

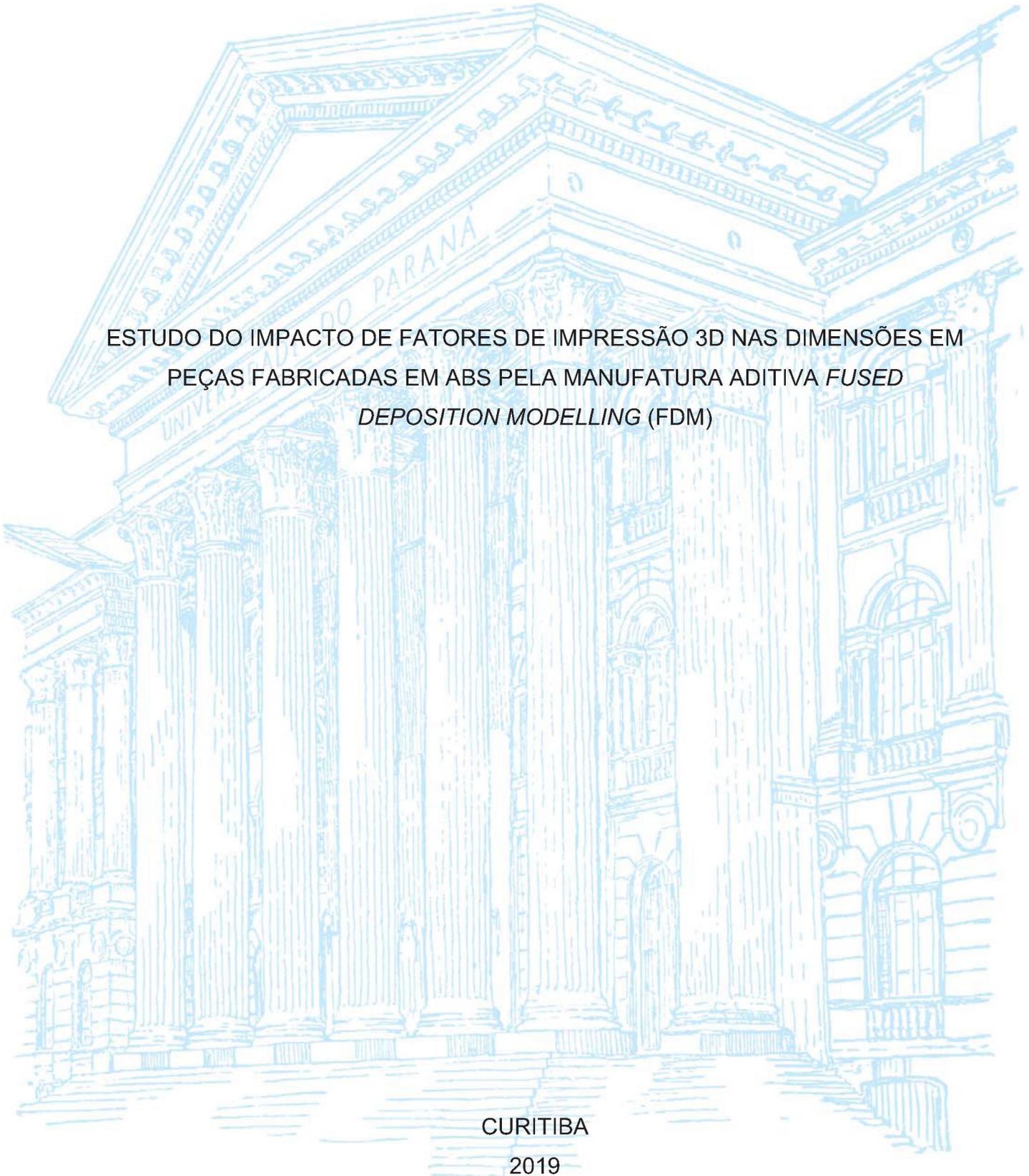
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NÍCOLAS EUGÊNIO MARTINS MARTINHÃO

ESTUDO DO IMPACTO DE FATORES DE IMPRESSÃO 3D NAS DIMENSÕES EM
PEÇAS FABRICADAS EM ABS PELA MANUFATURA ADITIVA *FUSED*
DEPOSITION MODELLING (FDM)

CURITIBA

2019



NÍCOLAS EUGÊNIO MARTINS MARTINHÃO

ESTUDO DO IMPACTO DE FATORES DE IMPRESSÃO 3D NAS
DIMENSÕES EM PEÇAS FABRICADAS EM ABS PELA MANUFATURA ADITIVA
FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM)

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M385e Martinhão, Nicolas Eugênio Martins

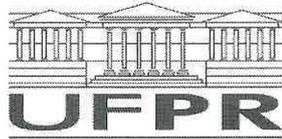
Estudo do impacto de fatores de impressão 3d nas dimensões em peças fabricadas em ABS pela manufatura aditiva Fused Deposition Modelling (FDM) [recurso eletrônico] / Nicolas Eugênio Martins Martinhão, 2019.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná
Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda

1. Impressão 3D. 2. Indústria - Inovações tecnológicas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Drozda, Fabiano Oscar. III. Título.

CDD 680

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO - 40001016070P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NÍCOLAS EUGÊNIO MARTINS MARTINHÃO** intitulada: **Estudo do impacto de fatores de impressão 3D nas dimensões em peças fabricadas em ABS pela manufatura aditiva FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM)**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovado no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 28 de Fevereiro de 2019.

FABIANO OSCAR DROZDA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

MARCOS AUGUSTO MENDES MARQUES

Avaliador Interno (UFPR)

GUSTAVO VALENTIM LOCH

Avaliador Interno (UFPR)

ADRIANO SCHEID

Avaliador Externo (UFPR)

Aos meus pais,
a quem tudo devo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por tudo.

Aos meus pais, Abilio e Rosmeire Martinhão, pelo apoio e por estarem ao meu lado em todas as etapas de minha vida.

À minha amada, Bia Caroline Moreti, pela paciência, compreensão e carinho em todos os momentos.

Ao meu orientador, Fabiano Oscar Drozda, pelos ensinamentos, incentivo, disposição e toda ajuda para tornar esse trabalho realidade.

A todos professores que contribuíram com minha trajetória, em especial ao Marcos Augusto Mendes Marques, Gustavo Valentim Loch pelo conhecimento em estatística, e Mariana Kleina pelo conhecimento em programação.

Aos meus colegas do programa, em especial ao Anis Assad Neto e ao Gustavo Bernardi Pereira, pelo apoio, pela ajuda e pelas risadas que tornaram o caminho mais leve.

À Rafaella que sempre ajudou a desburocratizar os procedimentos internos do curso.

*“O que sabemos é uma gota;
o que ignoramos é um oceano.”*

Isaac Newton

RESUMO

Com a chegada do que especialistas estão chamando de quarta revolução industrial, é esperado que as empresas se reinventem. Novas tecnologias tais como *cyber-physical systems*, *internet of things* e manufatura aditiva estão sendo aplicadas ao ambiente fabril. Isso impacta diretamente o processo produtivo e injeta novidades no segmento. Peças que antes eram fabricadas por processos como injeção e moldagem, hoje já encontram uma alternativa na manufatura aditiva quando sua complexidade e customização são altas. Assim, as peças produzidas pela manufatura aditiva precisam ser dimensionalmente precisas e mecanicamente resistentes. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é otimizar precisão dimensional de objetos fabricados por meio da manufatura aditiva FDM (*Fused Deposition Modelling*) em ABS, utilizando como fatores de controle os parâmetros de impressão da manufatura aditiva. Para isso, foi utilizado o DOE (*Design of Experiment*) e um arranjo ortogonal de Taguchi para testar os parâmetros da impressão: altura da camada, porcentagem de preenchimento, padrão de preenchimento e temperatura de extrusão com 3 níveis cada. Foram utilizados análise de variância e teste de Kruskal Wallis para verificar se existe diferença significativa entre os níveis dos fatores e otimizá-los caso exista, aproximando as dimensões dos valores alvo. Foi observado que a configuração ideal dos parâmetros para maior precisão dimensional é a altura da camada de 0,2mm, 20% de preenchimento e 225°C de temperatura para a extrusão.

Palavras chaves: Manufatura aditiva; *Fused Deposition Modelling*; Impressão 3D; Parâmetros da impressão 3D; ABS.

ABSTRACT

With the arrival of what specialists are calling the fourth industrial revolution, it is expected that the companies reinvent themselves. New technologies such as cyber-physical systems, internet of things and additive manufacturing have been applied to the manufacturing environment. It has a direct impact on productive process and introduces news in the segment. Parts that were before manufactured by processes such as injection and molding, already find an alternative in additive manufacturing when their complexity and customization are high. Therefore, parts manufactured by additive manufacturing need to be precise and mechanically resistant. In this context, the goal of this work is to optimize dimensional precision of parts manufactured by additive manufacturing FDM (Fused Deposition Modelling) in ABS, using as control factors the printing parameters of additive manufacturing. For this, it was used a DOE (Design of Experiment) and a Taguchi Orthogonal Array to test the parameters: layer height, infill percentage and pattern, and printing temperature, with 3 levels each. It was used analysis of variance and Kruskal Wallis test to verify if there's significative difference between factor levels, approaching the dimensions to target values. It was observed the ideal parameters configuration for better dimensional precision is layer height 0.2mm, 20% of infill and 225°C of printing temperature are the ideal configuration.

Keywords: Additive manufacturing, Fused Deposition Modelling, 3D printing; 3D printing parameters; ABS.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IOT – *Internet of things*
FDM – *Fused Deposition Modelling*
ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno
PLA – Ácido Poliláctico
RP – *Rapid Prototyping*
CAD – *Computer Aided Design*
SLA – *Stereolithography*
SLM – *Selective Laser Melting*
SLS – *Selective Laser Sintering*
DLP – *Digital Light Processing*
FTI – *Film Transfer Imaging*
LOM – *Laminated Objet Manufacturing*
MDF – *Medium-Density Fiberboard*
PVC – Policloreto de Vinila
MJM – *Multi Jet Modeling*
3DP – *3 dimensional printing*
CJP – *Colour Jet Printing*
MRO – Manutenção, Reparo e Operação
DOE – *Design Of Experiments*

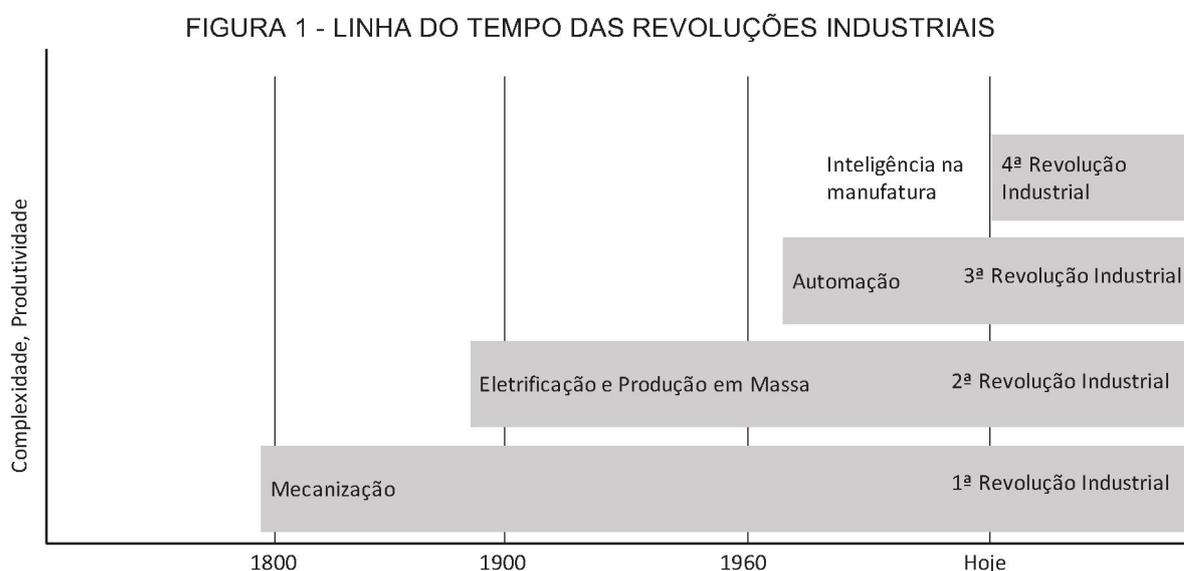
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	DELIMITAÇÕES	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DA LITERATURA	20
2.2	MANUFATURA ADITIVA	23
2.2.1	Tecnologias da manufatura aditiva	28
2.2.1.1	Laser	28
2.2.1.2	Projeção	29
2.2.1.3	Laminação	30
2.2.1.4	Jatos	31
2.2.1.5	Extrusão	32
2.2.2	Fatores de impressão do FDM	33
2.3	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	40
2.4	TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE KRUSKAL WALLIS	43
2.5	RAZÃO SINAL-RUÍDO	44
2.5.1	Problemas estáticos	45
2.5.2	Problemas dinâmicos	46
2.6	TESTE DE NORMALIDADE	47
3	METODOLOGIA	48
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	48
3.2	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO DE LABORATÓRIO (MATERIAIS E MÉTODOS)	49
3.2.1	Material	49
3.2.2	Equipamento	50
3.2.3	Procedimento experimental	52
4	RESULTADOS	61
4.1	COMPRIMENTO	61
4.2	LARGURA	64

4.3	ALTURA.....	68
4.4	FATORES MULTIPLICADORES DE CORREÇÃO DIMENSIONAL	71
4.5	EMPENAMENTO MÉDIO.....	72
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS.....	80
	APÊNDICE 1 - MEDIÇÕES REALIZADAS	85
	APÊNDICE 2 - QUALIDADE DE IMPRESSÃO	87

1 INTRODUÇÃO

Instalações industriais e fábricas são entidades únicas, que se diferenciam entre si pelos produtos, processos, sistemas, a filosofia de trabalho da companhia, seus recursos humanos, a função, dimensões, *layout* e estrutura. A habilidade dessas instalações em se adaptar é uma “tarefa contínua” em termos de gerenciamento (SCHENK *et al.*, 2010).

Ao longo dos anos, ocorreram uma série de revoluções industriais que transformaram a indústria e a forma de produzir. A FIGURA 1 apresenta as grandes revoluções industriais em uma linha do tempo e a principal contribuição de cada uma delas para o mundo fabril.



FONTE: O autor (2019).

A primeira revolução industrial gerou uma profunda mudança na década de 1780, quando as indústrias começaram a utilizar teares mecânicos movidos a vapor. A produção deixava as casas em favor de fábricas centrais, o que gerou um grande incremento na produtividade (DRATH; HORCH, 2014).

Já a segunda revolução teve início cerca de 100 anos depois, nos matadouros de Cincinnati e teve seu auge com o advento da linha de produção utilizada por Ford com seu modelo T, e trouxe eletrificação e produção em massa às indústrias. A

terceira grande revolução iniciou em 1969, quando a Modicon apresentou o primeiro controlador lógico programável, o que permitiu a automação de sistemas produtivos (DRATH; HORCH, 2014).

A quarta revolução industrial está ocorrendo e está relacionada ao IOT (*Internet of Things*) e à inteligência na produção, que é alcançada pela grande conectividade entre máquinas, o que torna possível as redes inteligentes aplicadas a todo o processo produtivo, permitindo que máquinas se comuniquem e tomem decisões com pouca ou nenhuma interferência humana. Isso torna-se vantajoso ao ambiente produtivo visto que com a rápida reação das máquinas, é possível realizar melhorias no processo de manutenção utilizando previsões de defeitos, por exemplo. (LOPEZ RESEARCH, 2014).

O termo indústria 4.0 foi primeiramente usado na feira industrial de Hannover em 2011, e desde então, o número de discussões e trabalhos relacionados a ele têm aumentado. Até na política o termo é frequentemente utilizado em respeito à indústria alemã. Investimentos em pesquisa estão sendo feitos pelo governo do mesmo país em relação ao tema. (DRATH; HORCH, 2014).

Segundo Posada et al. (2015), a impressão tridimensional de modelos (manufatura aditiva), simulações, big data, cloud computing, internet of things, machine learning são soluções que fazem já parte da 4ª revolução industrial.

Além das três revoluções industriais, três revoluções na comunicação humana ocorreram desde os primórdios da existência humana, a primeira delas foi o aprendizado da linguagem oral, que abriu a possibilidade de cada ser explicar e descrever sua percepção a outro, já a segunda revolução foi a escrita, que possibilitou preservar essa percepção. A terceira revolução aconteceu na medida em que era necessário replicar essa escrita em massa, com a invenção da imprensa e impressão móvel (HARNAD, 2013).

Após isso, muitas técnicas de impressão foram desenvolvidas: impressão matricial, laser, jato de tinta, digital. Contudo, todas elas capazes apenas de imprimir o resultado de forma bidimensional (SCHUBERT et al., 2014).

Entretanto, Charles Hull (1986) elevou esse patamar ao inventar o primeiro dispositivo capaz de imprimir objetos em três dimensões, processo que foi definido em sua patente como o desenvolvimento de um padrão de seção transversal do objeto que através de estimulação adequada é capaz de formar através do acúmulo da matéria em lâminas o objeto propriamente dito.

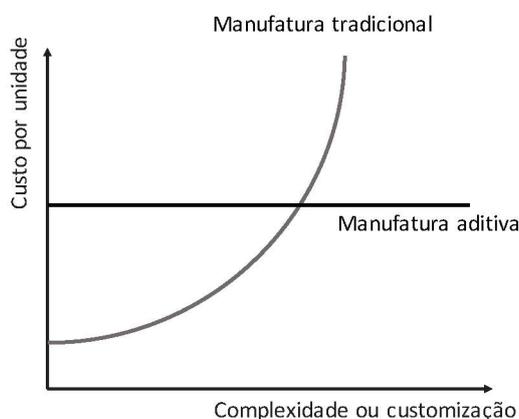
Segundo Attaran (2017), essa tecnologia inovadora de impressão tridimensional, ou também chamada de manufatura aditiva, possibilita a produção de protótipos ou produtos com alto grau de personalização, que contribuem para que empresas se destaquem frente a concorrência em uma economia global.

A manufatura aditiva difere dos demais processos tradicionais de fabricação pela peça ser feita depositando material camada a camada, ao invés de processos subtrativos que partem de uma matéria-prima e aos poucos removem parcialmente material do bloco (perfuração, *milling*), ou processos de união (solda) ou ainda de processos formativos (fundição) (CONNER et al., 2014).

Nos últimos anos, a tecnologia de manufatura aditiva foi muito além do uso inicial que era especialmente a prototipagem, agora trazendo benefícios em toda a cadeia de suprimentos de uma empresa, como redução de custos ou etapas de validação produtos, tornando os produtos mais dinâmicos e adaptados a realidade de mercado (ATTARAN, 2017).

Em uma análise de custo qualitativa, Conner et al. (2014) mostram no GRÁFICO 1 que o custo da manufatura tradicional é elevado conforme aumenta-se o nível de complexidade de uma peça ou de sua customização. Fato esse que beneficia o uso da manufatura aditiva, pois com o uso dela não há um grande incremento no custo de produção quando a complexidade ou customização são altas, o que elevaria a competitividade da empresa.

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO CUSTO E COMPLEXIDADE



FONTE: Adaptado de Conner et al. (2014).

Nesse contexto, a manufatura aditiva mostra-se viável, mas ainda há uma pergunta a ser respondida: Como os parâmetros da manufatura aditiva afetam a precisão dimensional de objetos produzidos por ela?

1.1 JUSTIFICATIVA

A manufatura aditiva ficou assim conhecida após a grande evolução que a rápida prototipagem (do inglês *Rapid Prototyping*) sofreu. Isso ocorreu porque a tecnologia deixou de ser utilizada apenas para o que foi inicialmente concebida, que é a prototipagem, e começou a ser utilizada para a produção de peças (GARDAN, 2015). Atualmente, a tendência da manufatura aditiva é fabricar diretamente produtos finais e funcionais (GUO; LEU, 2013).

