e Mirones (2017) e Sun, Rao e Kong (2018) estudaram e indicaram fatores de impressão que mais influenciam na precisão dimensional da peça, sendo eles:

- espessura de camada, que é restringida pelo diâmetro do bico de extrusão e afeta a tensão entre as camadas;
- largura de extrusão da primeira camada, que gera uma maior aderência a mesa de impressão;
- temperatura de extrusão, que é influenciada pelo material, velocidade de varredura, que varia com o tempo de resfriamento do material e pode aumentar a tensão entre camadas;
- lacunas de ar, que afetam a precisão dimensional, porém não tanto o acabamento superficial;
- números de contornos, que pode impedir o empenamento da peça;
- direção de construção que é o sentido de orientação da sua peça, ele pode alterar a precisão, tempo de construção e propriedades mecânicas.

A tabela 1 apresenta alguns, dos artigos estudados, com parâmetros analisados, a peça de análise e uma breve ideia do que o artigo aborda.

Tabela 1 - Artigo selecionados com referências

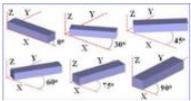
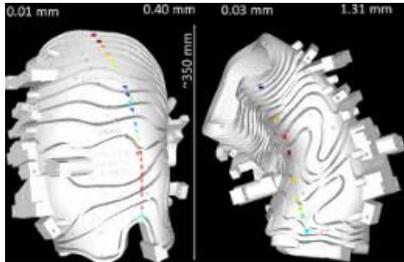
ARTIGO	PEÇAS	PARÂMETROS ANALISADOS	RESUMO	CONCLUSÃO
YAMAN (2018)		Diâmetro dos furos	Analisou três tipos de peças para verificar um modo de diminuir o erro no diâmetro dos furos	A conclusão é que é possível diminuir o encolhimento utilizando o próprio encolhimento com linhas
MOHAMED (2017)		Precisão dimensional	Estudou os parâmetros da máquina de impressão que afetam a qualidade de impressão	Os resultados mostram que as técnicas de RSM e otimização gráfica IV podem ser aplicadas com sucesso para obter uma melhora de peças MA

Tabela 1 - Artigo selecionados com referências
(continuação)

MIAH et al.(2019)		Rugosidade superficial Precisão geométrica Variação do efeito escada Diâmetro dos furos	Analisou a impressão de uma mesma peça em 3 materiais diferentes	Em conclusão, os protótipos produzidas através de MA se destacam e são recomendadas para aplicar os resultados desta
GARG, et al.(2016)		Rugosidade superficial Efeito escada Precisão dimensional em comparação com o efeito CAD.	Realizou uma medição dos parâmetros de impressão na peça impressa, depois na mesma peça que passa por tratamento com acetona	Os resultados mostram que o acabamento superficial é grandemente melhorado processo de vapor com variações mínimas na precisão geométrica
SLJIVIC et al.(2017)		Precisão dimensional Velocidade de impressão	Comparou duas máquinas de impressão 3D, na impressão de uma estrutura religiosa	Os resultados mostram algumas diferenças notáveis entre as impressoras 3D em termos de precisão e aplicabilidade
UNKOVSKI Y et al.(2017)		Qualidade de precisão Textura	Abordou a impressão de uma orelha para uso	FDM mostrou a precisão dimensional superior e melhor reprodução da superfície da pele
KUMAR et al.(2015)		Precisão dimensional Encolhimento Efeito escada Velocidade de Impressão	Analisa o efeito dos parâmetros na fabricação de articulações do quadril pelo processo de modelagem por deposição fundida	Os resultados indicaram que as fundições da articulação do quadril são aceitáveis de acordo com os graus de tolerância internacional
SINGH et al.(2017)	Sem imagens	Acabamento superficial Precisão dimensional	Apresentou os esforços que feitos para melhorar o acabamento do FDM através de exposição química	Os resultados destacam a capacidade do VSS de melhorar o acabamento superficial das peças baseadas em FDM

Tabela 1 - Artigo selecionados com referências
(continuação)

<p>QUERAL et al.(2017)</p>		<p>Instabilidade dimensional em longo prazo Precisão dimensional</p>	<p>O artigo estudou as tolerâncias e desvios de erro de estruturas de enrolamento de bobinas para pequenos stellarators fabricados de forma industriais</p>	<p>AM pode contribuir para a fabricação de estruturas precisas de enrolamento para stellarators e outros componentes precisos em fusão</p>
----------------------------	---	--	---	--

Fonte: Autor (2019).

O estudo realizado por Sljivic et al (2017) desenvolveu uma análise aproximada a análise realizada neste trabalho, apresentando um comparativo entre duas impressoras 3D, uma de uso profissional (Dimension Elite) e outra de uso consumidor (LeapFrog). Essa comparação teve o objetivo de verificar o quanto esses dois modelos de impressoras diferem em termos de obtenção de geometrias complexas, qualidade superficial e estabilidade dimensional de modelos aditivos. O modelo complexo proposto foi um edifício religioso.

Com as medidas dos protótipos pode-se notar que a impressora de uso industrial possui uma melhor qualidade dimensional e superficial em relação a impressora de uso consumidor, porém seus aspectos de impressão como valor do material usado (ASB) e tempo de fabricação são limitantes na hora de escolher qual impressora usar.

Devido a isso, os autores concluíram que a impressão deve ser feita na máquina que atendem aos requisitos finais do produto, visando o tempo necessário de impressão, valor da peça e precisão dimensional que se deseja obter.

Contudo o estudo realizado por Sljivic et al (2017) não aborda o grau de repetitividade de cada máquina e nem as diferentes precisões dimensionais em características distintas da peça.

Tendo em vista a necessidade de conhecimento sobre o comportamento de máquinas de impressão 3D com diferentes vieses, este trabalho foi desenvolvido objetivando comparar 4 modelos de máquinas pretendendo focar a análise nos erros dimensionais e grau de repetitividade de cada das impressoras para determinada característica da peça.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de analisar a precisão dimensional de peças produzidas em impressoras 3D e realizar um comparativo entre impressoras de diferentes aspectos construtivos, foi utilizado o método de pesquisa descritiva, apresentando uma revisão bibliográfica composta de artigos e livros atuais sobre o tema. O intuito do estudo é analisar os desvios dimensionais que cada impressora terá em relação ao seu modelo CAD.

Foram selecionadas quatro impressoras 3D de diferentes custos disponíveis no Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos – LID na UFSC, tratando de uma impressora profissional e três de uso pessoal, sendo uma delas montada no laboratório.

Uma melhor descrição das características das máquinas utilizadas está na tabela 2.

Tabela 2 – Características das impressoras

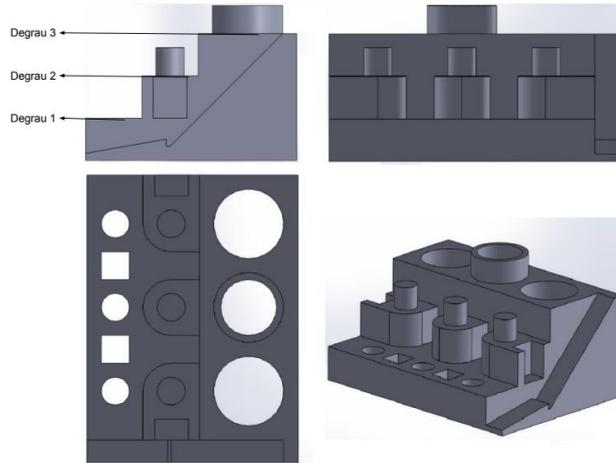
IMPRESSORAS				
	Dimension Elite	3D CLONER DH	3D CLONER LAB	Modelo Próprio
Fabricante	Stratsys	Indústria Schumacher	Indústria Schumacher	Própria fabricação
Dimensões (mm)				
Largura	686	570	385	380
Profundidade	914	500	350	340
Altura	1041	740	697	350
Material Impresso	ABS	PLA	PLA	PLA
Área útil de impressão (mm)				
Largura	203	320	200	200
Profundidade	203	210	200	200
Altura	305	400	200	200
Tensão V	127/240	127/220	127/220	220
Consumo (W)	1680	90	396	360
Qualidade de impressão, altura da camada (mm)	0,254 0,178	0,050 0,100 0,200 0,300 0,400	0,100 0,125 0,250 0,400	0,100 0,125 0,250 0,400
Diâmetro do filamento (mm)	1,75	1,75	1,75	1,75
Diâmetro do bico extrusor (mm)	Não especificado	0,4	0,4	0,4
Temperatura de trabalho (°C)	70° a 80°	15° a 40°	15° a 40°	15° a 40°
Software de impressão	CatalystEx 4.5.	Simplify 3D	Simplify 3D	Simplify 3D
Custo (R\$)	200.000,00	5.500,00	3.500,00	2.000,00

Fonte: Autora (2019).

