



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

PATRIC DE HOLANDA NOGUEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM SOBRE O
ACABAMENTO SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVAS IMPRESSOS
COM FILAMENTO ABS.**

RUSSAS

2022

PATRIC DE HOLANDA NOGUEIRA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM SOBRE
O ACABAMENTO SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVAS IMPRESSOS
COM FILAMENTO ABS.

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

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães
Pinheiro.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N714a Nogueira, Patric de Holanda.
Análise da influência dos parâmetros de usinagem sobre o acabamento superficial dos corpos de provas impressos com filamento ABS. / Patric de Holanda Nogueira. – 2022.
96 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro. .
1. manufatura aditiva. 2. usinagem. 3. parâmetros de impressão . 4. parâmetros de usinagem. 5. acabamento superficial. I. Título.

CDD 620.1

PATRIC DE HOLANDA NOGUEIRA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM SOBRE
O ACABAMENTO SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVAS IMPRESSOS
COM FILAMENTO ABS.

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

Aprovada em: 06/07/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo

Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me proteger em tempos difíceis, principalmente nos que estamos enfrentando e por ter me dado forças para superar todas as adversidades encontradas na vida ao longo dos últimos anos.

Agradeço também aos meus pais, Rosimeire e Julcimar, por todo o amor, carinho, empenho e esforço para que esse sonho se tornasse realidade.

A minha irmã, Pâmela por todo o carinho e compreensão das dificuldades da vida acadêmica.

A minha vó materna, Aldenia, por todo amor, carinho, fé, dedicação e empenho dos últimos anos para que esse sonho tornasse realidade.

Aos meus avós paternos, João Nogueira e Dorinha, por todo amor, incentivo e torcida dos últimos anos.

A minha madrinha, Tânia, pelo apoio, carinho e suporte ao longo dos anos.

A toda minha família, que fazem parte da minha vida e me incentivaram e me deram apoio para que este sonho fosse alcançado.

Ao meu orientado, Dr. Pedro Helton, pela amizade, além de todo o suporte, conselhos e pela disponibilidade para a elaboração desse trabalho.

Agradeço também meus amigos, Guilherme, Luan e James, que estiveram presentes comigo durante a graduação, me ajudando e apoiando, tornando esta trajetória mais agradável.

Também estendo meus agradecimentos a todos os amigos de graduação, por todos os momentos compartilhados e suporte durante esses anos.

Agradeço também aos meus amigos, por todo apoio, suporte, entendimento e auxílio durante essa trajetória.

A todos os professores e técnicos da UFC que contribuíram para a minha formação acadêmica, pois a contribuição de todos foi fundamental.

RESUMO

Durante toda a história da humanidade, os processos produtivos sofreram diversas alterações, sempre visando inovação, melhor aproveitamento de matéria-prima, bem como redução de custos. Nesse cenário a manufatura híbrida (MH) surge como uma alternativa, uma vez que, une os processos produtivos de redução e adição de material, em um único método. Essa combinação tem chamado a atenção de diversos pesquisadores e produtores, haja vista que resulta em processos mais eficazes e mais rápidos. Desta maneira, o objetivo geral do trabalho é analisar como os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e regiões usinadas), influenciam no acabamento final dos corpos de provas produzidos através da impressão 3D, utilizando como material o filamento ABS. Dessa forma, foi impresso um corpo de prova e posteriormente realizado o torneamento desse, a fim de verificar os efeitos deste processo de usinagem sobre o acabamento final da peça. Para à análise utilizou-se o software estatístico por meio da ferramenta de Análise de Variância (ANOVA), onde possibilitou averiguar quais parâmetros exercem influência significativa nas variáveis de resposta. Os resultados obtidos mostraram que a impressão 3D, não gerou peças com bom acabamento superficial, mas que ao se combinar com o torneamento, esse acabamento melhorou significativamente. Outrossim, constatou-se que o avanço foi o parâmetro que apresentou maior influência sobre o acabamento final. Já a velocidade de corte e a região de medição, não apresentaram efeitos significativos sobre o acabamento dos corpos de provas.

Palavras-chaves: manufatura aditiva; usinagem; parâmetros de impressão e de usinagem; acabamento superficial.

ABSTRACT

Throughout human history, production processes have undergone several changes, always aiming at innovation, better use of raw materials, as well as cost reduction. In this scenario, hybrid manufacturing (MH) appears as an alternative, since it unites the production processes of material reduction and addition, in a single method. This combination has drawn the attention of several researchers and producers, given that it results in more efficient and faster processes. In this way, the general objective of the work is to analyze how the machining parameters (cutting speed, feed and machined regions) influence the final finish of the specimens produced through 3D printing, using ABS filament as material. Thus, a specimen was printed and subsequently turned, in order to verify the effects of this machining process on the final finish of the part. For this analysis, statistical software was used through the Analysis of Variance (ANOVA) tool, which made it possible to ascertain which parameters exert a significant influence on the response variables. The results obtained showed that 3D printing did not generate parts with a good surface finish, but that when combined with turning, this finish improved significantly. Furthermore, it was found that the feed was the parameter that had the greatest influence on the final finish. On the other hand, the cutting speed and the measurement region did not present significant effects on the finishing of the specimens.

Keywords: additive manufacturing; machine; print and machine parameters; surface finish.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de Tecnologia de Camadas	20
Figura 2 -Fluxograma das etapas de produção de uma peça por meio de Manufatura Aditiva.	21
Figura 3 - Utilização da manufatura aditiva nas industrias	23
Figura 4 - Crescimento do faturamento da manufatura aditiva ao longo dos anos.	23
Figura 5- Representação esquemática do processo de FDM.....	25
Figura 6 - Representação esquemática do processo SLA.....	26
Figura 7- Representação esquemática do processo SLA.....	27
Figura 8 - Representação de uma impressora 3D cartesiana	31
Figura 9 - Representação de uma impressora 3D coreXY	32
Figura 10 - Representação da impressora 3D tipo delta.....	33
Figura 11 -Representação das principais camadas da peça.	34
Figura 12 - Representação da altura de camada	37
Figura 13- Efeitos da altura de camada sobre a qualidade superficial final da peça.....	37
Figura 14 - Tipos de preenchimentos disponíveis no Cura	38
Figura 15 - Níveis de preenchimento	39
Figura 16 - Representação de diferentes diâmetros de bico extrusor.	40
Figura 17 - Representação de um torno mecânico e seus componentes.....	42
Figura 18 - Representação das principais operações de torneamento	43
Figura 19- Representação dos movimentos ativos	46
Figura 20 - Representação dos tipos de superfície: geométrica, real e efetiva.....	50
Figura 21 - Fatores que influenciam a rugosidade	51
Figura 22 - Marcas do avanço e do raio de ponta da ferramenta sobre a superfície da peça.	53
Figura 23- Rugosidade média.....	54
Figura 24 - Rugosidade média parcial.....	56
Figura 25 - Rugosidade máxima.....	56
Figura 26 - Rugosidade total	57
Figura 27 - Máquina híbrida com o cabeçote aditivo paralelo ao eixo árvore de usinagem	59
Figura 28 - Máquina híbrida com cabeçotes aditivo e redutivo acoplado ao spindle da máquina.	60

Figura 29 - Fluxograma metodológico	62
Figura 30 - Filamento ABS	63
Figura 31 - Impressora Core H5	64
Figura 32 - Paquímetro digital.....	65
Figura 33 - Torno mecânico	65
Figura 34 - Rugosímetro eletrônico.....	66
Figura 35 – Modelos de corpo de prova adotado.	68
Figura 36 - Representação do corpo de prova.	70
Figura 37 - Corpo de prova no <i>Software</i> Ultimaker Cura®	71
Figura 38 - Representação do resultado final do corpo de prova depois da usinagem... 72	
Figura 39 - Medição da rugosidade.	73
Figura 40 - Divisão dos quadrantes.	73
Figura 41 - Corpos de provas impressos	74
Figura 42 - Início do torneamento das peças.....	75
Figura 43 - Vista lateral do corpo de prova usinado.....	76
Figura 44 - Corpo de prova usinado	76
Figura 45 - Influência do avanço sobre a rugosidade média.	80
Figura 46 - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade média.....	81
Figura 47 - Influência dos quadrantes sobre a rugosidade média.....	82
Figura 48 - Influência do avanço sobre a rugosidade total.....	83
Figura 49 - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade total.	84
Figura 50 - Influência dos quadrantes sobre a rugosidade total.	85
Figura 51 - Comparativo entre os valores de rugosidade média para cada corpo de prova.	86
Figura 52 - Comparativo entre os valores de rugosidade total para cada corpo de prova.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura de impressão dos filamentos da empresa 3DLAB.	35
Tabela 2 - Temperatura de impressão dos filamentos da empresa 3Dfila.	35
Tabela 3 - Temperatura da mesa de impressão.	36
Tabela 4 - Parâmetros dos corpos de provas produzidos.	67
Tabela 5 - Parâmetros de usinagem.	69
Tabela 6 - Parâmetros dos corpos de provas	69
Tabela 7 - Parâmetros de corte e valores de Ra obtidos para todos os corpos de provas.	77
Tabela 8 - Parâmetros de corte e valores de Rt obtidos para todos os corpos de provas.	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo de desempenhos dos materiais de impressão 3D.....	30
Quadro 2 – Comparativo das propriedades dos materiais de impressão 3D.	30
Quadro 3 - Principais fatores que influenciam no acabamento superficial de uma peça.	52
Quadro 4 - Fatores secundários que influenciam no acabamento superficial de uma peça.	53

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

3D	Tridimensional
A	Média da soma das áreas acima e abaixo da linha média
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ANOVA	Análise de variância
Ap	Profundidade de corte
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for testing and materials
C	Número de amostras
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computer Numeric Control
CPs	Corpos de prova
DIN	Deutsches Institut für Normung
f	Avanço
FDM	Modelagem por fusão deposição
L	Comprimento de medição
Lc	Comprimento de amostragem
Le	Comprimento analisado para a obtenção de A
Lm	Distância de medição
LMD	Laser Metal Deposition
LPTS	Laboratório de Pesquisa Tecnologia em Soldagem
MA	Manufatura aditiva
MH	Manufatura híbrida
mm	Milímetro
n	Rotação
PETG	Poli Tereftalato de Etileno Glicol
PLA	Poli Ácido Láctico

PR	Prototipagem rápida
Q	Taxa de remoção de material
R ϵ	Raio de ponta da ferramenta
Ra	Rugosidade média
rpm	Rotação por minuto
Rt	Rugosidade total
Ry	Rugosidade máxima
Rz	Rugosidade média total
SLA	Máquina de estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STL	Standard Template Library
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço
Yi	Intervalo ordenado de afastamento
Zi	Valores da rugosidade parcial

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos.....	19
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>19</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>19</i>
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	Manufatura Aditiva.....	20
<i>2.1.1</i>	<i>Aplicação da manufatura aditiva.....</i>	<i>22</i>
2.2	Técnicas de impressão 3D.....	24
<i>2.2.1</i>	<i>Fused Deposition Modeling (FDM) – Fundição e Deposição de Material.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Estereolitografia (SLA).....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Sinterização Seletiva a Laser (SLS).....</i>	<i>26</i>
2.3	Materiais de impressão 3D.....	28
<i>2.3.1</i>	<i>Filamento de ácido polilático – PLA.....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Filamento de acrilonitrila butadieno estireno – ABS.....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Filamento de material poli tereftalato de etileno glicol – PETG.....</i>	<i>29</i>
2.4	Máquinas de impressão 3D.....	31
<i>2.4.1</i>	<i>Cartesiana.....</i>	<i>31</i>
<i>2.4.2</i>	<i>CoreXY.....</i>	<i>32</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Delta.....</i>	<i>32</i>
2.5	Parâmetros de impressão 3D.....	33
<i>2.5.1</i>	<i>Velocidade de impressão 3D.....</i>	<i>33</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Temperatura de impressão.....</i>	<i>35</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Temperatura de mesa.....</i>	<i>36</i>
<i>2.5.4</i>	<i>Altura de camada de impressão.....</i>	<i>36</i>
<i>2.5.5</i>	<i>Tipo e nível de preenchimentos.....</i>	<i>38</i>
<i>2.5.6</i>	<i>Diâmetro do bico.....</i>	<i>40</i>

2.5.7	<i>Refrigeração</i>	40
2.6	Processo de usinagem	41
2.6.1	<i>Torneamento</i>	41
2.7	Operações de torneamento	43
2.8	Parâmetros de usinagem	45
2.8.1	<i>Movimentos</i>	45
2.8.2	<i>Parâmetros de corte</i>	47
2.8.2.1	<i>Velocidade de corte (V_c)</i>	47
2.8.2.2	<i>Tempo</i>	47
2.8.2.3	<i>Avanço (f)</i>	48
2.8.2.4	<i>Velocidade de avanço (V_f)</i>	48
2.8.2.5	<i>Profundidade de corte (a_p)</i>	48
2.8.2.6	<i>Taxa de remoção de material (Q)</i>	48
2.9	Acabamento superficial	49
2.9.1	<i>Parâmetros de rugosidade</i>	54
2.9.1.1	<i>Rugosidade média (R_a)</i>	54
2.9.1.2	<i>Rugosidade média parcial (R_z)</i>	55
2.9.1.3	<i>Rugosidade máxima (R_y)</i>	56
2.9.1.4	<i>Rugosidade total (R_t)</i>	57
2.10	Manufatura híbrida (MH)	58
2.10.1	<i>Máquinas híbridas</i>	59
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA	61
3.1	Material e Equipamentos	63
3.1.1	<i>Filamento de impressão 3D</i>	63
3.1.2	<i>Impressora 3D</i>	64
3.1.3	<i>Instrumentos de Medição</i>	64
3.1.4	<i>Torno Mecânico</i>	65

3.1.5	<i>Rugosímetro</i>	66
3.2	Metodologia	67
3.2.1	<i>Parâmetros de impressão</i>	67
3.2.2	<i>Corpo de Prova (CP)</i>	68
3.2.3	<i>Parâmetros de Usinagem</i>	69
3.2.4	Matriz experimental	69
3.2.5	<i>Procedimento de impressão 3D.</i>	70
3.2.6	<i>Procedimento de usinagem</i>	71
3.2.7	<i>Procedimento de medição da rugosidade</i>	72
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	Corpos de prova impressos	74
4.2	Usinagem dos corpos de provas	75
4.3	Análise da rugosidade	77
4.4	Efeitos do avanço sobre a rugosidade média	80
4.5	Efeitos da velocidade de corte sobre a rugosidade média	81
4.6	Efeitos dos quadrantes sobre a rugosidade média	82
4.7	Efeitos do avanço sobre a rugosidade total	83
4.8	Efeitos da velocidade de corte sobre a rugosidade total	84
4.9	Efeitos dos quadrantes sobre a rugosidade total	85
4.10	Comparativo entre os corpos de provas	86
4.10.1	<i>Comparativo entre os valores de Ra btidos para os corpos de provas.</i>	86
4.10.2	<i>Comparativo entre os valores de Rt btidos para os corpos de provas.</i>	87
5.	CONCLUSÃO	88
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista o cenário altamente competitivo entre as empresas, faz com que os meios produtivos estejam em constante evolução, a fim de extrair o máximo de cada processo, além de obter o melhor desempenho possível. Com a finalidade de garantir redução de custo e tempo de produção.

Visando atender essa demanda, a chamada indústria 4.0, surge com a finalidade de gerar melhorias nos processos industriais que envolvam: planejamento, organização, logística e controle da produção, e análise de processo durante o ciclo de vida dos produtos. Além disso, esse método pretende fazer com que as fábricas atinjam um novo patamar de produção, baseando principalmente, em um processo de manufatura dinâmica, capaz de tornar alterações nos projetos, algo flexível e de fácil execução (ZHOU *et al.*, 2015; QIN; LIU; GROSVENOR; CHENG *et al.*, 2016)

Na atualidade um dos métodos de fabricação mais utilizado nos mais diversos setores industriais, é a usinagem, que caracteriza-se principalmente pela remoção de material, com o objetivo de conferir forma, dimensões ou acabamento desejado a peça. Entretanto, nos últimos anos, a manufatura aditiva (MA), apresentou-se como uma alternativa para a fabricação de peças, sendo capaz de reduzir prazos de entrega ao máximo possível, através da utilização de técnicas como a modelagem por fusão e deposição do material (FDM), que opera adicionando material em camadas e assim gerando o perfil desejado.

Baseando-se nos modelos produtivos anteriormente mencionado e na visão de produção apresentada pela indústria 4.0, surge a manufatura híbrida (MH). Essa, consiste da combinação dos processos de adição e remoção de material. Onde nessa metodologia, realiza-se inicialmente a operação de deposição de material e posteriormente realiza-se a usinagem, gerando assim peças de melhor precisão, bem como um processo produtivo mais eficiente (CORTINA *et al.*, 2018). Outro fator importante desse método, é a sua capacidade de extrair o melhor de cada procedimento e eliminar e/ou otimizar eventuais empecilhos. Haja vista, que o processo aditivo quando utilizado sozinho não assegura uma boa precisão, à medida que quando combinado com a usinagem assegurasse a precisão e acabamento necessários (GUESSASMA *et al.*, 2015; NEWMAN *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017). De maneira análoga, o processo de usinagem quando realizado sozinho, tende a gerar cavaco, que pode ser entendido como a porção

de material retirada, ou seja, essa porção retirada, não será efetivamente utilizada. Porém quando se combina o processo de redução com o de adição de material, tem-se uma redução da quantidade de material retirado, haja vista, que em sua grande maioria utiliza-se a usinagem para realizar o acabamento final dos objetos produzidos, acarretamento assim em uma maior eficiência no processo como um todo.

Levando em consideração a elevada confiabilidade metrológica da manufatura híbrida, as boas propriedades mecânicas e sua alta versatilidade, tem feito com que essa metodologia esteja avançando fortemente no meio produtivo, sendo empregado nos mais diversos setores e na produção de diversos componentes como: pás de turbinas, moldes, queimadores de gás e rotores (WILSON *et al.*, 2014).

A qualidade superficial das amostras, sofrem influência direta de parâmetros como: avanço, velocidade de corte, raio de ponta da ferramenta, comprimento de medição. Além dos fatores de impressão 3D, como: variação dos parâmetros, material do filamento utilizado, tipo de impressora, dentre outros. Dessa maneira é imprescindível, constatar parâmetros que possuem maior influência sobre o acabamento superficial final das peças, a fim de identificar combinações de parâmetros que resultem em objetos com bom acabamento superficial. Outrossim, vale enfatizar que os parâmetros de usinagem e de impressão 3D podem ser alterados para se obter melhores acabamentos superficiais.

Com base nessas informações e na vasta gama de aplicações da manufatura híbrida, realizou-se esse trabalho com o objetivo de avaliar como parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e regiões usinadas), influenciam no acabamento final dos corpos de provas produzidos através da impressão 3D, utilizando como material o filamento ABS.

1.1 Objetivos

Com a finalidade de melhorar a compreensão desse trabalho, dividiu-se os objetivos entre objetivos gerais e específicos, de modo que o primeiro visa apresentar a ideia principal do trabalho, bem como, seu objetivo. Enquanto, o segundo detalhará as etapas necessárias para alcançar as metas traçadas no objetivo geral.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar como os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e regiões usinadas), influenciam no acabamento final dos corpos de provas produzidos através da impressão 3D, utilizando como material o filamento ABS.

1.1.2 Objetivos Específicos

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

- a) Analisar visualmente o acabamento superficial dos corpos de provas impressos;
- b) Analisar visualmente o acabamento superficial dos corpos de provas usinados.
- c) Avaliar a influência da velocidade de corte sobre a rugosidade média e total das amostras;
- d) Avaliar a influência do avanço sobre a rugosidade média e total das amostras;
- e) Avaliar a influência da região usinada sobre a rugosidade média e total das amostras;
- f) Avaliar qual combinação de parâmetros gera melhor resultado, no que diz respeito ao acabamento superficial.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manufatura Aditiva

Segundo relatos históricos o conceito de Manufatura Aditiva (MA), ou Additive Manufacturing em inglês, surgiu durante a década de 80, no Japão, mais especificamente, no Instituto de Pesquisa Industrial de Nagoya. Quando Hideo Kodama, desenvolveu um modelo capaz de produzir peças tridimensionais, por meio do endurecimento de polímeros fotossensíveis, devido a utilização de raios ultravioletas (SCHOTTE, 2019).