Além disso, a manufatura aditiva tem mostrado grande potencial de aplicação na indústria aeronáutica, automotiva, biomédica e de energia por fornecer soluções economicamente viáveis e eficientes em tempo para produzir peças de baixo volume, customizadas e de geometrias complexas (GUO; LEU, 2013). Inclusive, o custo de fabricação tradicional aumenta quando a complexidade da peça é maior, o que não ocorre na manufatura aditiva (CONNER et al., 2014), favorecendo a tecnologia para peças de alta complexidade.

Isso se encaixa na indústria 4.0 com a chamada customização em massa, que a princípio é uma contradição, mas tenta unir vantagens da produção *Engineered to Order* (customização para o cliente) com a vantagem da produção em massa (baixo custo para a indústria) (GUO; LEU, 2013).

Como em qualquer processo industrial, é esperada precisão dimensional para que peças produzidas pela manufatura aditiva possam substituir peças fabricadas por processos tradicionais.

Por isso, o estudo em pauta pretende contribuir por desenvolver uma pesquisa sobre a manufatura aditiva utilizando a técnica de FDM (*Fused Deposition Modelling*), avaliando quais parâmetros do processo impactam na precisão às dimensões da peça produzida por ela.

1.2 OBJETIVOS

Nos próximos tópicos serão apresentados os objetivos do trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar como os parâmetros de processo na manufatura aditiva influenciam na precisão dimensional de objetos fabricados por meio da manufatura aditiva FDM (*Fused Deposition Modelling*) em ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno).

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Definir principais parâmetros de impressão para serem testados usando revisão da literatura;
- Aplicar a técnica DOE para avaliar os parâmetros de processamento e as variáveis de qualidade e precisão dimensional;
- Comparar os fatores ótimos para precisão dimensional em relação à resistência a tração.

1.3 DELIMITAÇÕES

O estudo será realizado apenas na manufatura aditiva do tipo FDM (*Fused Deposition Modelling*), dessa forma esse estudo não pode ser generalizado para outras tecnologias da manufatura aditiva, tais como estereolitografia, sinterização seletiva e outras. Outra delimitação está na utilização de um único material no estudo, o ABS e um modelo de impressora 3D, a GTMax 3D Core A2.

Além disso, devido ao tempo de produção de cada amostra, será utilizado o arranjo ortogonal de Taguchi, para reduzir o número de amostras necessárias. Porém, ao utilizar esse tipo de arranjo ortogonal não é possível calcular a interação entre os fatores da ANOVA.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo se encontra segmentado em quatro capítulos. No primeiro capítulo são apresentados uma introdução ao tema, o problema de pesquisa, as justificativas para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos e a delimitação do trabalho.

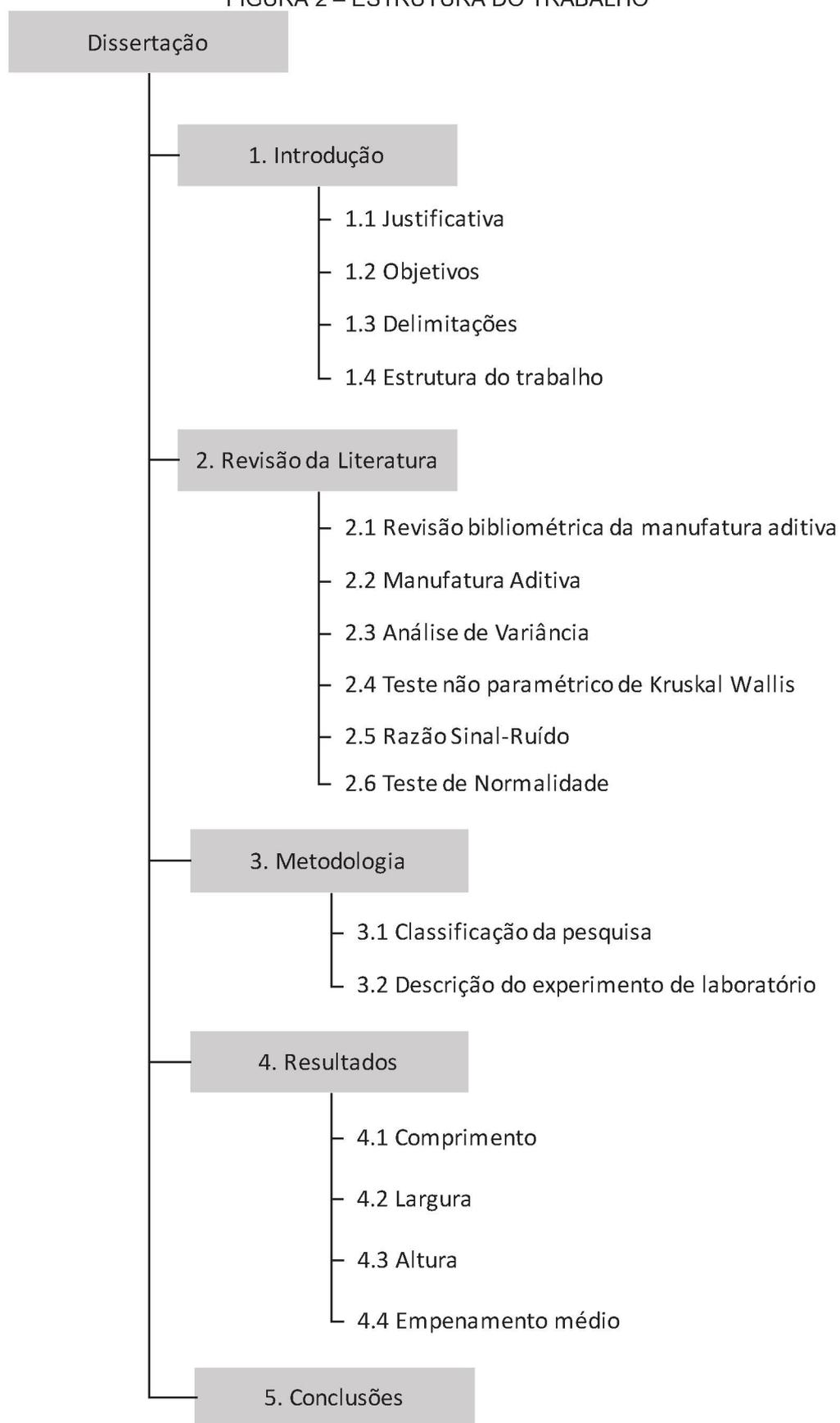
No capítulo 2 são apresentados os levantamentos bibliográficos sobre os tópicos relevantes ao tema de pesquisa: indústria 4.0, manufatura aditiva, análise de variância, teste não paramétrico de Kruskal Wallis e razão sinal-ruído.

No capítulo 3 é descrito o método de pesquisa aplicado neste trabalho, através da classificação da pesquisa, apresentação e explicação de cada etapa do experimento, bem como o material utilizado.

No capítulo 4 são mostrados os resultados e no capítulo 5 é apresentada a conclusão.

Na FIGURA 2 está representada a estrutura do trabalho.

FIGURA 2 – ESTRUTURA DO TRABALHO



Fonte: O autor (2018).

2 REVISÃO DA LITERATURA

No tópico 2 é apresentada a revisão da literatura, intrudozindo o tema e os procedimentos estatísticos.

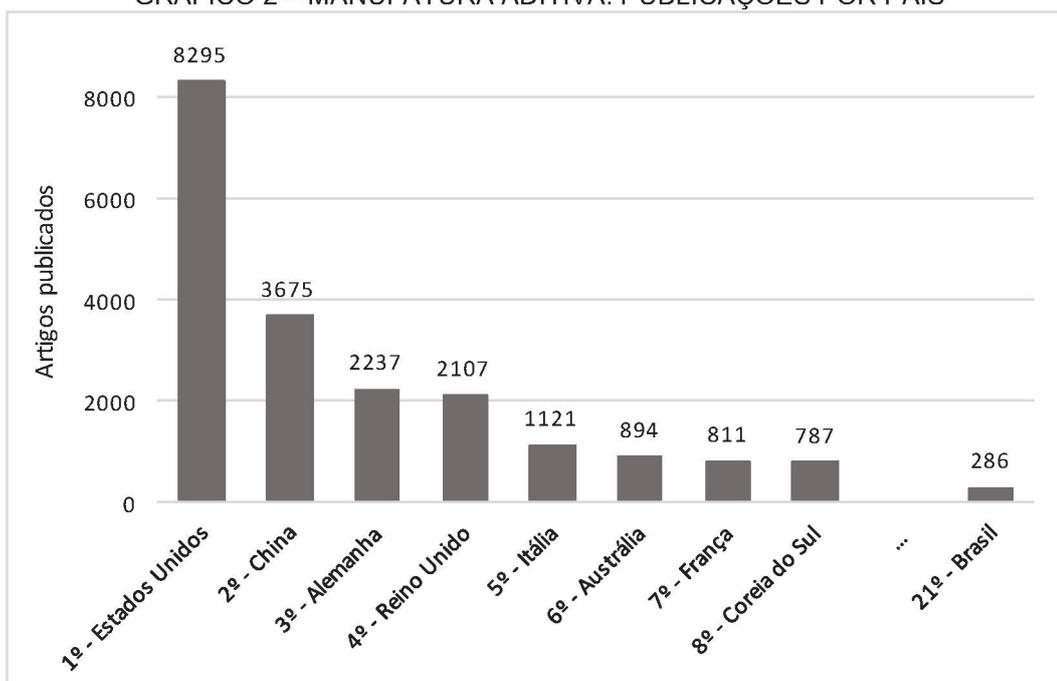
2.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DA LITERATURA

Para a revisão bibliométrica da literatura foram pesquisados termos similares: “*Additive Manufacturing*” e “*3D printing*”. Os termos apresentados foram buscados na base da Scopus, de forma que aparecessem trabalhos que possuíssem qualquer um dos termos nos títulos, resumos ou palavra-chaves.

A linha de pesquisa utilizada na busca da base Scopus foi: TITLE-ABS-KEY ("additive manufacturing" OR "3D printing"). Esses termos foram buscados apenas na base Scopus pela maior clareza na apresentação e facilidade de manipulação dos resultados, como também para evitar redundância caso fossem pesquisadas em mais de uma base de dados.

Após a busca, foi identificado que o país com mais publicações relacionadas a manufatura aditiva é os Estados Unidos, com 8295 artigos publicados. Em seguida, encontra-se a China com 3675 trabalhos. Alemanha, Reino Unido e Itália aparecem a seguir com 2237, 2107 e 1121 artigos publicados respectivamente. O Brasil aparece em 21º lugar, com 286 publicações na área. Esses dados são mostrados no GRÁFICO 2.

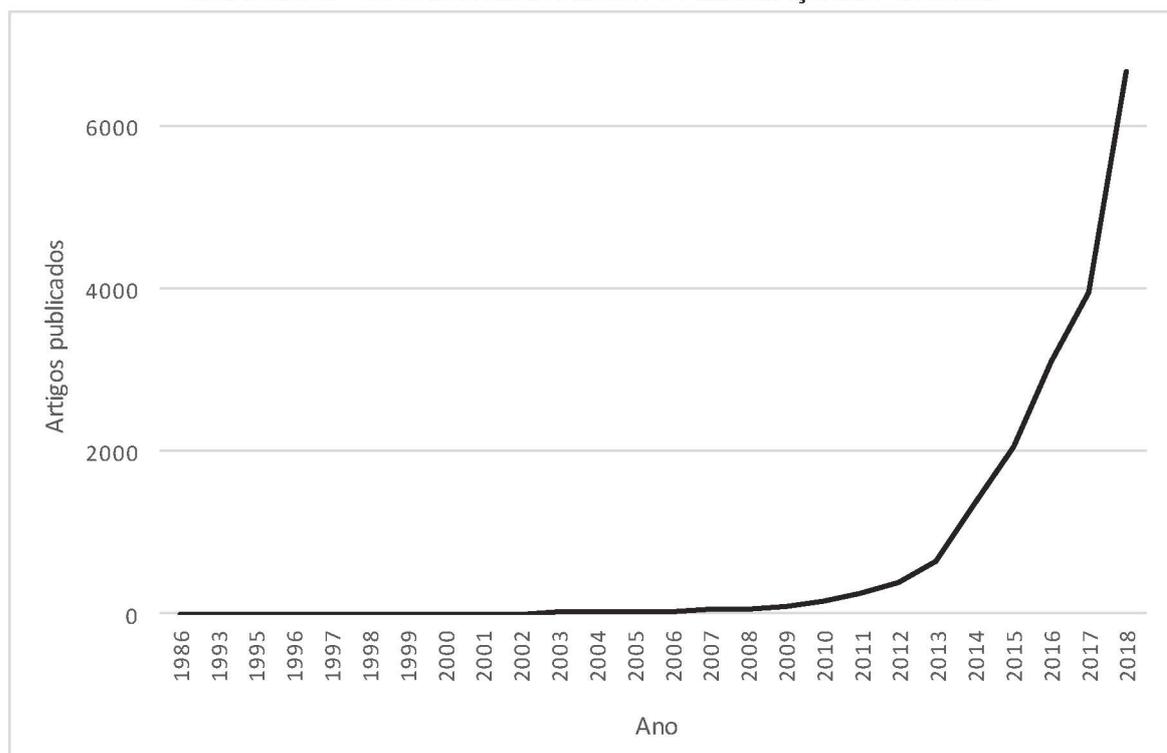
GRÁFICO 2 – MANUFATURA ADITIVA: PUBLICAÇÕES POR PAÍS



FONTE: Scopus (2019).

No GRÁFICO 3, é mostrado o número de publicações por ano. Observa-se que após 2009 o tema passou a ser mais relevante, e após 2013 o número de publicações começou uma escalada. No GRÁFICO 3, há uma tendência de o número de publicações continuar subindo comprovando a relevância do tema.

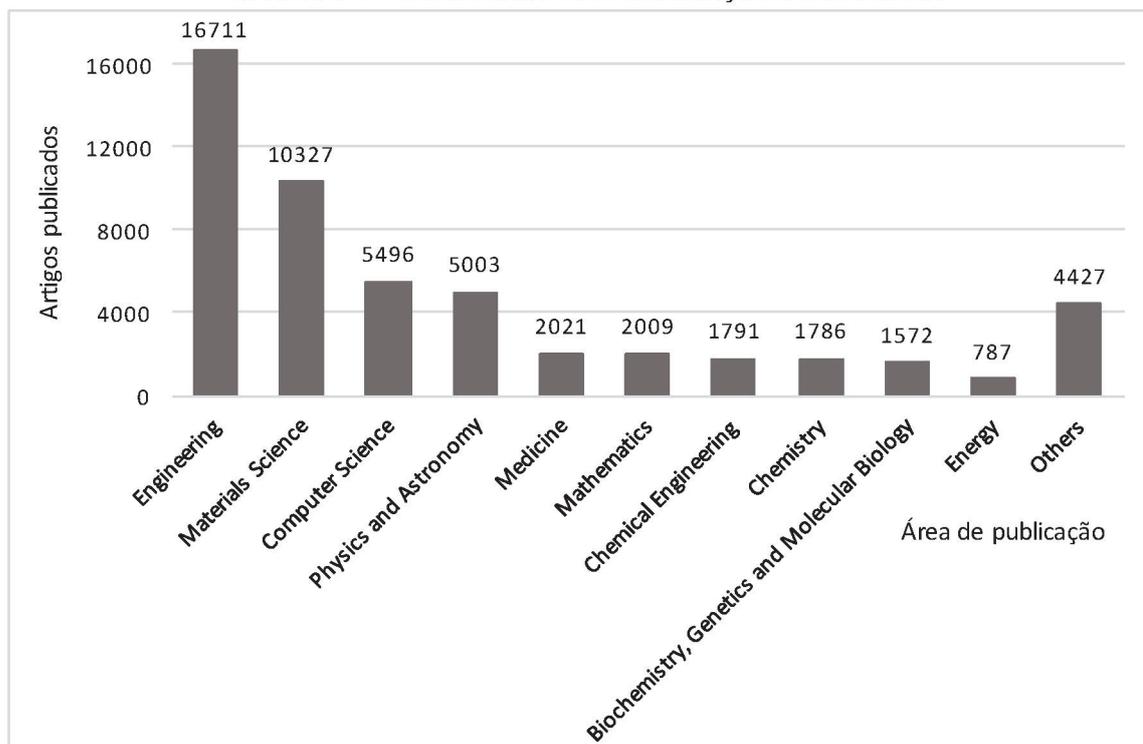
GRÁFICO 3 – MANUFATURA ADITIVA: PUBLICAÇÕES POR ANO



FONTE: Scopus (2019).

No GRÁFICO 4, observa-se que 16711 publicações são da área de *Engineering* (Engenharia), onde são publicados grande parte dos trabalhos. Destes, 10327 são de *Material Science* (Ciência dos materiais) e 5496 de *Computer Science* (Ciência da Computação). Essas são as 3 áreas nas quais mais trabalhos foram publicados.

GRÁFICO 4 – INDÚSTRIA 4.0: PUBLICAÇÕES POR ÁREA



FONTE: Scopus (2019).

Com base na revisão bibliométrica, é possível observar a relevância do tema apresentado nesse trabalho.

2.2 MANUFATURA ADITIVA

O termo Manufatura Aditiva (ou *Additive Manufacturing* em inglês) é caracterizado pela fabricação de objetos adicionando-se camadas sucessivas de material. Isso é o oposto do que ocorre na fabricação subtrativa, onde material é retirado para formar um objeto (GIBSON et al., 2010; ASTM INTERNATIONAL, 2013).

A manufatura aditiva como conhecemos hoje teve como base um conceito chamado *Rapid Prototyping* (RP), desenvolvido nos anos 80 para produzir modelos e peças de protótipos (GARDAN, 2015). O termo RP tem sido utilizado em uma grande variedade de indústrias para descrever o processo rápido de criação de um modelo antes da sua comercialização e ele tem origem na indústria de *softwares*, onde o conceito é bastante utilizado na criação de modelos, muitas vezes com nenhuma ou

limitada funcionalidade, criados para testar as principais ideias e colher *feedbacks* de clientes.

Mais recentemente, usuários da tecnologia perceberam que o termo *Rapid Prototyping* não faz jus ao uso que tem sido dado à tecnologia da manufatura aditiva. Muitas peças finais tem sido manufaturadas usando a técnica de manufatura aditiva, por isso não é correto usar o termo “protótipos” para isso. Assim surgiu o termo manufatura aditiva (GIBSON et al, 2010).

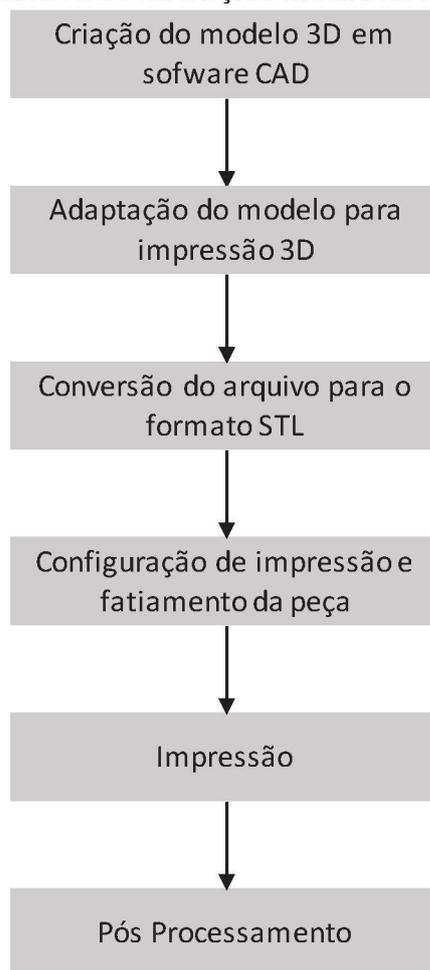
O princípio base da tecnologia de manufatura aditiva é um modelo tridimensional inicialmente gerado utilizando *softwares* CAD (*Computer Aided Design*) que pode ser fabricado diretamente, sem necessidade de planejamento do processo com maquinários e pessoas (GIBSON et al., 2010).

O processo começa com um modelo 3D desenvolvido num *software* CAD, e então é convertido em um arquivo com extensão STL. Esse formato de arquivo é tratado em um *software* específico para manufatura aditiva, que cortará a peça em fatias e criará um novo arquivo de código gcode que possui informações camada a camada em código utilizado pela impressora.