Para o comparativo das impressoras foi necessária a concepção de um mesmo modelo de peça que foi fabricado em cada uma das máquinas. O modelo foi desenvolvido a partir de definições de quais as geometrias são relevantes a análise, sendo baseado tanto nos artigos encontrados como na experiência das impressões realizadas no laboratório.

Com o intuito de analisar a qualidade dimensional na fabricação de geometrias variadas, verificar o desvio angular e a precisão em relação a altura foi elaborado um modelo com 105x75x45 (mm), possuindo três degraus, como pode ser observado na Figura 2.

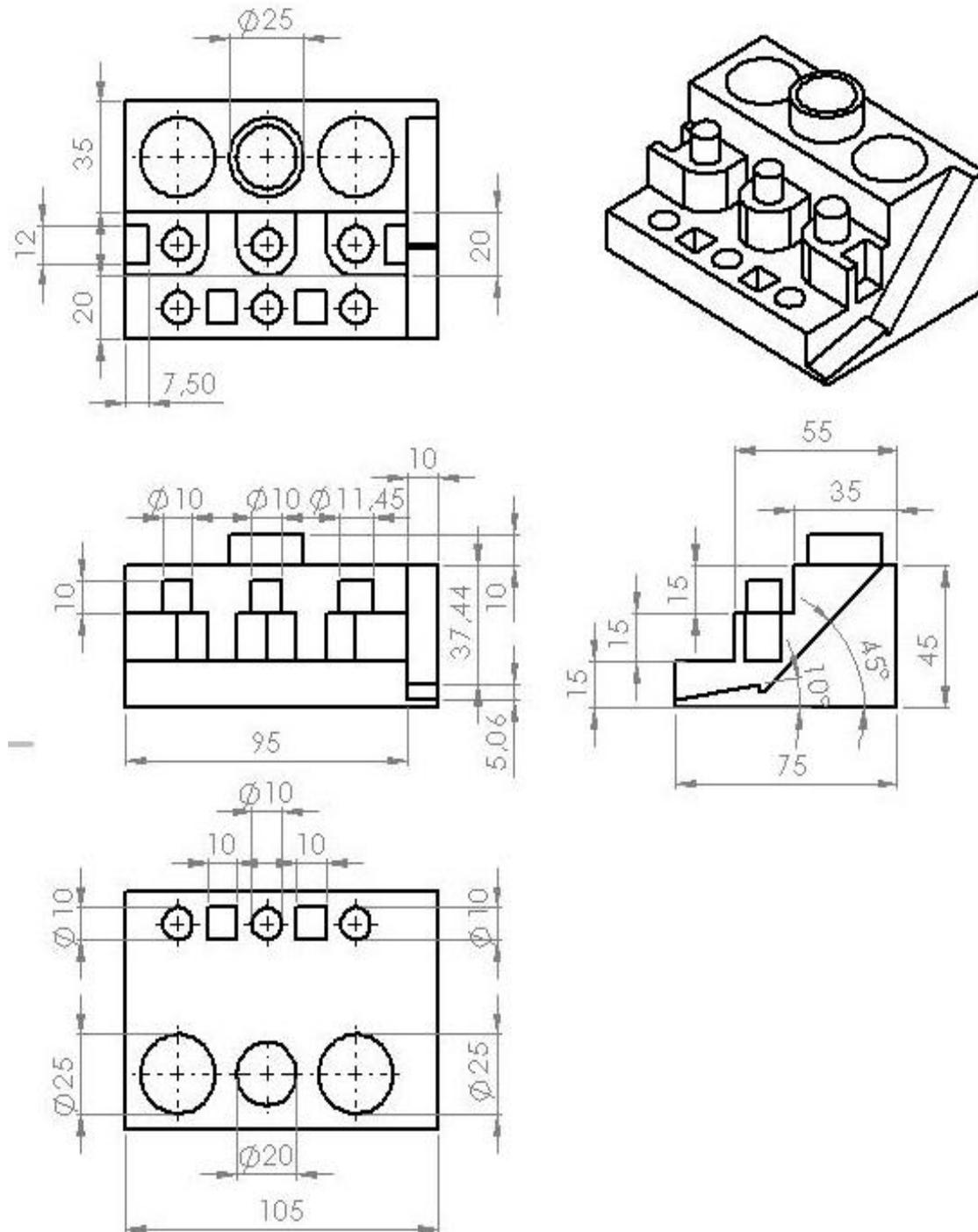
Figura 2 – Vistas da peça padrão



Fonte: Autora (2019).

A Figura 3 apresenta as vistas da peça com suas cotas.

Figura 3 – Vistas da peça padrão com medidas



Fonte: Autora (2019).

Como parte do processo de verificação da precisão dimensional das peças de cada impressora foi utilizada a máquina de medição por coordenadas Crystal-Plus M574, do fabricante Mitutoyo, para obter as medidas dos protótipos físicos. De acordo com o fabricante a máquina de medição possui uma exatidão de 3,66 μm para peças com máximo tamanho de

165 mm. Para obter maior precisão na medição, e considerando a máquina de medição muito melhor do que as máquinas de impressão foram realizadas duas medições em cada peça, sendo o valor médio analisado.

Para os estudos estatísticos realizado nos experimentos foi utilizado como base o livro de Barbetta (2004). A primeira informação a ser extraída dos dados obtidos é a repetibilidade de cada máquina, ou seja, a concordância entre resultados de sucessivas impressões usando um mesmo modelo CAD e sob as mesmas condições de impressão. Sendo a capacidade da máquina em reproduzir os mesmos valores para várias impressões, contendo erros ou não. A equação da repetibilidade (R) para cada máquina é demonstrada na equação 1, sendo estimada para um nível de confiança de 95%. Sendo a multiplicação do valor t Student (usada na estatística para comparação de dados quantitativos em termo dos valores médios), obtido através da tabela t Student para um determinado grau de liberdade (g) apresentado na equação 2, e pelo desvio padrão combinado (σ) das médias da peça.

Equação 1 – Repetibilidade

$$R = t \times \sigma$$

O grau de liberdade (g) utilizado é obtido a partir da equação 2, onde k é a quantidade de características analisadas e n o número de peças medidas.

Equação 2 – Grau de liberdade

$$g = k \times (n - 1)$$

A partir do g calculado é possível achar o t usado na equação 1 pela tabela t Student, com um nível de confiança de 95%.

O desvio padrão combinado (σ) utilizado na equação 1 é obtido pela equação 3, sendo a soma dos quadrados dos desvios padrões amostrais (s) para cada média, dividido esse valor pelo k, quantidade de características analisadas e tirado a raiz quadrada.

Equação 3 – Desvio padrão combinado

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k s^2}$$

Os desvios padrões amostrais (s) são obtidos a partir da equação 4, onde é realizado a soma dos quadrados da diferença entre, o valor da medida da peça menos o valor da média das três medidas das peças. O somatório é dividido pelo valor de n, quantidade de peças, menos 1 e tirado a raiz quadrada.

Equação 4 – Desvio padrão amostral

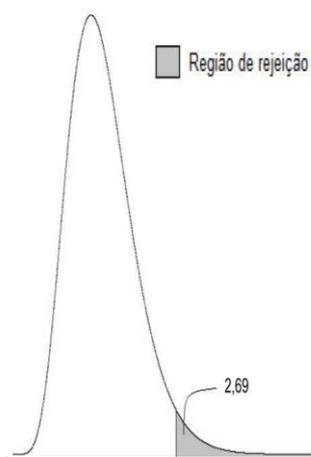
$$s = \sqrt{\frac{1}{k - 1} \times \sum_{i=1}^k (x_i - \mu)^2}$$

A equação 5 foi utilizada quando necessário para confirmar a possível diferença entre dois valores de repetibilidade. O teste consiste no teste F apresentado na estatística, onde o valor quadrado da maior repetibilidade é dividido pelo valor quadrado da menor repetibilidade. O teste tem como hipótese nula que as duas repetibilidades são iguais e como hipótese não nula que essas mesmas repetibilidades são diferentes. De acordo com a figura 4 a hipótese nula do teste F pode ser rejeitada se o valor obtido pela equação 5 for maior que 2,69.

Equação 5 – Teste F

$$F = \frac{R_{maior}^2}{R_{menor}^2}$$

Figura 4 - Teste F unilateral



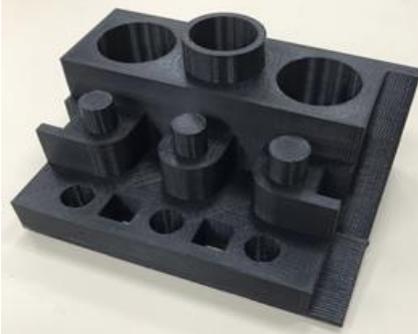
Fonte: Adaptado de Teste para variância (2019).

3 RESULTADOS

Nesta seção será realizada uma análise das medidas obtidas em cada peça, comparando os resultados e verificando a repetibilidade e precisão dimensional de cada impressora.