Ainda nessa década, o inglês Chuck Hull, desenvolveu um modelo capaz de criar elementos devido ao processo de cura de uma resina líquida, por intermédio de laser ou raios ultravioletas, tal método ficou conhecido como Estereolitografia (SLA) (3D SYSTEMS, 2021). Ademais, vale ressaltar que Chuck participou da fundação da 3D Systems, empresa pioneira no ramo de impressão 3D, e responsável pela criação da primeira máquina de manufatura aditiva comercializada no mundo. Essa criação, permitiu a produção de sólidos em um único processo, independente da complexidade da geometria, uma vez que, sua realização consiste na adição de materiais em camadas planas, ou seja, fatia-a-fatia até se chegar ao perfil desejado, como se pode ver na Figura 1 (GEBHARDT & HOTTER, 2016).

Figura 1 - Princípio de Tecnologia de Camadas



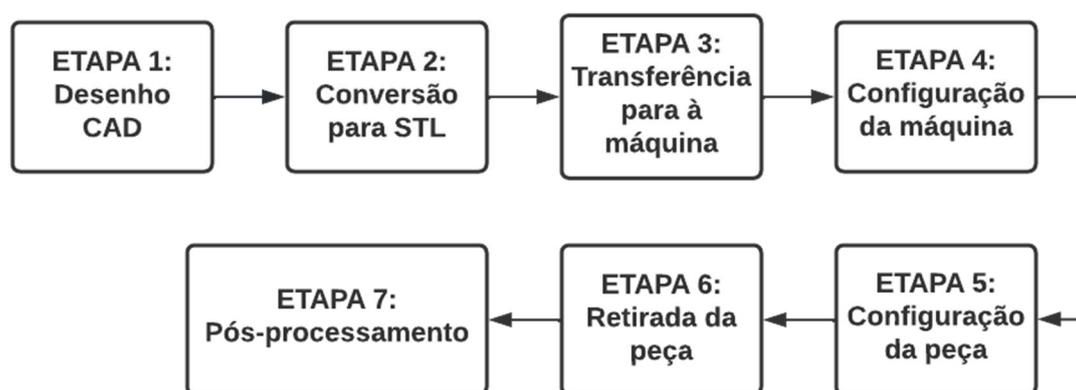
Fonte: Gebhardt & Hotter (2016).

Vale salientar que o processo de MA, recebeu outras nomenclaturas ao longo do tempo. Como exemplo, pode-se mencionar o método que a princípio visava, somente, a produção rápida de protótipos sem se importar com precisão e resistência destes, essa metodologia ficou conhecida como Prototipagem Rápida (PR), ou Rapid Prototyping em inglês (VOLPATO, 2007). Ademais, vale ressaltar que hodiernamente a principal nomenclatura usada para esse modelo é impressão 3D.

Diversas nomenclaturas, várias modificações, alterações e evoluções foram feitas nesse processo, a fim de que houvesse um melhor aproveitamento e aplicação desse meio produtivo. Tais avanços culminaram na criação de uma norma regulamentadora que visasse padronizar a exequibilidade dessa atividade. A norma ASTM F 2792 (2010), surge como a responsável pela regulamentação do termo manufatura aditiva. Esta, define o termo como o processo de união de materiais para a construção de objetos a partir de um modelo pré-estabelecido, normalmente pela sobreposição de camadas sobre camadas (SANTANA, 2015).

Mediante essas evoluções e padronizações, alguns passos devem ser seguidos, a fim de que se produza peças com formatos e parâmetros desejados. Na Figura 2, tem-se a representação do fluxograma com as sequências para execução do procedimento padrão.

Figura 2 -Fluxograma das etapas de produção de uma peça por meio de Manufatura Aditiva.



Fonte: Autor (2022).

Corroborando com o exposto, Gibson (2010), afirma que o procedimento padrão visando objetos de boas qualidades devem seguir a seguinte sequência:

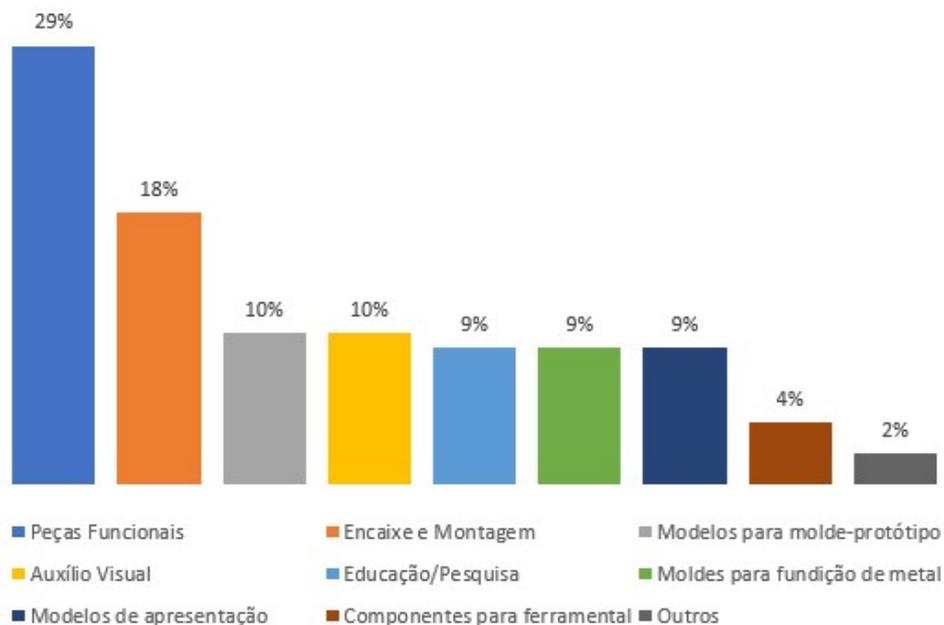
1. Utilização de *softwares* CADs para estabelecer o formato da peça a ser produzida;
2. Conversão do arquivo CAD para STL, a fim de descrever as superfícies externas e fechadas do CAD original e servir como base para o cálculo das fatias;
3. Transferência do arquivo STL para a máquina de MA;
4. Configuração da máquina com o intuito de evitar erros e atingir o padrão desejado;
5. Produção da peça;
6. Remoção da peça;
7. Pós-processamento com a finalidade de retirar algumas impurezas ou imperfeições.

2.1.1 Aplicação da manufatura aditiva

Uma vez que esse método foi padronizado, estudos e testes mostraram a sua viabilidade para o meio produtivo, fazendo com que diversas empresas dos mais variados ramos começassem a investir nesse segmento. Estes investimentos possibilitaram o desenvolvimento de diversas características dessas máquinas, resultando assim em equipamentos mais rápidos, de simples manuseio e com menores custos de aquisição (WOHLERS, 2008).

Com esses avanços, a manufatura aditiva passou a ter aplicabilidade em diversos setores econômicos, difundindo assim, o seu uso em inúmeros segmentos da sociedade. A Figura 3, traz a distribuição da utilização da impressão 3D nas mais diversas áreas.

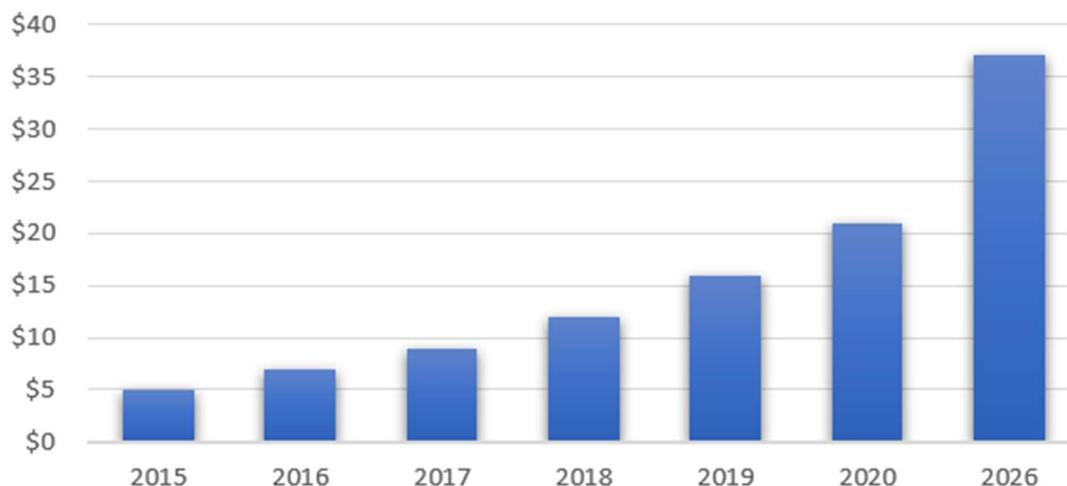
Figura 3 - Utilização da manufatura aditiva nas indústrias



Fonte: Adaptado de Volpato (2017).

Mediante o aumento da utilização da impressão 3D nos mais diversos setores econômicos, houve também um crescimento nas receitas. Segundo Wohlers (2008), esse segmento cresceu mais de cinco bilhões de dólares desde 2015 e com estimativa de arrecadação de aproximadamente 37,2 bilhões de dólares em 2026, conforme Figura 4.

Figura 4 - Crescimento do faturamento da manufatura aditiva ao longo dos anos.



Fonte: Adaptado de 3D HUBS (2022).

2.2 Técnicas de impressão 3D

Foi mencionado anteriormente que a fabricação de objetos tridimensionais tem sido discutida e tratada desde o século passado. Entretanto, no início de sua utilização, essa tinha a finalidade de confeccionar apenas protótipos. Despreendendo-se dessa ideia inicial, diversos avanços surgiram, dentre eles o surgimento da impressora 3D. Essa caracteriza-se como uma máquina que com o auxílio da tecnologia têm proporcionado a fabricação de diversos componentes físicos, sejam elas peças, artefatos pessoais e de decoração, protótipos ou modelos em três dimensões (3D). Por meio das informações da geometria da peça contidas em um arquivo digital que normalmente é elaborado em um sistema de computador (CAD), que contém as informações que serão utilizadas pela máquina, para construção da peça física (VOLPATO, 2007, p. 3; GORNI, 2013).

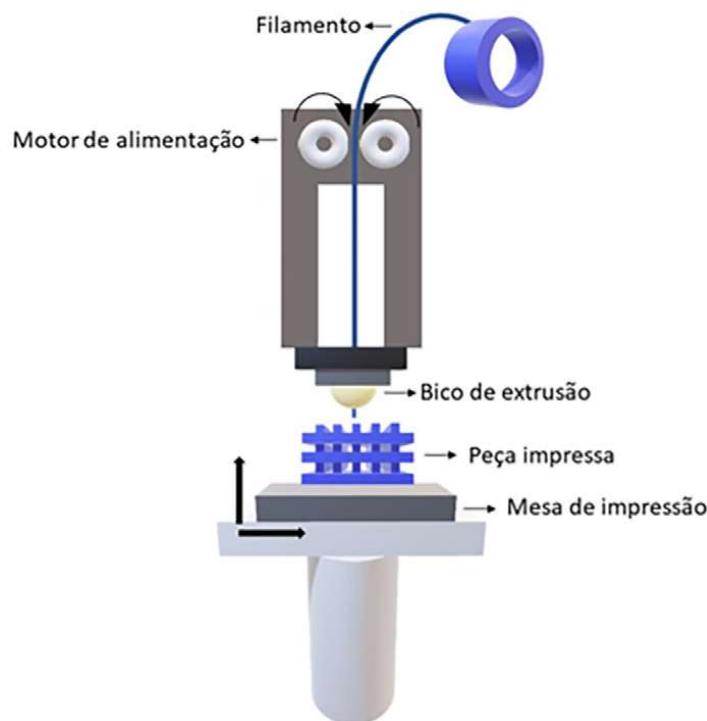
Compreende-se assim que o processo de funcionamento segue um padrão. Todavia, não podemos relacionar essa ideia a um modelo universal de impressora 3D. Haja vista a existência de métodos distintos e cada um apresenta suas particularidades específicas, acarretando assim, na produção de máquinas específicas para cada modelo.

2.2.1 *Fused Deposition Modeling (FDM) – Fundição e Deposição de Material*

Esse método foi desenvolvido e patenteado entre o final da década de 80 e o início da década de 90, por S.Scott Crump. Esta tecnologia, caracteriza-se por apresentar menores custos de produção, simplicidade de construção, bem como da utilização de materiais termoplásticos como matéria prima (ANTAS, 2007; CHUA, LEONG e LIM, 2010; ABREU, 2017).

Quanto à funcionalidade e exequibilidade do processo temos que o material usado possui forma de filamento que são envolvidos em um carretel. A fim de se obter um estado viscoso para impressão, traciona-se o filamento por meio de polias, empurrando o material para um canal aquecido, normalmente a uma temperatura acima da temperatura de fusão, para então iniciar a ejetar o material. Na etapa de extrusão tem-se um êmbolo que é responsável por empurrar o material até o bico de saída, sendo ajustado nas coordenadas do eixo cartesiano X e Y, introduzindo material sobre a plataforma aquecida, de acordo com o modelo escolhido para impressão, como pode-se observar na Figura 5 (STRATASYS, 1989; VOLPATO *et al.*, 2007; BIKAS; CHRYSSOLOURIS, STAVROPOULOS, 2015).

Figura 5- Representação esquemática do processo de FDM



Fonte: Bernardo et al. (2021).

Ademais, é sabido que esse processo de deposição é contínuo, tornando-se necessário que o material depositado encontre-se solidificado, entretanto, este deve apresentar uma temperatura que permita a adesão entre as camadas (STRATASYS, 1989; VOLPATO *et al.*, 2007; BIKAS; CHRYSOLOURIS, 2015).

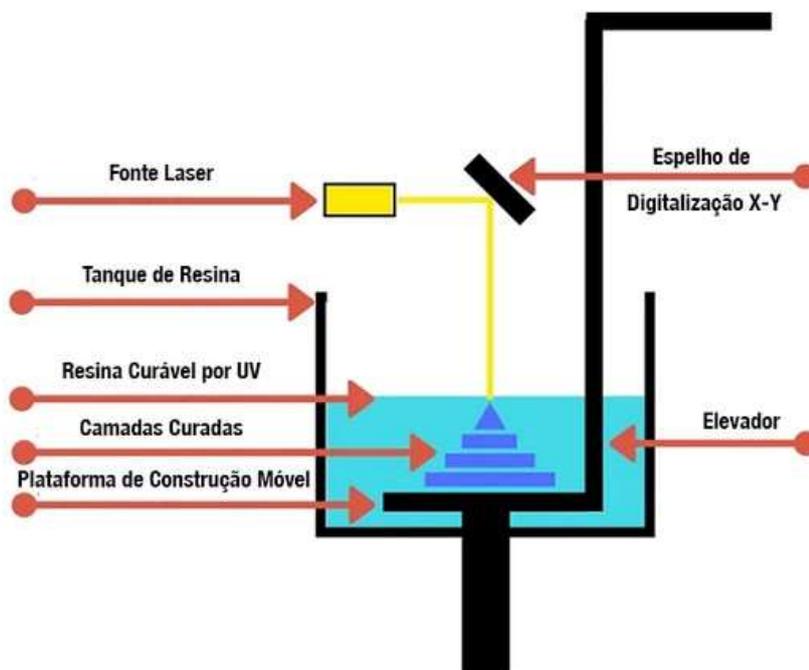
2.2.2 Estereolitografia (SLA)

Esse foi o primeiro método a ser desenvolvido nesse segmento, tendo sido patenteado por volta da década de 80. Quanto ao seu funcionamento, temos uma oposição ao FDM, uma vez que nesse modelo não se faz uso de material sólido, e sim de uma resina líquida, para formar os objetos. A resina encontra-se em um recipiente que tem a finalidade de submergir à medida que as camadas vão sendo constituídas. Ademais, esta é exposta a feixes de raios ultravioletas, o que permite um ganho de resistência mecânica à medida que as camadas se solidificam (ANTAS, 2007; CHUA *et al.*, 2010; BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSOLOURIS, 2015).

Para a formação do objeto, preenchesse o tanque de resina com matéria prima no estado líquido e realizasse movimentos na vertical, devido a uma plataforma interna, a fim de que os feixes luminosos incidam em regiões específicas, possibilitando a solidificação da resina para a formação da camada. Ao finalizar a camada, a plataforma

imersa na cuba e inicia-se o processo novamente, até que se obtenha o perfil desejado. A Figura 6, a seguir ilustra uma máquina desse modelo.

Figura 6 - Representação esquemática do processo SLA



Fonte: EngiPrinters (2020).

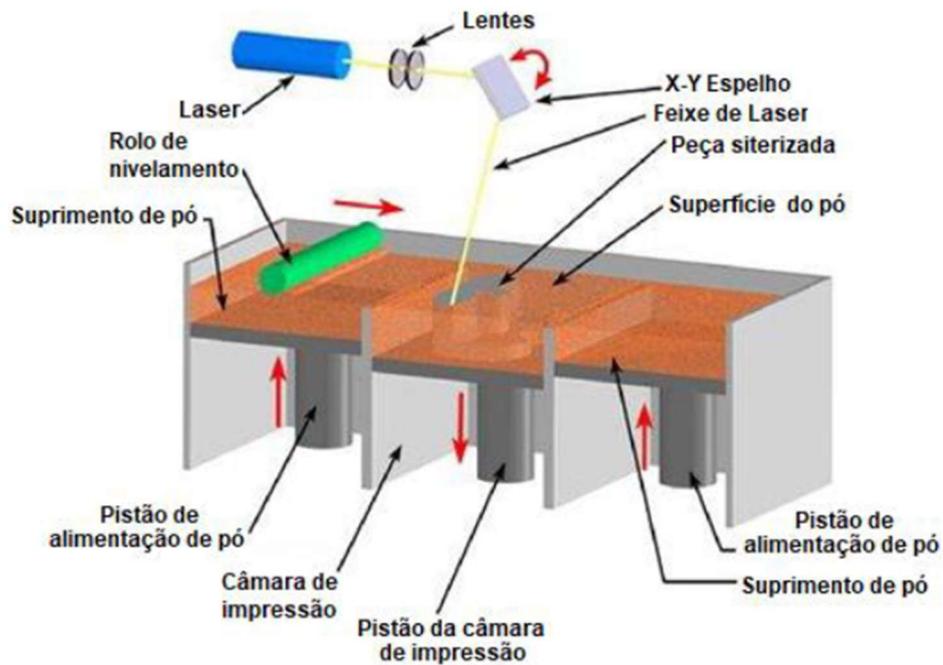
2.2.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

Esse é um dos métodos mais praticado no mercado, outrossim, esse modelo assemelha-se em alguns pontos com processo de estereolitografia. Entretanto, nessa metodologia ocorre a construção de objetos tridimensionais pela superposição de camada homogêneas de polímeros em pó (GRIMM, 2004; CHUA; LEONG; LIM, 2010).

Tratando-se do processo de fabricação, temos que esse inicia-se pelo preenchimento da câmara de impressão com a matéria prima. Posteriormente, a máquina faz o nivelamento do material e um feixe de luz de alta potência é projetado no pó fazendo o material entrar em fusão. Vale salientar que, a fim de minimizar os efeitos de transferência de calor, a superfície da plataforma é aquecida para dar maior precisão ao processo. Após a formação da camada a plataforma desce e então um rolo aplica uma nova camada de pó sobre a mesa. Finalizando essa parte, o procedimento é reiniciado e segue de forma contínua até se obter o objeto desejado (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSOLOURIS, 2015; GRIMM, 2004; ANTAS, 2007). Além

do exposto vale salientar que ao término do processo é necessário realizar a remoção do excesso de pó, presente no objeto. A Figura 7, representa esquematicamente o processo de SLA.

Figura 7- Representação esquemática do processo SLA.



Fonte: Adaptado de FERNANDES et. al. (2014).

2.3 Materiais de impressão 3D

Na produção das peças por meio da manufatura aditiva a definição de material varia de acordo com o processo escolhido, haja vista que para determinado procedimento pode existir mais de um material a ser escolhido. Ademais, cada material possui características específicas, que tendem a alterar a impressão e qualidade final da peça. A seguir, será discorrido sobre os principais materiais utilizados no FDM.

2.3.1 Filamento de ácido polilático – PLA

Este é um dos materiais mais usados no processo de impressão 3D, sendo definido como um termoplástico sintético obtido por meio de processo de fermentação de vegetais que são ricos em amido. Além disto, cabe destacar que esse não tem efeitos maléficos ao operador durante a realização da impressão (BARROS, 2011; CANESSA; FONDA; ZENNARO, 2013; LOPES *et al.*, 2018).