A manufatura aditiva se encaixa perfeitamente com o *design* numérico (com o uso de *softwares* CAD). Ela também é totalmente complementar à engenharia reversa, visto que pode ser utilizada para reproduzir e reparar um modelo, seja peça ou produto completo (GARDAN, 2015).

O fluxo seguido na manufatura aditiva é apresentado na FIGURA 3.

FIGURA 3 – FLUXO DE PRODUÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA



FONTE: adaptado de Gardan (2015).

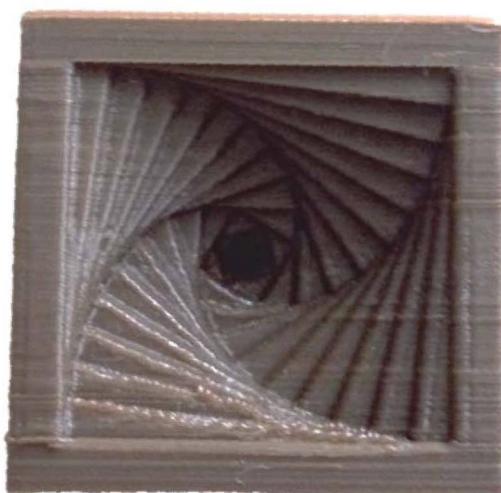
Similarmente, segundo Gibson et al. (2010), em geral existem 8 etapas necessárias para a produção utilizando a manufatura aditiva. São elas:

- CAD (*Computer-aided design*): toda peça produzida por manufatura aditiva deve ter um desenho numérico, ou seja, representado digitalmente em um *software* CAD. Também é possível realizar a engenharia reversa utilizando escaneamento de um objeto e transformando em um desenho numérico;
- Conversão para STL: o formato utilizado por quase todas máquinas de manufatura aditiva é o STL. Esse arquivo descreve as superfícies externas do objeto a ser fabricado;
- Transferência para a máquina de manufatura aditiva e manipulação do arquivo: o arquivo STL deve ser transferido para a máquina. Aqui pode haver alguma manipulação do arquivo para que se possa atingir o tamanho correto, posição e orientação para a impressão;

- Configuração da máquina: definição de alguns parâmetros necessários para o processo como altura da camada, especificidades do material, entre outros parâmetros;
- Produção: a produção em si é automatizada e a máquina pode seguir sem supervisão. Apenas um monitoramento deve ser realizado para garantir que não há nenhum problema ou erro ocorrendo com a máquina;
- Remoção: após o fim da produção, a peça deve ser retirada, o que pode exigir alguma interação como movimentação dos eixos. Deve-se garantir que a temperatura esteja baixa o suficiente para manusear o objeto e que não haja nenhuma peça em movimento;
- Pós-processamento: após a produção é possível que sejam necessárias atividades adicionais como retirada de estruturas de suporte e limpeza;
- Aplicação: é possível que ainda sejam necessários tratamentos adicionais antes da peça estar pronta para uso. Pintura, suavização da superfície e acabamento são os tratamentos mais comuns.

Ainda sobre o pós-processamento, isso ocorre pois a peça nem sempre é produzida com a qualidade desejada ou em sua forma final. Como a produção por manufatura aditiva é realizada em camadas, dificilmente se conseguirá uma superfície extremamente lisa, principalmente no eixo vertical, como pode ser visto na FIGURA 4.

FIGURA 4 – SUPERFÍCIE DA PEÇA PRODUZIDA POR MANUFATURA ADITIVA



FONTE: O autor (2018).

Além disso, o pós processamento pode ser necessário pois em alguns casos é preciso adicionar estruturas de suporte quando a nova camada a ser adicionada à peça não possui uma superfície inferior a ser depositada. Uma representação disso é demonstrada na FIGURA 5.



Quando não é adicionado um suporte à impressão, o material depositado pode escorrer e se solidificar, alterando o formato da peça e a rugosidade de sua superfície, como mostrado na FIGURA 6.

FIGURA 6 – ADIÇÃO DE CAMADAS SEM SUPORTE



FONTE: O autor (2018).

2.2.1 Tecnologias da manufatura aditiva

Existem diversas tecnologias de manufatura aditiva. Essas técnicas serão descritas na sequência.

2.2.1.1 *Laser*

Existem diversas tecnologias que utilizam *lasers* na manufatura aditiva. A primeira delas é a SLA, do inglês *stereolithography* ou estereolitografia em português, que foi a primeira tecnologia criada para a rápida prototipagem (*Rapid Prototyping*), ou o que se tornaria a manufatura aditiva (JACOBS, 1992).

Esse sistema utiliza luz para desenhar formas e solidificar uma resina fotosensitiva. A estereolitografia por *laser* é uma das mais utilizadas tecnologias de manufatura aditiva (GARDAN, 2015).

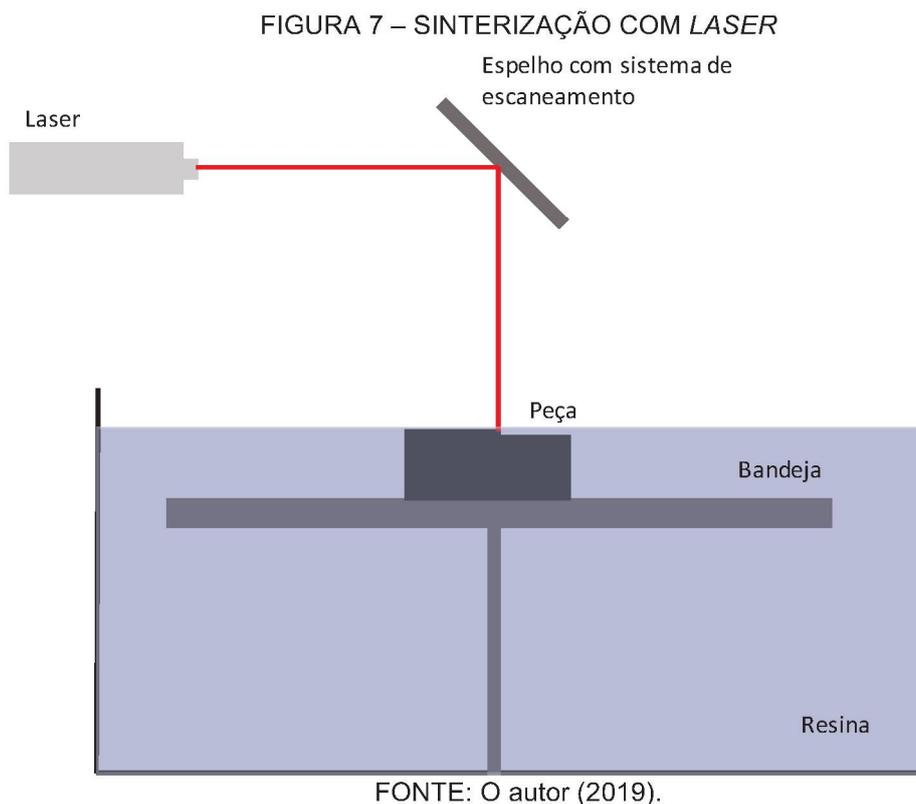
Ainda na estereolitografia, mais recentemente foi utilizada um monômero de cerâmica que se cura na presença de luz. Segundo Griffith e Halloran (1996), uma peça produzida usando esse composto se torna mais resistente e consegue resistir a temperaturas acima de 200°C.

Além disso, novos equipamentos foram criados e já existe a microestereolitografia, capaz de imprimir camadas com menos de 10 µm de espessura (HALLORAN et al., 2011).

Outra tecnologia que utiliza o *laser* é o *Selective Laser Melting* (SLM), ou fundição seletiva por *laser* em uma tradução literal. Nessa tecnologia uma fina camada de pó é derramada sobre a cama ou sobre camadas anteriores e o *laser* faz a fundição desse pó, no formato correto da camada. Segundo Gardan (2015), esse processo pode ser utilizado com aço, aço inox, cobalto cromo titânio e alumínio.

O *Selective Laser Sintering* (SLS) ou sinterização seletiva por *laser* é outra tecnologia que utiliza *laser* para a manufatura aditiva. Da mesma forma que o SLM, um feixe *laser* funde o pó que é depositado entre as camadas. Porém, há uma diferença: esse pó não é completamente fundido, por isso é necessário um pós tratamento para endurecer a peça (GARDAN, 2015).

Uma representação da sinterização com *laser* é apresentada na FIGURA 7.



2.2.1.2 Projeção

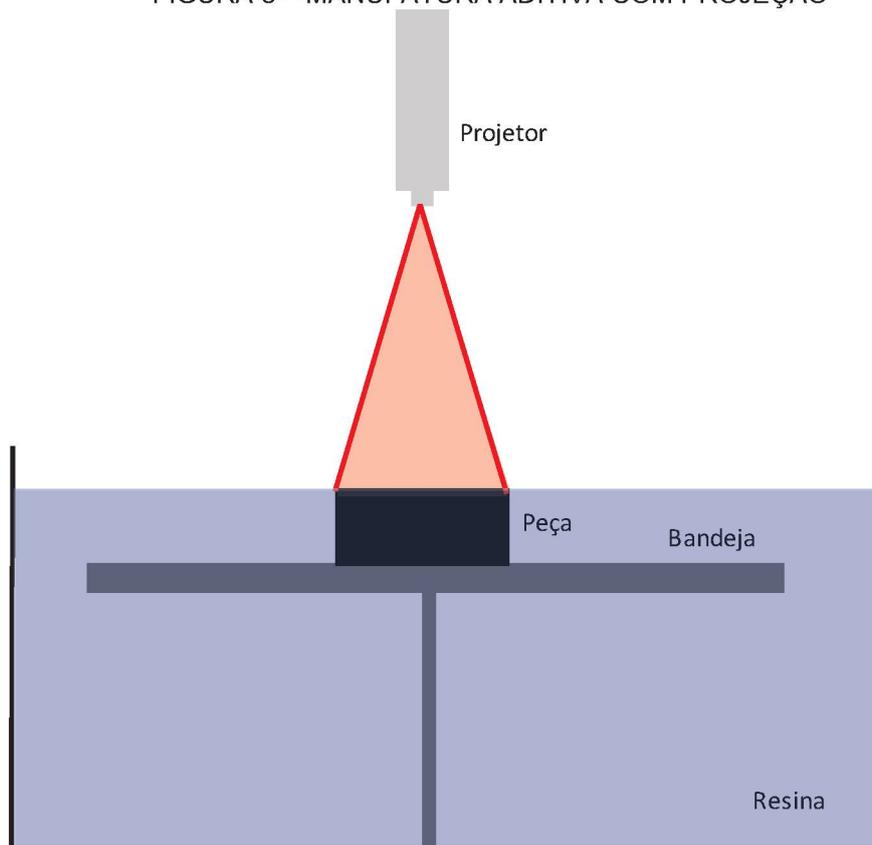
Derivado da estereolitografia (SLA), na tecnologia chamada DLP (*Digital Light Processing*) ou FTI (*Film Transfer Imaging*), um projetor de luz utiliza o princípio de mascaramento para produzir peças de forma mais rápida, reduzindo assim o *lead time* de produção (GARDAN, 2015).

O DLP também utiliza resinas fotossensíveis, porém, diferentemente da SLA, uma imagem completa da camada é projetada na resina, ao invés de pontos ou linhas criadas pelo *laser*. É isso que faz essa tecnologia conseguir uma impressão muito mais rápida que o SLA.

Segundo Gardan (2015), essa tecnologia também é conhecida por sua grande resolução, capaz de imprimir camadas de apenas 30 μm . A fonte de luz utilizada para solidificar a resina pode ser apontada para baixo e com a mesa de impressão voltada para cima, ou o contrário.

Uma representação da manufatura aditiva por projeção é apresentada na FIGURA 8.

FIGURA 8 – MANUFATURA ADITIVA COM PROJEÇÃO



FONTE: O autor (2019).

2.2.1.3 Laminação

Nas tecnologias de laminação como *Laminated Object Manufacturing* (LOM) e *Stratoconception*, camadas de material são adicionadas e coladas com um adesivo, seja papel no caso do primeiro, ou camadas de outros materiais como MDF, PVC, madeira, etc. no caso do segundo (GARDAN, 2015).

Segundo Wong e Hernandez (2012), na laminação são utilizadas folhas de material, que são cortadas no formato da camada por lasers e unidas por pressão, calor e um revestimento adesivo. Por isso esse processo combina manufatura aditiva e subtrativa.

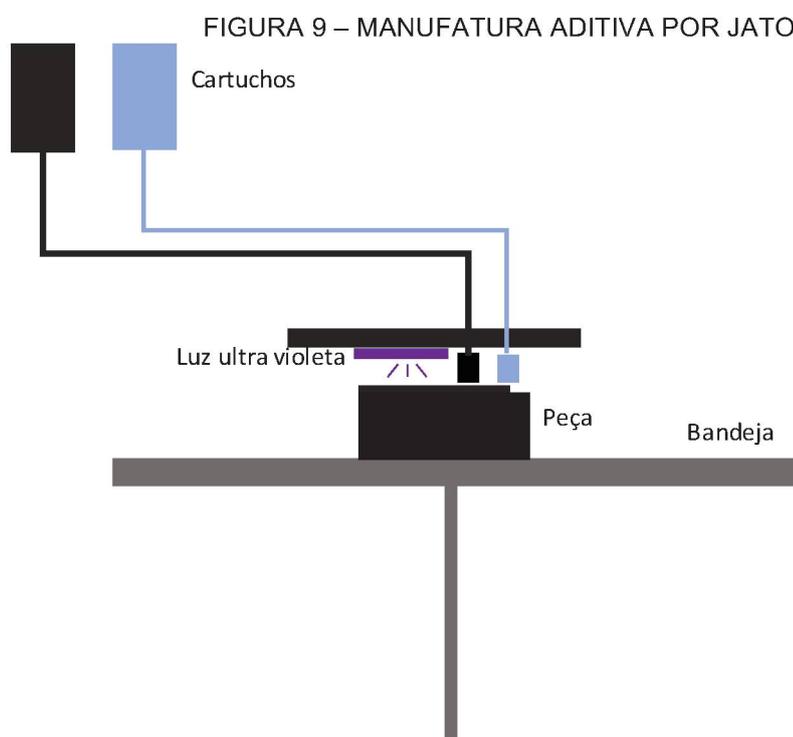
2.2.1.4 Jatos

Como em impressoras jato de tinta, essa tecnologia utiliza jatos de material para a impressão de objetos em 3 dimensões. Também existem diferentes tecnologias utilizadas na impressão por jato.

No *Multi Jet Modeling* (MJM) uma cabeça de impressão com centenas de micro bicos, injeta camadas de resina de apenas 20 μ m de espessura. Junto com a essa resina, é injetado um material de suporte, solúvel em água que é removido em um pós processamento. Simultaneamente a resina é curada por uma luz ultra violeta (IBRAHIM et al., 2009).

No *3 dimensional printing* (3DP) ou *Colour Jet Printing* (CJP) uma camada de pó é depositada sobre a peça e um jato de produto seletivamente depositado sobre esse pó é utilizado para agrega-lo (GARDAN, 2015).

Uma representação da manufatura por jato é apresentada na FIGURA 9.



FONTE: O autor (2019).

2.2.1.5 Extrusão

Segundo Crump (1989), o criador da tecnologia, a manufatura aditiva por extrusão cria objetos em 3 dimensões, depositando múltiplas camadas de material fundido em uma base. Esse material fundido é extrusado através de uma cabeça aquecida que funde o material e o deposita na superfície de impressão, seja ela a mesa de impressão ou camadas anteriores.

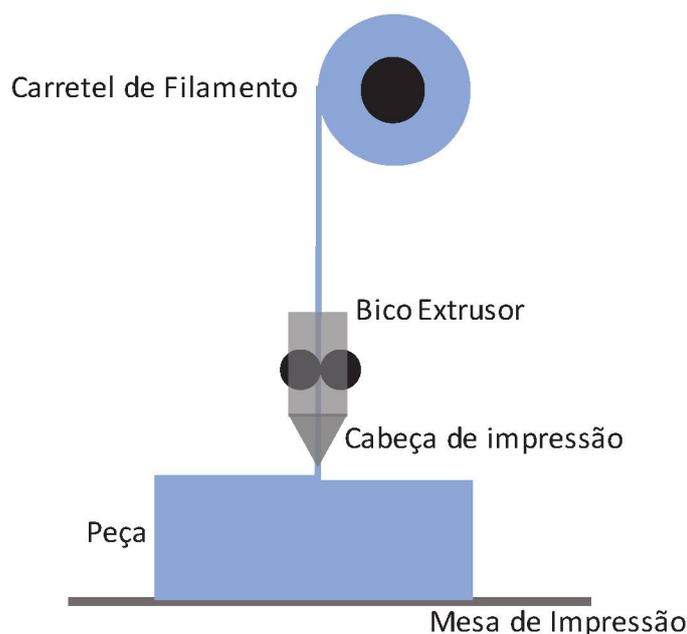
Segundo Gardan (2015), há diferentes tipos de manufatura por extrusão. O *Fused Deposition Modeling* (FDM) é o mais comum, tanto pelo baixo custo do equipamento, quanto ao material de consumo. Este tipo de equipamento já pode ser encontrado em residências para fabricação de objetos decorativos e até na indústria aeronáutica ou automotiva para a fabricação de peças de MRO (manutenção, reparo e operação).

No FDM, um filamento plástico é fundido e extrudado através de uma cabeça de impressão, também chamado de bico, e depositado em camadas para a criação do objeto. O *Fused Deposition Modelling* alia sistemas de deslocamentos da cabeça ou mesa de impressão nos eixos x, y e z (FOGGIATO, 2005). Os materiais de filamento mais comuns são o ABS e o PLA.

Segundo Gardan (2015), a desvantagem da manufatura aditiva tipo FDM é a baixa resolução alcançada no eixo Z se comparado com outras tecnologias de manufatura aditiva.

Uma representação da manufatura aditiva por extrusão é mostrado na FIGURA 10.

FIGURA 10 – MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DO TIPO FDM



FONTE: O autor (2019).

2.2.2 Parâmetros de impressão do FDM

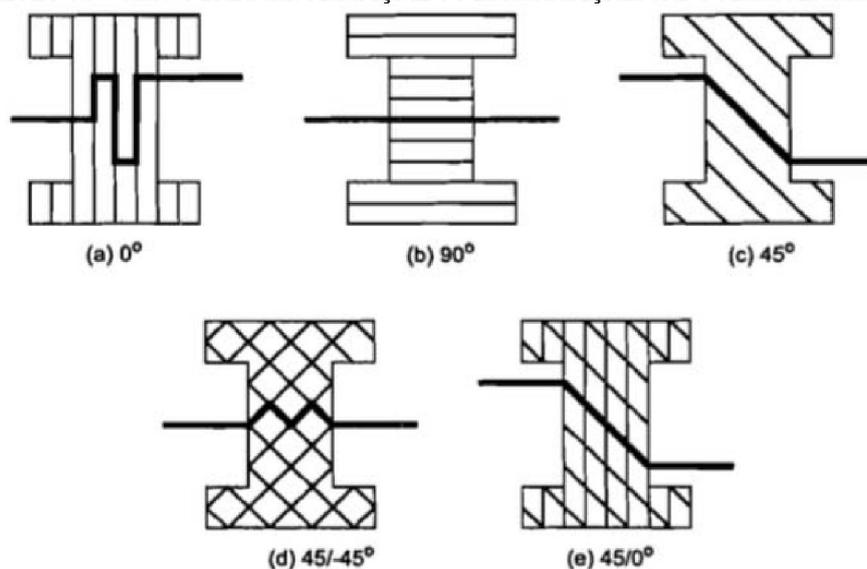
O *software* de fatiamento Ultimaker Cura 3.2.1, é um dos *softwares* utilizados para realizar o fatiamento da peça e posterior impressão. Nele é permitida a alteração dos diversos parâmetros de impressão (parâmetros de processamento), que são mostrados no *software* como categorias de parâmetros que podem ser alterados. São elas:

- Máquina: configurações como tamanho da mesa e do bico de impressão podem ser alterados;
- Qualidade: nessa categoria a qualidade visual da impressão pode ser alterada. Aqui, o principal fator é a altura da camada (em milímetros), que quanto menor, traz maior qualidade visual da peça. Porém, isso pode aumentar consideravelmente o tempo de impressão;
- *Shell* (Casca): aqui são ajustadas a quantidade de camadas e conseqüentemente de material que será utilizado nas camadas externas da impressão. Mais camadas externas geram impressões mais robustas porém aumentam o tempo de impressão e o uso de material;

- Preenchimento: o padrão de preenchimento pode ser alterado, sendo ele hexagonal, zig zag, triângulos, entre outros. A porcentagem do preenchimento também pode ser alterada: de 0 a 100%. Um maior preenchimento utiliza mais material e aumenta o tempo de impressão;
- Material: características de temperaturas (bico de impressão e mesa) que serão utilizadas para impressão e a utilização ou não de retração do filamento no bico de impressão quando ele estiver se movendo entre dois pontos de impressão, o que evita um escorrimento do material;
- Velocidade: podem ser alteradas as velocidades de impressão na camada externa, no preenchimento, nas camadas superiores e inferiores;
- Desclocamento: se consiste basicamente na velocidade de deslocamento do bico de impressão enquanto esse não está imprimindo;
- Resfriamento: parâmetros dos ventiladores podem ser alterados para garantir que a camada esteja fria quando a camada seguinte for depositada;
- Suporte: quando o material precisa ser depositado em um local onde não há uma camada inferior, é necessário utilizar suportes para que o material seja sustentado. Nesse item pode-se alterar se será utilizado ou não suportes;
- Adesão na plataforma: padrão de impressão que será adicionado a peça para que ela seja fixada na mesa de impressão;
- Orientação das camadas: alinhamento (direção) da deposição.