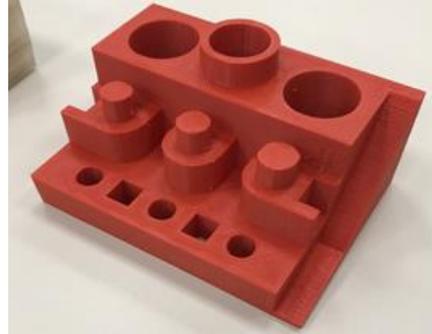
As figuras 5,6,7 e 8 apresentam uma das três peças impressas na impressora Dimension Elite (máquina 1), 3D Cloner DH (máquina 2), 3D Cloner Lab (máquina 3) e na impressora de Modelo próprio (máquina 4) respectivamente.

Figura 5 – Peça impressa na máquina 1



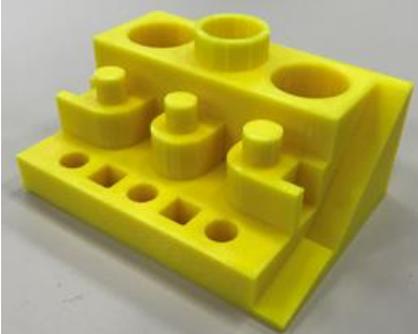
Fonte: Autora (2019).

Figura 6 – Peça impressa na máquina 2



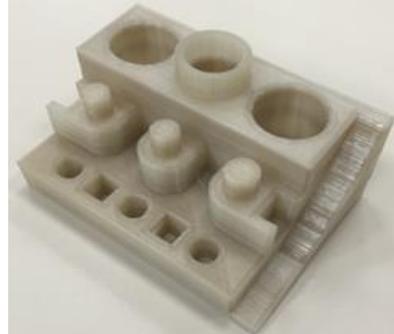
Fonte: Autora (2019).

Figura 7 – Peça impressa na máquina 3



Fonte: Autora (2019).

Figura 8 – Peça impressa na máquina 4



Fonte: Autora (2019).

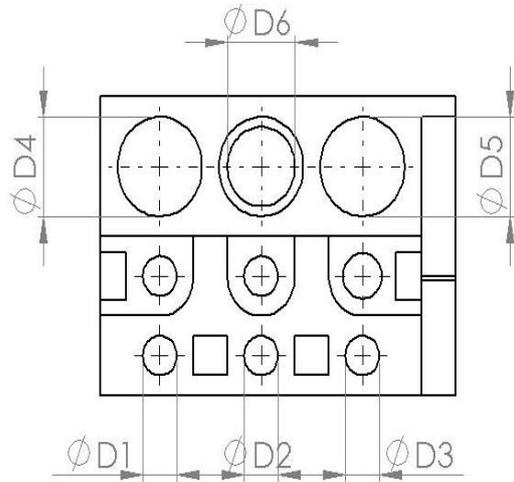
Todas as peças foram desenvolvidas no Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos – LID na UFSC, sendo elas impressas em datas diferentes. Em cada máquina foram impressas 3 peças com o mesmo material, como se avaliou 4 máquinas, foram obtidas um total de 12 peças. Após a finalização de todas as impressões as peças foram medidas no Laboratório de Metrologia da UFSC, cada peça foi medida 2 vezes. Considerando que os erros das máquinas de impressão são muito maiores que os erros da máquina de medição assumimos que as medidas são exatas, sendo a média das 2 medições utilizada para a análise dos dados.

A análise dos dados foi dividida por características da peça, sendo analisados os diâmetros internos dos seis furos que a peça continha, os diâmetros externos dos três cilindros e as diferentes dimensões da largura e comprimento da peça.

3.1 ANÁLISE DOS DIÂMETROS INTERNOS

Os resultados obtidos para os seis diâmetros internos, apresentados na vista superior da peça na figura 9, estão nas tabelas 3, 4, 5 e 6, sendo cada tabela correspondente a uma máquina. Os valores apresentados são as médias para as duas medições em cada uma das três peças impressas nas distintas impressoras. Também foi calculada a média dos valores de cada peça e o desvio padrão de cada uma delas.

Figura 9 – Vista superior com diâmetros internos



Fonte: Autora (2019).

Tabela 3 – Medidas dos diâmetros internos da peça impressa na máquina 1

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
D1 (mm)	10	10,013	10,023	10,028	10,021	0,008
D2 (mm)	10	10,016	10,038	10,042	10,032	0,014
D3 (mm)	10	9,992	9,992	10,002	9,995	0,006
D4 (mm)	25	25,007	24,985	24,983	24,992	0,013
D5 (mm)	25	25,038	25,038	25,032	25,036	0,003
D6 (mm)	20	19,982	19,931	19,971	19,961	0,027

Fonte: Autora (2019).

Tabela 4 – Medidas dos diâmetros internos da peça impressa na máquina 2

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
D1 (mm)	10	9,784	9,919	9,807	9,837	0,072
D2 (mm)	10	9,730	9,782	9,689	9,734	0,047
D3 (mm)	10	9,848	9,827	9,820	9,832	0,015
D4 (mm)	25	24,864	24,686	24,687	24,746	0,102
D5 (mm)	25	24,752	24,635	24,622	24,670	0,072
D6 (mm)	20	19,873	19,848	19,850	19,857	0,014

Fonte: Autora (2019).

Tabela 5 – Medidas dos diâmetros internos da peça impressa na máquina 3

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
D1 (mm)	10	9,650	9,600	8,946	9,399	0,393
D2 (mm)	10	9,610	9,617	8,917	9,381	0,402
D3 (mm)	10	9,574	9,634	8,860	9,356	0,431
D4 (mm)	25	24,408	24,411	23,736	24,185	0,389
D5 (mm)	25	24,306	24,335	23,630	24,090	0,399
D6 (mm)	20	19,467	19,416	19,092	19,325	0,203

Fonte: Autora (2019).

Tabela 6 – Medidas dos diâmetros internos da peça impressa na máquina 4

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
D1(mm)	10	9,908	9,999	9,935	9,947	0,047
D2 (mm)	10	9,888	9,970	9,859	9,906	0,058
D3 (mm)	10	9,918	9,880	9,750	9,849	0,088
D4 (mm)	25	25,201	25,259	25,171	25,210	0,045
D5 (mm)	25	25,251	25,261	25,208	25,240	0,028
D6 (mm)	20	19,926	19,924	19,957	19,936	0,019

Fonte: Autora (2019).

Como apresentado no capítulo dois a repetibilidade foi calculada para cada máquina. A partir da fórmula 2 é possível obter o grau de liberdade de 12, sendo $k = 6$, para seis medidas da mesma características e $n = 3$, para as três peças impressas. É utilizada a tabela t Student para um grau de confiança de 95% para obter-se o t usado na fórmula 1. Para $g = 12$ o t é de 2,18.

A tabela 7 mostra a repetibilidade para as quatro máquinas. O desvio padrão combinado é calculado primeiro utilizando a fórmula 3, sendo somado para cada máquina todos os seis desvios padrões calculados nas tabelas 3, 4, 5 e 6, dividido pelo valor de k que é o número de características analisadas e por fim é tirado a raiz quadrada deste valor. A repetibilidade é obtida pela multiplicação do t Student, descoberto a partir do grau de liberdade, pelo desvio padrão combinado.

Tabela 7 – Desvio padrão combinado e repetibilidade para diâmetros internos

Máquina	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	M4 (mm)
Desvio padrão combinado (σ)	0,014	0,062	0,377	0,052
Repetibilidade (R)	0,031	0,136	0,822	0,114

Fonte: Autora (2019)