Quanto às características, o PLA tem a temperatura de transição vítrea em torno de 60°C e a de fusão na faixa de 175°C. Já a faixa de temperatura que é utilizada para extrusão no processamento, varia de 160° a 220°C, de acordo com as especificações do fabricante do filamento. Outrossim, vale mencionar que o ponto de mudança de estado é também a temperatura usada como referência pela mesa aquecida no processo de impressão 3D, a fim de permitir a adesão da primeira camada depositada à mesa, evitando assim o empenamento do material. (GARLLOTA, 2001; HAMOD, 2014; HAUSMAN; HORNE, 2017).

Pode-se mencionar também que esse material apresenta alta fragilidade o que impossibilita o seu uso em atividades que necessitem de deformações plásticas. Outro ponto que merece destaque, é a facilidade de manuseio. Entretanto, o armazenamento exige um cuidado especial, principalmente, que seja um ambiente seco e que não haja contato com a umidade (RASAL *et al.*, 2010; BRITO *et al.*, 2012; BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

2.3.2 Filamento de acrilonitrila butadieno estireno – ABS

ABS é um polímero composto, basicamente, pelos monômeros Acrilonitrila, Butadieno e Estireno. Além disso, pode-se mencionar que este é um termoplástico derivado do petróleo, que apresenta uma estrutura amorfa devido ao grupo poliestireno e rigidez através de emaranhamentos. Para sua aplicação em impressão 3D, esse material,

normalmente, é extrudado em torno de 220°C, com a transição vítrea em torno de 105°C. (ALBUQUERQUE, 2014; BATES-GREEN, 2017).

Como características principais desse material, pode-se enfatizar que este, apresenta boa resistência mecânica, resistência à abrasão e ao calor e pode receber um pós-tratamento superficial, possui excelente resistência ao impacto a baixas temperaturas, se comparado com os outros materiais. Entretanto, porta uma peculiaridade de emitir gases nocivos, possui baixa adesão entre as camadas e ser sensível a umidade (FERREIRA, PESSAN; JÚNIOR; 1997; ALBUQUERQUE, 2014; AZIMI, 2016).

2.3.3 Filamento de material poli tereftalato de etileno glicol – PETG

Esse material, pode ser definido como um polímero termoplástico, obtido por meio da combinação do PET com glicol (CHDM). Essa combinação resulta em um material que apresenta a funcionalidade do ABS (mais resistente, resistente à temperatura, mais durável) e a confiabilidade do PLA (fácil de imprimir), tudo isso em um único material. Outrossim, esse material, apresenta como característica o baixo encolhimento o que acarreta em um baixo empenamento da peça, bem como boa resistência a elementos químicos e ácidos, além de não emitir odor durante a impressão (3DLAB, 2017; BATES-GREEN, 2017).

No que diz respeito às características deste material, tem-se que desde sua a projeção objetivava-se que fosse de fácil utilização, além de possuir uma variedade de aplicações. Este, possui uma característica peculiar, uma vez que tem eficiência no retardamento de chamas, onde o material acaba se distorcendo, mas não pega fogo em si (3DLAB, 2017; BATES-GREEN, 2017).

2.3.4 Comparativo entre os materiais de impressão 3D.

Com a finalidade de apresentar uma sintetização do exposto nos itens anteriores, os Quadro 1 e 2, trazem um comparativo dos desempenhos e das propriedades dos materiais ABS, PETG e PLA.

Quadro 1 - Comparativo de desempenhos dos materiais de impressão 3D.

DESEMPENHO	MENOR	MÉDIO	MAIOR
Qualidade superficial da peça	ABS	PETG	PLA
Precisão de detalhes	ABS	PETG	PLA
Rigidez	PETG	ABS	PLA
Resistência a impactos	PLA	ABS	PETG
Resistência a atritos	ABS	PETG	PLA
Resistência a altas temperaturas	PLA	PETG	ABS
Facilidade de pós processamento	PLA	PETG	ABS

Fonte: Adaptado de 3DLAB (2017).

Quadro 2 – Comparativo das propriedades dos materiais de impressão 3D.

PROPRIEDADES	PLA	ABS	PETG
Densidade	1,24 g/cm ³	1,04 g/cm ³	1,27 g/cm ³
Temperatura de fusão	185°C	220°C	270°C
Tensão de escoamento	66 Mpa	38 Mpa	51 Mpa
Resistência a flexão	130 Mpa	66 Mpa	72 Mpa
Módulo de elasticidade	4350 Mpa	2200 Mpa	2120 Mpa

Fonte: Adaptado de 3DLAB (2017).

2.4 Máquinas de impressão 3D

Diante da disseminação do uso da impressora 3D as empresas viram a necessidade da produção desse maquinário como uma oportunidade de negócio, proporcionando assim um maior desenvolvimento dentro desse setor. Dessa forma, alguns aspectos fazem com que determinadas características diferenciem modelos e formas de produzir. As impressoras de FDM, por exemplo, são diferenciadas de acordo com o modo de translação do extrusor no espaço, bem como pela capacidade de possuir classes de impressoras abertas ou fechadas que geram impactos significativos na qualidade final da peça.

2.4.1 *Cartesiana*

Esse modelo é o mais conhecido e empregado pelos usuários e apaixonados desse segmento. Este, faz uso de um hardware que possui a capacidade de realizar o movimento nos eixos de coordenadas X, Y e Z, ou seja, todos os eixos possuem um motor que tem a finalidade de realizar movimento nessa direção, permitindo assim maior precisão na construção das peças (BELL, 2015). A Figura 8, traz uma representação de um modelo dessa impressora.

Figura 8 - Representação de uma impressora 3D cartesiana



Fonte: Eletrogate (2021).

2.4.2 CoreXY

Esse modelo, se assemelha com as impressoras cartesianas, entretanto, diferenciam-se por possuir motores que são responsáveis por realizar o movimento, somente, no plano X e Y em conjunto. Ademais, nesse modelo, os movimentos no eixo Z, são realizados de forma independente por outro motor (THOMAZETTI, 2019). A Figura 9, apresenta uma representação desse modelo.

Figura 9 - Representação de uma impressora 3D coreXY

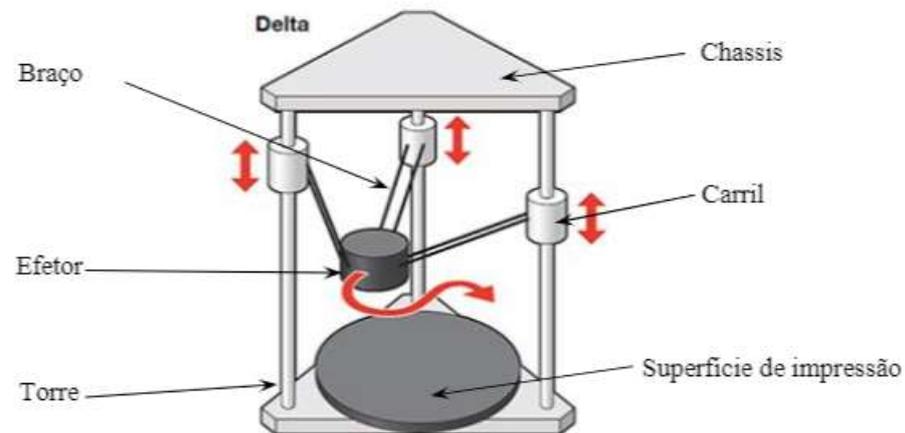


Fonte: GTMax 3D (2022).

2.4.3 Delta

Esse modelo, também trabalha no sistema cartesiano, entretanto, apresenta uma cinemática complexa. Isso porque para a perfeita execução do movimento, necessita-se que os três motores contidos na torre trabalhem em conjunto. Tal fato, possibilita alcançar qualquer coordenada dentro do volume de trabalho. Ademais, vale salientar que esse modelo possui mesa de trabalho circular, com ponto inicial localizado no centro do círculo (ABREU, 2017). A Figura 10 a seguir, traz uma representação desse modelo.

Figura 10 - Representação da impressora 3D tipo delta



Fonte: Abreu (2017).

2.5 Parâmetros de impressão 3D

No modelo atual da sociedade tem-se a exigência cada vez maior por padrões de qualidade, dessa forma, surge a necessidade de que alguns parâmetros sejam ajustados a fim de que padrões dimensionais e de qualidade sejam atendidos, uma vez que, esses possuem grande influência na qualidade final da peça, além de poder conferir melhores propriedades mecânicas. Mediante tamanha importância, os tópicos subsequentes irão apresentar os principais parâmetros adotados para uma boa qualidade final de peças produzidas por processos de MA.

2.5.1 Velocidade de impressão 3D

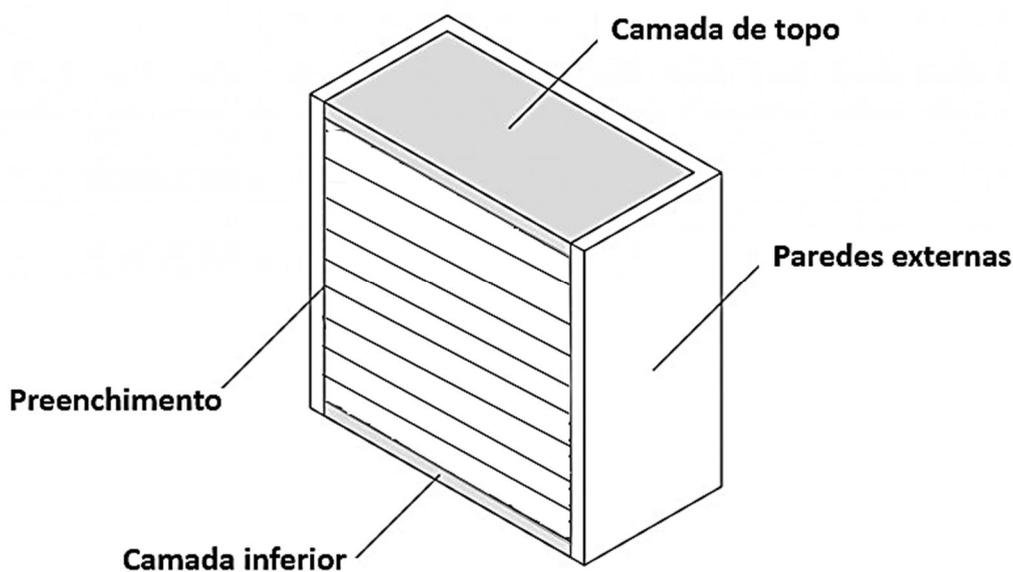
A velocidade de impressão é um dos principais parâmetros da impressão 3D, uma vez que, caracteriza-se basicamente, pela determinação com que os motores de sua impressora se movem.

Visto isso, surge a ideia de que ao se aumentar a velocidade de impressão, teremos uma grande quantidade de peças produzidas em determinado espaço de tempo. De fato, esse pensamento está correto, entretanto, vale salientar que somente aumentar a velocidade, não representa um meio produtivo eficiente, uma vez que, o aumento de forma irresponsável e/ou não avaliada pode acarretar peças de má qualidade superficial, bem como um aumento da vibração da máquina e perda de precisão no produto final (3DLAB, 2018).

Todavia, não se pode deixar induzir ao erro e imaginar que a redução da velocidade, resultará em peças perfeitas. Uma vez que, essa condição gera uma deformação do material, devido ao elevado tempo em contato com o bico extrusor. Ficando claro assim, a necessidade de se trabalhar com uma velocidade adequada, sem atingir os dois extremos (WISHBOX, 2020).

Outrossim Fernandes (2016), divide a velocidade de impressão em 5 categorias. Onde a primeira é a velocidade de primeira camada, sendo essa a base para todas as outras. Já a segunda categoria refere-se à velocidade de enchimento, enquanto a terceira trata-se da velocidade das paredes de topo e fundo. Já a quarta e a quinta, representam respectivamente as velocidades da parede lateral externa e a velocidade da parede lateral interna, conforme pode-se observar na Figura 11.

Figura 11 -Representação das principais camadas da peça.



Fonte: Adaptada de Zortrax (2022).

2.5.2 *Temperatura de impressão*

Esse parâmetro corresponde a temperatura que o material deixa o bico extrusor e entra em contato com a mesa de impressão. A fim de que se obtenha um melhor processamento, é necessário que a temperatura na saída esteja ajustada para que haja a fundição do material extrudado. Pois se essa estiver abaixo do recomendado, o filamento não irá fluir de forma adequada causando lacunas entre as camadas. Já se esse parâmetro estiver muito elevado, o filamento pode se degradar e produzir peças frágeis (3DLAB, 2019).

Além do exposto, é sabido que existem diversos tipos de materiais que diferem entre si, de acordo com fabricante e de sua composição. Tal fato, faz com que não exista uma única temperatura de impressão padrão, mas sim a necessidade de se ajustar conforme a recomendação do fabricante. Como exemplo, as Tabelas 1 e 2, fornecem as temperaturas de extrusão sugeridas por fabricantes distintos, tornando possível verificar a diferença de temperatura, conforme cada produtor.

Tabela 1 - Temperatura de impressão dos filamentos da empresa 3DLAB.

FILAMENTO	TEMPERATURA DE IMPRESSÃO (°C)
ABS	220 – 240
PLA	190 – 220
PETG	235 – 255

Fonte: Adaptado de 3DLAB (2022).

Tabela 2 - Temperatura de impressão dos filamentos da empresa 3Dfila.

FILAMENTO	TEMPERATURA DE IMPRESSÃO (°C)
ABS	220 – 240
PLA	180 – 230
PETG	245 – 260

Fonte: Adaptado de 3Dfila (2022).

2.5.3 *Temperatura de mesa*

No tópico anterior, pode-se constatar a importância da temperatura de extrusão, entretanto, existe um outro parâmetro que deve ser levado em consideração, a fim de que a peça final tenha uma boa qualidade, este é a temperatura da mesa. Pois grandes diferenças entre a temperatura da mesa e de extrusão, aumentam as possibilidades de se obter uma impressão com falhas e imperfeições. Além do mais, vale destacar que determinados filamentos quando esfriam, tendem a encolher e empenar, tão logo esses parâmetros não estejam ajustados (3DPROCER, 2019).

Além do exposto, Fischer (2018) aponta que ao se aquecer a mesa, há uma maior aderência do material, garantindo assim que a primeira camada agarre bem e que a peça não venha se deslocar durante a impressão, fazendo com que a peças produzidas apresentem uma melhor qualidade.

A Tabela 3, fornece a recomendação de temperatura da mesa para cada tipo de filamento de determinado fabricante.

Tabela 3 - Temperatura da mesa de impressão.

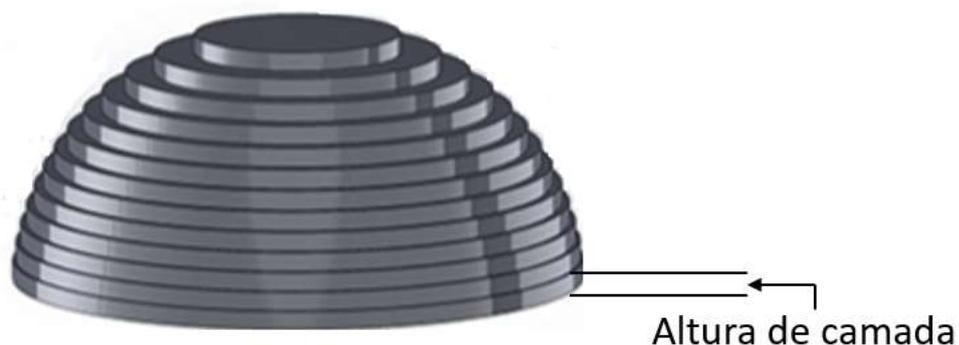
FILAMENTO	TEMPERATURA DA MESA (°C)
ABS	110
PLA	60 – 70
PETG	85

Fonte: Adaptado de 3DLAB (2022).

2.5.4 *Altura de camada de impressão*

A altura da camada corresponde a espessura de cada camada impressa, ou seja, a altura que a camada de adição de material tem ao ser depositada sobre a camada anterior (SCULPTEO, 2016). A Figura 12, traz uma representação da altura da camada e nela pode-se perceber que o processo de impressão 3D por FDM possui a deposição de material em camadas no sentido vertical.

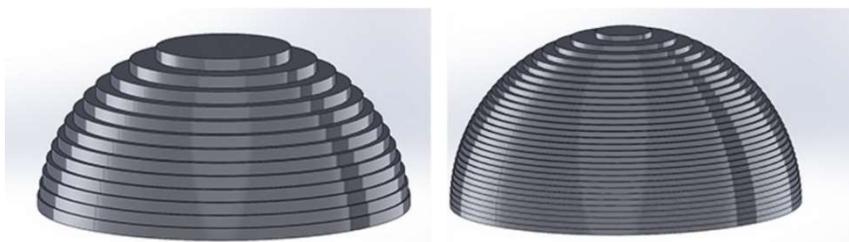
Figura 12 - Representação da altura de camada



Fonte: Adaptada de Brasilia Fab Lab (2017).

Vale evidenciar, que esse parâmetro influencia diretamente a qualidade superficial, tempo de fabricação, resistência e aparência externa. Por exemplo, quando se projeta uma peça que possui camadas finas, teremos uma melhor precisão dimensional, mas também um maior tempo de impressão. Já para os casos em que não se importa tanto com acabamento superficial e deseja-se peças com maior rigidez, deve-se adotar uma altura de camada maior (ARAÚJO, 2017; ALAFAGHANI E QATTAWI, 2018). A Figura 13, representa a um comparativo da qualidade superficial da peça para diferentes alturas de camadas.

Figura 13- Efeitos da altura de camada sobre a qualidade superficial final da peça



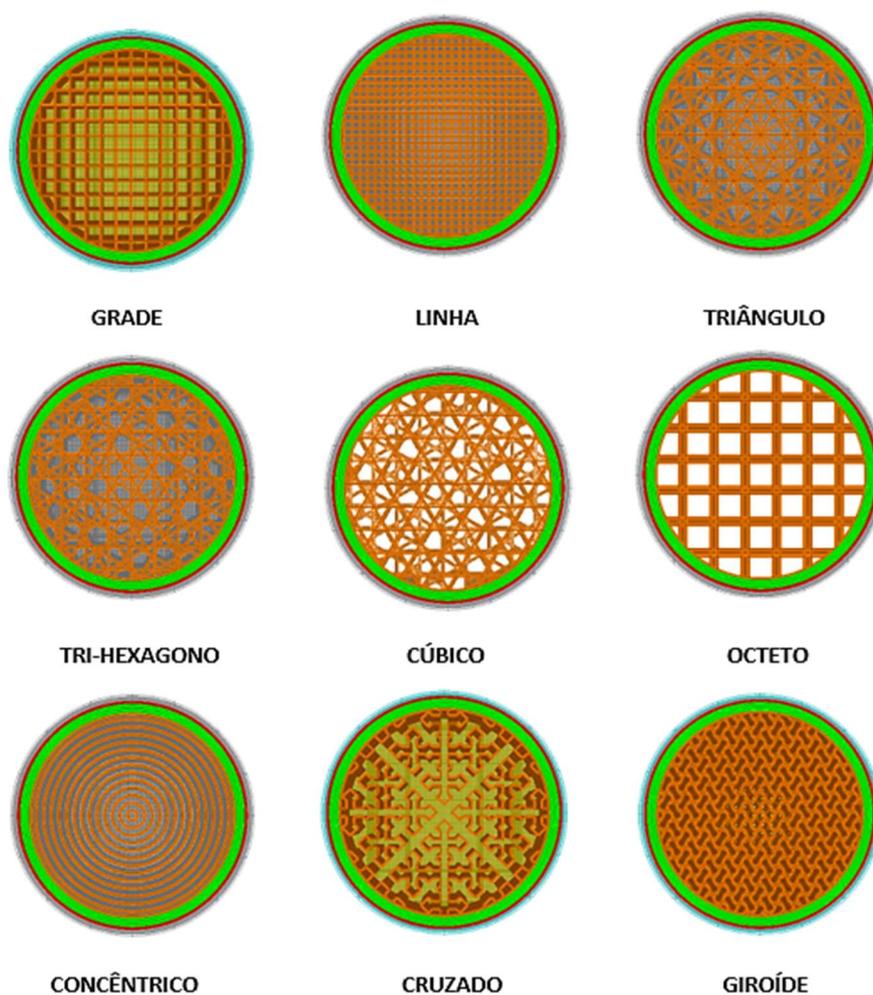
Fonte: Brasilia Fab Lab (2017).