Segundo Es-Said et al. (2000), em um estudo realizado com ensaio de tração em corpos de prova fabricados por manufatura aditiva em ABS, concluiu que a orientação do material depositado nas camadas tem forte influência na resistência a tração do material. Isso ocorre pois entre as camadas existem espaços vazios, que são basicamente espaços sem preenchimento de material. Quando a peça é submetida ao ensaio de tração, é justamente nesses espaços vazios que o material tende a romper. A orientação das camadas e o local de ruptura são apresentados na FIGURA 11.

FIGURA 11 – RUPTURA EM RELAÇÃO A ORIENTAÇÃO DO PREENCHIMENTO



FONTE: Es-Said et al. (2000).

O corpo de prova que conseguiu suportar a maior carga foi o que possuía a orientação do preenchimento paralelo a aplicação da força de tração (0°). Em seguida veio o corpo com preenchimento de 45° e 0° em relação a força de tração.

Sood et al. (2010) fez um estudo com ensaios de tração, ensaio de flexão e ensaio de impacto com corpos de ABS fabricados pela manufatura aditiva. Para o ensaio de tração, a combinação de fatores que suportou a maior força pode ser vista no QUADRO 1.

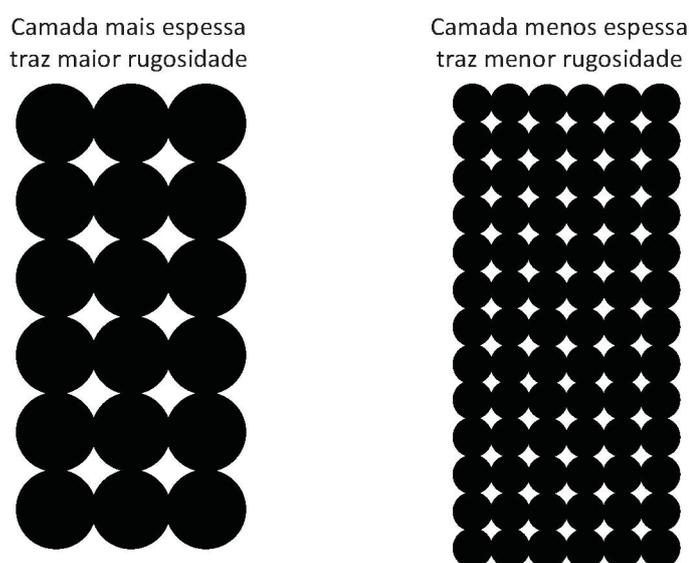
QUADRO 1 – NÍVEIS DE FATORES QUE SUPOSTARAM A MAIOR FORÇA APLICADA NO ENSAIO DE TRAÇÃO REALIZADO POR SOOD

Fator	Nível (VALORES)
Espessura da camada	0,127mm (menor espessura)
Orientação em relação a mesa	0° (paralelo a mesa)
Orientação da deposição	0° (paralelo a força aplicada)
Espessura das camadas utilizadas para preencher partes curvas	0,5064mm (maior espessura)
Espessura da camada de ar entre camadas de material	0mm (menor camada de ar)

FONTE: Sood et al. (2010).

Já em um estudo da rugosidade da superfície da peça impressa pela manufatura aditiva, Anitha et al. (2001) concluiu que dos itens espessura da camada, largura da camada e velocidade da impressão, apenas a espessura da camada tem influência na rugosidade. Quanto menor a espessura da camada, menor também será a rugosidade da peça. Uma exemplificação desse fenômeno pode ser vista na FIGURA 12.

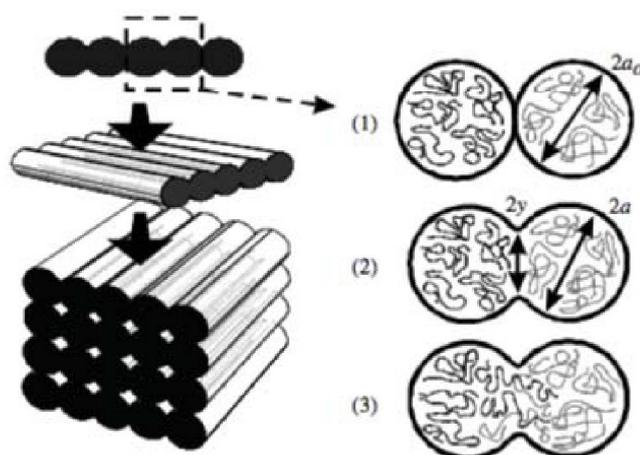
FIGURA 12 – RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE EM RELAÇÃO A ESPESSURA DA CAMADA



FONTE: O autor (2019).

Os trabalhos anteriormente citados não consideram fatores de temperatura, como por exemplo a temperatura de extrusão. Porém, Segundo Sun et al. (2008), a formação de uniões entre as camadas depositadas dependem da energia térmica do material extrudado. Dessa forma, a temperatura tem grande influência na qualidade dessas uniões e conseqüentemente na resistência da peça. Isso é mostrado na FIGURA 13.

FIGURA 13 – QUALIDADE DA UNIÃO ENTRE CAMADAS



FONTE: Sun et al. (2008).

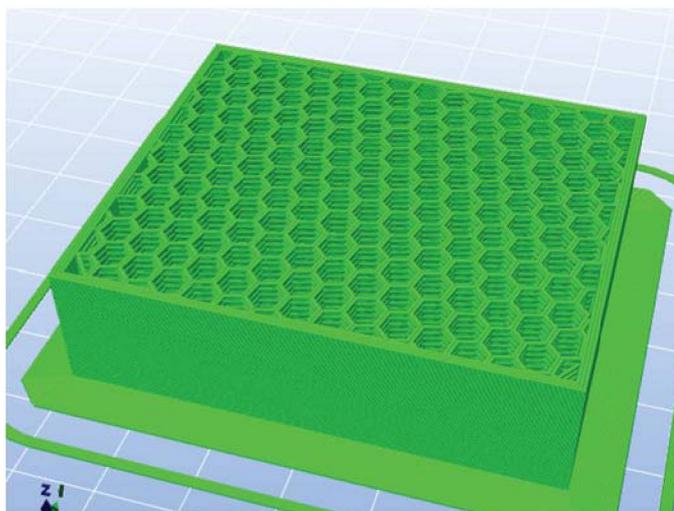
Outro autor, N. Turner et al. (2014), diz que a qualidade das uniões entre camadas determina a superfície e as propriedades mecânicas da peça produzida por manufatura aditiva. Segundo ele, características como tensão superficial, viscosidade, razão de esfriamento e interação com o bico de impressão compõem o histórico térmico da impressão. E esse histórico tem grande importância e é o maior determinante na qualidade dessas uniões.

Seguindo esse raciocínio, Abbott et al. (2018) fizeram um experimento utilizando 4 fatores: temperatura do bico de impressão, velocidade de impressão, espessura da camada e orientação de impressão. Após ensaios de tração, foi concluído que uma maior velocidade de impressão afeta negativamente a resistência a tração. A temperatura de impressão teve menos influência que a velocidade de impressão, porém com o aumento da temperatura, conseguiu-se maior resistência a tração. Já a espessura da camada se mostrou fortemente dependente da orientação de impressão. Quando o corpo de provas foi impresso paralelo ao eixo Z, uma maior

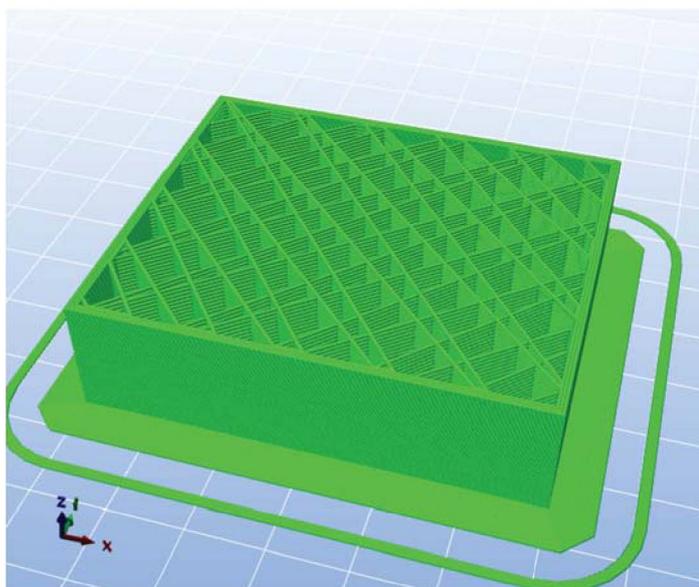
resistência a tração foi atingida com uma menor espessura de camada. Isso ocorreu devido a maior compactação das camadas nesse eixo, que é paralelo a força de tração aplicada, e perpendicular as camadas depositadas. Já quando o corpo de prova foi impresso paralelo ao eixo X, a maior resistência foi conseguida utilizando a maior espessura das camadas. Nesse caso isso se deu pelo contato entre as deposições vizinhas.

Fernandez-Vicente et al. (2016) analisaram a influência do padrão e a porcentagem de preenchimento da peça fabricada pela manufatura aditiva em ABS. Para isso eles utilizaram 3 padrões: *Honeycomb*, *Line* e *Rectilinear*, que podem são mostrados respectivamente nas FIGURAS 14, 15 e 16.

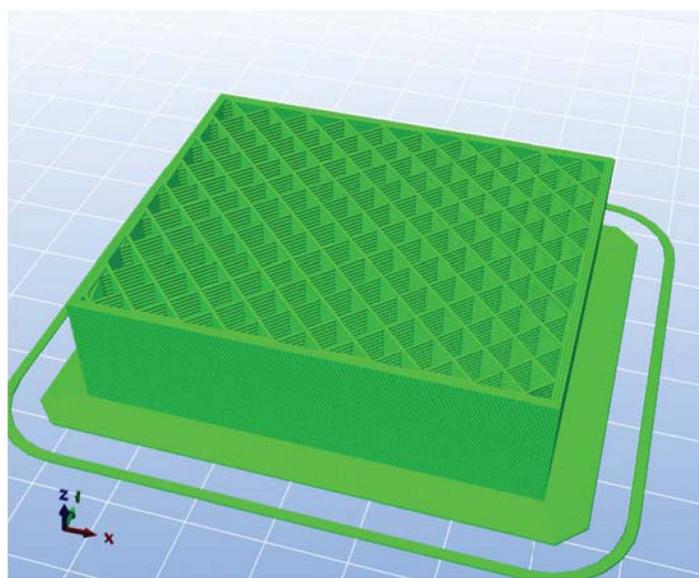
FIGURA 14 – PADRÃO DE PREENCHIMENTO *HONEYCOMB*



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 15 – PADRÃO DE PREENCHIMENTO *LINE*

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 16 – PADRÃO DE PREENCHIMENTO *RECTILINEAR*

FONTE: O autor (2019).

Em porcentagem de preenchimento, Fernandez-Vicente et al. (2016) estudaram os níveis de 20%, 50% e 100%.

As peças que se mostraram mais resistentes no ensaio de tração foram as que possuíam 100% de preenchimento, sendo a mais resistente com o padrão *rectilinear*. Com porcentagens de preenchimento de 50% e 20%, as peças mais resistentes são as que possuem padrão de preenchimento *honeycomb*.

Em um estudo parecido, Ebel; Sinnermann (2014) realizaram testes de tração em corpos de prova fabricados em ABS e PLA, com 100% de preenchimento e padrão *line* e parcialmente preenchida com padrão *honeycomb*.

Os corpos de prova que apresentaram maior resistência a tração foram os completamente preenchidos com padrão *lines*, tanto ABS como PLA, o segundo possuindo mais resistência a tração.

Tymrak et al. (2014) por sua vez conduziram um estudo semelhante, analisando a resistência a tração das peças impressas em 3D, porém variando a altura da camada entre 0,2 a 0,4mm e orientação de impressão entre as camadas de -45°/45° e 0°/90°. Menores alturas de camadas e o a orientação de -45°/45° entre as camadas apresentaram maior resistência a tração, tanto em ABS quanto em PLA, novamente com o PLA apresentando maior resistência.

2.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Segundo Girden (1992), a análise de variância (ANOVA) é um procedimento geral para isolar fontes de variabilidade em um conjunto de amostras. O objetivo é determinar quais os efeitos que uma variável independente tem na variável resposta.

Doncaster; Davey (2007) dizem que a ANOVA é uma técnica muito versátil, que pode ter muitas estruturas descritas em diferentes modelos. Ela estima o efeito de um fator categórico testando a diferença entre as médias das categorias, obtidas das variáveis respostas.

A ANOVA testa o efeito do fator na resposta, analisando o quanto da variação total pode ser explicada por esse efeito (DONCASTER; DAVEY, 2007). Ela ajuda a determinar se as amostras são melhores ou piores, com significância estatística. Ela pode ser aplicada com um fator, (*one-way ANOVA*), dois fatores (*two-way ANOVA*) e *repeated measures ANOVA*, ou seja, pode ser utilizada com diversos fatores (LAND et al., 2012).

É uma generalização do teste para igualdade de duas médias populacionais. São testadas k médias (quando $k \geq 2$) com base na estatística F (MENDES; MENDES, 2009). Ela testa a hipótese H_0 de que não existe diferença significativa

entre as médias. Já H_1 é a hipótese alternativa onde ao menos uma das médias possui diferença significativa, que como mostrados na Equação 1.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$
$$H_1: \text{Pelo menos uma das médias é diferente} \quad (1)$$

Para o cálculo da ANOVA, é utilizada uma tabela com um formato que concentra os principais cálculos necessários. Essa tabela para o caso da *one-way* ANOVA está mostrada no QUADRO 2.

QUADRO 2 – TABELA DA ANOVA

Fonte de Variação	Soma de quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Estatística <i>F</i>
Entre Amostras	<i>SQE</i>	$k - 1$	$QME = \frac{SQE}{K - 1}$	$\frac{QME}{QMR}$
Residual	<i>SQR</i>	$N - k$	$QMR = \frac{SQR}{N - K}$	
Total	<i>SQT</i>	$N - 1$		

FONTE: O autor (2019).

Onde:

$$SQE = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{x}_j - \bar{X})^2 \quad (2)$$

$$SQR = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (3)$$

$$SQT = SQE + SQR \quad (4)$$

Sendo:

- k : número de fatores
- N : número total de observações
- \bar{X} : média do conjunto de k amostras
- \bar{x}_j : média da j -ésima amostra
- x_{ij} : i -ésimo elemento da j -ésima amostra

A estatística F calculada é então comparada com a estatística F tabelada com . Se o F calculado for maior que o F tabelado, rejeita-se a hipótese H_0 , ou seja, há diferença significativa entre as médias. Caso contrário aceita-se H_0 .

Segundo Feir-walsh (1974), para utilização da ANOVA, devem-se assumir 2 suposições: normalidade das amostras e igualdade das variâncias (homocedasticidade). Quando essas suposições não são atendidas, recomenda-se utilizar testes não paramétricos, como o teste de Kruskal Wallis.

2.4 TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE KRUSKAL WALLIS

Testes estatísticos da família da ANOVA e correlação exigem que as variáveis dependentes sejam normalmente distribuídas, ou seja, se ajustem uma distribuição normal. Como a curva normal é definida por 2 parâmetros, média e desvio padrão, esses testes são chamados de paramétricos.

Uma outra classe de teste é chamada de teste não paramétrico, ou seja, que não faz nenhuma suposição referente a distribuição dos dados (STREINER, 2010).

O teste de Kruskal Wallis é um teste não paramétrico que avalia diferenças em três ou mais grupos de avaliados de forma independente. Ele é uma forma mais generalizada do teste para dois grupos Mann-Whitney e é considerado uma forma não paramétrica da ANOVA (MCKIGHT; NAJAB, 2010).

O teste, diferentemente da ANOVA, é baseado em classificações (*ranks*) em ordem de magnitude, substituindo o menor por 1, o segundo menor por 2 e assim por diante, e o maior por N. Segundo Kruskal e Wallis (1952) isso traz algumas vantagens:

- Simplificação dos cálculos;
- Única suposição realizada é das variáveis serem independentes;
- Dados de forma ordinal podem ser usados;
- Quando as suposições do teste estiverem muito fora da realidade, é provável que o teste usual não tem chance de detectar diferenças de real interesse.

As hipótese H_0 é a de que não há diferença entre os grupos. Já H_1 é a hipótese em que há diferença entre eles.

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k$$

$$H_1: \text{Pelo menos um dos grupos é diferente} \quad (5)$$

O cálculo do teste H é calculado de 2 formas:

- Sem valores repetidos na Equação 6:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^C \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N + 1) \quad (6)$$

Sendo:

- C o número de amostras
- N o número total de observações;
- n o número de observações em cada grupo;
- R_i a soma das classificações dos grupos.
- Com valores repetidos na Equação 7:

$$H = \frac{\frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^C \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)}{1 - \frac{\sum T}{N^3 - N}} \quad (7)$$

Sendo T calculado pela Equação 8.

$$T = t^3 - t \quad (8)$$

Sendo t o número de valores repetidos.

A estatística então segue distribuição χ^2 com $C - 1$ graus de liberdade.

2.5 RAZÃO SINAL-RUÍDO

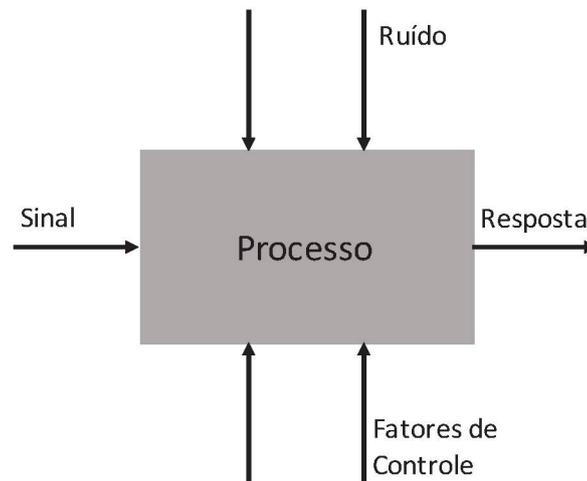
A razão Sinal-Ruído é uma forma de medir quantitativamente a robustez de um processo ou produto. Ou seja, a razão sinal-ruído é um índice que mede a qualidade da transformação de energia do processo (TAGUCHI et al.; 2000).

É usada a razão sinal-ruído ao invés do desvio padrão como medida de qualidade devido a menor influência da média na razão sinal-ruído quando comparada com o desvi padrão (KUMAR et al., 2012).

A razão sinal-ruído é uma variação da função perda quadrática de Taguchi, e é mais fácil de ser calculada e interpretada, e por isso mais comum. É comumente utilizada de forma que seja minimizada a sensibilidade a ruídos antes do ajuste da média (PHADKE, 1989).