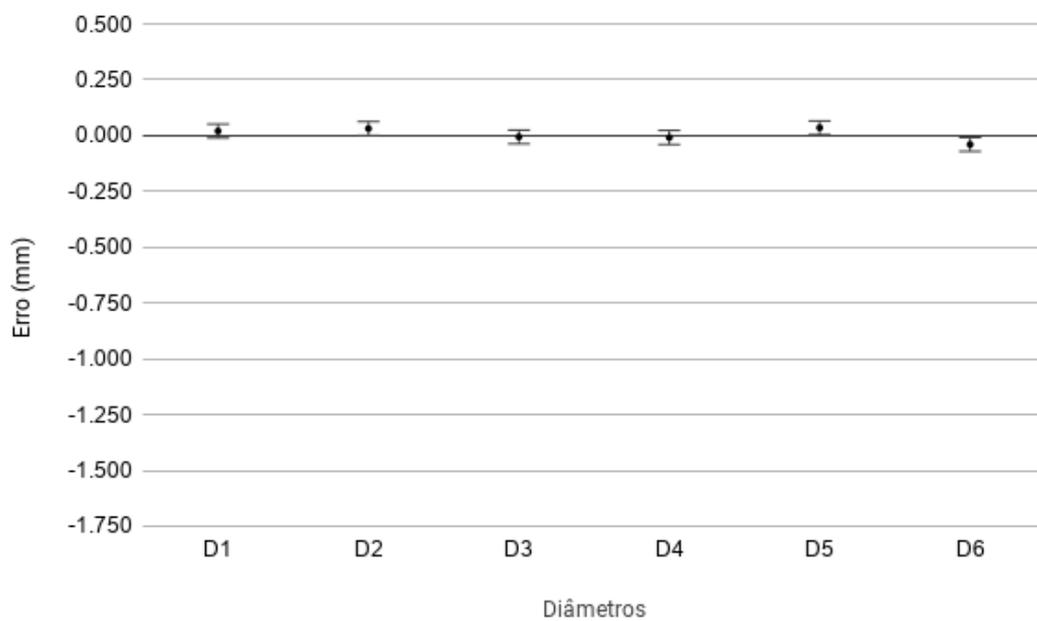
Analisando a repetibilidade de cada máquina é possível dizer que a máquina 1 possui maior repetibilidade entre todas como já esperado. Já a máquina 3 apresenta uma repetibilidade baixa em comparação as outras, sendo a impressora que mais varia seus valores para diferentes impressões. Como as máquinas 2 e 4 obtiveram valores muito próximos foi utilizado o teste F, que compara duas variâncias, para determinar se os valores de

repetibilidade poderiam ser ditos diferentes ou não. A hipótese nula desse teste afirma que os valores são significativamente iguais, o que é comprovado de acordo com a equação 5, tendo que ser obtido um valor menor que 2,69, para um nível de confiança de 95%.

Com o resultado de 1,42 é possível dizer que as repetibilidades das máquinas 2 e 4 não apresentam diferenças significativas.

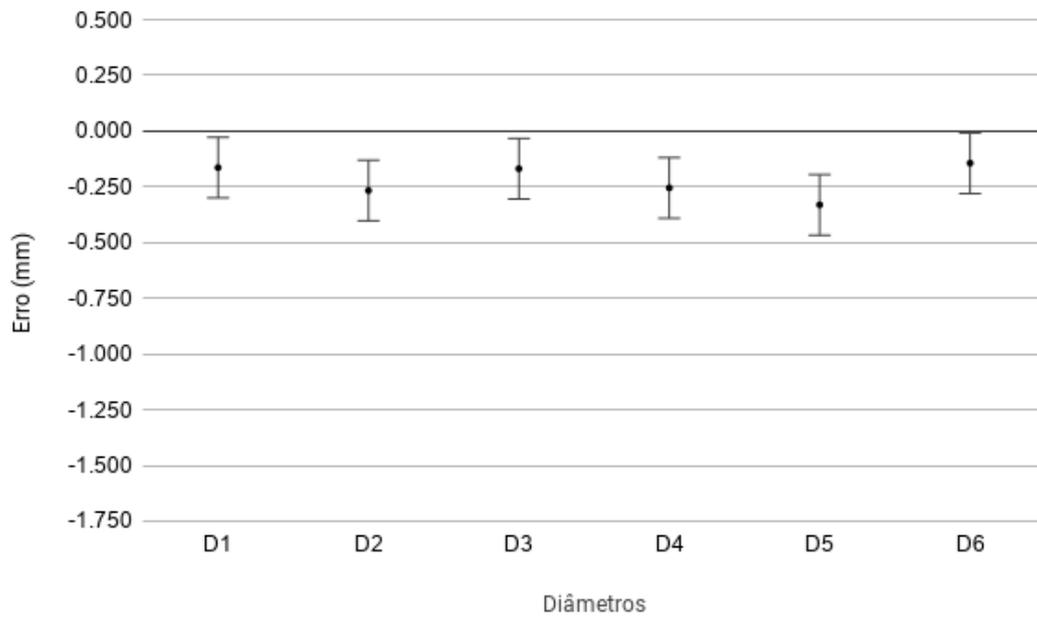
De acordo com a repetibilidade de cada máquina e as médias obtidas das três peças os gráficos 1, 2, 3 e 4 apresentam os erros presentes em cada máquina para cada diâmetro, e o grau de confiança como amplitude que cada valor pode obter.

Gráfico 1 – Erros para cada diâmetro interno máquina 1



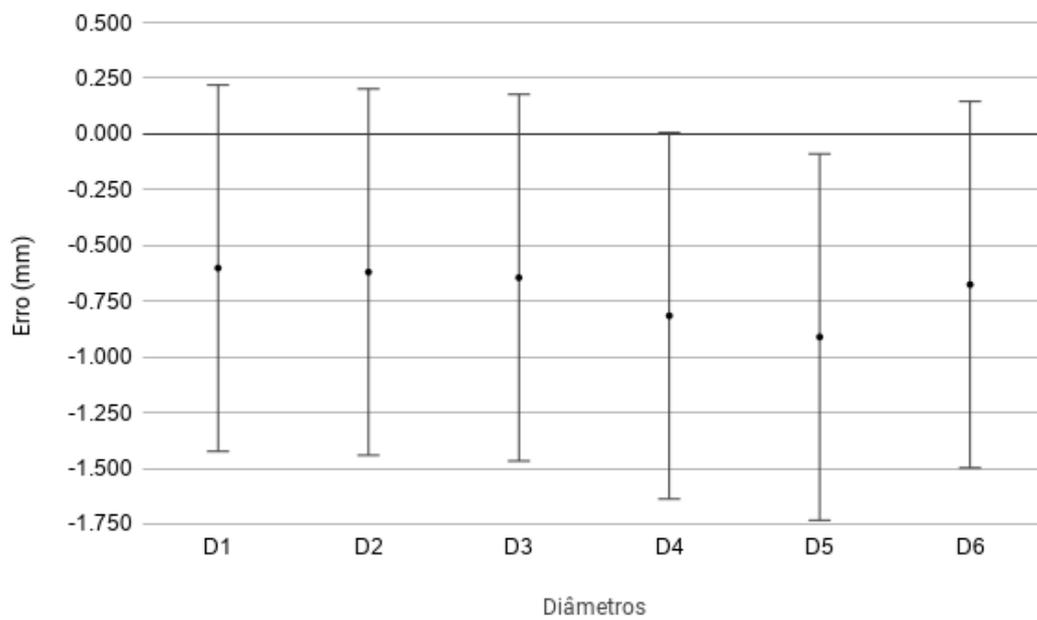
Fonte: Autora (2019).

Gráfico 2 – Erros para cada diâmetro interno máquina 2



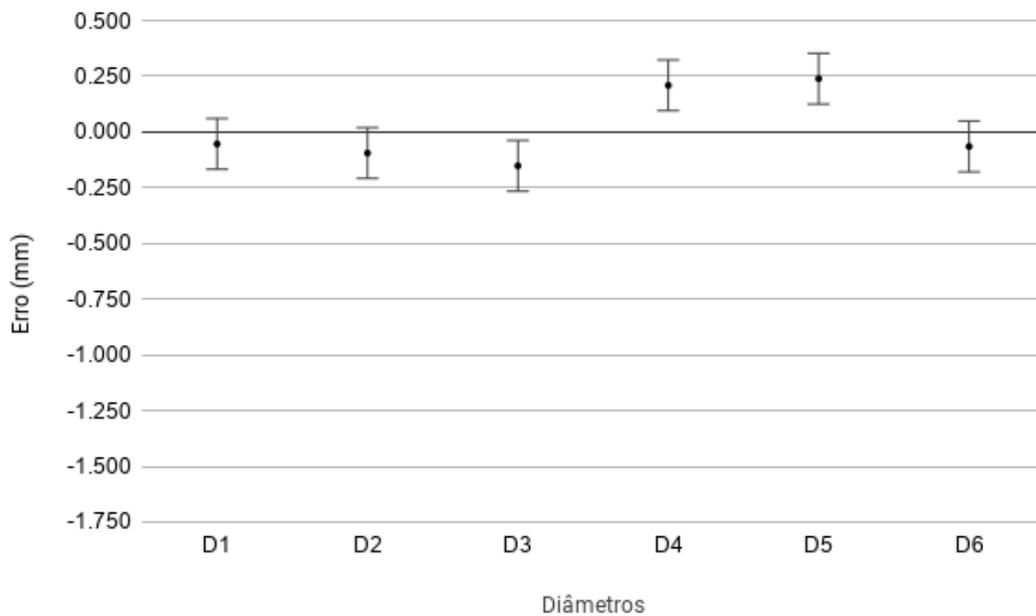
Fonte: Autora (2019).

Gráfico 3 – Erros para cada diâmetro interno máquina 3



Fonte: Autora (2019).