2.5.5 Tipo e nível de preenchimentos

Esse é um dos parâmetros mais importantes, dentre todos os mencionados anteriormente, uma vez que possui influência direta na impressão final do objeto, pois permite que a peça seja fabricada sem a obrigatoriedade de possuir um corpo maciço. Ademais, pode-se destacar que conforme o preenchimento adotado ocorrerá alterações na quantidade de material utilizado, acarretando assim em alterações no tempo de impressão, além de possuir influência direta na resistência final da peça (3DLAB, 2019).

Para a produção de peças, existem uma variação de geometrias que normalmente são adotadas. Corroborando com isso, Lopes *et al.* (2018), define as principais geometrias como sendo: hexagonal, grade, triângulos, linhas e concêntrico. A Figura 14, fornece os padrões de preenchimento disponíveis no *Software* Ultimaker Cura.

Figura 14 - Tipos de preenchimentos disponíveis no Cura



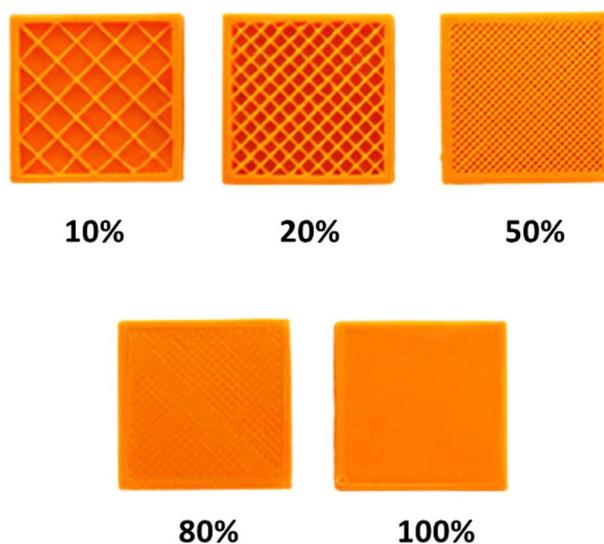
Fonte: Autor (2022).

Uma vez que se define o tipo de preenchimento, torna-se possível estabelecer o nível de preenchimento, que definirá o quanto de material será depositado no interior de cada peça. De acordo como o exposto, Cunico (2015) e Junior (2017), argumentam que os níveis de preenchimento podem variar da seguinte maneira:

- 0% para peças ocas;
- 1% a 99% para peças semipreenchidas;
- 100% para peças sólidas.

Tais variações são possíveis devido a densidade de preenchimento, que indica a quantidade de material a ser usada no padrão de preenchimento. A Figura 15, apresenta algumas peças, com densidade de preenchimento distintas.

Figura 15 - Níveis de preenchimento



Fonte: Adaptada de Impressão 3D Portugal (2021).

Corroborando com o exposto, pode-se destacar que tanto o nível de preenchimento como a geometria adotada, apresentam forte influência na resistência mecânica final da peça. Por exemplo, o tipo hexagonal apresenta uma maior resistência mecânica que outros formatos, assim como, uma peça oca possui menor resistência que uma peça maciça.

2.5.6 *Diâmetro do bico*

Este possui a função de depositar o material fundido sobre a mesa com o diâmetro desejado. Aliado a esse parâmetro, temos a altura da camada, e por padrão temos que essa depende diretamente do diâmetro do bico, além de não poder apresentar valores maior que 80% do diâmetro do bico extrusor. Logo, torna-se claro que quanto maior o diâmetro do bico extrusor, menor será o tempo gasto na impressão, além de apresentar uma maior resistência mecânica. Entretanto, não se deve acreditar que somente elevar esse parâmetro para obter um menor tempo de impressão é suficiente, pois como consequência disso, tem-se uma queda brusca em níveis de detalhamento do objeto (3DLAB, 2017). A Figura 16, apresenta diferentes diâmetros de bico extrusor.

Figura 16 - Representação de diferentes diâmetros de bico extrusor.



Fonte: Acelera 3D (2019).

2.5.7 *Refrigeração*

Como visto anteriormente, a temperatura possui grande influência sobre o resultado final da peça, e com base nessa informação, deve-se destacar que além desse parâmetro, a refrigeração também apresenta-se como de grande valia para obtenção de objetos com boa qualidade. E no que diz respeito aos parâmetros, temos que levar em consideração que cada material possui suas necessidades específicas, o PLA e o PETG por exemplo, necessitam que os ventiladores de refrigeração sejam ligados, já quando trata-se de produtos que utilizam o ABS é de fundamental importância que os ventiladores estejam desligados e que a impressora esteja fechada, uma vez que, esse material tende a encolher quando há diminuição de temperaturas, podendo haver deformações no formato final da peça (3DPROCER, 2019).

2.6 Processo de usinagem

Diferente dos processos de adição de materiais, a usinagem é um processo de manufatura redutiva, utilizado desde 1797. Além disso, esse método é um dos processos de fabricação mais utilizados do mundo. Sendo caracterizado principalmente pela remoção de material, com o objetivo de conferir à peça a forma, dimensões ou acabamento desejados. Ademais, vale salientar que esse material retirado a fim de obter o perfil final, recebe o nome de cavaco (FERRARESI, 1977; TRENT, 1985; KÖNIG; KLOCKE, 1997).

Uma vez que, se entende o conceito de usinagem, torna-se necessário que se discorra sobre os principais processos, a fim de que se entenda seu funcionamento e aplicação, visto que, pode-se ter operações que visam somente uma remoção de elevada taxa de material, chamado de desbaste. Mas também, tem-se procedimentos que visam principalmente a qualidade final da peça, denominado acabamento. Vale destacar que na usinagem convencional existem três processos principais: furação, fresamento e torneamento. Todavia, nesse trabalho será discorrido somente sobre torneamento.

2.6.1 Torneamento

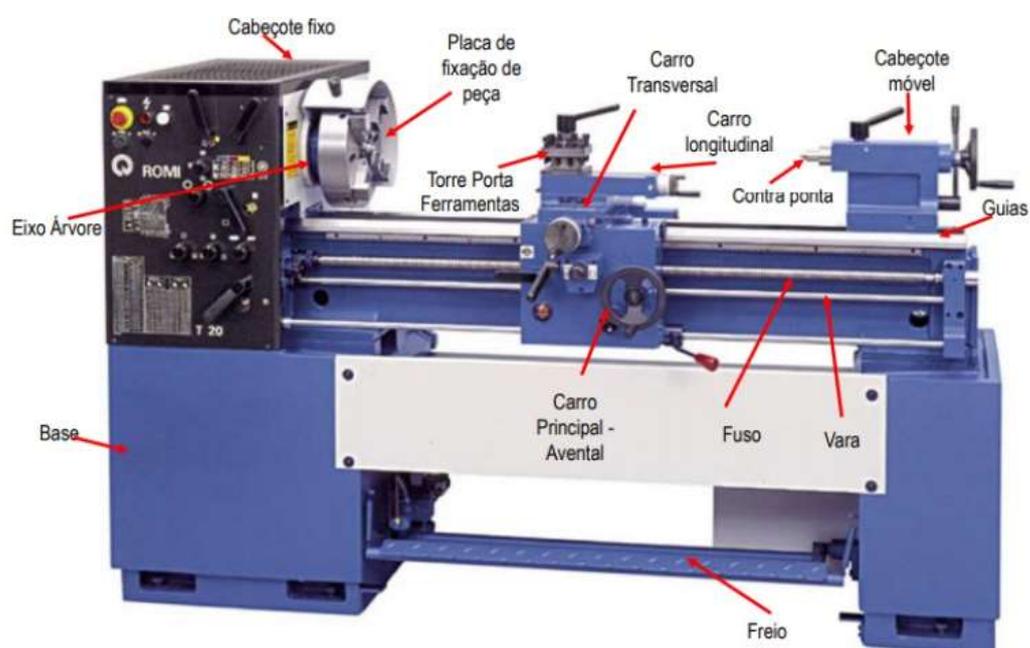
Esse processo de usinagem é caracterizado, basicamente, pela busca de se obter superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas. Para tal, a peça de trabalho é girada em torno do eixo principal da máquina e a ferramenta é movida simultaneamente ao longo de um caminho coplanar com este eixo. Além disso, vale mencionar que este processo é normalmente utilizado para obter peças simétricas de revolução (FERRARESI, 1977).

No que diz respeito ao procedimento de realização do torneamento, tem-se que a peça de trabalho a ser cortada é presa ao mandril do torno e depois girada. A ferramenta é fixada rigidamente ao porta-ferramentas e se move a uma velocidade constante ao longo do eixo de rotação da peça de trabalho, para retirar uma camada de metal dessa peça e formar um cilindro ou superfície mais complexa. Outro ponto que merece destaque nesse processo é a utilização de ferramentas monocortantes feitas com material de dureza superior à dos materiais que serão torneados (SHAW, 1984; WALSH; CORMIER, 2005).

Ainda discorrendo sobre o processo de torneamento, mais especificamente sobre o torno em si, têm-se que esse equipamento é composto por uma mesa com dois

barramentos paralelos que sustentam seus acessórios como o contraponto ligado ao cabeçote móvel, que tem a finalidade de auxiliar na fixação da peça. Além disso, têm-se a presença do carro principal, que realiza o movimento longitudinal, enquanto que o carro auxiliar, tem a responsabilidade de realizar o movimento transversal (CHIAVERINI, 1986). Ademais, tem-se a presença do eixo árvore, que possui rotação que sofre alterações conforme a configuração das alavancas, podendo girar nos dois sentidos. A fim de facilitar a visualização e o entendimento a Figura 17, traz uma representação dos componentes de um torno mecânico.

Figura 17 - Representação de um torno mecânico e seus componentes

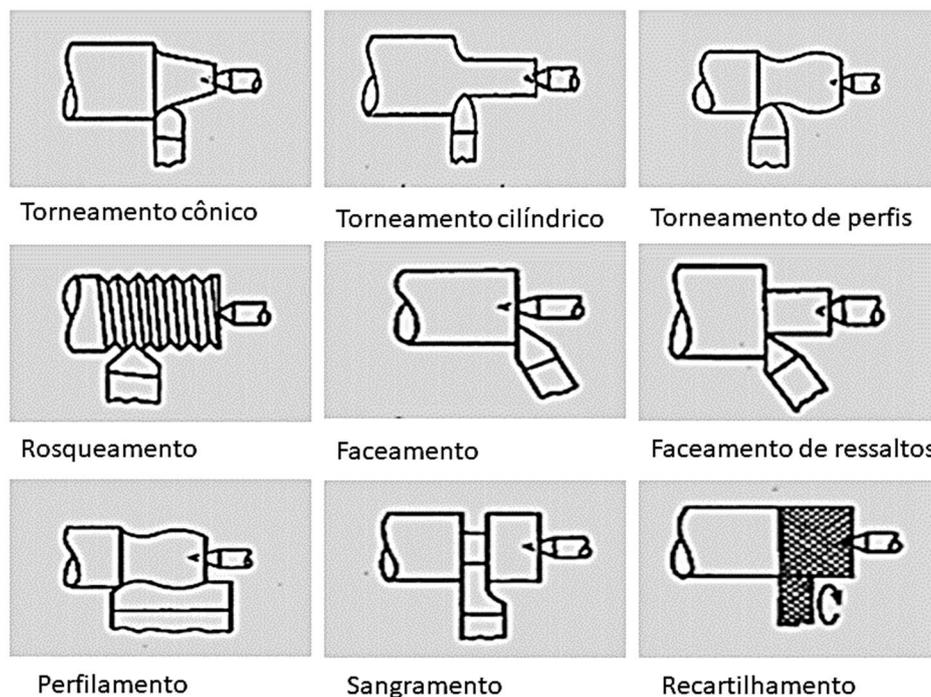


Fonte: RML Máquinas (2020).

2.7 Operações de torneamento

Segundo Chiaverini (1986), existem várias operações que podem ser feitas por meio da utilização de torno mecânico, com movimentos, geometrias e objetivos distintos. Tais operações, podem ser vistas na Figura 18.

Figura 18 - Representação das principais operações de torneamento



Fonte: Adaptado de Chiaverini (1986).

Pela Figura 18, é possível observar os procedimentos de torneamento, tornando-se interessante que se discorra sucintamente sobre cada um. De acordo com Chiaverini (1986), temos:

- Torneamento cilíndrico: este caracteriza-se pela realização da operação através do deslocamento da ferramenta paralelamente ao eixo da peça, podendo ser externo ou interno.
- Torneamento cônico: caracterizado pela operação em que o deslocamento da ferramenta obliquamente ao eixo da peça, podendo ser externo ou interno.
- Rosqueamento: consiste, basicamente, no processo de se abrir rosca (filetes) na superfície externa ou interna de um cilindro.
- Faceamento: nessa operação realiza-se o deslocamento da ferramenta no sentido normal ao eixo de rotação da peça, em contato com uma superfície. O processo de faceamento, pode ser externo ou interno.

- e) Torneamento de perfis: essa operação é obtida através do deslocamento da ferramenta em relação ao eixo da peça para se obter geometrias e perfis desejados, sendo possível a sua realização tanto externamente quanto internamente.
- f) Perfilamento: procedimento em que a ferramenta se desloca em uma trajetória retilínea radial ou axial, visando à obtenção de um formato previamente definido, determinado pelo perfil da ferramenta.
- g) Sangramento: consiste, basicamente, em cortar ou criar canais em uma peça utilizando o torno, por meio do emprego de uma ferramenta denominada bedame. Essa operação pode ser radial ou axial.
- h) Recartilhamento: Operação obtida usada quando se deseja obter uma superfície áspera e com traços desejados, fazendo uso de uma ferramenta que possibilita imprimir na superfície a forma desejada.

2.8 Parâmetros de usinagem

A fim de obter peças com bom acabamento superficial, padronizou-se as grandezas envolvidas no processo de usinagem, para que em conjunto com a utilização de máquinas e ferramentas adequadas, obtenham-se resultados cada vez melhores. A seguir será discorrido sobre os parâmetros e conceitos do processo de usinagem, com a finalidade de esclarecer conceitos relacionados às diferentes operações.

2.8.1 Movimentos

No processo de usinagem os movimentos são caracterizados pela movimentação que ocorre entre a aresta de corte da ferramenta e a peça que se considera parada (DINIZ *et al.*,1999). Esses movimentos são divididos em:

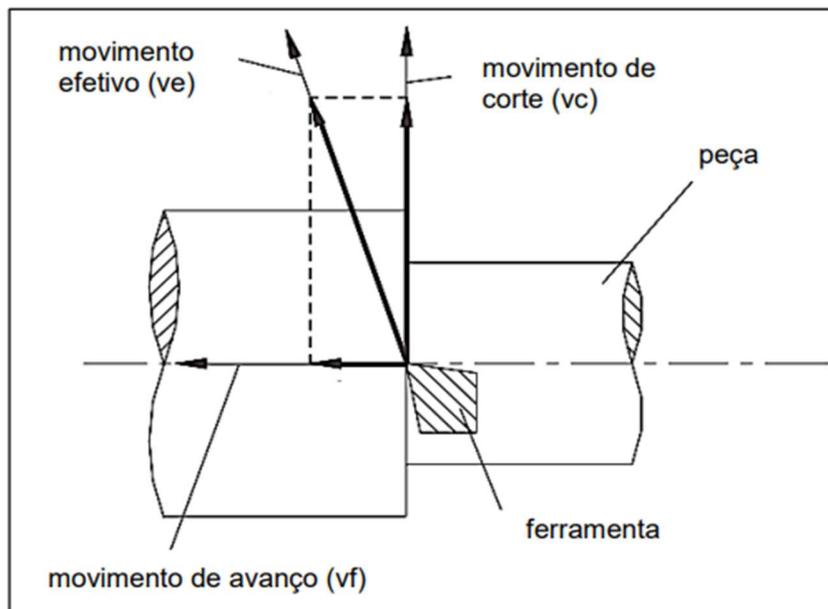
- a) Movimentos ativos: caracterizado por promover a remoção de material por meio da formação do cavaco,
- b) Movimentos passivos: esses são caracterizados por não retirarem material.

Ainda de acordo com, Diniz *et al.* (1999), temos uma subdivisão destes movimentos, onde os ativos são categorizados em:

- Movimento de corte – caracterizado como o movimento que ocorre entre a peça e a aresta de corte, para que se retire material;
- Movimento de avanço – esse se assemelha com o movimento de corte e em conjunto são responsáveis pela retirada contínua de material, ou seja, é o responsável pelo deslocamento da ferramenta de corte ao longo da superfície da peça;
- Movimento efetivo de corte – este representa a resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço.

A Figura 19, traz a representação dos movimentos ativos.

Figura 19- Representação dos movimentos ativos



Fonte: Adaptado de Diniz et al. (1999).

Já os movimentos passivos, são organizados da seguinte forma:

- Movimento de aproximação: esse ocorre entre a ferramenta e a peça, onde antes de usinar, realiza-se a aproximação da ferramenta e da peça.
- Movimento de ajuste: realizado entre a peça e a ferramenta para definir a espessura da camada de material a ser retirada da peça.
- Movimento de correção: também ocorre entre a peça e a ferramenta, mas nesse caso realiza-se a compensação do desgaste da ferramenta, variação térmica, deformação plástica ou qualquer outra variação que ocorra.
- Movimento de recuo: esse movimento ocorre após a usinagem, e é caracterizado pelo afastamento da ferramenta e da peça.

2.8.2 Parâmetros de corte

No processo de torneamento, existe um grupo de parâmetros de corte que devem ser levados em consideração, como potência de corte, força de corte, pressão específica de corte, entre outros. A seguir, tem-se uma breve descrição dos principais parâmetros.

2.8.2.1 Velocidade de corte (V_c)

Para Diniz *et al.* (2008), essa representa a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça. E para os processos de torneamento, fresamento e furação, a velocidade de corte é a resultante do deslocamento da ferramenta na peça quando esta gera cavaco. Essa grandeza pode ser definida pela Equação 1:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \quad (1)$$

Onde:

V_c = velocidade de corte (m/min);

d = diâmetro da peça a ser usinada (mm);

n = frequência de rotação (rpm).

2.8.2.2 Tempo

Esse parâmetro é de grande relevância para a parte econômica do setor produtivo, haja vista que contempla o tempo ativo e passivo. Por tempo ativo ou tempo de corte (T_c), entende-se como o período em que a ferramenta está retirando material da peça. Já o tempo passivo, representa diversas ações que não geram remoção de material, mas apresentam importância para o processo de usinam, como exemplo, pode-se mencionar: colocação e fixação da peça, ajustagem, afastamento e posicionamento da ferramenta, inspeção e retirada da peça (DINIZ *et al.*, 1999).

Para o processo de torneamento, pode-se utilizar a Equação 2, para determinar T .

$$T_c = \frac{L_f}{V_f} \quad (2)$$

Onde:

T_c = tempo em minutos;

L_f = comprimento de avanço em mm;

V_f = velocidade de avanço em mm/min.

2.8.2.3 Avanço (f)

Esse parâmetro pode ser entendido como o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta (FERRARESI, 1977). Em outras palavras, esse parâmetro representa a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, permitindo assim a remoção contínua de material.

2.8.2.4 Velocidade de avanço (V_f)

Para Diniz (2008), a velocidade de avanço pode ser definida como o produto do avanço da ferramenta no material pela rotação a que é destinada na operação, como pode ser observado na Equação 3.

$$V_f = f * n \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \quad (3)$$

Onde:

V_f = velocidade de avanço (mm/min);

f = avanço (mm);

n = rotação (rpm).

2.8.2.5 Profundidade de corte (a_p)

Essa pode ser entendida como a grandeza de penetração com que a aresta de corte penetra transversalmente no material (BRIZOLLA, 2016).

2.8.2.6 Taxa de remoção de material (Q)

Esse parâmetro corresponde a taxa de material removida no decorrer do torneamento. Além disso, é importante destacar que parâmetro está diretamente ligado a velocidade de corte, profundidade de corte e avanço, como pode-se observar na Equação 4 (TEDESCO, 2007).

$$Q = v_c * a_p * f \quad (4)$$

De posse dessa equação, é perceptível que qualquer alteração que cause aumento em algum desses parâmetros, provoca um aumento na quantidade de material removido. Todavia, existe um lado ruim nisso, pois como consequência desses aumentos, têm-se uma redução da vida da ferramenta (TEDESCO, 2007).