A FIGURA 17 mostra a representação de um produto ou processo.

FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DE UM PRODUTO OU PROCESSO



FONTE: O autor (2019).

No processo há diversas entradas e uma saída, a resposta. São elas:

- Fatores de sinal: controlado pelo usuário, para alterar o desempenho. Um exemplo é o acelerador de um veículo;
- Fatores de controle: parâmetros do processo/produto de responsabilidade do projetista. Esses fatores podem ser manipulados ou controlados pelo usuário, por isso seu nome. Na impressão 3D, por exemplo, a temperatura de impressão.
- Fatores de ruído: são os fatores que não podem ser controlados mas alteram a resposta. Normalmente são fatores externos ao experimento que se traduzem em variabilidade na resposta. Como exemplos estão a temperatura e umidade do ambiente em um ambiente aberto.

Os problemas podem ser classificados entre estáticos e dinâmicos. Que serão vistos nos tópicos 2.5.1 e 2.5.2, respectivamente.

2.5.1 Problemas estáticos

Segundo Taguchi e Phadke (1989), os problemas estáticos não possuem fatores de sinal, apenas fatores de ruído e fatores de controle.

Dessa forma, a razão sinal-ruído para esses problemas de 3 diferentes formas. São elas:

- Menor é melhor: quando a variável resposta deve ser minimizada. A equação para o cálculo da razão sinal-ruído é mostrada na Equação 9.

$$SN = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (9)$$

- Nominal é melhor: quando a variável resposta deve atingir um valor alvo. A equação para o cálculo desse tipo está na Equação 10.

$$SN = 10 \log_{10} \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

Onde μ^2 é a média quadrada do fator e σ^2 é a variância.

- Maior é melhor: a variável resposta deve ser maximizada. Sua equação é mostrada na Equação 11.

$$SN = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (11)$$

2.5.2 Problemas dinâmicos

Os problemas dinâmicos diferem dos estáticos por possuírem fatores de sinal. Segundo Phadke (1989) eles podem ser:

- Contínuo-Contínuo (C-C) quando tanto sinal quanto resposta possuem variáveis contínuas;
- Contínuo-Digital (C-D) quando o sinal é uma variável contínua mas a resposta é do tipo categórica (1 ou 0, SIM e NÃO).
- Digital-Digital (D-D) quando tanto o sinal quanto a resposta são categóricas;
- Digital-Contínua (D-C), o sinal é categórico mas a variável resposta é contínua.

2.6 TESTE DE NORMALIDADE

Para verificar se os dados se ajustam a uma distribuição normal, que é uma das suposições para se utilizar a ANOVA, devem ser feitos testes de normalidades.

Em fenômenos aleatórios existe a tendência de verificar se os dados coletados pertencem a algum modelo de distribuição de probabilidade. Para comprovar a teoria é necessário aplicar testes estatísticos (ROSS, 2009).

Uma variedade de procedimentos estatísticos leva em consideração o fato dos dados pertencerem ou não a um tipo de distribuição específica, especialmente os voltados para a distribuição normal. Por essa razão, os testes para testar a normalidade de amostras são uma área importante na pesquisa estatística (SHAPIRO; WILK, 1965).

A hipótese nula H_0 de um teste de normalidade é a de que os dados fazem parte de uma distribuição normal. Quando o p-valor é superior que o valor base ($\alpha = 0,05$ ou $\alpha = 0,01$), a hipótese H_0 não é rejeitada e assim sendo, pode-se concluir que os dados se ajustam a uma distribuição normal (AHAD et al., 2011).

Os procedimentos mais utilizados para verificar se uma amostra pertence a uma distribuição normal são: métodos gráficos, métodos numéricos e especialmente os testes formais de normalidade propriamente ditos, sendo os mais comuns: Shapiro-Wilk, o teste de Lilliefors, o teste de Anderson-Darling, e o utilizado nesse trabalho: o teste de Kolmogorov-Smirnov (WAH et al., 2011).

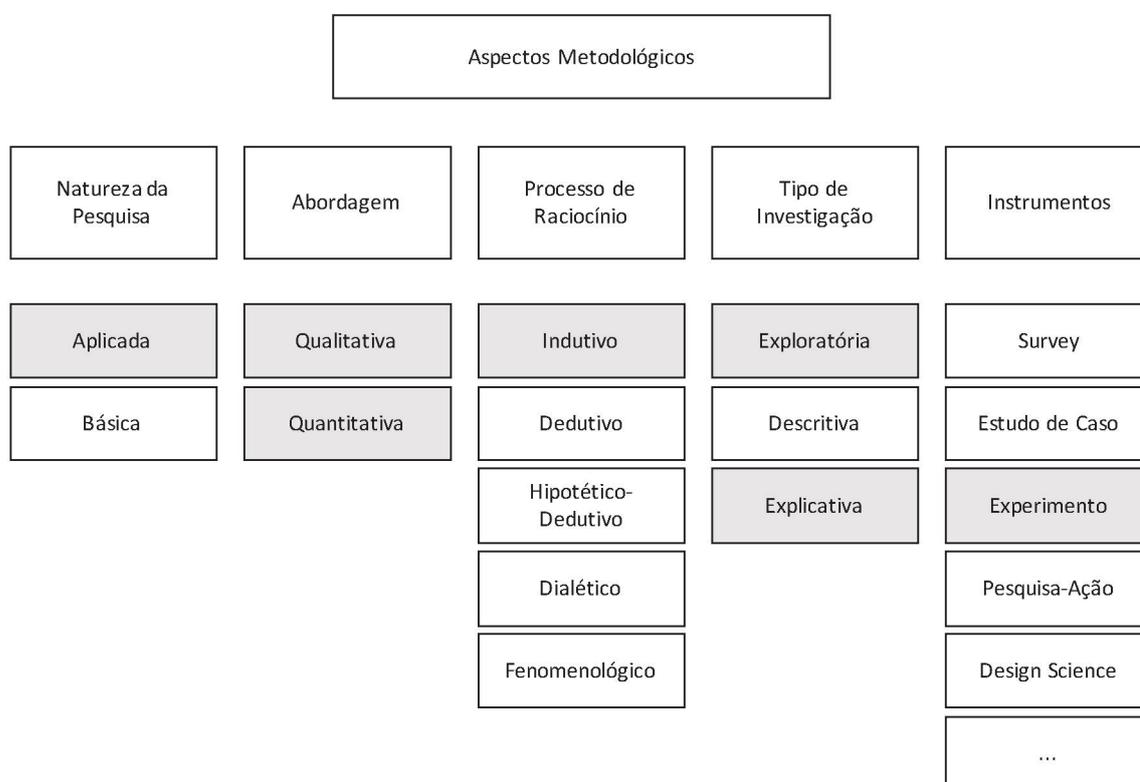
3 METODOLOGIA

Esse capítulo apresenta a metodologia que será aplicada a esse trabalho, a classificação da pesquisa e procedimentos para coleta e análise de dados.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Um esquema para sintetizar a classificação do método de pesquisa deste trabalho é apresentado na FIGURA 18.

FIGURA 18 – VISÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA



FONTE: Adaptado de MIGUEL, *et. al.* (2017).

Quanto a natureza da pesquisa, ela é aplicada. Isso pois ela gera conhecimentos para a aplicação prática da manufatura aditiva, ou seja, um problema específico mas não envolve o avanço da ciência (SILVA; MENEZES, 2001).

Do ponto de vista da forma de abordagem, ela é tanto qualitativa como quantitativa. Ela considera que é possível traduzir em números o que está sendo

observado nas informações. Isso requerirá técnicas estatísticas para gerar conclusões. Porém, pode-se classificá-la também como qualitativa, pois faz observações que não podem ser transformadas em dados numéricos.

Quanto ao processo de raciocínio, a pesquisa em questão é indutiva. Na indução, a generalização é derivada de observações de casos da realidade observada.

Quanto a investigação, ela é do tipo exploratória pois tem como objetivo desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, utilizando levantamento bibliográfico. Porém, ela também é do tipo explicativa visando identificar fatores que causam ocorrência de um fenômeno (GIL, 2008).

Quanto aos instrumentos de pesquisa, o utilizado nesse trabalho é o experimento. Utilizado quando um objeto de estudo é determinado e são estudados as variáveis e os efeitos que elas causam no objeto.

3.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO DE LABORATÓRIO (MATERIAIS E MÉTODOS)

Segundo Gil (2002):

A pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto (GIL, 2002).

Dessa forma, com o intuito de responder a nossa pergunta de pesquisa “Como os parâmetros da manufatura aditiva afetam a precisão dimensional” essa pesquisa irá utilizar o método experimental.

3.2.1 Material

Para o trabalho em questão, será utilizado um rolo de filamento de 1kg com 1,75mm de diâmetro. O material escolhido poderia ser ABS ou PLA devido à

capacidade da impressora 3D que produzirá os corpos de prova. Esses rolos de filamento são disponíveis comercialmente.

Porém, no ambiente industrial, o ABS é mais utilizado. Ele oferece uma boa resistência ao envelhecimento, dureza, brilho e rigidez. É comum que indústrias o utilizem para produzir capacetes, tubos e carcaças de eletrodomésticos, como apiradores de pó, telefones, câmeras, etc. (IZDEBSKA; THOMAS, 2016). Já o PLA é menos utilizado industrialmente, é mais instável e tende a ser mais quebradiço que o ABS (WOJTYŁA et al. 2017). Pelo maior uso industrial, o material escolhido para o estudo em questão foi o ABS.

Apesar do maior uso industrial do ABS, segundo Tymrak et al. (2014), em um teste de tração realizado com corpos de provas fabricados por meio da manufatura aditiva, os que foram produzidos com PLA se mostraram mais resistentes que os de ABS.

3.2.2 Equipamento

A impressora 3D utilizada no estudo é produzida pela empresa brasileira GTMax 3D, modelo A2, e utiliza a técnica FDM de manufatura aditiva. As características dessa impressora são apresentadas no QUADRO 3 e uma imagem da impressora é apresentada na FIGURA 19.

QUADRO 3 – CARACTERÍSTICAS DA IMPRESSORA 3D UTILIZADA

Parâmetro	Valor
Largura da área de impressão (máx)	200mm
Profundidade da área de impressão (máx)	200mm
Altura da área de impressão (máx)	200mm
Volume total da área de impressão (máx)	8000cm ³
Temperatura máxima da cabeça de impressão	290°C
Temperatura máxima da mesa de impressão	110°C
Velocidade máxima de impressão	120mm/s
Velocidade máxima em deslocamento	200mm/s
Diâmetro da cabeça de impressão	0,4mm
Altura máxima das camadas	0,32mm
Altura mínima das camadas	0,05mm
Tipo de enclausuramento	Gabinete Fechado

FONTE: O autor (2018).

FIGURA 19 – IMPRESSORA GTMAX 3D CORE A2



FONTE: GTMAX (2019).

A temperatura e a umidade do ambiente não serão controlados, porém a impressora possui gabinete fechado, o que diminui o ruído desses fatores.

3.2.3 Procedimento experimental

Com a finalidade de entender a influência dos parâmetros de processamento da manufatura aditiva em objetos produzidos, foi utilizado o DOE (*Design of Experiments*).

Com base na revisão bibliográfica realizada anteriormente, de parâmetros que afetam o comportamento mecânico da peça, e no interesse do autor de conhecer

melhor algum fator específico que não foi visto por outros trabalhos foram utilizados para a manufatura os seguintes parâmetros:

1. Altura da camada depositada;
2. Padrão de preenchimento;
3. Porcentagem de preenchimento;
4. Temperatura da cabeça de impressão.

Como citado em tópico anterior, foi utilizado filamento de ABS e uma impressora GTMax 3D A2 para o experimento. Outros parâmetros de processo foram mantidos fixos.

Para cada parâmetro, ou fator, foram utilizados 3 ajustes, ou seja, 3 níveis. Esses níveis foram arbitrariamente definidos e são apresentados no QUADRO 4.

QUADRO 4 – FATORES E NÍVEIS DO EXPERIMENTO

Fator	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Altura da camada	0,1mm	0,2mm	0,3mm
Padrão de preenchimento	Lines	Rectilinear	Honeycomb
Porcentagem do preenchimento	20%	50%	100%
Temperatura da cabeça de impressão	225°C	235°C	245°C

FONTE: O autor (2019).

Caso fosse utilizado o delineamento fatorial completo, seriam necessários 81 experimentos, ou 3^4 . Porém, a manufatura de todos essas amostras e suas replicações tomaria um tempo excessivamente longo. Dessa forma, a realização do teste fatorial completo seria inviável.

Para contornar esse problema de demasiado número de testes, foi utilizado um arranjo ortogonal de Taguchi. Mais especificamente o arranjo com 4 fatores e 3 níveis cada, nesta configuração são totalizados 9 experimentos. Utilizando esse arranjo consegue-se bom nível de acurácia nos resultados porém reduzindo muito o custo do experimento. O arranjo ortogonal de Taguchi L9 é mostrado no QUADRO 5.

QUADRO 5 – ARRANJO ORTOGONAL DE TAGUCHI L9

Experimento	Fatores			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

FONTE: O autor (2018).

Rearranjando a matriz de Taguchi, agora aplicando os fatores do experimento, obtém-se o QUADRO 6.

QUADRO 6 – ARRANJO ORTOGONAL DE L9

Experimento	Fatores			
	Altura da Camada	Padrão de preenchimento	Porcentagem de preenchimento	Temperatura da cabeça de impressão
1	0,1mm	Lines	20%	225°C
2	0,1mm	Rectilinear	50%	235°C
3	0,1mm	Honeycomb	100%	245°C
4	0,2mm	Lines	50%	245°C
5	0,2mm	Rectilinear	100%	225°C
6	0,2mm	Honeycomb	20%	235°C
7	0,3mm	Lines	100%	235°C
8	0,3mm	Rectilinear	20%	245°C
9	0,3mm	Honeycomb	50%	225°C

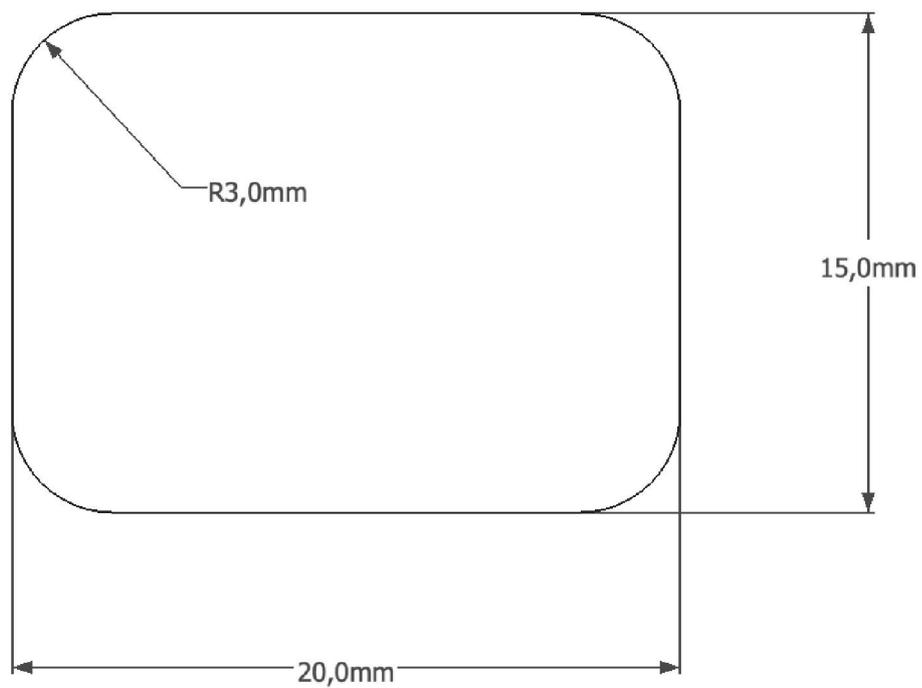
FONTE: O autor (2018).

Além de realizar os experimentos de forma randômica, com a finalidade de reduzir ruídos que poderiam ocorrer durante a produção das peças ou durante os testes, o experimento foi replicado 5 vezes, chegando a um total de 45 amostras. Apesar do gabinete fechado, a temperatura e umidade não são controladas, sendo esses dois fatores de ruído.

Por conta das replicações, também será possível calcular a razão Sinal/Ruído além da análise das médias.

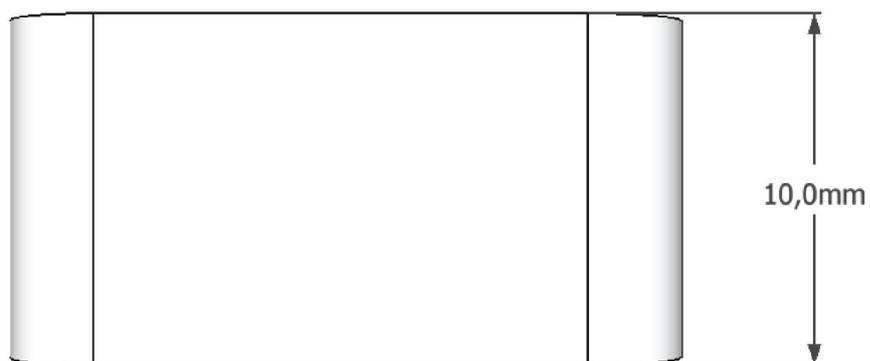
A peça impressa tem o formato de paralelepípedo com as bordas arredondadas para evitar o descolamento da base de impressão. A peça é representada na FIGURAS 20 e 21, e uma perspectiva em 3D na FIGURA 22.

FIGURA 20 – DESENHO DA AMOSTRA, VISTA SUPERIOR



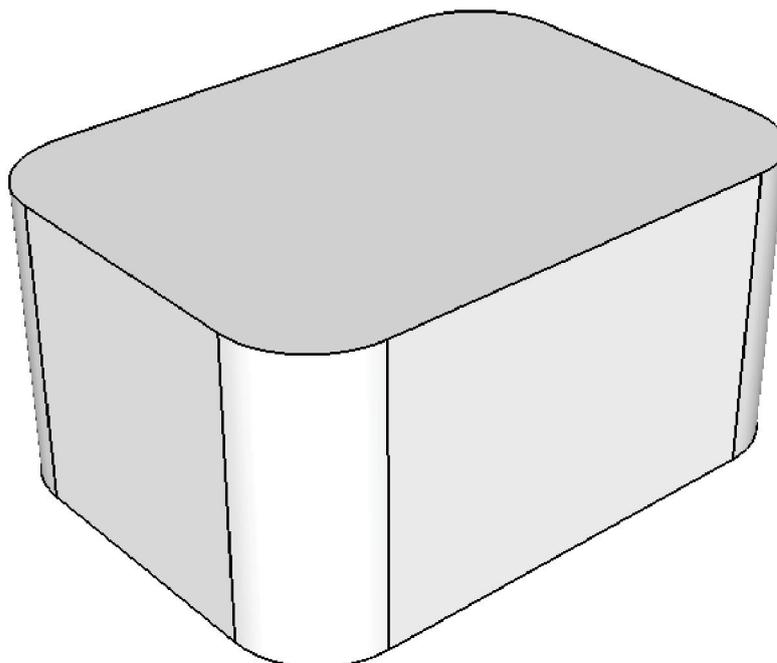
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 21 – DESENHO DA AMOSTRA, VISTA FRONTAL



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 22 – VISTA EM PERSPECTIVA DA AMOSTRA



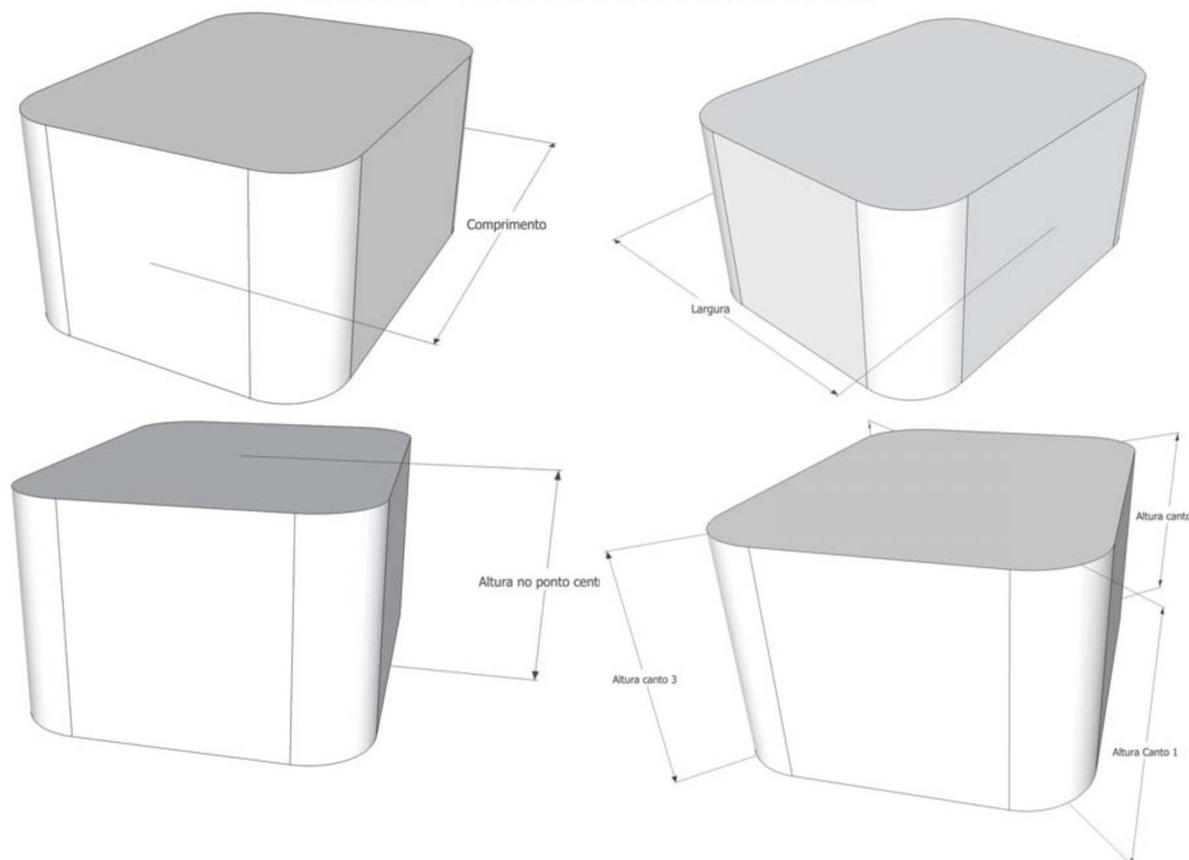
FONTE: O autor (2019).