Gráfico 4 – Erros para cada diâmetro interno máquina 4



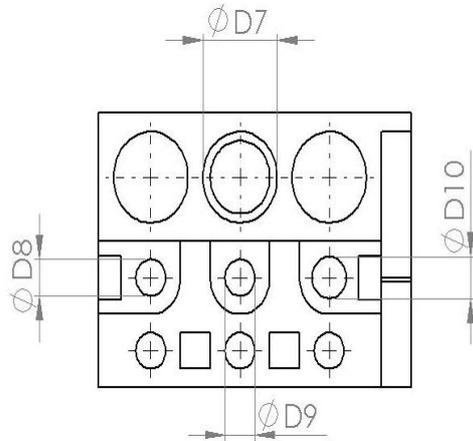
Fonte: Autora (2019).

Com esses dados é possível verificar que as máquina 1 mantém-se próxima dos valores de diâmetros nominais, com amplitude de valores máximos e mínimos que qualquer diâmetro pode obter de 0,137 mm destacando-se como a máquina mais precisa. As máquinas 4 e 2 apresentam valores como basicamente a mesma dispersão dos valores esperados, ambas apresentando uma precisão média entre as 4 máquinas. É interessante notar que a máquina 2 apresenta todos seus erros negativos. Para a máquina 3 a amplitude de valores ficou é consideravelmente grande, também apresentando a maioria dos seus valores com erros negativos. O gráfico da máquina 3 revela que sua exatidão em torno do valor esperado é muito baixa.

3.2 ANÁLISE DOS DIÂMETROS EXTERNOS

A peça padrão contém três diâmetros externos no segundo degrau, cada um com 10 mm de altura e um quarto diâmetro externo no terceiro degrau. Esse quarto diâmetro externo possui um furo no centro e sua espessura é de 5 mm. A figura 10 indica os diâmetros externos na peça. As tabelas 8, 9, 10 e 11 apresentando os valores para cada um dos diâmetros, a média de valores entre as três peças e o desvio padrão.

Figura 10 – Vista superior com diâmetros internos



Fonte: Autora (2019).

Tabela 8 – Medidas dos diâmetros externos da peça impressa na máquina 1

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
D7 (mm)	25	24,936	24,923	24,932	24,930	0,007
D8 (mm)	10	9,949	9,920	9,930	9,933	0,015
D9 (mm)	10	9,906	9,888	9,900	9,898	0,009
D10 (mm)	11,45	11,346	11,343	11,355	11,348	0,006

Fonte: Autora (2019).

Tabela 9 – Medidas dos diâmetros externos da peça impressa na máquina 2

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
D7 (mm)	25	24,775	24,831	24,795	24,800	0,028
D8 (mm)	10	9,927	10,177	10,139	10,081	0,135
D9 (mm)	10	10,070	10,339	10,184	10,198	0,135
D10 (mm)	11,45	11,337	11,498	11,555	11,463	0,113

Fonte: Autora (2019).

Tabela 10 – Medidas dos diâmetros externos da peça impressa na máquina 3

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
D7 (mm)	25	24,386	24,429	24,784	24,533	0,218
D8 (mm)	10	9,448	9,541	10,389	9,793	0,519
D9 (mm)	10	9,599	9,508	10,534	9,880	0,568
D10 (mm)	11,45	10,906	10,935	11,779	11,207	0,496

Fonte: Autora (2019).

Tabela 11 – Medidas dos diâmetros externos da peça impressa na máquina 4

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
D7 (mm)	25	25,302	25,331	25,249	25,294	0,042
D8 (mm)	10	9,993	9,978	9,946	9,972	0,024
D9 (mm)	10	10,203	10,172	10,001	10,125	0,109
D10 (mm)	11,45	11,592	11,549	11,564	11,568	0,022

Fonte: Autora (2019).

Para a análise da repetibilidade da característica diâmetros externos foi utilizado um $k=4$ na equação 2 obtendo um 8 graus de liberdade com um $t= 2,306$. A tabela 12 mostra a repetibilidade para cada uma das quatro máquinas em função dos diâmetros externos.

Tabela 12 – Desvio padrão combinado e repetibilidade para diâmetros externos

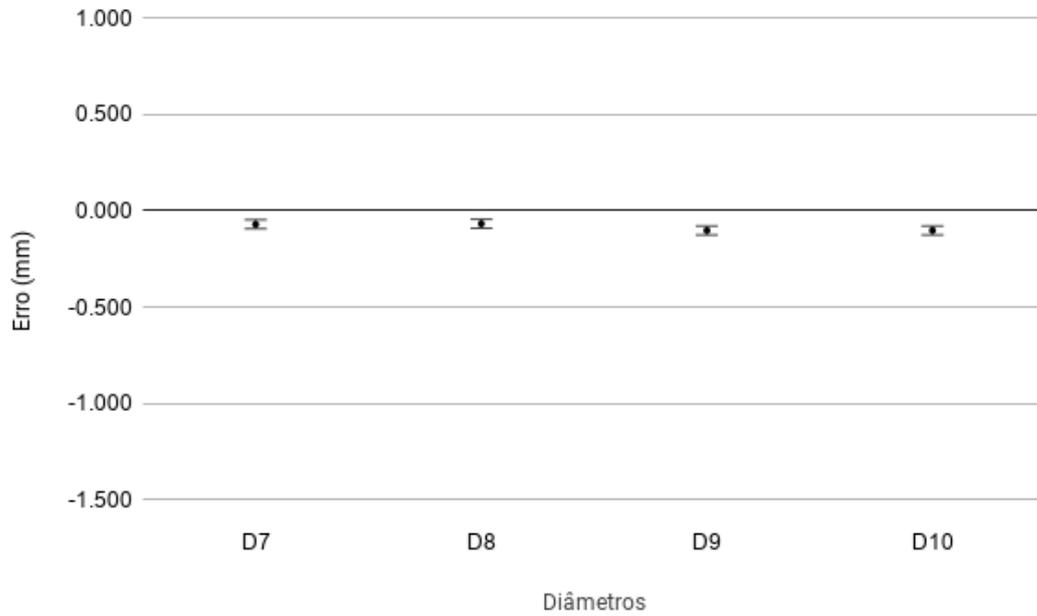
Máquina	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	M4 (mm)
Desvio padrão combinado (σ)	0,010	0,112	0,471	0,061
Repetibilidade (R)	0,023	0,258	1,086	0,141

Fonte: Autora (2019).

De acordo com a tabela 12 é possível perceber que a repetibilidade da máquina 1 continua sendo consideravelmente melhor do que as outras, tanto para diâmetros externos quanto internos. A máquina 4 e 2 possuem repetibilidades com pouca diferença, onde ambas apresentam um resultado satisfatório. Já a máquina 3 possui um pior desempenho em relação a repetibilidade do que as outras máquinas..

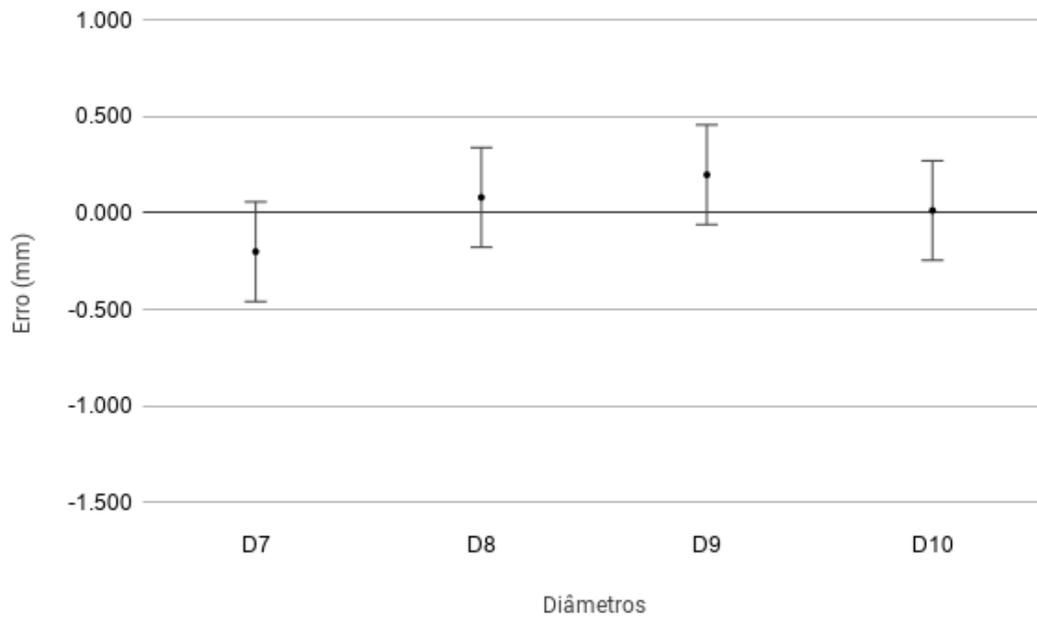
Os gráficos 5, 6, 7 e 8 fazem uma melhor visualização da precisão das máquinas. É possível observar que a máquina 1 além de manter seus valores quase constantes também possui uma maior exatidão, sendo que a amplitude de seus valores é de 0,081 mm. A máquina 4 se assemelha muito com a máquina 2 em questão de precisão, apresentando pouca dispersão do valor nominal. Para a máquina 3 a amplitude foi consideravelmente maior, indicando que os valores da máquina não apresentam grande precisão e variam muito em relação ao valor esperado.