2.9 Acabamento superficial

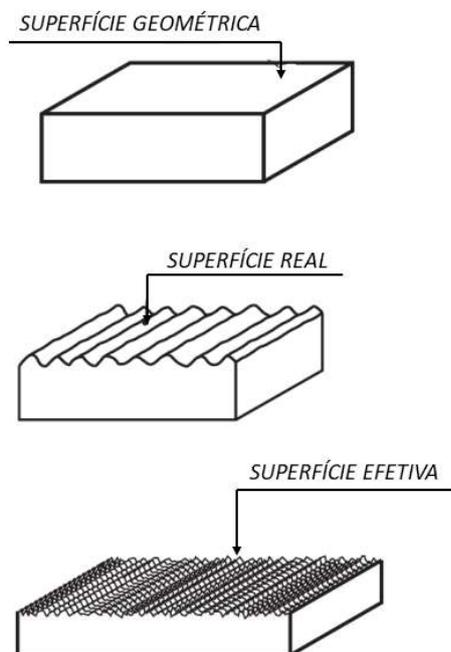
Um dos principais aspectos a serem analisados na produção de peças é o acabamento superficial, haja vista, que diversos setores produtivos exigem elevados graus de precisão. De acordo com Mehl (2017), o acabamento superficial é imprescindível em situações que possuem atrito, desgaste, transmissão de calor, resistência à fadiga, corrosão e superfícies de medição. Outrossim, vale destacar que sua medição ocorre através da rugosidade superficial, que consiste em um conjunto de irregularidades, caracterizados por saliências e reentrâncias macro-geométricas presentes nas superfícies (AGOSTINHO, 2001; FILHO, 2011).

Corroborando com o exposto, Amorim (2012), aponta que as irregularidades estão presentes em todas as superfícies reais e são oriundas em sua grande maioria do método utilizado. E tratando-se de superfícies, a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) traz a seguinte classificação:

- a) Geométrica: refere-se a superfície ideal desejada no projeto, de modo que não haja variações micro-geométricas e macro-geométricas do modelo projetado;
- b) Real: resultante do processo produtivo adotado na produção da peça;
- c) Efetiva: resultados obtidos durante as medições realizadas nas superfícies reais da peça.

A Figura 20, apresenta uma representação dos tipos de superfícies descritas anteriormente.

Figura 20 - Representação dos tipos de superfície: geométrica, real e efetiva

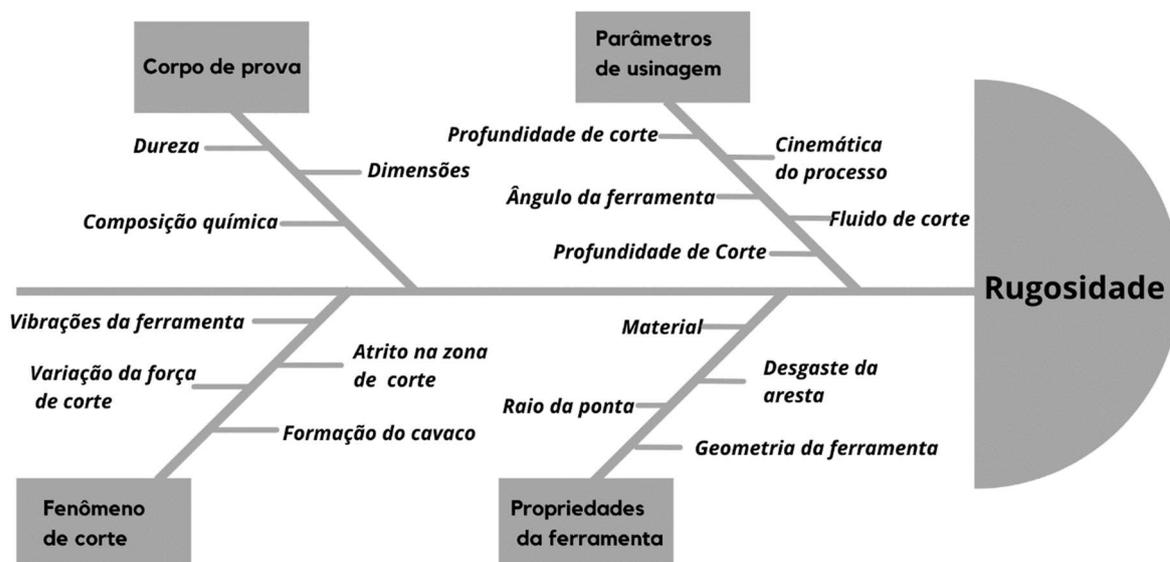


Fonte: Editado de ABNT (2002).

De posse dessa informação, torna-se importante entender a utilização e definição desse parâmetro em processos de usinagem. Hübner (2016), aponta que a rugosidade pode ser especificada conforme a aplicação da superfície usinada, onde pode-se mencionar sua aplicação em: superfícies que necessitam de pintura, superfícies de mancais, além de superfícies que serão utilizadas para escoamento de fluidos. Além disso, vale notabilizar que para os casos anteriores é de suma importância que apresente-se baixa rugosidade, já para os casos em que se lubrifica a superfície, é interessante que se tenha uma rugosidade característica de modo a favorecer a lubrificação.

Ademais, é possível ainda mencionar que a rugosidade pode influenciar no comportamento de determinados fatores de uma peça mecânica, como: resistência à fadiga, ao desgaste e à corrosão, escoamento de fluidos e na capacidade de deslizamento. Além do exposto, é sabido que a rugosidade pode ser influenciada por diversos parâmetros (BAJIC *et al.*, 2012; COLACO e MEDEIROS, 2014). A partir disso, Bajic *et al.* (2012), empregaram o diagrama de Ishikawa, para especificar a relação de influência dos parâmetros, de acordo com as bibliografias existentes. A Figura 21, traz a representação do diagrama anteriormente mencionado.

Figura 21 - Fatores que influenciam a rugosidade



Fonte: Adaptado de Bajic et al (2012).

Vale salientar ainda a influência de determinados parâmetros sobre o acabamento superficial. Os Quadros 1 e 2, trazem um detalhamento sobre a influência desses parâmetros sobre o resultado final da peça. Além disso, vale mencionar que o Quadro 3, elenca os parâmetros que possuem maior influência sobre as peças usinadas, enquanto o Quadro 4, traz a influência de parâmetros secundários.

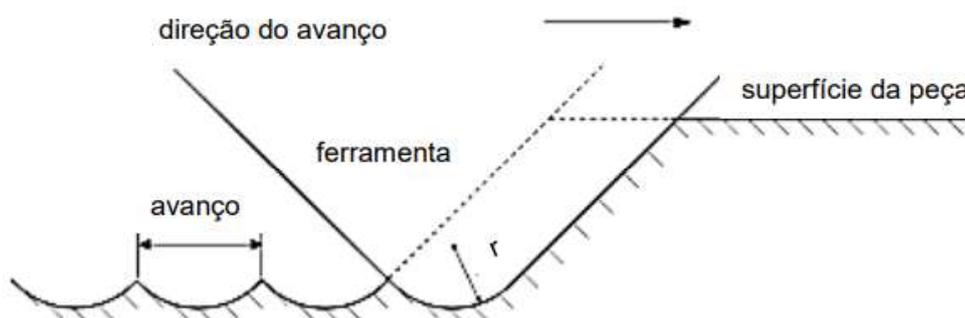
Quadro 3 - Principais fatores que influenciam no acabamento superficial de uma peça.

Velocidade de Corte (V_c)	<ul style="list-style-type: none"> • Baixas velocidade de corte, resulta em peças rugosas, ou seja, mau acabamento superficial; • Incrementos de velocidade de corte tendem a melhorar o acabamento superficial.
Avanço (f)	<ul style="list-style-type: none"> • Esse parâmetro possui influência quando combinado com a V_c. Por exemplo, casos com baixa velocidade de corte e que se aumenta o avanço, resulta em péssimo acabamento superficial. • Outro ponto importante é que à medida que o avanço diminui, há uma redução dos níveis de rugosidade superficial. Entretanto, existe um ponto em que essa redução fará com que a tensão média na superfície de saída da ferramenta aumente, acarretando em um maior fluxo lateral de cavaco e conseqüentemente em um aumento da diferença entre a rugosidade teórica e a medida.
Raio da ponta da ferramenta ($r\epsilon$)	<ul style="list-style-type: none"> • Esses devem ser suficientemente grandes para que possa reduzir as marcas de avanço deixadas na peça pela ferramenta, acarretando assim em uma melhor rugosidade. Todavia, deve-se tomar cuidado, pois raio de ponta muito grande pode gerar vibrações como consequência do aumento dos esforços.

Fonte: Adaptado de Diniz (2010).

A Figura 22, ilustra a representação das marcas do avanço e do raio de ponta da ferramenta sobre uma superfície torneada. Onde é perceptível a geração de irregulares a medida que se avança com a ferramenta sobre a peça usinada.

Figura 22 - Marcas do avanço e do raio de ponta da ferramenta sobre a superfície da peça.



Fonte: Adaptado de Juneja et al. (1987).

Quadro 4 - Fatores secundários que influenciam no acabamento superficial de uma peça.

Geometria da ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> • Quanto maior o ângulo de saída, menor será a força de usinagem e consequentemente teremos rugosidade das superfícies menores, haja vista que as alturas dos picos e as profundidades dos vales produzidos.
Fluído de corte	<ul style="list-style-type: none"> • Sua aplicação pode reduzir o desgaste da ferramenta e o entre peça e ferramenta ou cavaco, resultando em melhores acabamentos superficiais. Todavia, se for usado como refrigerante, pode acarretar em um aumento da resistência ao cisalhamento do material da peça o que resulta em um aumento da força de usinagem, prejudicando, assim, o acabamento da peça.
Vibrações	<ul style="list-style-type: none"> • A presença de vibração durante o processo de usinagem, tende a gerar desgaste na peça e como consequência se tem peças com pior acabamento superficial, devido ao aumento da rugosidade.

Fonte: Adaptado de Diniz (2010) e Inasaki et al (2001).

2.9.1 Parâmetros de rugosidade

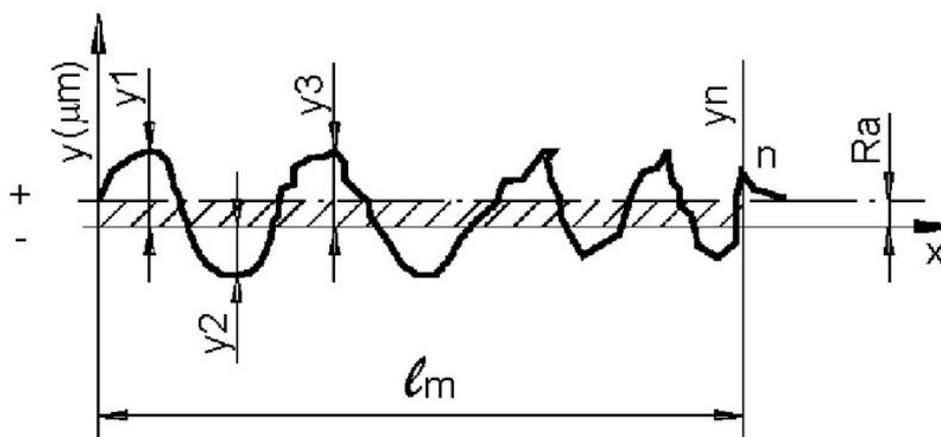
É sabido que as superfícies das peças não possuem perfis padrões, mas distintos. Tornando-se necessário a utilização de indicadores que permitam analisar, quantificar e qualificar os níveis em que essas peças devem ser usinadas, a fim de se obter o acabamento superficial adequado.

Segundo Hübner (2016), existem parâmetros para avaliar quantitativamente a rugosidade, onde os principais são: rugosidade média (R_a), rugosidade média total (R_z), rugosidade máxima (R_y) e rugosidade total (R_t).

2.9.1.1 Rugosidade média (R_a)

A rugosidade média (R_a), pode ser entendida como a média aritmética dos valores reais das ordenadas na extensão da amostragem, ou ainda como a média aritmética do intervalo ordenado de afastamento (y_i) entre os pontos do perfil de rugosidade e a linha média dentro da distância de medição (l_m) (MACHADO *et al.*, 2009; HÜBNER, 2016). Na Figura 23, podem ser observados os parâmetros associados à rugosidade média.

Figura 23- Rugosidade média



Fonte: Editado de Fracaro (2014).

No que diz respeito ao cálculo da rugosidade média, temos uma análise teórica, uma vez que, seus valores são indicativos, visto que, alguns fatores como a vibração e o desgaste das arestas de corte, não podem ser equacionados. Assim sendo, temos a Equação 4, para o cálculo de R_a :

$$R_a = \frac{1}{L_e} * \int_0^L |y| dx \quad (4)$$

De maneira simplificada, utilizamos a Equação 5, para calcularmos Ra.

$$Ra = \frac{A}{Le} [\mu\text{m}] \quad (5)$$

Onde:

A = média da soma das áreas acima e abaixo da linha média;

Le = comprimento analisado para a obtenção de A.

Como mencionado anteriormente, o cálculo desse parâmetro pode sofrer modificações, haja vista que são valores indicativos. Como exemplo, pode-se mencionar sua definição para a operação de torneamento, onde Ra pode ser obtido teoricamente em função do avanço (f) e do raio de ponta ($r\epsilon$). Fazendo uso do equacionamento apresentado por Machado *et al.* (2009), tem-se que:

- Para situações onde o avanço (f) é menor que o raio de ponta ($r\epsilon$) da ferramenta, obtém-se o Ra pela Equação 6:

$$Ra = \frac{f^2}{31,2 * r\epsilon} \quad (6)$$

- Para os casos em que a ferramenta possui raio de ponta muito pequeno ou quando ele não existir, utiliza-se a seguinte Equação 7, para obter o Ra:

$$Ra = \frac{f}{4 * (\tan\theta_s + \tan\theta_e)} \quad (7)$$

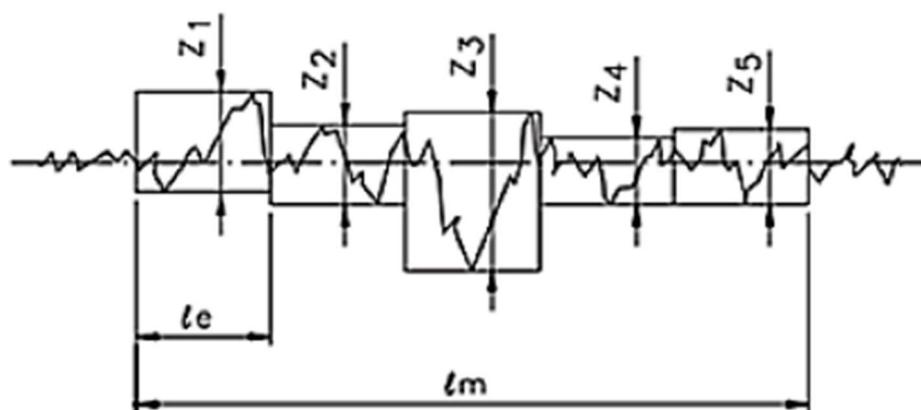
Onde:

θ_s e θ_e = características geométricas da ferramenta de corte.

2.9.1.2 Rugosidade média parcial (Rz)

O parâmetro de rugosidade Rz, é determinado pela média aritmética de cinco valores da rugosidade parcial (Z_i). Onde para se obter Z_i , é necessário que se realize a soma dos valores absolutos dos pontos mais afastados, tanto da parte superior quanto da inferior, com relação à linha média existente no comprimento de amostragem (l_e), como podemos observar na Figura 24 (HÜBNER, 2016).

Figura 24 - Rugosidade média parcial



Fonte: Editado de Fracaro (2014).

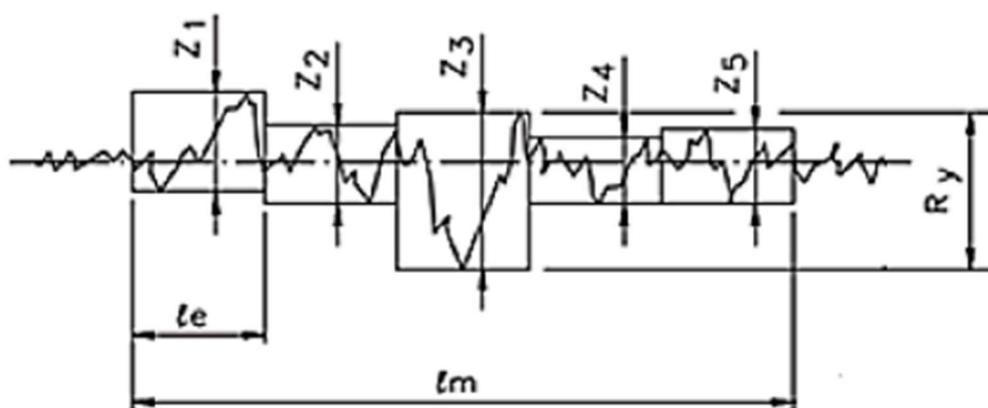
Ademais, vale salientar que para obtenção de valores para R_z , utiliza-se a Equação 8:

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (8)$$

2.9.1.3 Rugosidade máxima (R_y)

A rugosidade máxima (R_y), corresponde ao maior valor entre todas Z_i , ou seja, o maior valor de rugosidade parcial em um dado comprimento de avaliação. (HÜBNER, 2016). A Figura 25, traz uma leitura desse parâmetro, onde é possível observar o maior valor parcial Z_3 .

Figura 25 - Rugosidade máxima

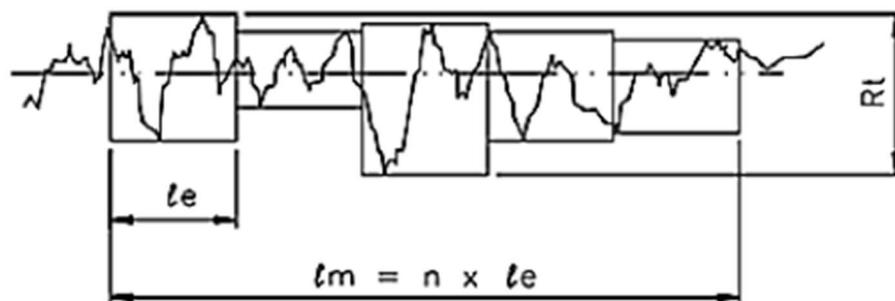


Fonte: Fracaro (2014).

2.9.1.4 Rugosidade total (R_t)

Esse parâmetro, pode ser definido como o maior valor da distância vertical entre o vale mais profundo e pico mais alto em um dado comprimento de avaliação, independentemente dos valores de rugosidade parcial. A Figura 26, traz uma leitura desse parâmetro, onde é possível observar que o pico mais alto está no primeiro comprimento de amostragem, enquanto que, o vale mais profundo localiza-se no terceiro comprimento de amostragem. De modo que a distância entre eles caracteriza a rugosidade total.

Figura 26 - Rugosidade total



Fonte: Fracaro (2014).

Vale salientar que para operações de torneamento, define-se R_t teoricamente em função do avanço (f) e do raio de ponta (r_ϵ). Fazendo uso do equacionamento apresentado por Machado et al. (2009):

- Para situações onde o avanço (f) é menor que o raio de ponta (r_ϵ) da ferramenta, utiliza-se a seguinte Equação 9, para determinar R_t :

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (9)$$

- Já para os casos em que a ferramenta não tenha raio de ponta, ou quando esse for muito pequeno, utiliza-se a Equação 10:

$$R_t = \frac{f}{\tan \theta_s + \tan \theta} \quad (10)$$

Onde:

θ_s e θ_e = características geométricas da ferramenta de corte.

2.10 Manufatura híbrida (MH)

Com o passar dos anos, os processos produtivos vêm sofrendo grandes alterações, uma vez que, a busca por processos mais eficientes e econômicos tem se tornado uma exigência do mercado altamente competitivo. Prova disso, é o levantamento feito em 2019, pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), que estima uma economia de custos industriais de aproximadamente R\$ 73 bilhões/ano, após a migração para a chamada indústria 4.0 (PORTOGENTE, 2019).

Seguindo nessa mesma linha de raciocínio, tem-se o surgimento da manufatura híbrida, que consiste na combinação dos processos de adição de material com a usinagem. Nessa metodologia, realiza-se inicialmente a operação de deposição de material e posteriormente realiza-se a usinagem, ocasionando assim em peças de melhor precisão, bem como um processo produtivo mais eficiente (CORTINA *et al.*, 2018). Além disso, vale salientar que esse modelo se apresenta como viável no que diz respeito ao fator econômico, bem como benéfico ao meio ambiente.