Em seguida, as amostras foram medidas em 7 pontos com um paquímetro digital do fabricante Mtx. São elas:

- Comprimento;
- Largura;
- Altura no ponto central;
- Altura canto 1;
- Altura canto 2;
- Altura canto 3;
- Altura canto 4.

Uma representação dos pontos das medições são apresentados na FIGURA 23.

FIGURA 23 – PERSPECTIVA 3D DA AMOSTRA



FONTE: O autor (2019).

Os resultados são apresentados no Apêndice 1.

As medições de altura dos cantos foram utilizadas para o cálculo do empenamento médio da peça. Este foi calculado utilizando a Equação 10 e a Equação 11.

$$E_{ij} = A_{mi} - A_{ij} \quad (10)$$

$$E_{mi} = \frac{\sum_{j=1}^4 E_{ij}}{4} \quad (11)$$

Onde:

- E_{ij} = Empenamento do canto j do corpo i
- A_{mi} = Altura do ponto médio do corpo i
- A_{ij} = Altura do canto j do corpo i
- E_{mi} = Empenamento médio do corpo

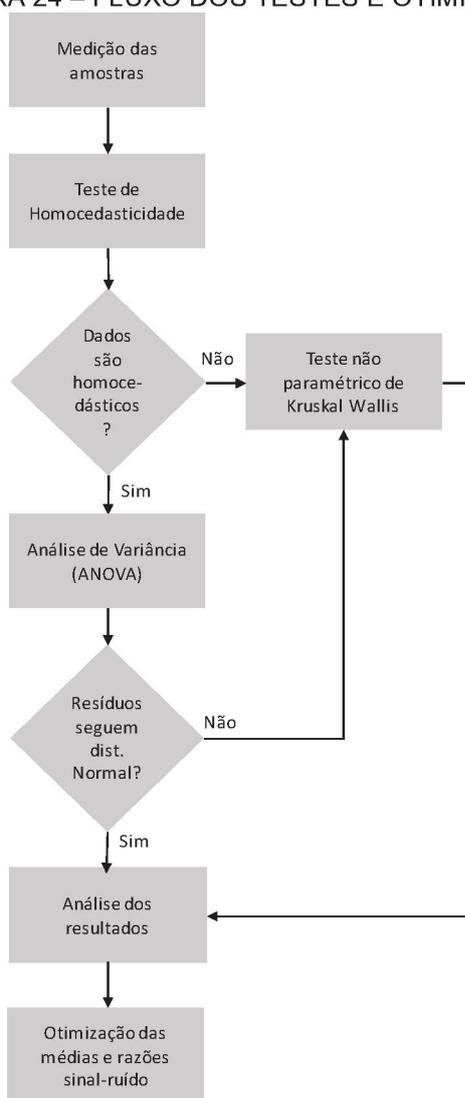
Em seguida, para verificar quais níveis dos fatores tem influência nas respostas (dimensões das peças), foi utilizado a Análise de Variância (ANOVA) quando os dados atendiam seus pressupostos ou teste não paramétrico de Kruskal Wallis quando esses pressupostos não eram atendidos.

Os cálculos de normalidade, homocedasticidade, ANOVA e teste de Kruskal Wallis foram realizados no *software* Minitab.

A seguir, foram calculadas as médias das respostas para cada nível do fator que tem influência e as respectivas razões sinal ruído. Quando a média não atinge o valor alvo (do desenho), foram calculados fatores de correção relativos aos parâmetros, para ser utilizado no projeto da peça, de forma que o valor alvo seja atingido na impressão da peça.

Um fluxograma representando a metodologia dos testes estatísticos é apresentado na FIGURA 24.

FIGURA 24 – FLUXO DOS TESTES E OTIMIZAÇÃO



FONTE: O autor (2019).

4 RESULTADOS

Os resultados serão mostrados em tópicos, relativos a cada dimensão da peça.

4.1 COMPRIMENTO

Primeiramente, foi realizado um teste comparações múltiplas nos dados de comprimento das peças para identificar se eles possuem a mesma variância, ou seja, se são homocedásticos, que é um pressuposto para se realizar a ANOVA. Os resultados deste teste podem ser vistos na FIGURA 24.

FIGURA 25 – TESTE DE HOMOCEDESTICIDADE PARA COMPRIMENTO

Tests		
Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	-	0,193

FONTE: O autor (2019).

Pelo teste de comparações múltiplas, há homocedasticidade nos dados de comprimento, para significância de 0,05, ou seja, pode-se dizer que as variâncias são iguais, permitindo o uso da ANOVA, que foi realizada a seguir.

Os resultados da ANOVA (tabela da ANOVA) são mostrados na FIGURA 26.

FIGURA 26 – ANOVA PARA COMPRIMENTO

Analysis of Variance

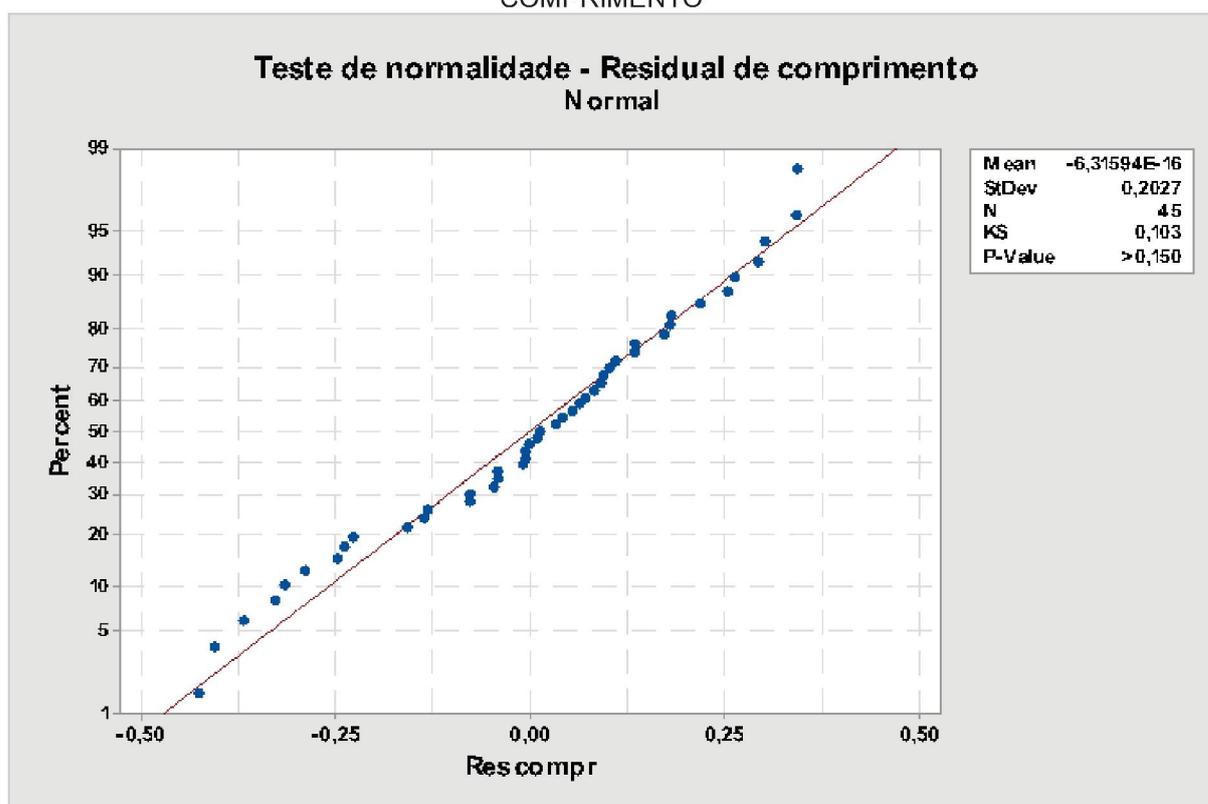
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Altura camada	2	0,13462	0,06731	1,34	0,275
Padrao preenchimento	2	0,09559	0,04780	0,95	0,396
Porc. preenchimento	2	0,19547	0,09774	1,95	0,158
Temperatura extrusao	2	0,74819	0,37410	7,45	0,002
Error	36	1,80856	0,05024		
Total	44	2,98243			

FONTE: O autor (2019).

Para um nível de significância de 0,05, apenas os níveis do fator Temperatura de Extrusão tem diferença na média do comprimento. Isso indica que os fatores altura da camada, padrão de preenchimento e porcentagem de preenchimento não influenciam no comprimento do corpo de provas.

Para verificar se a ANOVA é significativa é necessário testar a normalidade dos resíduos. Para isso, foi realizado o teste de Kolmogorov Smirnov nos resíduos. O resultado do teste de Kolmogorov Smirnov está mostrado na FIGURA 27.

FIGURA 27 – TESTE DE NORMALIDADE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DOS RESÍDUOS DE COMPRIMENTO



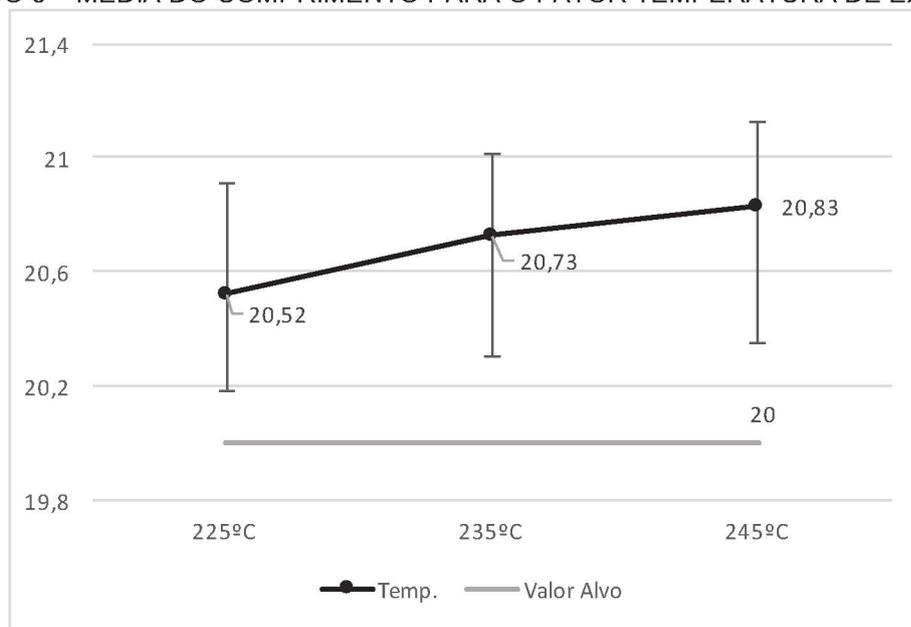
FONTE: O autor (2019).

Com um P-valor maior que o nível de significância de 0,05, tem-se que os resíduos se ajustam a uma distribuição normal. Dessa forma o resultado mostrado pela ANOVA pode ser utilizado para a análise.

Em seguida, foram calculadas as médias e a razão-sinal das amostras. O gráfico de média do fator temperatura de extrusão está mostrado no GRÁFICO 5, sendo estando representado a média no ponto central e os maiores e menores valores encontrados, representados pela barra de erros superior e inferior, respectivamente.

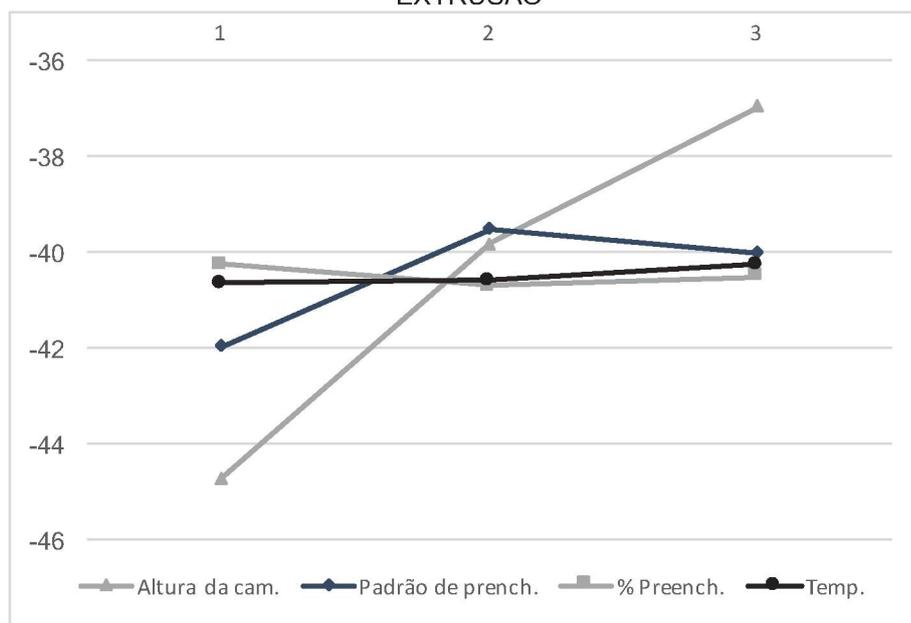
O gráfico da razão sinal-ruído calculada como uma variável do tipo nominal melhor, do mesmo fator é mostrado no GRÁFICO 6.

GRÁFICO 5 – MÉDIA DO COMPRIMENTO PARA O FATOR TEMPERATURA DE EXTRUSÃO



FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 6 – RAZÃO SINAL-RUÍDO DE COMPRIMENTO PARA O FATOR TEMPERATURA DE EXTRUSÃO



FONTE: O autor (2019).

Analisando os gráficos de média e da razão sinal-ruído, percebe-se que a configuração do parâmetro temperatura que mais se aproxima do valor alvo do

comprimento (20mm) e tem a melhor razão (com o valor mais negativo) é a configuração com a menor temperatura de extrusão, de 225°C ou o nível 1 do fator.

4.2 LARGURA

De forma similar, para os dados de largura das amostras, primeiramente foi realizado um teste de comparações múltiplas para verificar a homocedasticidade ou igualdade de variâncias da amostra. O resultado do teste está mostrado na FIGURA 28.

FIGURA 28 – TESTE DE HOMOCEASTICIDADE PARA LARGURA

Tests		
Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	-	0,757

FONTE: O autor (2019).

Como foi comprovada a homocedasticidade da amostra, foi realizado a ANOVA, cuja tabela de resultados é mostrada na FIGURA 29.

FIGURA 29 – ANOVA PARA LARGURA

Analysis of Variance

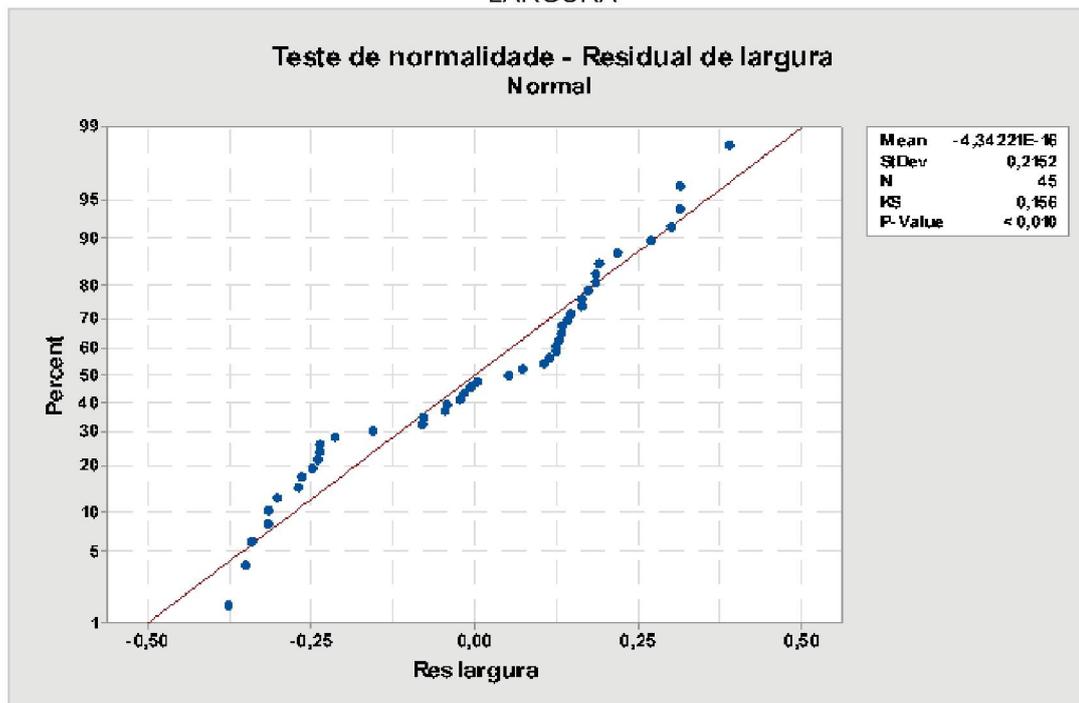
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Altura camada	2	0,2196	0,10982	1,94	0,158
Padrao preenchimento	2	0,1121	0,05606	0,99	0,381
Porc. preenchimento	2	0,1796	0,08982	1,59	0,218
Temperatura extrusao	2	0,9026	0,45128	7,97	0,001
Error	36	2,0374	0,05659		
Total	44	3,4513			

FONTE: O autor (2019).

Observa-se que pela ANOVA apenas os níveis do fator temperatura de extrusão apresenta diferença nas média de largura.

Em seguida, foi realizado o teste de Kolmogorov Smirnov para verificar normalidade dos resíduos e verificar se os resultados da ANOVA são significativos e podem ser usados para conclusões. Os resultados do teste estão representados na FIGURA 30.

FIGURA 30 – TESTE DE NORMALIDADE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DOS RESÍDUOS DE LARGURA



FONTE: O autor (2019).