Gráfico 5 – Erros para cada diâmetro externo máquina 1



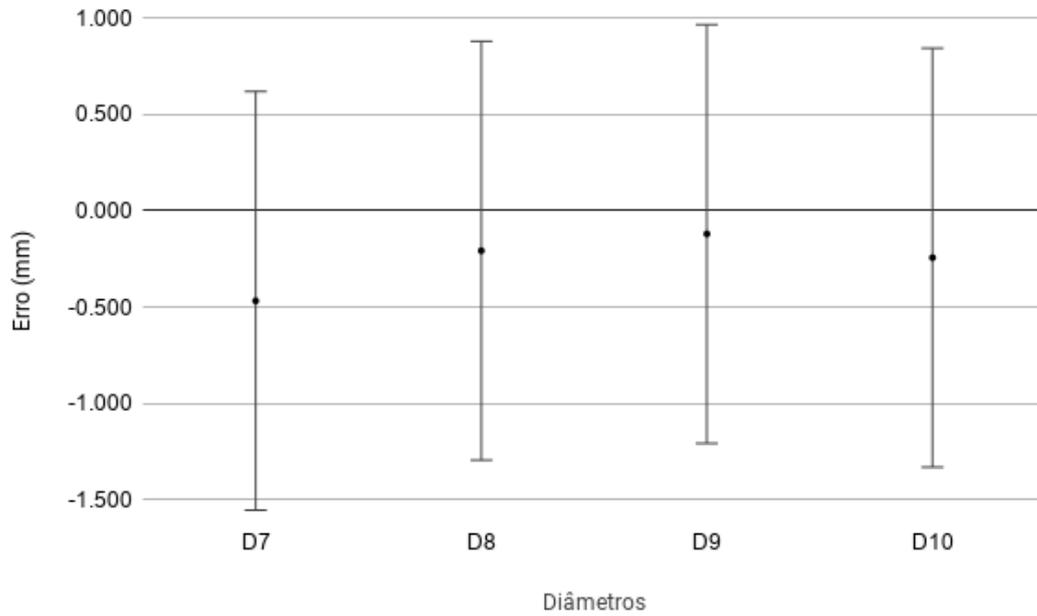
Fonte: Autora (2019).

Gráfico 6 – Erros para cada diâmetro externo máquina 2



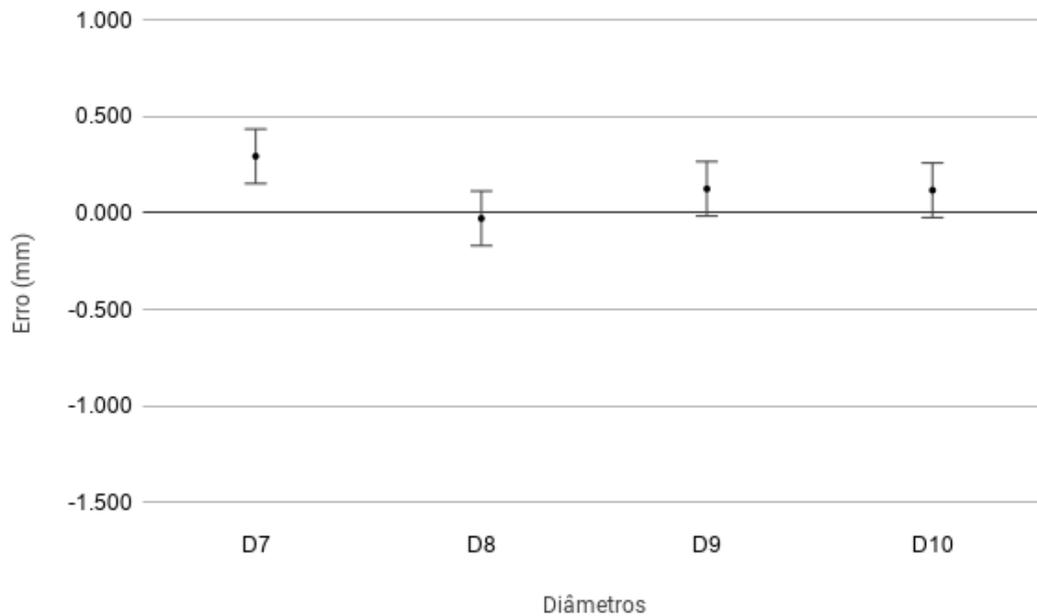
Fonte: Autora (2019).

Gráfico 7 – Erros para cada diâmetro externo máquina 3



Fonte: Autora (2019).

Gráfico 8 – Erros para cada diâmetro externo máquina 4



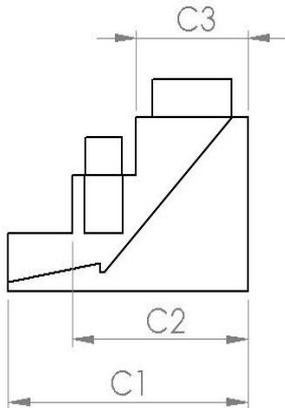
Fonte: Autora (2019).

3.2 ANÁLISE DE MEDIDAS LINEARES

Foram analisado na peça algumas medidas de comprimento e largura, para verificar a precisão

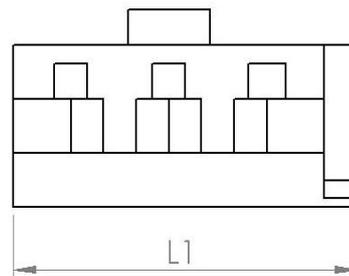
dimensional em relação a características lineares. O comprimento total da peça, a largura do primeiro degrau, a largura do segundo degrau e a largura do terceiro degrau também foram analisadas. A figura 11 indica quais são os comprimentos laterais e a figura 12 indica a largura medida.

Figura 11 – Vista lateral direita



Fonte: Autora (2019).

Figura 12 – Vista frontal com largura total



Fonte: Autor (2019).

As tabelas 13, 14, 15 e 16 apresentam as medidas obtidas para cada peça.

Tabela 13 – Medidas dos comprimentos e largura total da peça impressa na máquina 1

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
L1 (mm)	105	104,882	104,874	104,861	104,872	0,011
C1 (mm)	75	74,965	75,369	75,058	75,131	0,212
C2 (mm)	55	55,005	55,476	55,065	55,182	0,256
C3 (mm)	35	35,03	35,522	35,528	35,360	0,286

Fonte: Autora (2019).

Tabela 14 – Medidas dos comprimentos e largura total da peça impressa na máquina 2

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
L1 (mm)	105	104,968	105,08	105,036	105,028	0,056
C1 (mm)	75	74,796	74,980	75,034	74,937	0,125
C2 (mm)	55	54,785	55,002	55,049	54,945	0,141
C3 (mm)	35	34,968	35,136	35,109	35,071	0,090

Fonte: Autora (2019).

Tabela 15 – Medidas dos comprimentos e largura total da peça impressa na máquina 3

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
L1 (mm)	105	103,801	103,756	104,060	103,872	0,164
C1 (mm)	75	75,094	74,012	75,367	74,824	0,717
C2 (mm)	55	54,988	54,437	54,921	54,782	0,301
C3 (mm)	35	35,264	34,729	35,218	35,070	0,296

Fonte: Autora (2019).

Tabela 16 – Medidas dos comprimentos e largura total da peça impressa na máquina 4

Diâmetros	Nominal	Médias			Média	Desvio Padrão (s)
		Peça 1	Peça 2	Peça 3		
L1 (mm)	105	110,285	110,306	110,163	110,251	0,077
C1 (mm)	75	74,357	73,649	73,674	73,893	0,402
C2 (mm)	55	54,098	54,015	53,98	54,031	0,061
C3 (mm)	35	34,410	34,378	34,322	34,370	0,045

Fonte: Autora (2019).

A repetibilidade foi calculada pela fórmula 2, com 8 graus de liberdade tendo então um t de 2,306. A tabela 17 mostra a repetibilidade das 4 máquinas, ela foi desenvolvida a partir das equações 1, 2 e 3.