Outrossim, vale salientar que a impressão 3D convencional, utiliza polímeros de baixo ponto de fusão como material produtivo, limitando assim, sua utilização para determinadas aplicações. Visando a diminuir essa limitação e otimizar o processo, pesquisadores têm desenvolvido a impressão 3D para metais, a fim de impulsionar sua utilização no meio fabril. Uma vez que, ao unir esses métodos convencionais, objetiva-se extrair o melhor de cada procedimento e eliminar e/ou otimizar eventuais empecilhos. Visto que, o processo aditivo quando utilizado sozinho não assegura a precisão necessária, à medida que a usinagem possibilita essa precisão e acabamento, necessários (GUESSASMA *et al.*, 2015; NEWMAN *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017).

Tendo em vista a elevada confiabilidade metrológica da manufatura híbrida, e sua alta versatilidade, faz com que esse método seja usado na utilização de diversos produtos como: pás de turbinas, moldes, queimadores de gás e rotores (WILSON *et al.*, 2014).

Diante de todo exposto, é perceptível que essa metodologia tem muito a evoluir e acrescentar ao setor produtivo, entretanto, alguns pontos positivos já podem ser extraídos quando comprado com os métodos tradicionais, onde pode-se mencionar:

- a) variedade de aplicações;
- b) uso adequado e preciso do material;

- c) maior produtividade e assertividade;
- d) menores danos ambientais.

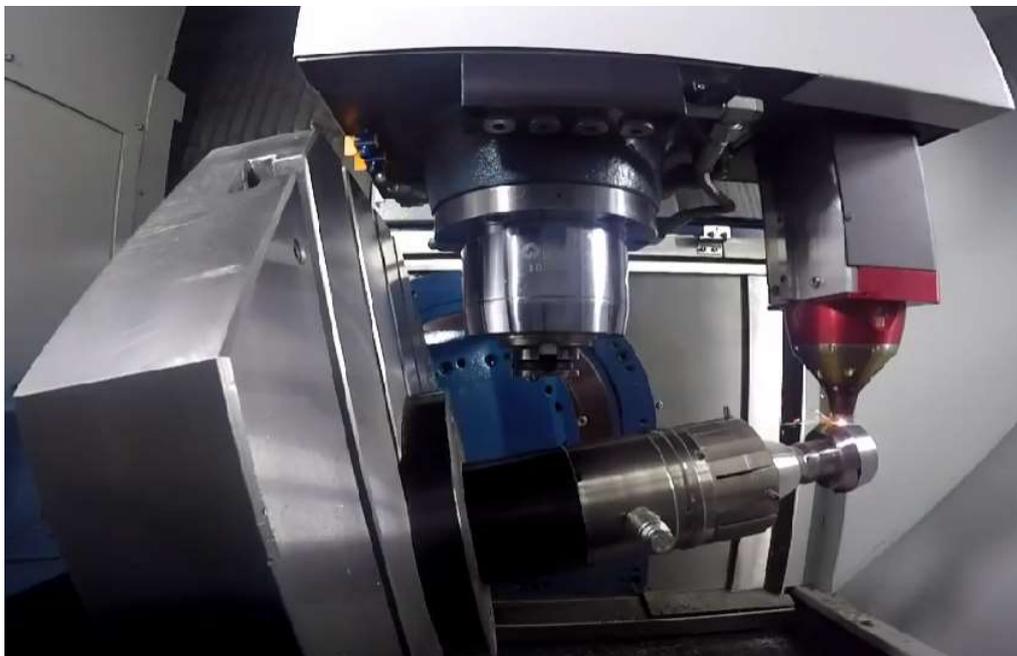
Todavia, é importante salientar que devido ao elevado custo e as exigentes condições de usinagem o avanço e o uso abrangente dessa tecnologia, tem sido limitado.

2.10.1 Máquinas híbridas

No que diz respeito aos equipamentos híbridos, têm-se que as formas variam de acordo com o fabricante, porém o sistema LMD (Laser Metal Deposition), tem-se mostrado muito promissor. Haja vista, a possibilidade de utilizá-lo com máquinas de 2 a 5 eixos, além de possuir sistemas de medição e escaneamento que auxiliam no processo de tomada de decisão (NEWMAN *et al.*, 2015).

Como mencionando anteriormente, as formas do equipamento, variam de acordo com o fabricante. A seguir, temos a Figura 27, que traz a representação de uma máquina usada pela empresa ROMI S/A. Onde é possível observar que cabeçote aditivo é colocado paralelo ao eixo árvore de usinagem (spindle) (ROMI; 2017).

Figura 27 - Máquina híbrida com o cabeçote aditivo paralelo ao eixo árvore de usinagem



Fonte: Indústrias Romi S.A (2015).

Já a Figura 28, traz a representação de uma máquina da empresa DMG MORI, onde o cabeçote laser é acoplado diretamente ao splindle da máquina. Na imagem (a),

temos o spindle montado com o cabeçote aditivo para trabalho, já em (b) temos a ferramenta montada para o processo subtrativo.

Figura 28 - Máquina híbrida com cabeçotes aditivo e redutivo acoplado ao spindle da máquina.



(a)

(b)

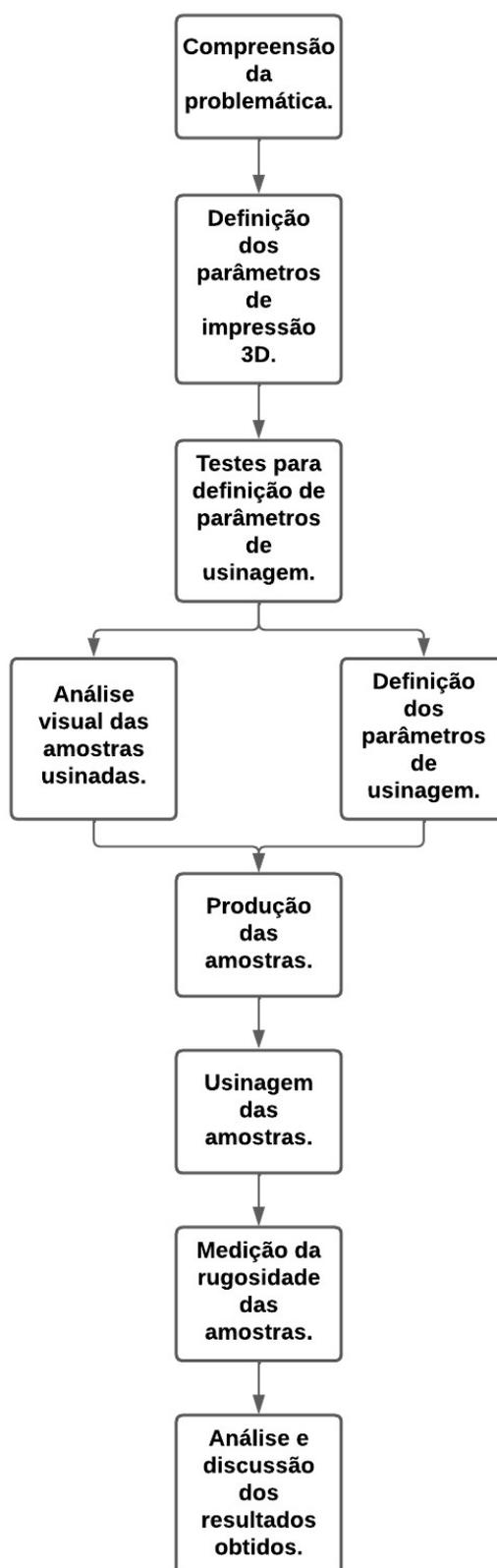
Fonte: DMG-Mori (2015).

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Utilizando como referência a classificação de pesquisa elaborada por Gil (2002), este trabalho classifica-se como do tipo explicativa, bibliográfica, experimental e quantitativo. Uma vez que, busca identificar fatores que justifiquem a ocorrência dos fatos, caracterizando-se assim como explicativa. Já no que concerne ao fator bibliográfico, pontua-se que a pesquisa é realizada com o intuito de fomentar os argumentos, bem como potencializar as bases do estudo. É experimental, por buscar determinar as influências dos parâmetros, sobre o resultado final das amostras e quantitativo por coletar dados concretos que sirvam de base para conclusões.

O fluxograma da Figura 29, ilustra as etapas adotadas para a realização da pesquisa, de modo que, será explorada de forma mais detalhada sobre cada um desses componentes nos tópicos subsequentes.

Figura 29 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor (2022).

3.1 Material e Equipamentos

3.1.1 Filamento de impressão 3D

As amostras foram fabricadas a partir do filamento ABS da fabricante 3DFila®. Uma vez que, esse é um dos materiais mais empregados no método de impressão FDM, tendo em vista que apresenta ótimas propriedades mecânicas, bem como uma excelente opção no que diz respeito ao fator econômico. Ademais, vale salientar que as propriedades dos materiais podem variar de acordo com o fabricante. A Figura 30, apresenta o filamento ABS.

Figura 30 - Filamento ABS



Fonte: Autor (2022).

3.1.2 Impressora 3D

Para a produção das amostras, recorreu-se à impressora 3D de tecnologia FDM da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas. Sendo essa do tipo Core XY, da fabricante GTMax3d e do modelo Core H5. A Figura 31, ilustra a máquina utilizada para a produção das peças.

Figura 31 - Impressora Core H5



Fonte: GTMax 3D (2022).

3.1.3 Instrumentos de Medição

A fim de verificar as dimensões das amostras impressas, utilizou-se de instrumentos com bom nível de precisão, que fossem capazes de apontar com elevado grau de confiabilidade às medições realizadas. Para dimensionar o comprimento e diâmetro das peças, fez-se uso de um paquímetro digital da fabricante Zaas, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Paquímetro digital



Fonte: Autor (2022).

3.1.4 Torno Mecânico

A usinagem de materiais é um meio produtivo muito usado para se chegar a um perfil desejado, além de permitir um bom acabamento nas peças. Partindo desse pressuposto, produziu-se nas amostras regiões de diferentes rugosidades, conforme a variação dos parâmetros de usinagem, para tal utilizou-se do torno mecânico manual da fabricante Nardini, de modelo NODUS 220, da Universidade Federal do Ceará - Campus Russas. Conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 - Torno mecânico



Fonte: Autor (2022).

3.1.5 Rugosímetro

Com o intuito de se obter os resultados das rugosidades das amostras, utilizou-se um Rugosímetro Eletrônico Portátil SR400, da fabricante Starrett®, do Laboratório de Pesquisa Tecnologia em Soldagem (LPTS) do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará. A Figura 34, traz a ilustração deste instrumento.

Figura 34 - Rugosímetro eletrônico



Fonte: Autor (2022).

3.2 Metodologia

3.2.1 Parâmetros de impressão

Mediante o objetivo do presente trabalho, optou-se pela impressão das amostras possuindo os mesmos parâmetros de impressão, haja vista que, o objetivo final seria avaliar a rugosidade após a usinagem dessas peças. Entretanto, vale salientar que experimentos preliminares foram realizados, a fim de determinar qual combinação de parâmetros resultaria em um melhor acabamento.

Finalizado os testes preliminares, adotou-se os parâmetros da Tabela 4, para a produção dos corpos de provas. Além disso, vale salientar que um fator importantíssimo nessa definição foi o tipo de preenchimento, uma vez que esse possui influência significativa sobre o tempo de impressão. A fim de reduzir o tempo de produção, consumo de material e conferir um bom resultado a peça final, optou-se pelo tipo de preenchimento concêntrico, que basicamente, possui como padrão de enchimento uma estrutura interna composta de linhas concêntricas que corresponde ao contorno da peça.

Tabela 4 - Parâmetros dos corpos de provas produzidos.

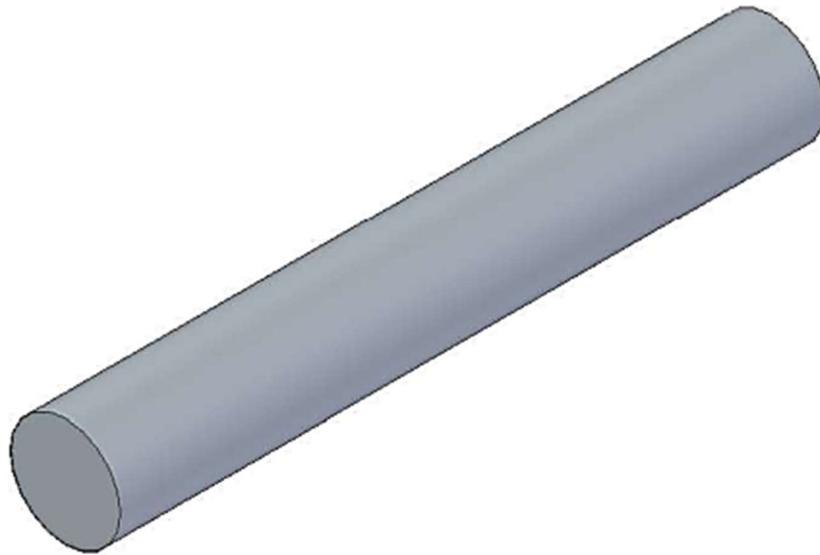
Parâmetros	Especificações	Unidade
Tipo de Preenchimento	Concêntrico	-
Densidade de Preenchimento	100	%
Altura de Camada	0,2	mm
Temperatura de Impressão	235	°C
Temperatura da Mesa	100	°C
Velocidade de Impressão	40	mm/s

Fonte: Autor (2022).

3.2.2 *Corpo de Prova (CP)*

Definidos os parâmetros, realizou-se a impressão de 4 corpos de provas semelhantes, todos com diâmetro inicial de 28 mm e comprimento de 180 mm, aproximadamente. Além disso, vale mencionar que todos foram produzidos utilizando ABS como material. A Figura 35, traz a representação dos modelos de corpos de provas adotado, utilizando o *Software* de CAD SolidEdge®.

Figura 35 – Modelos de corpo de prova adotado.



Fonte: Autor (2022).

3.2.3 Parâmetros de Usinagem

Para a usinagem das amostras, também se realizou testes preliminares, a fim de definir os melhores parâmetros para se trabalhar, assim como descartar aqueles que não apresentarem resultados interessantes. Feito isso, optou-se por realizar experimentos com valores da profundidade de corte (ap) e de raio de ponta da ferramenta constantes, enquanto os parâmetros de avanço (f) e número de rotação (n) decidiu-se fazer variações, a fim de verificar suas influências na rugosidade da peça. Outrossim, vale salientar que utilizou-se o avanço automático durante a usinagem, com a finalidade de não se ter influência externa sobre os resultados obtidos. A Tabela 5 abaixo, apresenta os valores que foram adotados neste estudo.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem.

Rotação(rpm)	Avanço(mm/rot)	Profundidade de corte (mm)	Raio de ponta da ferramenta (mm)
150	0,053	0,5	0,8
1500	0,49	0,5	0,8

Fonte: Autor (2022).

3.2.4 Matriz experimental

O número de combinações pode ser determinado, através da Equação 11, onde o produto é o resultado da multiplicação dos parâmetros que sofrem variações ao longo do procedimento.

$$C = n * f \quad (11)$$

Onde, “C” representa o número de amostras, o “n” representa o número de rotações da máquina e “f” avanço aplicado. Ou seja, a quantidade de amostras que serão produzidas será de $C = 2 \times 2$, resultando assim em um total de 4 amostras que devem ser produzidas. A Tabela 6, traz essas combinações de forma explícita.

Tabela 6 - Parâmetros dos corpos de provas

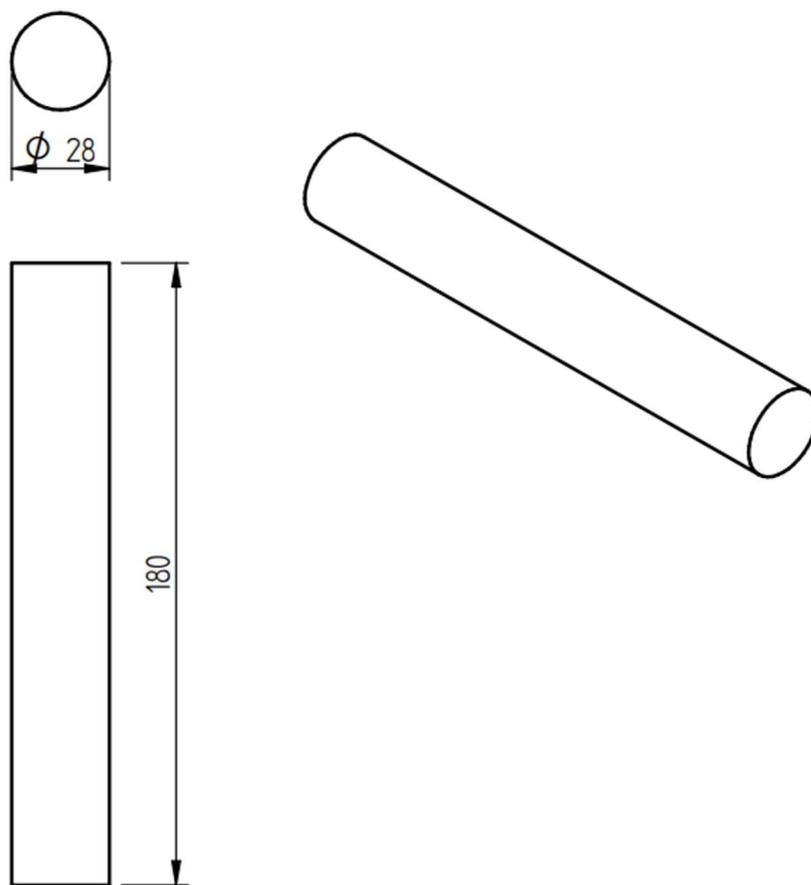
Corpo de prova	Número de Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Profundidade de usinagem (mm)
CP1	1500	0,053	0,5
CP2	1500	0,49	0,5
CP3	150	0,053	0,5
CP4	150	0,49	0,5

Fonte: Autor (2022).

3.2.5 Procedimento de impressão 3D.

Para a fabricação dos corpos de provas, definiu-se dimensões padrões, conforme os resultados dos testes preliminares. Visto que não foi encontrado normas que servissem como diretrizes para definição da geometria e modelo. A Figura 36, ilustra o esboço do modelo de corpo de prova.

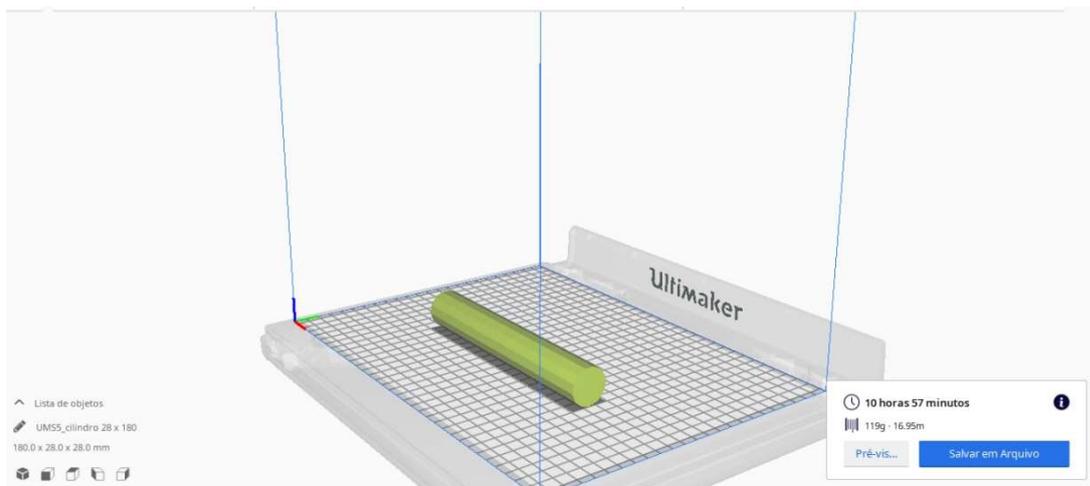
Figura 36 - Representação do corpo de prova.



Fonte: Autor (2022).

Tendo definido as dimensões do CP padrão, utilizou-se o *Software* de CAD SolidEdge® para gerar a modelagem, sendo essa exportada para o formato Standard Template Library – STL. Haja vista, que esse é o formato padrão de leitura em *softwares* de impressoras 3D com tecnologia FDM. O arquivo STL é carregado no *Software* Ultimaker Cura® 4.6.2, que possui a finalidade de realizar o processo de pré-fabricação dos objetos a serem impressos. A Figura 37, ilustra o corpo de prova no *software* de fatiamento.