Com um p-valor inferior ao nível de significância 0,05, não há normalidade dos resíduos. Dessa forma, deve ser utilizado um teste não paramétrico para verificar se há influência dos níveis dos fatores na média da largura.

Para isso, foi realizado o teste não paramétrico de Kruskal Wallis. Os resultados do teste são mostrados na FIGURA 31.

FIGURA 31 – TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE KRUSKALL WALLIS PARA LARGURA

Kruskal-Wallis Test on Largura

Altura camada	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	15,76	25,2	0,81
2	15	15,74	19,9	-1,12
3	15	15,82	23,9	0,31
Overall	45		23,0	

H = 1,33 DF = 2 P = 0,513
H = 1,34 DF = 2 P = 0,513 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Largura

Padrao preenchimento	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	15,77	20,6	-0,85
2	15	15,70	23,1	0,04
3	15	15,87	25,3	0,82
Overall	45		23,0	

H = 0,93 DF = 2 P = 0,627
H = 0,94 DF = 2 P = 0,626 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Largura

Porc. preenchimento	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	15,66	19,8	-1,17
2	15	15,85	23,5	0,18
3	15	15,80	25,7	0,99
Overall	45		23,0	

H = 1,58 DF = 2 P = 0,454
H = 1,58 DF = 2 P = 0,453 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Largura

Temperatura extrusao	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	15,57	13,6	-3,41
2	15	15,82	26,7	1,32
3	15	15,90	28,8	2,08
Overall	45		23,0	

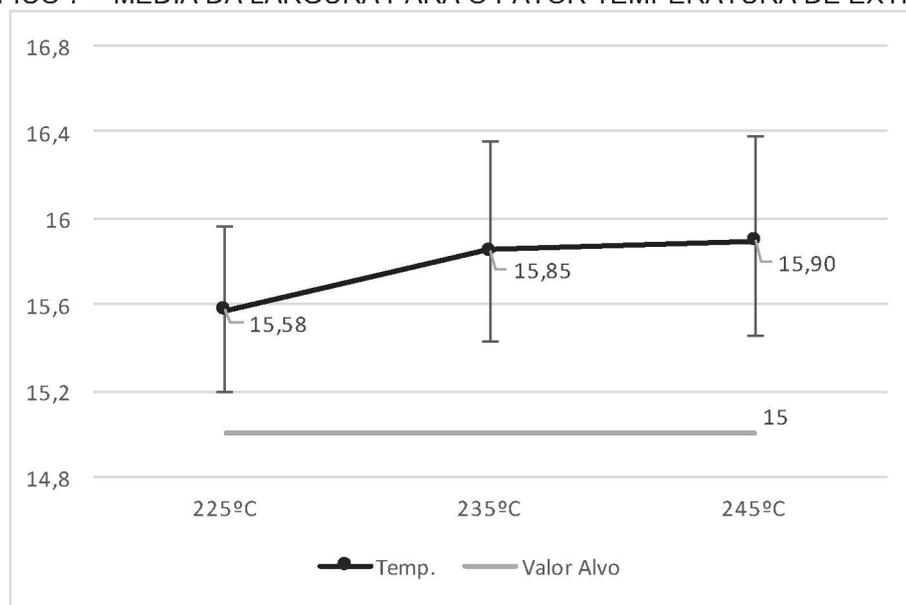
H = 11,80 DF = 2 P = 0,003
H = 11,81 DF = 2 P = 0,003 (adjusted for ties)

FONTE: O autor (2019).

Com este teste, de forma semelhante a apresentada pela ANOVA, observa-se que apenas os níveis do fator Temperatura de extrusão possuem influência na média de largura, com um p-valor inferior a um nível de significância de 0,05.

Dessa forma, as médias de largura em relação aos níveis do fator temperatura de extrusão foram plotadas em um gráfico e são apresentadas no GRÁFICO 7, bem como os valores máximos e mínimos obtidos em cada nível está representado pelas barras superiores e inferiores aos pontos médios.

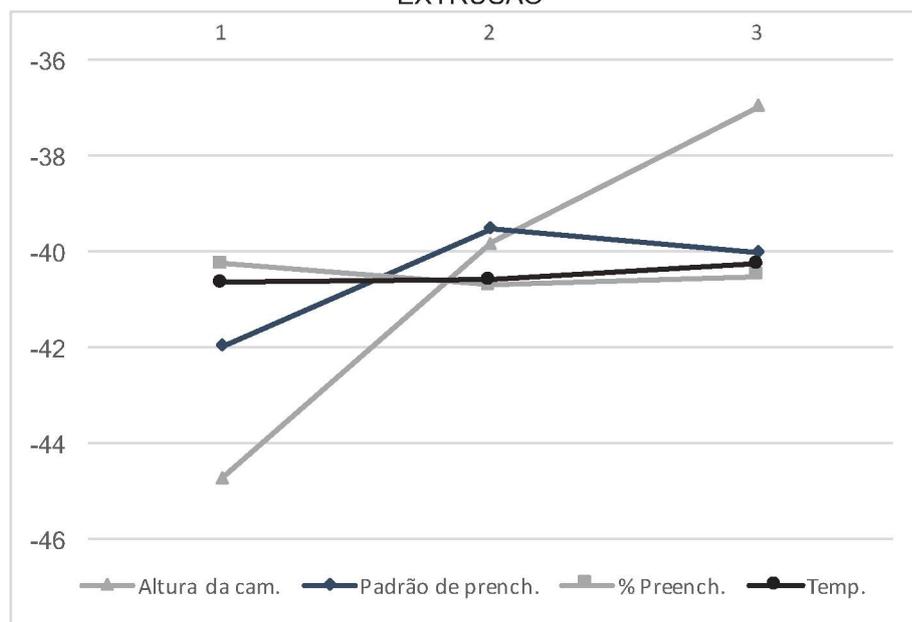
GRÁFICO 7 – MÉDIA DA LARGURA PARA O FATOR TEMPERATURA DE EXTRUSÃO



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 8 são mostradas as razões sinal-ruído calculadas como nominal melhor das amostras de largura para o mesmo fator.

GRÁFICO 8 – RAZÃO SINAL-RUÍDO DE LARGURA PARA O FATOR TEMPERATURA DE EXTRUSÃO



FONTE: O autor (2019).

Com esses dados, é possível concluir que a temperatura de extrusão que faz a média se aproximar do alvo (15mm) e ainda assim possui uma boa razão sinal-ruído,

sendo quase a melhor encontrada, é o nível 1 do fator, ou 225°C de temperatura de extrusão.

4.3 ALTURA

Com os dados de altura, iniciou-se realizando um teste de homocedasticidade para definir se é possível a realização da ANOVA.

Os resultados do teste de homocedasticidade para um nível de significância de 0,05 são apresentados na FIGURA 32.

FIGURA 32 – TESTE DE HOMOCEASTICIDADE PARA ALTURA

Tests

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	–	0,043

FONTE: O autor (2019).

Pelo teste de comparações múltiplas com um nível de significância de 0,05, rejeita-se H_0 , a hipótese que as variâncias são iguais. Por isso, será utilizada novamente o teste não paramétrico de Kruskal Wallis para verificar quais níveis dos fatores influenciam na média.

A FIGURA 33 mostra os resultados do teste não paramétrico de Kruskal Wallis para os dados de altura das amostras.

FIGURA 33 – TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE KRUSKALL WALLIS PARA ALTURA

Kruskal-Wallis Test on Altura

Altura

camada	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	10,34	25,2	0,79
2	15	10,09	16,6	-2,32
3	15	10,32	27,2	1,53
Overall	45		23,0	

H = 5,58 DF = 2 P = 0,061

H = 5,58 DF = 2 P = 0,061 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Altura

Padrao

preenchimento	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	10,15	23,1	0,04
2	15	10,25	22,6	-0,13
3	15	10,29	23,3	0,10
Overall	45		23,0	

H = 0,02 DF = 2 P = 0,991

H = 0,02 DF = 2 P = 0,991 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Altura

Temperatura

extrusao	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	10,03	15,2	-2,82
2	15	10,34	26,5	1,25
3	15	10,24	27,3	1,57
Overall	45		23,0	

H = 7,97 DF = 2 P = 0,019

H = 7,97 DF = 2 P = 0,019 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Altura

Porc.

preenchimento	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	10,01	14,8	-2,96
2	15	10,15	21,2	-0,65
3	15	10,73	33,0	3,61
Overall	45		23,0	

H = 14,82 DF = 2 P = 0,001

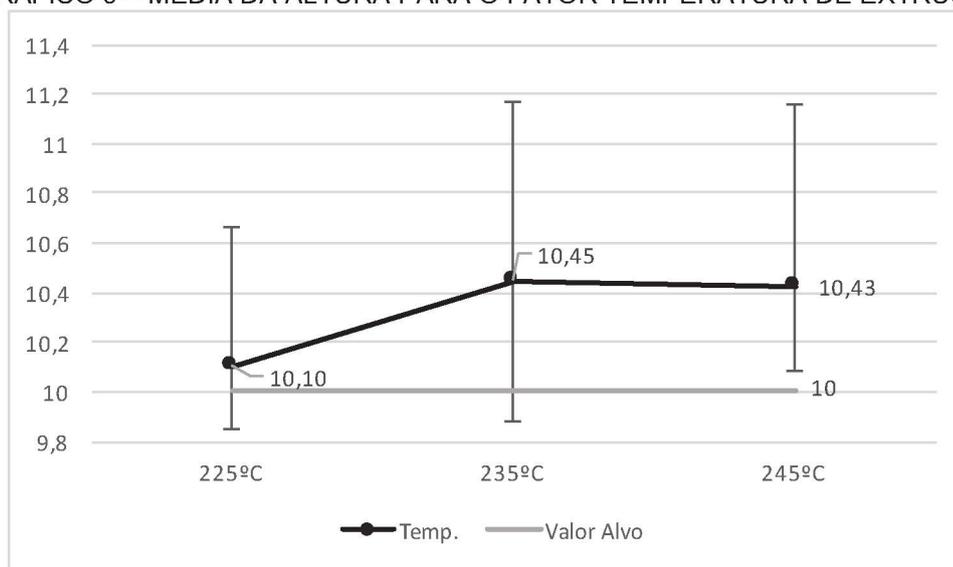
H = 14,83 DF = 2 P = 0,001 (adjusted for ties)

FONTE: O autor (2019).

Após o teste, é possível dizer que os níveis dos fatores temperatura de extrusão e porcentagem do preenchimento possuem diferença na média.

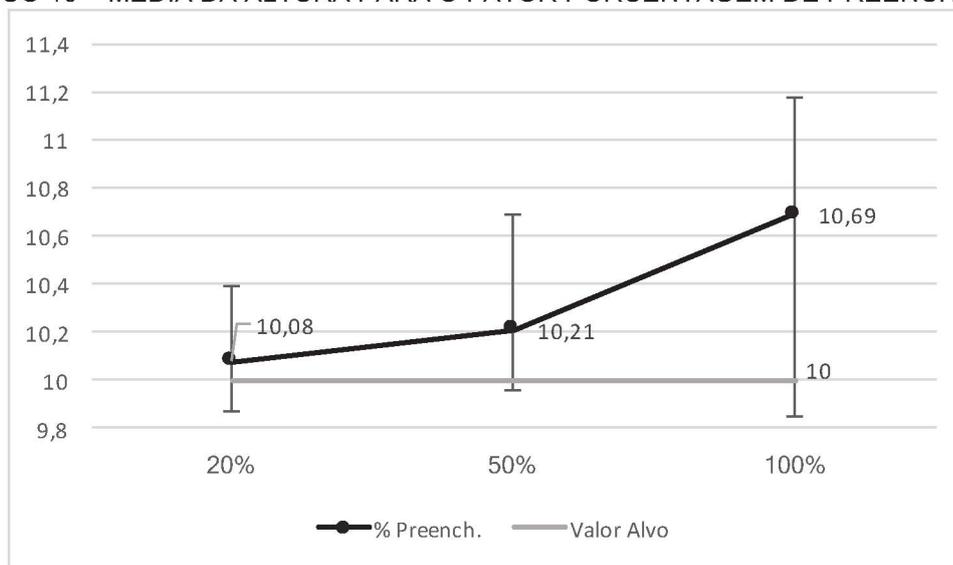
No GRÁFICO 9 é mostrada a plotagem das médias em relação aos níveis dos fatores temperatura de extrusão e porcentagem de preenchimento.

GRÁFICO 9 – MÉDIA DA ALTURA PARA O FATOR TEMPERATURA DE EXTRUSÃO



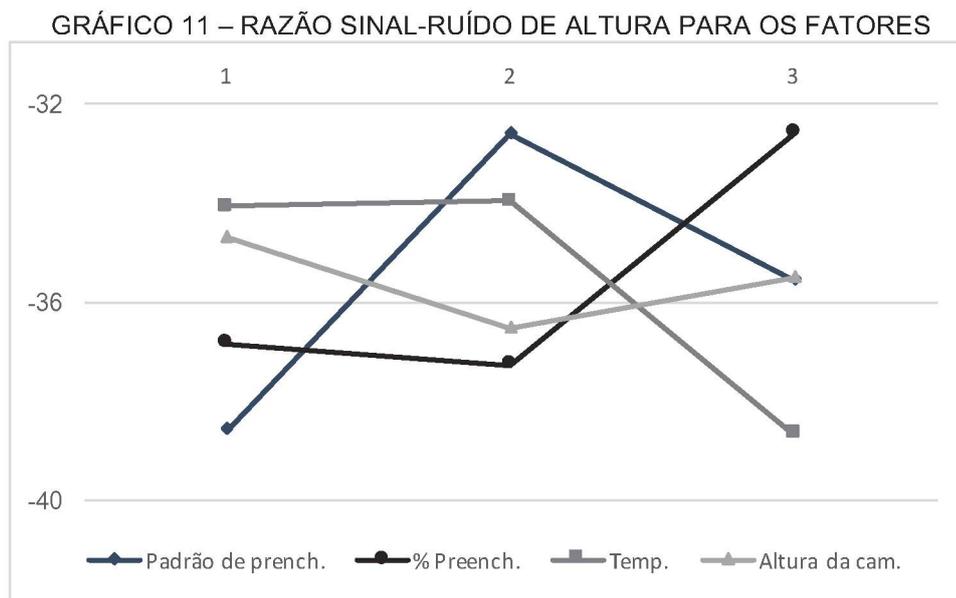
FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 10 – MÉDIA DA ALTURA PARA O FATOR PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO



FONTE: O autor (2019).

De forma análoga, no GRÁFICO 10 são mostradas as razões sinal-ruído relativos aos mesmos níveis dos fatores, calculada como variável do tipo nominal melhor.



Analisando os GRÁFICOS 9 e 10, os fatores que trazem as médias de altura mais próximas do valor alvo de 10mm são os níveis 1 dos fatores porcentagem de preenchimento e temperatura de extrusão, 20% e 225°C respectivamente.

Para a razão sinal-ruído, o nível 1 (20%) da porcentagem de preenchimento apresenta valor próximo da melhor possível com os níveis desse fator. Já para o fator temperatura de extrusão, o nível 1 (225°C) que obtém a média mais próxima do valor alvo tem uma razão sinal-ruído pior se comparado ao nível 3 (245°C).

4.4 FATORES MULTIPLICADORES DE CORREÇÃO DIMENSIONAL

Como apresentado anteriormente, mesmo com a alteração dos fatores para atingir o valor mais próximo do alvo, as dimensões das amostras ainda assim não o atingem.

Por isso, foram criados fatores de correção que devem ser utilizados no projeto da peça, multiplicando-se as dimensões alvos, para que a peça finalizada possua as dimensões corretas.

Esses fatores de correção são aplicados baseados nos níveis dos fatores e foram calculados com base na média apresentada pelas dimensões dos corpos de provas.

Nas TABELAS de 1 a 3 estão mostrados esses fatores em relação ao comprimento, largura e altura da peça, respectivamente.

TABELA 1 – FATORES DE CORREÇÃO PARA O COMPRIMENTO

Nível	Altura da camada	Padrão de preenchimento	Porcentagem de preenchimento	Temperatura de extrusão
1	0,964	0,969	0,970	0,975
2	0,970	0,966	0,967	0,965
3	0,966	0,964	0,963	0,960

FONTE: O autor (2019).

TABELA 2 – FATORES DE CORREÇÃO PARA A LARGURA

Nível	Altura da camada	Padrão de preenchimento	Porcentagem de preenchimento	Temperatura de extrusão
1	0,945	0,955	0,956	0,963
2	0,956	0,951	0,950	0,946
3	0,952	0,947	0,947	0,944

FONTE: O autor (2019).

TABELA 3 – FATORES DE CORREÇÃO PARA A ALTURA

Nível	Altura da camada	Padrão de preenchimento	Porcentagem de preenchimento	Temperatura de extrusão
1	0,959	0,965	0,992	0,990
2	0,988	0,975	0,979	0,957
3	0,959	0,965	0,935	9,959

FONTE: O autor (2019).

4.5 EMPENAMENTO MÉDIO

Similarmente às outras dimensões, é possível minimizar o empenamento médio que ocorre durante a impressão das amostras.

Com os dados calculados do empenamento médio de cada peça, primeiramente é necessário realizar o teste de homocedasticidade, cujo resultado está representado na FIGURA 34.

FIGURA 34 – TESTE DE HOMOCEASTICIDADE PARA EMPENAMENTO MÉDIO

Tests

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	—	0,012

FONTE: O autor (2019).

Pela não homocedasticidade comprovada pelo teste de comparações múltiplas com um nível de significância de 0,05, foi utilizado novamente o teste não paramétrico de Kruskal Wallis para verificar quais níveis de fator tem influência na média.

Na FIGURA 35 são mostrados os resultados do teste não paramétrico de Kruskal Wallis.

FIGURA 35 – TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE KRUSKALL WALLIS PARA EMPENAMENTO MÉDIO

Kruskal-Wallis Test on Empenamento médio

Altura

camada	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	0,19900	31,3	2,99
2	15	0,06650	17,5	-2,00
3	15	0,08000	20,3	-0,99
Overall	45		23,0	

H = 9,25 DF = 2 P = 0,010

H = 9,26 DF = 2 P = 0,010 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Empenamento médio

Padrao

preenchimento	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	0,08300	19,6	-1,22
2	15	0,10000	25,7	0,96
3	15	0,09350	23,7	0,25
Overall	45		23,0	

H = 1,65 DF = 2 P = 0,439

H = 1,65 DF = 2 P = 0,439 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Empenamento médio

Porc.

preenchimento	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	0,03150	17,0	-2,18
2	15	0,08000	22,5	-0,18
3	15	0,11000	29,5	2,36
Overall	45		23,0	

H = 6,90 DF = 2 P = 0,032

H = 6,90 DF = 2 P = 0,032 (adjusted for ties)

Kruskal-Wallis Test on Empenamento médio

Temperatura

extrusao	N	Median	Ave Rank	Z
1	15	0,07200	17,6	-1,94
2	15	0,10900	25,7	0,96
3	15	0,07550	25,7	0,98
Overall	45		23,0	

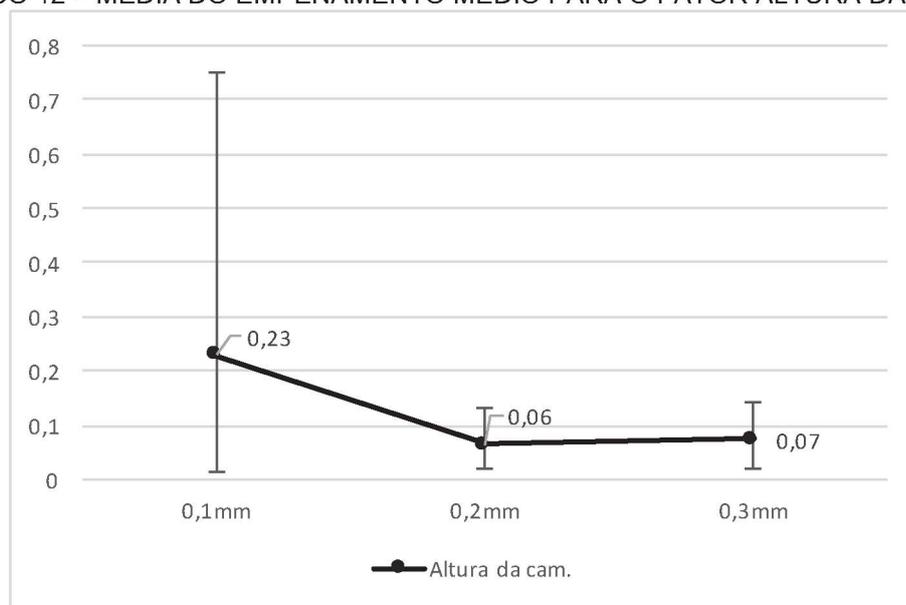
H = 3,76 DF = 2 P = 0,153

H = 3,76 DF = 2 P = 0,153 (adjusted for ties)

FONTE: O autor (2019).