Tabela 17 – Desvio padrão combinado e repetibilidade para comprimentos e largura total

Máquina	M1 (mm)	M2 (mm)	M3 (mm)	M4 (mm)
Desvio padrão combinado (σ)	0,219	0,108	0,424	0,208
Repetibilidade (R)	0,505	0,249	0,978	0,480

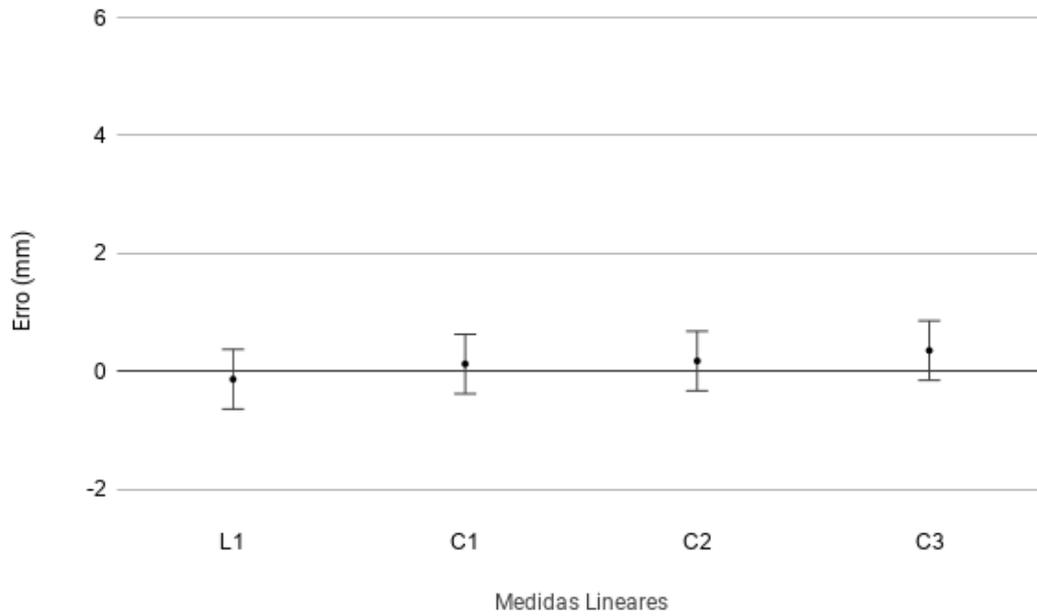
Fonte: Autora (2019).

Diferente dos diâmetros tanto externos quanto internos a máquina 1 não foi a melhor no quesito de características lineares. A máquina 2 apresenta uma maior repetibilidade mantendo seus valores mais constantes a cada impressão. Como os valores de repetibilidade da máquina 1 e 4 são muito próximos foi realizado o teste F, descrito na seção 3.1, para analisar se eles possuem diferença significativa ou não, pela equação 5 foi obtido o valor de 1,11 que define que eles não possuem diferença significativa o que torna as máquinas semelhantes nesse quesito. A máquina 3 apresentou a pior repetibilidade entre as quatro.

Pode-se verificar de maneira mais clara a exatidão de cada máquina pelos gráficos 9, 10, 11 e 12. A máquina 2 se apresentou mais exata, tendo todos seus valores muito próximo dos valores nominais, por apresentar a melhor repetibilidade é a máquina que apresenta melhor desempenho para características lineares. A máquina 1 possui uma boa precisão também muito parecida com a da máquina 2. As máquinas 3 e 4 apresentam valores de erros grandes para as larguras totais, sendo que o erro da máquina 4 destaca se, deixando a máquina com uma precisão muito longe do esperado. Esse erro foi de 5,25 mm um valor que é considerável e não pode ser aceito em determinados projetos. Pode-se supor que esse erro é devido a algum tipo de calibração da máquina, a algo relacionado ao processo construtivo, seus ajustes ou a estrutura mecânica já que é a única máquina que não tem sua construção

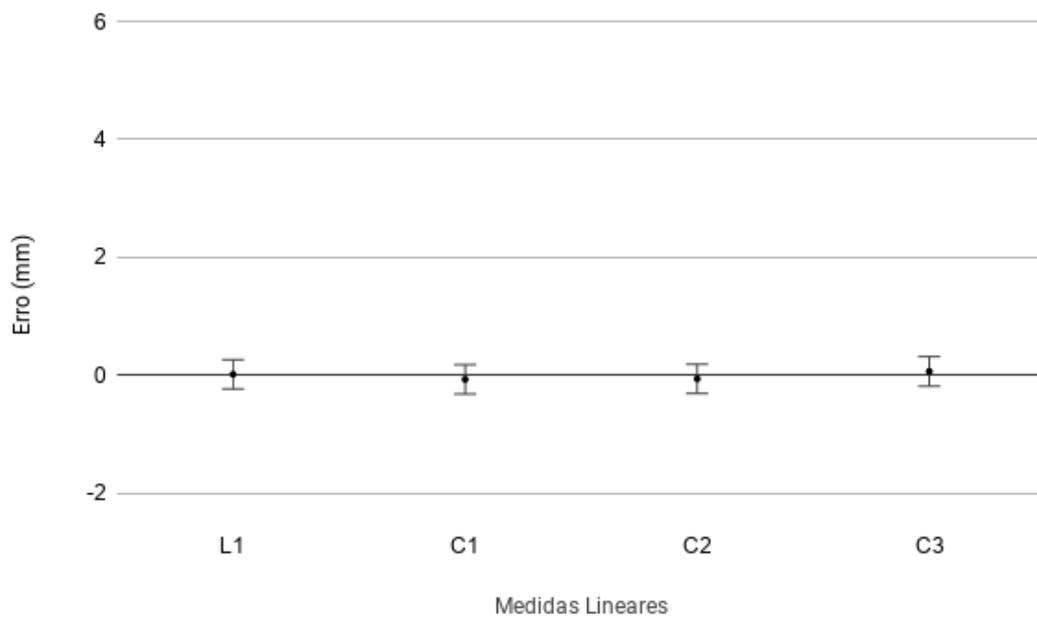
industrial.

Gráfico 9 – Erros para cada comprimento e largura máquina 1



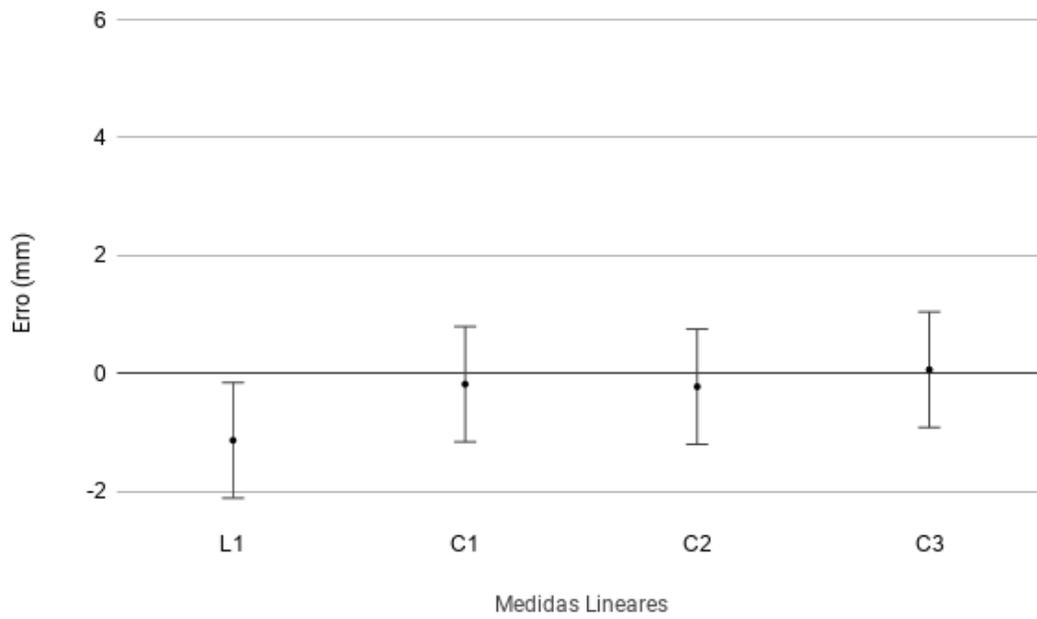
Fonte: Autora (2019).