Figura 37 - Corpo de prova no *Software* Ultimaker Cura®



Fonte: Autor (2022).

Além disso, é imprescindível que salve o modelo na linguagem de programação G-CODE, uma vez que, essa é a linguagem padrão das impressoras 3D. Ao realizar a leitura desse arquivo, a impressora identifica as coordenadas e os parâmetros que serão usados. Outrossim, vale salientar que antes que o filamento fosse depositado na mesa, foi verificado se as temperaturas estavam de acordo com o planejado.

3.2.6 Procedimento de usinagem

O torneamento das amostras foi realizado no Laboratório de Usinagem da Universidade Federal do Ceará do Campus Russas, utilizando-se o torno mecânico da fabricante Nardini, de modelo NODUS 220. Para o processo de torneamento da peça, utilizou-se a ferramenta de corte da empresa Sandvik, de código CNMG 12 04 08 – QM H13A.

Definido os parâmetros de usinagem, foi necessário estabelecer quais condições finais para cada corpo de prova. Para tal, foi estabelecido como critério de parada, a usinagem da peça até um diâmetro de 15 mm e um comprimento de 80 mm. Ademais, vale salientar que foram adotados passos para retirada de material de 0,5 mm, para todas as peças, com avanço automático. As Figura 38 , apresenta a representação do perfil final desejado para os corpos de provas depois da usinagem desenhada no *Software* de CAD SolidEdge®, respectivamente.

Figura 38 - Representação do resultado final do corpo de prova depois da usinagem



Fonte: Autor (2022).

3.2.7 Procedimento de medição da rugosidade

A medição da rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t), foi realizada no Laboratório de Pesquisa Tecnologia em Soldagem (LPTS) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará. Utilizou-se um Rugosímetro Eletrônico Portátil SR400 da empresa Starrett®. Foi empregado um comprimento de medição $L = 4,00$ mm e um comprimento de amostragem $L_c = 0,80$ mm. O “pick-up”, termo em inglês utilizado para identificar o apalpador possui uma ponta com raio de $5 \mu\text{m}$, oferecendo uma resolução de $0,01 \mu\text{m}$. Ademais, vale salientar que as medições foram feitas na direção longitudinal, como representado na Figura 39.

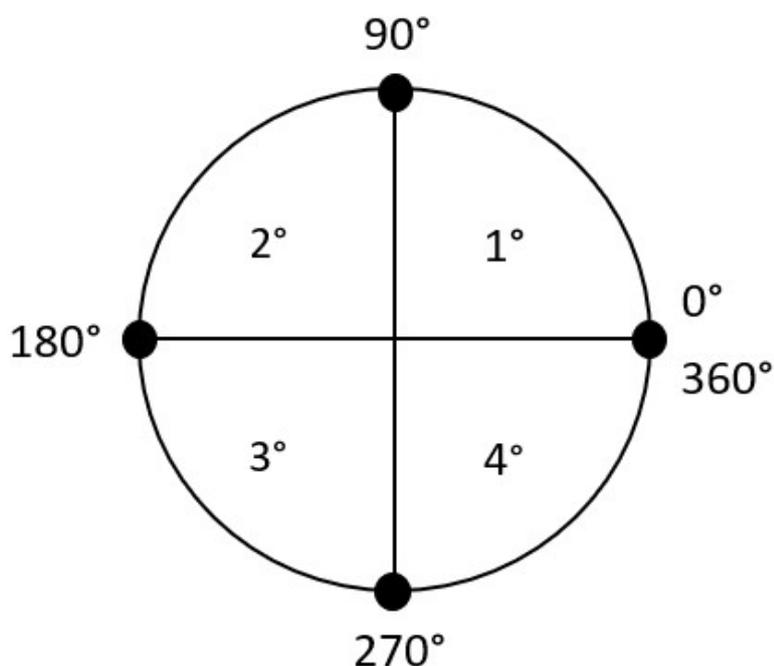
Figura 39 - Medição da rugosidade.



Fonte: Autor (2022).

Para as medições das rugosidades na superfície, a face da peça foi dividida em 4 regiões, denominadas quadrantes, que estavam separados por ângulos de 90°, como pode-se observar na Figura 40.

Figura 40 - Divisão dos quadrantes.



Fonte: Autor (2022).

Outrossim, é importante salientar que tentou-se realizar a medição das rugosidades nas regiões não usinadas, porém não foi possível extrair resultados, uma vez que, essas possuíam regiões que estavam fora do alcance de medição do equipamento, não sendo possível assim extrair resultado concretos e confiáveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos subsequentes, dissertasse sobre os resultados e análises obtidas durante a realização da pesquisa.

4.1 Corpos de prova impressos

Nessa seção, é feita a análise visual da qualidade dos corpos de provas impressos, uma vez que não foi possível extrair resultados quantitativos das rugosidades devido a limitação do equipamento utilizado. Todavia é possível constatar que como mencionado anteriormente, quando o processo aditivo é realizado sozinho, pode acarretar em peças que não apresentam boa qualidade final, necessitando assim de pós-processamento de acabamento. A Figura 41, mostra o resultado final da impressão de um dos quatros corpos de provas produzidos.

Figura 41 - Corpos de provas impressos



Fonte: Autor (2022).

Como esperado, é perceptível que os corpos de provas impressos não apresentam um bom acabamento superficial. Além disso, visualmente é possível constatar que o corpo de prova, apresenta uma considerável região com irregulares na superfície.

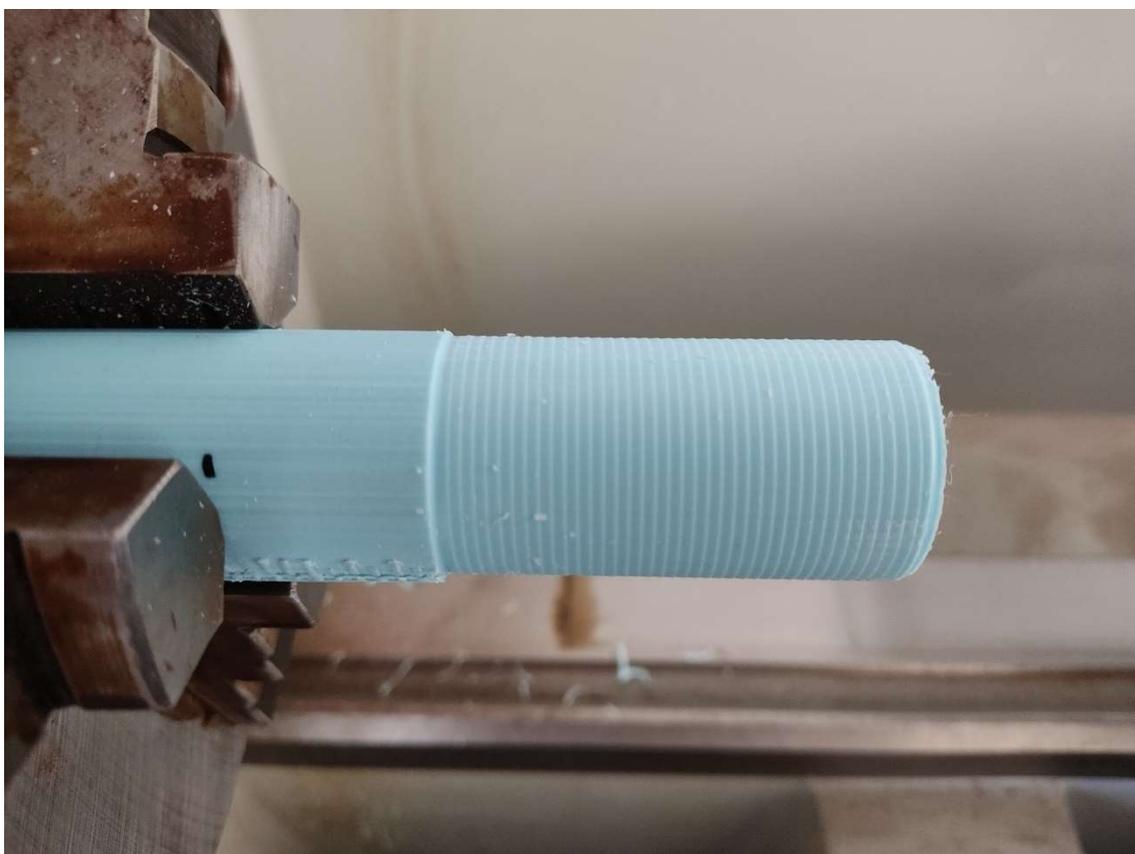
Retificando o que foi mencionado anteriormente, em algumas situações é necessário realizar um pós-processamento, a fim de suavizar a superfície da peça, ou ainda, para corrigir falhas e erros de impressão. Visando melhorar a superfície das peças, realizou-se o torneamento destas.

4.2 Usinagem dos corpos de provas

Conforme informado no item anterior, em alguns casos, após a impressão de peças e objetos, é necessário a realização de um pós-processamento, a fim de assegurar um melhor acabamento e controle dimensional dos elementos produzidos. Dessa maneira, a fim de garantir tais resultados aos corpos de provas, realizou-se o torneamento destes.

Durante o processo, constatou-se que após os passos iniciais, a superfície produzida, não apresentava com um bom acabamento. Haja vista, a presença de irregularidades ao longo de toda a peça trabalhada, como pode-se observar na Figura 42.

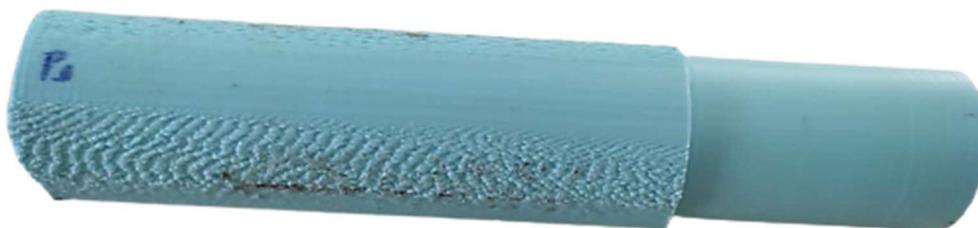
Figura 42 - Início do torneamento das peças.



Fonte: Autor (2022).

Todavia, a intenção de utilizar o processo de torneamento como pós-processamento, era garantir o melhor acabamento possível. Desse modo, realizou-se mais alguns passos, a fim de chegar a um acabamento que visualmente, apresenta-se como interessante ou de boa qualidade. As Figuras 43 e 44, trazem o resultado de alguns corpos de provas após a usinagem.

Figura 43 - Vista lateral do corpo de prova usinado



Fonte: Autor (2022).

Figura 44 - Corpo de prova usinado



Fonte: Autor (2022).

4.3 Análise da rugosidade

Os resultados das medições de Ra, para as quatro amostras, podem ser observados na Tabela 7. Além disso, é importante salientar que foram realizadas cinco medições de rugosidade média em quatro regiões distintas de cada CP.

Tabela 7 - Parâmetros de corte e valores de Ra obtidos para todos os corpos de provas.

Corpo de Prova 1

Quadrantes	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Ra4 (μm)	Ra5 (μm)
1°	1500	0,053	0,73	0,74	0,77	0,81	0,78
2°	1500	0,053	0,75	0,64	0,83	0,67	0,74
3°	1500	0,053	0,69	0,68	0,68	0,63	0,65
4°	1500	0,053	0,75	0,64	0,67	0,7	0,82

Corpo de Prova 2

Quadrantes	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Ra4 (μm)	Ra5 (μm)
1°	1500	0,49	8,81	0,74	7,13	8,06	7,81
2°	1500	0,49	6,75	0,64	7,56	8,09	6,74
3°	1500	0,49	7,74	0,68	7,46	8,55	7,11
4°	1500	0,49	5,99	7,38	7,22	5,17	6,32

Corpo de Prova 3

Quadrantes	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Ra4 (μm)	Ra5 (μm)
1°	150	0,053	0,67	0,7	0,7	0,69	0,67
2°	150	0,053	0,75	0,71	0,66	0,67	0,66
3°	150	0,053	0,65	0,85	0,79	0,7	0,7
4°	150	0,053	0,64	0,73	0,71	0,77	0,62

Corpo de Prova 4

Quadrantes	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Ra4 (μm)	Ra5 (μm)
1°	150	0,49	7,13	7,22	6,9	7,59	7,44
2°	150	0,49	7,49	7,03	6,45	7,26	6,09
3°	150	0,49	7,1	7,36	7,72	7,33	7,02
4°	150	0,49	7,13	7,22	6,9	7,59	7,44

Fonte: Autor (2022).

De maneira análoga ao processo de medição usado para determinar Ra, também foram feitas medições para se obter Rt. A Tabela 8, apresenta os valores obtidos para esse parâmetro.

Tabela 8 - Parâmetros de corte e valores de Rt obtidos para todos os corpos de provas.

Corpo de Prova 1

Quadrantes	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Rt1 (μm)	Rt2 (μm)	Rt3 (μm)	Rt4 (μm)	Rt5 (μm)
1°	1500	0,053	6,27	6,11	6,47	7,89	6,68
2°	1500	0,053	7,35	5,59	6,65	5,92	5,99
3°	1500	0,053	6,43	5,64	6,03	9,19	6,24
4°	1500	0,053	7,79	6,09	5,9	6,71	6,6

Corpo de Prova 2

Quadrantes	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Rt1 (μm)	Rt2 (μm)	Rt3 (μm)	Rt4 (μm)	Rt5 (μm)
1°	1500	0,49	38,88	28,12	33,05	38,37	29,96
2°	1500	0,49	28,47	32,58	31,07	35,7	29,97
3°	1500	0,49	35,98	32,91	30,65	33,58	35,45
4°	1500	0,49	24,96	29,52	43,47	36,2	29,96

Corpo de Prova 3

Quadrantes	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Rt1 (μm)	Rt2 (μm)	Rt3 (μm)	Rt4 (μm)	Rt5 (μm)
1°	150	0,053	5,46	5,78	8,25	8,25	0,94
2°	150	0,053	6,12	7,04	6,95	6,95	0,84
3°	150	0,053	5	8,49	6,79	7,26	1,05
4°	150	0,053	5,42	7,4	6,87	6,87	0,94

Corpo de Prova 4

Quadrantes	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Rt1 (μm)	Rt2 (μm)	Rt3 (μm)	Rt4 (μm)	Rt5 (μm)
1°	1500	0,49	33,28	33,79	29,26	35,09	31,74
2°	1500	0,49	31,91	28,82	25,85	30,18	24,64
3°	1500	0,49	32,9	32,62	31,27	36,32	28,86
4°	1500	0,49	29,34	30,38	34,26	33,18	28,61

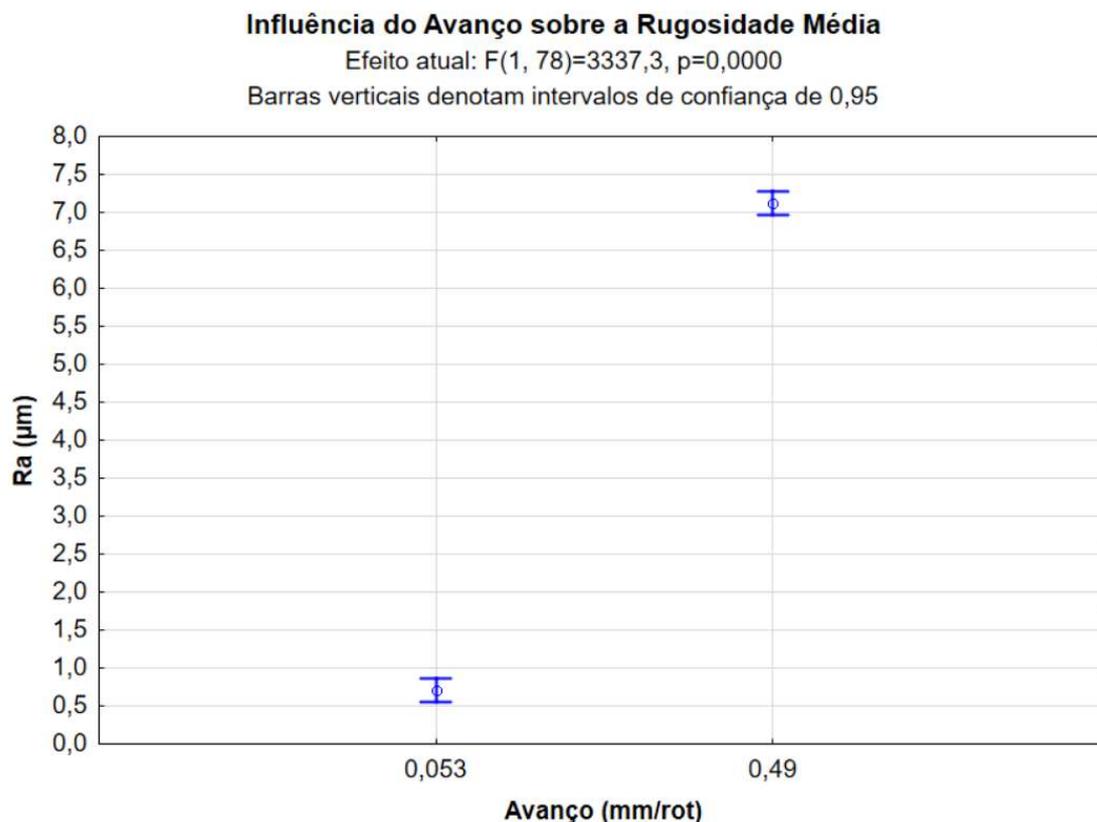
Fonte: Autor (2022).

Com a finalidade de se obter uma melhor análise da influência dos parâmetros sobre a rugosidade média e rugosidade total, fez-se a análise estatística por intermédio da ferramenta de Análise de Variância (ANOVA), onde foi possível gerar gráficos que permitam analisar os efeitos que os parâmetros de usinagem exerciam sobre as variáveis de respostas. Outrossim, vale salientar que se adotou um critério de rejeição para testar o efeito da interação, onde a probabilidade de significâncias “p-valores” das tabelas da ANOVA, devem ser menores que o nível de significância (5%), uma vez que, os gráficos obtidos possuem confiabilidade de 95%.

4.4 Efeitos do avanço sobre a rugosidade média

Na Figura 45, é possível observar o efeito que o avanço, possui sobre a rugosidade média da peça final. Tal, análise foi possível, graças a utilização da ANOVA.

Figura 45 - Influência do avanço sobre a rugosidade média.



Fonte: Autor (2022).

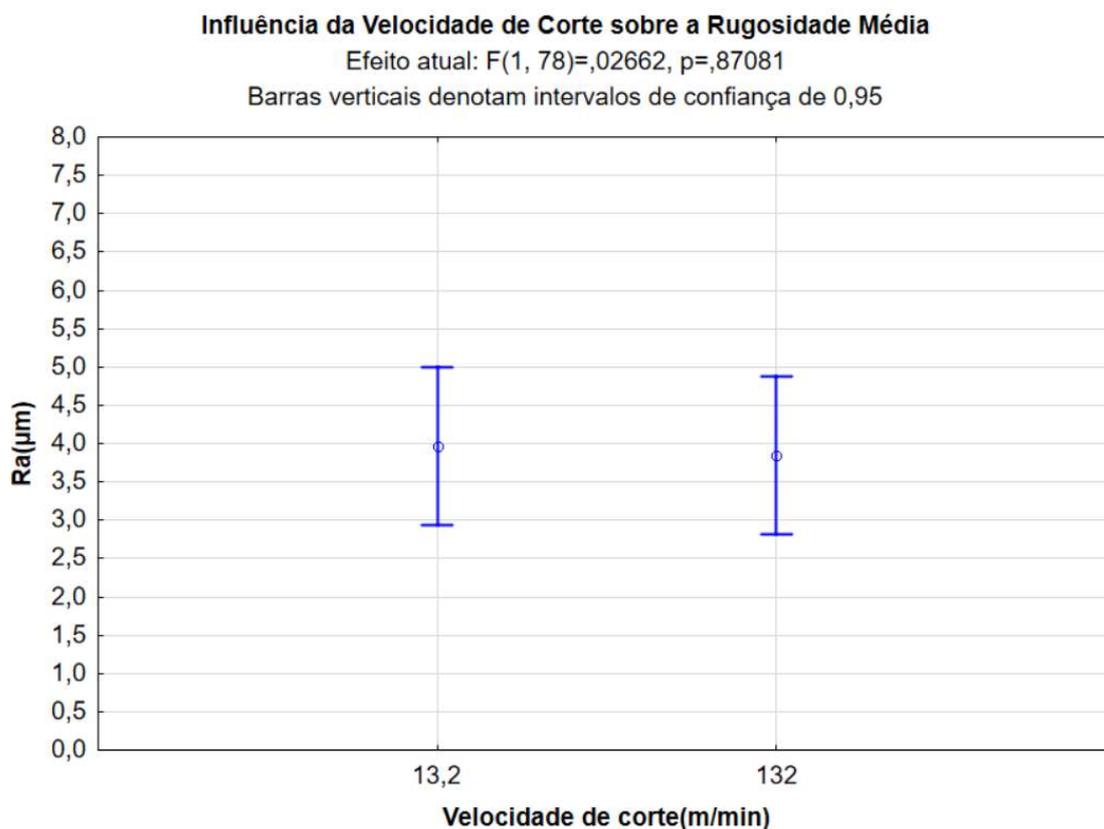
Através da Figura 45, constatou-se que o avanço é um parâmetro que possui influência significativa na rugosidade média. Uma vez que, ao aumentar o valor, tem-se um aumento na rugosidade média, ou seja, um pior acabamento superficial. Esse comportamento era esperado, tendo vista a Equação 6, que apresenta Ra como variável dependente do avanço. Além disso, ao realizar uma avaliação da Figura 45 juntamente com a Tabela 7, consta-se que os corpos de provas 2 e 4 que estão sujeitos aos maiores avanços, apresentam maiores valores de rugosidade média.