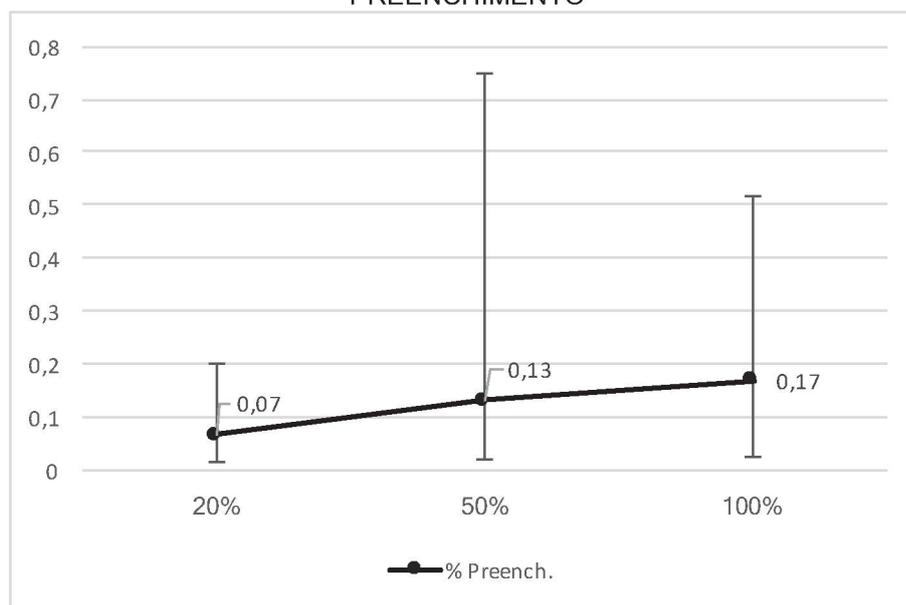
Os resultados do teste de Kruskal Wallis mostram que os níveis dos fatores altura da camada e porcentagem de preenchimento possuem diferenças na média do empenamento da peça. Essas diferenças são mostradas no GRÁFICO 11.

GRÁFICO 12 – MÉDIA DO EMPENAMENTO MÉDIO PARA O FATOR ALTURA DA CAMADA



FONTE: O autor (2019).

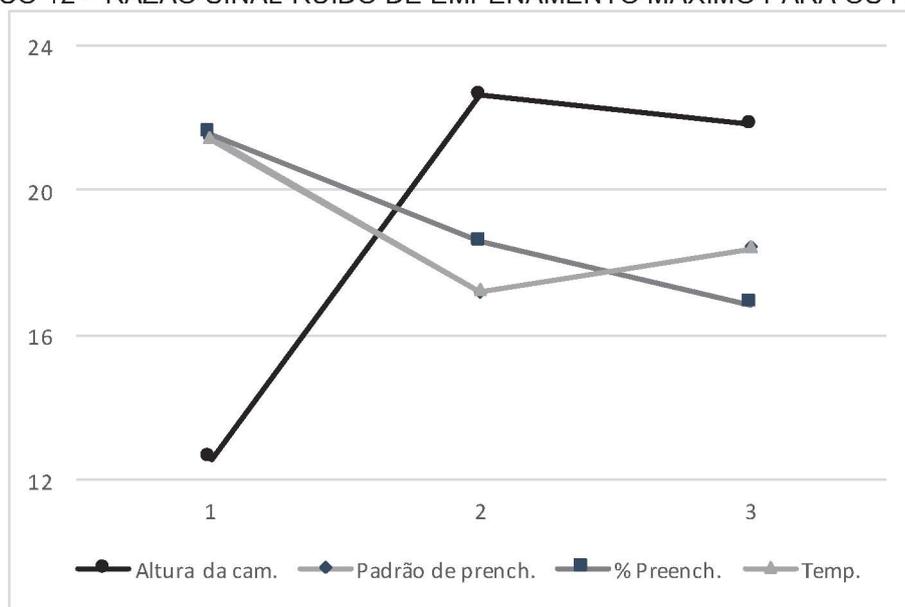
GRÁFICO 13 – MÉDIA DO EMPENAMENTO MÉDIO PARA O FATOR PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO



FONTE: O autor (2019).

Analogamente, as razões sinal-ruído são mostradas no GRÁFICO 12. Porém, dessa vez foram calculadas como do tipo menor melhor.

GRÁFICO 12 – RAZÃO SINAL-RUÍDO DE EMPENAMENTO MÁXIMO PARA OS FATORES



FONTE: O autor (2019).

Observando os gráficos plotados com os dados, é possível afirmar que a altura da camada no nível 2 (0,2mm) e a porcentagem de preenchimento no nível 1 (20%) trazem um menor empenamento médio. Porém a razão sinal-ruído não é a melhor nesses níveis.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O experimento realizado mostrou que os fatores de impressão da manufatura aditiva, mais especificamente do FDM, influenciam tanto na qualidade quanto na precisão dimensional do corpo produzido pela tecnologia.

Porém, em um estudo exploratório da otimização dos parâmetros de impressão, não foi possível chegar ao valor alvo para o comprimento e largura das amostras. Dessa forma a criação de fatores de correção para serem utilizados no projeto da peça ajudam a alcançar as dimensões desejadas após a impressão do corpo.

Além disso, é possível minimizar o empenamento médio dos corpos de prova, alterando os fatores de impressão. Para isso, os melhores parâmetros que minimizam esse efeito são altura da camada em 0,2mm e 20% de preenchimento. Já os fatores que trazem o maior empenamento são altura da camada em 0,1mm e 100% de preenchimento.

Quando analisadas todas as respostas dimensionais em conjunto, é possível perceber que existe uma configuração de impressão que consegue otimizar a maior parte das respostas.

O fator temperatura de extrusão no nível 1, a 225°C, traz o valor mais próximo do alvo tanto para comprimento, largura e altura. E esse mesmo nível traz uma boa razão sinal ruído para o comprimento e para a largura da amostra. Porém, é necessário levar em consideração que apesar de aproximar do valor alvo das dimensões de comprimento e largura, ainda assim não é possível chegar próximo a ele.

Em seguida, o fator porcentagem de preenchimento no nível 1 (20% de preenchimento) alcança o menor empenamento da amostra, a altura mais próxima do valor alvo e também as melhores razões sinais-ruído para ambas as respostas. Por isso essa é a configuração ideal de porcentagem de preenchimento.

Já a altura da camada tem influência apenas no empenamento médio do corpo. Dessa forma, a configuração que traz a menor razão sinal-ruído e o menor empenamento é o nível 2 do fator, ou seja, as camadas devem possuir 0,2mm de altura.

Considerando todos os fatores e respostas em conjunto, uma configuração ideal para a precisão dimensional é mostrada no QUADRO 7.

QUADRO 7 – CONFIGURAÇÃO IDEAL DE FATORES DE IMPRESSÃO

Fator	Nível	Descrição
1 – Altura da Camada	2	0,2mm
2 – Padrão de preenchimento	1,2 ou 3	Indiferente
3 – % de preenchimento	1	20%
4 – Temperatura de extrusão	1	225°C

FONTE: O autor (2019).

Considerando os dados obtidos em revisão bibliográfica de resistência à tração, é preciso obter um *trade-off* entre precisão dimensional e resistência. Menores alturas da camada, maiores temperaturas e preenchimento total trazem maior resistência a tração. Quando o preenchimento não é completo, o padrão *honeycomb* traz a maior resistência.

Um *trade-off* plausível que sacrifica precisão dimensional para ganhar resistência a tração é mostrado no QUADRO 8.

QUADRO 7 – CONFIGURAÇÃO IDEAL CONSIDERANDO RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

Fator	Nível	Descrição
1 – Altura da Camada	2	0,2mm
2 – Padrão de preenchimento	3	Honeycomb
3 – % de preenchimento	2	50%
4 – Temperatura de extrusão	2	235°C

FONTE: O autor (2019).

Como sugestão para próximos estudos estão a utilização de outros tipos de arranjos ortogonais ou até mesmo um fatorial completo, para que seja possível analisar também a interação entre os fatores. E também a validação dos fatores de correção criados nesse trabalho.

Além disso, a análise conjunta das respostas dimensionais, com o tempo de impressão, o consumo de material, o consumo de energia elétrica e a resistência à

tração de corpos produzidos com esses parâmetros também são ótimos projetos futuros.

Isso permitirá minimizar o custo de impressão, com boa precisão dimensional e resistência mecânica do objeto.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, A. C.; TANDON, G. P.; BRADFORD, R. L.; KOERNER, H.; BAUR, J. W. Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication. **Additive Manufacturing**, v. 19, p. 29–38, 2018.

AHAD, N. A.; YIN, T. S.; OTHMAN, A. R.; YAACOB, C. R. Sensitivity of normality tests to non-normal data. **Sains Malaysiana**, 2011.

ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*. **Anais...** . v. 118, p.385–388, 2001.

ATTARAN, M. Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics. **Journal of Service Science and Management**, v. 10, n. 03, p. 189–206, 2017.

CONNER, B. P.; MANOGHARAN, G. P.; MARTOF, A. N.; et al. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. **Additive Manufacturing**, v. 1, p. 64–76, 2014.

DONCASTER, C. P.; DAVEY, A. J. H. **Analysis of variance and covariance: How to choose and construct models for the life sciences**. 2007.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2014.

EBEL, B.; SINNEMANN, T. Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties. **RTejournal**, 2014.

ES-SAID, O. S.; FOYOS, J.; NOORANI, R.; et al. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 15, n. 1, p. 107–122, 2000.

FEIR-WALSH, B. J. **Assumptions Homogeneity Pendence**. , p. 789–799, 1974.

FERNANDEZ-VICENTE, M.; CALLE, W.; FERRANDIZ, S.; CONEJERO, A. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. **3D Printing and Additive Manufacturing**, 2016.

GARDAN, J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. **International Journal of Production Research**, v. 7543, n. August, p. 1–15, 2015.

GIBSON, I.; ASTM INTERNATIONAL. **F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**. 2013.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing**. 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 2002.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 2008.

GIRDEN, E. R. ANOVA: Repeated Measures. In: A. Viriding (Org.); . p.1–6, 1992. Newbury Park: Sage University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences.

GRIFFITH, M. L.; HALLORAN, J. W. Freeform Fabrication of Ceramics via Stereolithography.pdf. **Journal of the American Ceramic Society**, 1996.

GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. **Frontiers of Mechanical Engineering**, 2013.

HALLORAN, J. W.; TOMECKOVA, V.; GENTRY, S.; et al. Photopolymerization of powder suspensions for shaping ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, n. 14, p. 2613–2619, 2011.

HARNAD, S. Post-Gutenberg Galaxy: The Fourth Revolution in the Means of Production of Knowledge. .

IBRAHIM, D.; BROILO, T. L.; HEITZ, C.; et al. Dimensional error of selective laser sintering, three-dimensional printing and PolyJet™ models in the reproduction of mandibular anatomy. **Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery**, v. 37, n. 3, p. 167–173, 2009.

IZDEBSKA, J.; THOMAS, S. **Printing on Polymers**. 2016.

JAIR, M. M.; MARQUES, M. A. M. **Estatística básica para os cursos de engenharia**. Curitiba: Domínio, 2009.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. **Journal of the American Statistical Association**, 1952.

KUMAR, S.; SCHOLAR, K.; ACME, P.; SAHAI, R.; KARNA, S. K. An Overview on Taguchi Method. **International Journal of Engineering and Mathematical Sciences**, v. 1, n. June, p. 1–7, 2012.

LAND, S. K.; SMITH, D. B.; WALZ, J. W. **Practical Support for Lean Six Sigma Software Process Definition: Using IEEE Software Engineering Standards with CD**. 2012.

MCKIGHT, P. E.; NAJAB, J. Kruskal-Wallis Test. **The Corsini Encyclopedia of Psychology**, , n. 1, p. 2009, 2010.

N. TURNER, B.; STRONG, R.; A. GOLD, S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014.

PHADKE, M. **Quality Engineering Using Robust Design (1989, Prentice Hall).pdf**. 1º ed. New Jersey: AT&T Bell Laboratories, 1989.

POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; et al. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 35, n. 2, p. 26–40, 2015.

ROSS, S. M. Chapter 11 – GOODNESS OF FIT TESTS AND CATEGORICAL DATA ANALYSIS. **Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists**, 2009.

SCHENK, M.; WIRTH, S.; MULLER, E. **Factory Planning Manual - Situation-Driven Production Facility Planning**. 2010.

SCHUBERT, C.; VAN LANGEVELD, M. C.; DONOSO, L. A. Innovations in 3D printing: A 3D overview from optics to organs. **British Journal of Ophthalmology**, v. 98, n. 2, p. 159–161, 2014.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591–611, 1965.

SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. **Laboratório de Ensino a Distância da UFSC**, p. 138p, 2001.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Materials and Design**, v. 31, n. 1, p. 287–295, 2010.

STREINER, D. Nonparametric Statistical Tests. **The Corsini encyclopedia of psychology**, , n. 1, 2010.

SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; TAGUCHI, C. **Robust Engineering**. 1^o ed. New York: McGraw Hill, 2000.

TAGUCHI, G.; PHADKE, M. S. Quality Engineering through Design Optimization. **Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method**, 1989.

TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. **Materials and Design**, v. 58, p. 242–246, 2014.

WAH, N.; RAZALI, M.; BEE, Y. Power comparisons of Shapiro-Wilk , Kolmogorov-Smirnov , Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21–33, 2011.

WOJTYŁA, S.; KLAMA, P.; BARAN, T. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 14, n. 6, p. D80–D85, 2017.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A Review of Additive Manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, v. 2012, p. 1–10, 2012. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>>. .

APÊNDICE 1 – MEDIÇÕES REALIZADAS EM MM

REPLICAÇÃO	RUN	COMPR	LARGURA	ALTURA	ALT. CANTO 1	ALT. CANTO 2	ALT. CANTO 3	ALT. CANTO 4
1	1	20,4	15,44	10,21	9,87	9,88	9,9	9,55
1	2	20,75	16,27	10,69	10,37	10,13	10,37	10,19
1	3	20,8	15,87	11,16	10,68	10,28	10,49	10,25
1	4	20,4	15,46	10,24	9,96	9,91	9,96	9,98
1	5	20,47	15,52	10,46	9,65	9,26	9,63	9,6
1	6	20,3	15,43	10,29	9,99	9,77	9,92	9,81
1	7	20,35	15,54	10,7	9,72	9,72	9,74	9,82
1	8	20,35	15,59	10,36	10,13	10,02	10,21	10,04
1	9	20,41	15,41	10,32	9,89	9,78	10,15	9,9
2	1	20,31	15,27	10	9,8	9,81	9,77	9,83
2	2	20,79	15,63	10,34	9,88	9,84	9,82	10,1
2	3	21,13	16,24	10,91	10,68	10,8	10,15	11
2	4	20,68	15,77	10,13	9,77	9,71	9,76	9,75
2	5	20,18	15,19	9,85	9,75	9,72	9,77	9,71
2	6	20,55	15,73	10,01	9,77	9,75	9,76	9,74
2	7	20,75	15,8	10,73	9,87	9,85	9,89	9,72
2	8	20,46	15,54	10,39	10,06	10,13	10,11	10,11
2	9	20,32	15,41	10,29	9,85	9,86	9,82	9,84
3	1	20,58	15,66	9,92	9,74	9,74	9,71	9,79
3	2	20,75	15,89	10,25	9,96	9,83	9,83	9,75
3	3	21,04	16,3	11,02	9,9	10,17	9,97	10,36
3	4	20,7	15,85	10,09	9,75	9,75	9,75	9,79
3	5	20,72	15,74	10,66	9,84	9,91	9,8	9,83
3	6	20,67	15,75	10,01	9,76	9,73	9,73	9,75
3	7	20,85	15,82	11,13	9,83	9,85	9,83	9,89
3	8	20,91	15,91	10,11	9,84	9,81	9,84	9,88
3	9	20,87	15,96	10,03	9,83	9,84	9,87	9,83
4	1	20,44	15,57	9,93	10,01	9,88	9,74	9,76
4	2	21,01	16,36	10,54	10,85	10,04	9,76	10,31
4	3	21,06	16,38	10,62	10,66	10,24	9,82	10,2
4	4	20,8	15,9	10,15	9,85	9,69	9,71	9,73
4	5	20,73	15,7	9,86	9,66	9,71	9,84	9,73
4	6	20,92	15,91	9,88	9,69	9,8	9,82	9,73
4	7	20,82	15,99	11,17	9,87	9,91	9,84	9,96
4	8	21,04	15,99	10,1	9,97	9,81	9,76	9,85
4	9	20,33	15,49	9,96	9,88	9,84	9,77	9,75
5	1	20,5	15,65	9,87	9,79	9,79	9,75	9,78
5	2	20,66	15,7	10	10,16	9,87	9,82	9,76
5	3	21,11	15,76	10,91	10,29	10,14	9,78	9,82

REPLICAÇÃO	RUN	COMPR	LARGURA	ALTURA	ALT CANTO 1	ALT CANTO 2	ALT CANTO 3	ALT CANTO 4
5	4	20,87	15,9	10,09	9,78	9,83	9,8	9,88
5	5	20,64	15,68	10,17	9,88	9,79	9,71	9,83
5	6	20,7	15,91	9,95	9,75	9,72	9,73	9,75
5	7	21,01	16,06	11	9,83	9,88	9,9	9,89
5	8	21,12	15,99	10,12	9,87	9,83	9,85	9,89
5	9	20,91	15,96	10,03	9,83	9,85	9,84	9,83

APÊNDICE 2 – QUALIDADE DE IMPRESSÃO

Além dos fatores qualitativos de dimensões e empenamento, é possível notar também que certos fatores influenciam negativamente ou positivamente na qualidade da impressão. No experimento algumas amostras acabaram com uma alta rugosidade na superfície e formas deformadas.

A má qualidade foi observada em amostras que foram produzidas utilizando alturas das camadas baixas (0,1mm).

As FIGURAS 33 e 34 mostram uma amostra que foi impressa utilizando o parâmetro altura da camada de 0,1mm.

FIGURA 33 – RUN 3 REPLICAÇÃO 4, ALTURA DA CAMADA: 0,1MM, PADRÃO DE PREENCHIMENTO: HONEYCOMB, PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO: 100%, TEMPERATURA DE EXTRUSÃO: 245°C – VISTA FRONTAL



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 34 – RUN 3 REPLICAÇÃO 4, ALTURA DA CAMADA: 0,1MM, PADRÃO DE PREENCHIMENTO: HONEYCOMB, PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO: 100%, TEMPERATURA DE EXTRUSÃO: 245°C – VISTA LATERAL



FONTE: O autor (2019).

Em comparação, as FIGURAS 35 e 36 mostram amostras com qualidade maior.

FIGURA 35 – RUN 5 REPLICAÇÃO 5, ALTURA DA CAMADA: 0,2MM, PADRÃO DE PREENCHIMENTO: RECTILINEAR, PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO: 100%, TEMPERATURA DE EXTRUSÃO: 235°C – VISTA FRONTAL



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 36 – RUN 5 REPLICAÇÃO 5, ALTURA DA CAMADA: 0,2MM, PADRÃO DE PREENCHIMENTO: RECTILINEAR, PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO: 100%, TEMPERATURA DE EXTRUSÃO: 235°C – VISTA LATERAL



FONTE: O autor (2019).

A qualidade percebida da peça é refletida diretamente no estudo das dimensões e razão sinal-ruído delas.