Gráfico 10 – Erros para cada comprimento e largura máquina 2



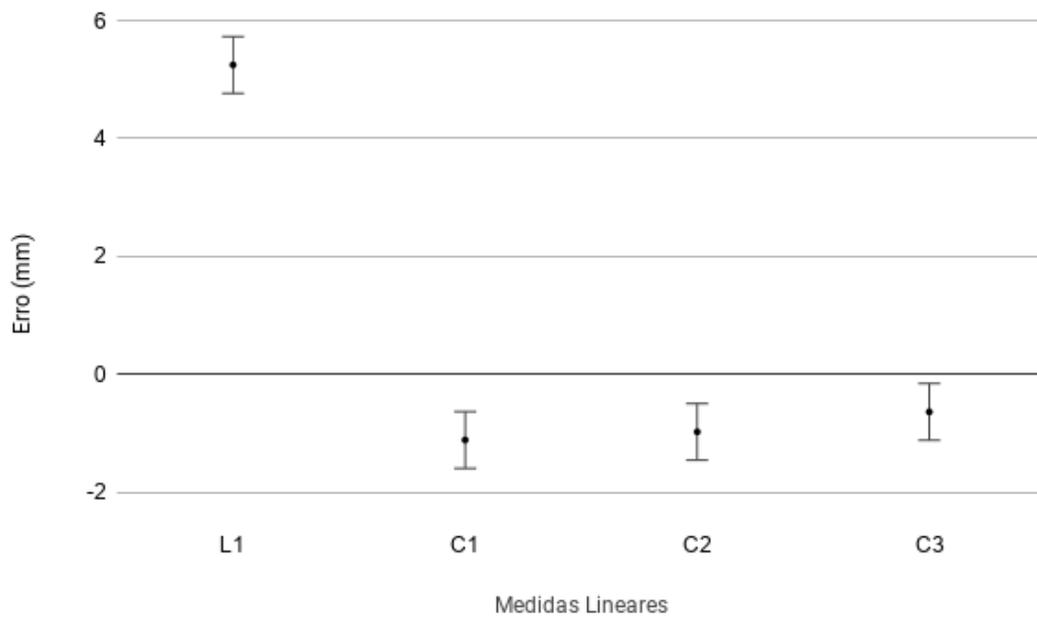
Fonte: Autora (2019).

Gráfico 11 – Erros para cada comprimento e largura máquina 3



Fonte: Autora (2019).

Gráfico 12 – Erros para cada comprimento e largura máquina 4



Fonte: Autora (2019).

4 CONCLUSÃO

A pesquisa e experimentos desenvolvidos no presente estudo possibilitou uma análise de impressoras 3D, verificando quais máquinas apresentam melhores desempenhos para determinadas características. Além disso, também foi possível observar para quais características as máquinas tendem a ter menos ou mais erros.

Ao analisar os resultados obtidos para as características circulares, é observado que a máquina 1 se destaca em todos os aspectos sendo a melhor máquina entre as quatro como já era esperado, é importante notar que entre as quatro máquinas é a única que trabalha com um material diferente. A máquina 2 apresenta um desempenho consideravelmente bom, levando em conta seu custo e finalidade, sua precisão e repetibilidade sempre estavam condizentes com os valores esperados. Os resultados da máquina 2 se assemelhavam com os da máquina 4 que também possuía valores com pouco erro e uma repetibilidade muito boa. A máquina 3 apresentou pior desempenho entre as quatro, sempre apresentando valores ruins de repetibilidade, não mantendo uma constância nas impressões e com valores de erros muito grandes.

Para as características lineares analisadas a máquina 2 foi a que possui melhor desempenho com seus valores sempre muito próximos do valor nominal. As máquinas 1 e 4 possuíram desempenhos semelhantes, sendo que os valores da máquina 1 sempre condizem com os esperados, a máquina 4 apresentou um erro consideravelmente grande na análise da largura total da peça. Esse erro não foi devido a nenhuma causa de projeto da peça aparente, pode se supor que foi devido a algo relacionado com a impressora, sua construção, a algum parâmetro de calibração ou algo do gênero. A máquina 3, como nas características circulares, apresentou o pior desempenho.

Os erros encontrados em cada máquina podem ser de diversas fontes, é possível supor que os diferentes softwares utilizados para cada máquina afetam a precisão das peças, já que ele orienta como a geometria deve ser impressa, sendo que softwares mais novos possibilitam maior precisão ao detalhes na impressão. As componentes construtivos de cada máquina, como motores de alimentação e motores de movimentação dos eixos também podem interferir consideravelmente na impressão, já que eles que posicionam o bico extrusor. Para trabalhos futuros é interessante a análise de novas características da peça e tentar relacionar os erros e desvios obtidos a aspectos de impressão. Como conclusão este trabalho apresenta um método de análise de precisão e repetibilidade de peças impressas pela técnica de modelagem por deposição fundida, junto com uma análise realizada entre quatro impressoras de diferentes víses, expondo os dados obtidos para a análise de cada característica e determinando qual máquina se enquadra melhor nos requisitos de precisão e repetibilidade para diferentes projetos.

REFERÊNCIAS

BARBETTA, Pedro Alberto; REIS, Marcelo Menezes; BORNIA, Antonio Cezar. Estatística para cursos de engenharia e informática. São Paulo: Atlas, 2004.

BOPARAI, Kamaljit Singh. SINGH, Rupinder, SINGH, Harwinder. Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review. **Rapid Prototyping Journal** Vol. 22 edição: 2, pp.281-299. 2016.

CONSHOHOCKEN, West. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies: Designation. **ASTM International**, <https://www.astm.org/DATABASE.CART/WITHDRAWN/F2792.htm>, F2792 -12a. 2012.

EVANS, brian. Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing, **Apress**. 2012.

Fused Filament Fabrication. RepRap, 8 de fev. de 2019. Disponível em: <http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication. [Acedido: 03-Mar-2017]>. Acesso em: 22 de jun. de 2019.

GARG, Ashu. BHATTACHARYA, Anirban. BATISH, Ajay. On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts Cold Vapor Treatment. **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 31. Ed. 4. Pag 522-529. mar, 2016.

HOFMANN, M. 3D printing achieves a breakthrough and a polymer design. **Macro ACS lyrics**. p382-86. Disponível em <<https://doi.org/10.1021/mz4006556>> . 2014.

HONGYAO, Shen. XIAOXIANG, Ye. JIANZHONG, Fu. Research on the flexible support platform for fused deposition modeling. **Springer-Verlag London Ltd**, p 18. 2017.

KIANIAN, Babak. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapters titles: The Middle East, and other countries. COLORADO, EUA: Lund University, 2017.

KUMAR, Parlad. SINGH, Rupinder. AHUJA, I. P. S. Investigations on Dimensional Accuracy of the Components Prepared by Hybrid Investment Casting. **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 20. Ed. SI. Pag 525-533. Parte 3. out, 2015.

MIAH, Maruf. NSENGIMANA, Joseph. PEI, Eujin. WALT, Jacobus Van der. Effect of post-processing on the dimensional accuracy of small plastic additive manufactured parts. **Rapid Prototyping Journal**, Vol. 25. Ed. 1. Pag 1-12. jan 2019.

MOHAMED, Omar Ahmed. Experimental investigation for dynamic stiffness and dimensional accuracy of FDM manufactured part using IV-Optimal reponse surface design. **Rapid Prototyping Journal**, Vol. 23. Ed. 4 Pag. 736-749, jan, 2017.

PRICEWATERHOUSE, Coopers. 3D Printing and the New Shape of Industrial manufacturing. 22p. Disponível em : <

http://www.themanufacturinginstitute.org/~media/2D80B8EDCCB648BCB4B53BBAB26BED4B/3D_Printing.pdf>. 2014.

QUERAL, V. RINCON, E. MIRONES, V. Dimensional Accuracy of Additively Manufactured Structures for Modular Coil Windings of Stellarators. **Fusion Engineering and Design**, Vol. 124. Pag. 173-178. nov, 2017.

SINGH, Rupinder. SINGH, Sunpreet. SINGH, Iqwinder Preet. Investigation for Surface Finish Improvement of FDM Parts by Vapor Smoothing Process. **Composites Part B-Engineering**, Vol 111. Pag 228-234. fev, 2017.

SLJIVIC, Maln. PAVLOVIC, Ana. ILIC, Jovica. Comparing the Accuracy of Professional and Consumer Grade 3D Printers in Complex Models Production. **FME Transaction**, Vol. 45. Ed. 3. Pag 348-353, jan, 2017.

SUN, Hongyue. RAO, Prahalad K. KONG, Zhenyu. Functional Quantitative and Qualitative Models for Quality Modeling in a Fused Deposition Modeling Process. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, Vol. 15. Ed. 1. Pag 393-403, jan, 2018.

Teste de variância, 13 de jul. de 2019. Disponível em:<<https://www.inf.ufsc.br/~marcelo.menezes.reis/testes2.html>>. Acessado em 23 de jul. de 2019.

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

YAMAN, Ulas. Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process. **Springer London**, Vol. 94. Pag. 2187-2197, fev, 2018.

UNKOVSKIY, Alexey; SPINTZYK, Sebastian; AXMANN, Detlef; ENGEL, Eva-Maria. Additive Manufacturing: A Comparative Analysis of Dimensional Accuracy and Skin Texture Reproduction of Auricular Prostheses Replicas. 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Universidade Federal de Santa Catarina que por meio de bolsas e custeio possibilitou o desenvolvimento da pesquisa presente neste trabalho, também ao meu professor orientador Carlos Maurício Sacchelli que com paciência me ajudou na pesquisa e desenvolvimento, a professora Sueli Fischer Beckert que me auxiliou na análise dos dados. Quero agradecer ao Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos – LID da UFSC e ao aluno Willian Harshe que realizou a produção das peças e ao aluno Matheus Santana de Carvalho do Laboratório de Metrologia da UFSC que executou todas as medições. Aos meus pais que me possibilitaram o estudo.