Corroborando com isso, Nunes (2011), afirma que o avanço possui grande influência no acabamento final da peça, uma vez que quanto menor o avanço, melhor será o acabamento final, ao passo que, ao se aumentar o avanço tem-se uma piora no acabamento superficial final. Tal efeito, é justificado pelo aumento da distância entre os picos de rugosidades existentes na peça.

4.5 Efeitos da velocidade de corte sobre a rugosidade média

A ANOVA, possibilita constatar quais parâmetros possuem influência sobre a rugosidade, bem como, aqueles que não possuem significância sobre o resultado final. A Figura 46, mostra o comportamento da rugosidade em decorrência da variação de velocidade de corte.

Figura 46 - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade média.



Fonte: Autor (2022).

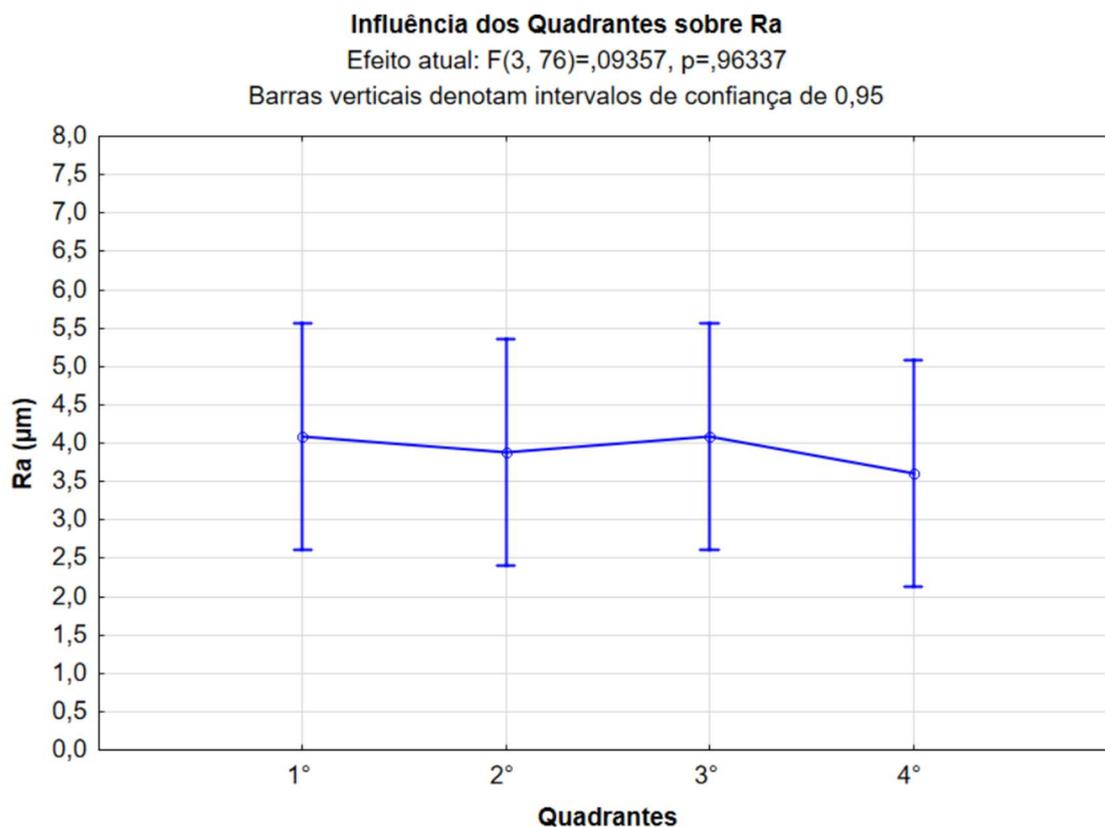
Por meio da Figura 46, foi possível observar que a velocidade de corte, não possui influência significativa sobre Ra. Visto que, ao se utilizar velocidades de cortes distintas, com variação de valores na casa de 10 vezes maiores, não foi possível detectar variação significativa na rugosidade média, permanecendo essa, praticamente constante. Esse comportamento era esperado, tendo vista que a Equação 6, não mostra dependência de Ra em função de Vc.

Confirmando isso, Nunes (2011), destaca que a velocidade de corte não é relevante sobre o acabamento final da peça, haja vista que ao se aumentar seu valor, não se constata variações na qualidade final do objeto.

4.6 Efeitos dos quadrantes sobre a rugosidade média

Como mencionado anteriormente, a ANOVA, permite avaliar quais parâmetros possuem influência sobre o resultado final. Desse modo, a Figura 47, traz a influência de regiões distintas da peça impressa, sobre a rugosidade média.

Figura 47 - Influência dos quadrantes sobre a rugosidade média.



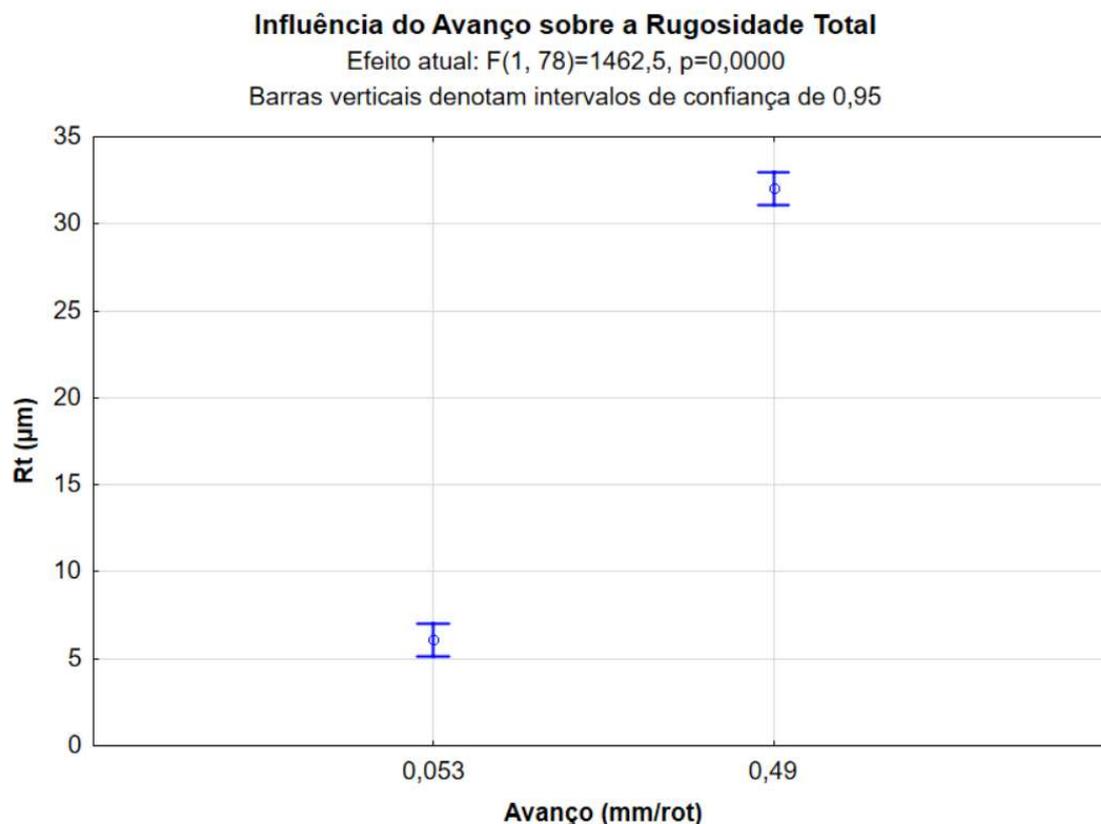
Fonte: Autor (2022).

A Figura 47, mostra que a variação das regiões de medição não possui influência sobre o valor final de Ra. Haja vista, que foram feitas medições em quatro regiões distintas e não se constatou uma influência significativa sobre o resultado final. De fato, se analisarmos a Equação 6, não observamos menção de dependência de Ra sobre esse parâmetro, porém como trata-se de um material impresso, era válido constatar se regiões extremas e centrais, apresentariam influência sobre Ra. Todavia, como já foi mencionado, esse parâmetro não impactou nos resultados de Ra obtidos.

4.7 Efeitos do avanço sobre a rugosidade total

Na Figura 48, é possível observar o efeito que o avanço, possui sobre a rugosidade total da peça final. Tal, análise foi possível, graças a utilização da ANOVA.

Figura 48 - Influência do avanço sobre a rugosidade total.



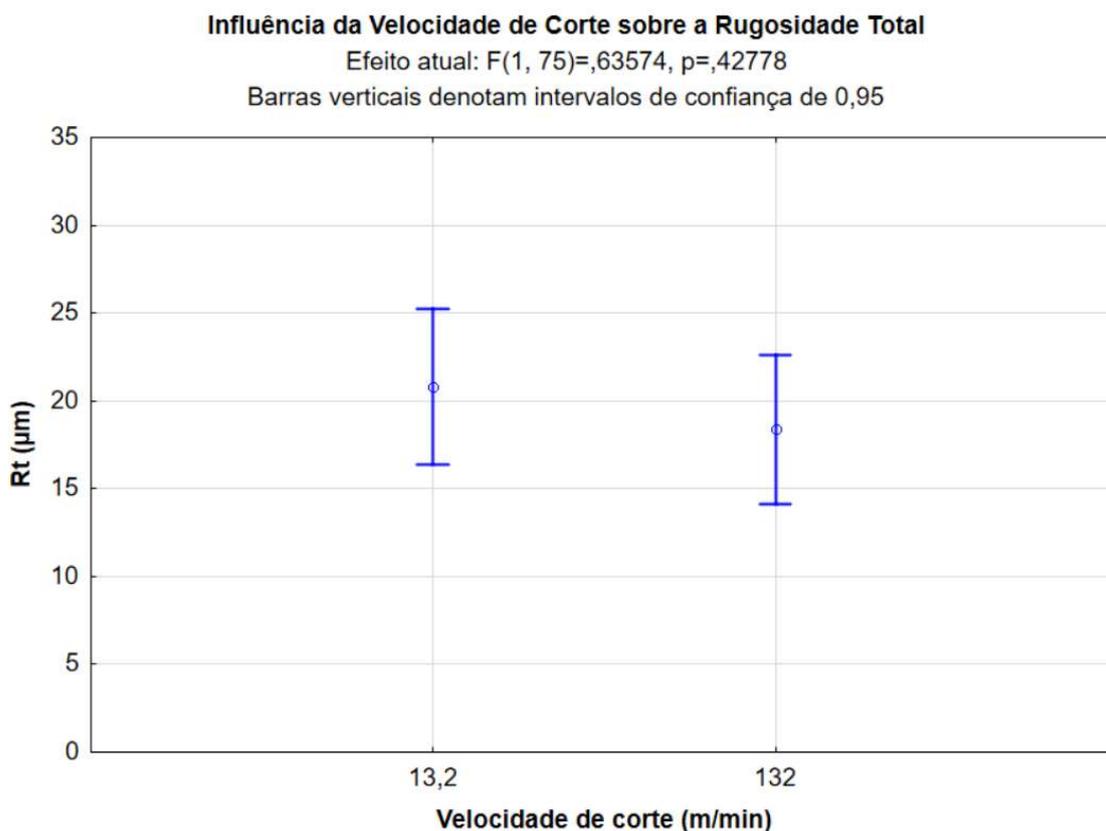
Fonte: Autor (2022).

Vimos que R_t , representa o maior valor da distância vertical entre o vale mais profundo e pico mais alto em um dado comprimento de avaliação, independentemente dos valores de rugosidade parcial. De tal modo, realizou-se experimentos que resultaram nos valores da Tabela 8. A fim, de entendermos melhor esse parâmetro, foi verificado se o avanço possuía influência significativa sobre o resultado final de R_t . Por meio da Figura 48, constatou-se que ao aumentar o valor do avanço, tem-se um aumento na rugosidade total, ou seja, esse parâmetro possui influência direta sobre o resultado final. Todavia, vale salientar que esse comportamento era esperado, haja vista a Equação 9, que apresenta R_t como variável dependente do avanço.

4.8 Efeitos da velocidade de corte sobre a rugosidade total

A ANOVA, permite verificar quais parâmetros possuem influência sobre a rugosidade, bem como, aqueles que não possuem interferência sobre os resultados obtidos. A Figura 49, mostra o comportamento da rugosidade em decorrência da variação de velocidade de corte.

Figura 49 - Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade total.



Fonte: Autor (2022).

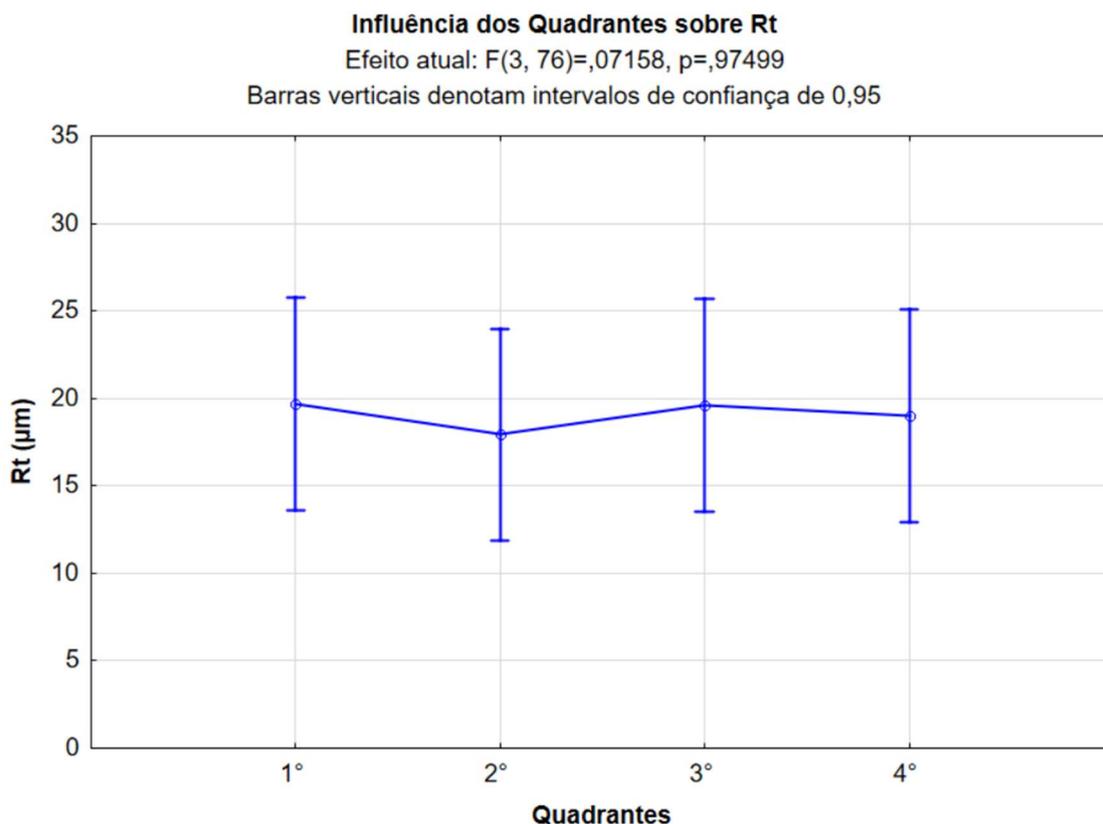
Analisando a Figura 49, é possível constatar que a velocidade de corte, não tem influência sobre os valores obtidos de R_t . Pode-se enfatizar que a primeira velocidade de corte, foi dez vezes maior que a segunda, e mesmo assim, não foi possível detectar variações significativas na rugosidade total.

Contudo, pode-se mencionar que esse comportamento era esperado, pois ao se analisar a Equação 9, não se constata dependência de R_t , em relação a V_c . De tal modo, torna-se intuitivo constatar, que esse parâmetro não apresentaria grandes influências sobre o resultado final.

4.9 Efeitos dos quadrantes sobre a rugosidade total

É sabido, que a ANOVA, possibilita avaliar os parâmetros que possuem influência sobre os resultados obtidos. De tal modo, utilizou-se essa ferramenta para gerar a Figura 50, e assim verificar a influência de regiões distintas da peça impressa, sobre a rugosidade total.

Figura 50 - Influência dos quadrantes sobre a rugosidade total.



Fonte: Autor (2022).

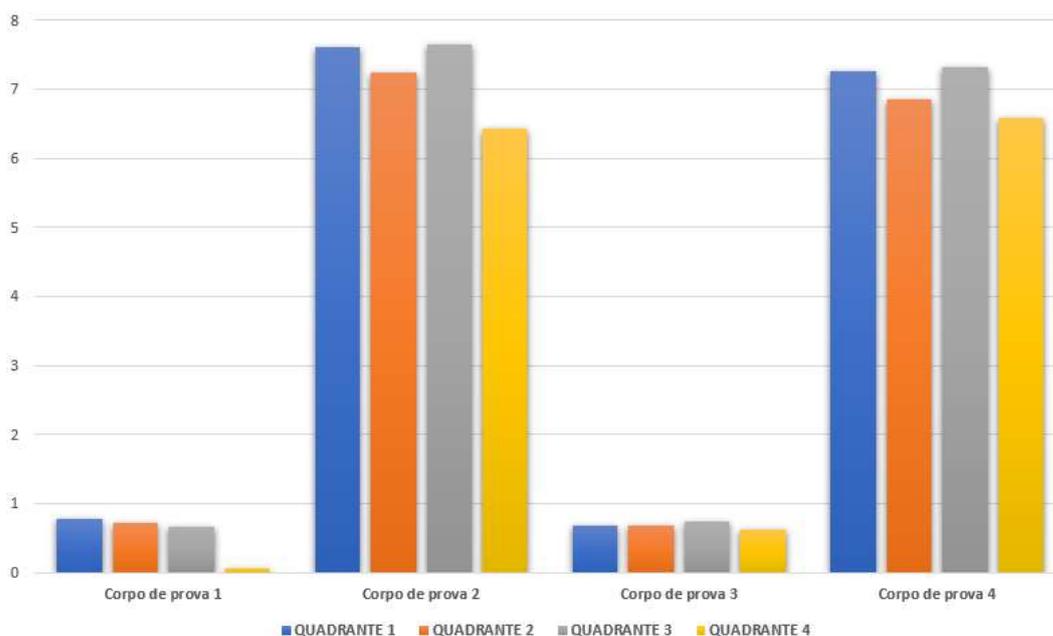
Analisando a Figura 50, pode-se constatar que a variação de regiões de medição, não apresentaram influência significativa sobre os resultados de Rt obtidos. Entretanto, esse resultado era esperado, pois ao analisar a Equação 9, não observamos menção de dependência de Rt com relação as regiões de medições.

4.10 Comparativo entre os corpos de provas

4.10.1 Comparativo entre os valores de Ra btidos para os corpos de provas.

A fim de verificar qual corpo de prova apresentou, melhor acabamento superficial, plotou-se os resultados obtidos em gráficos, com a finalidade de facilitar a análise dos resultados. A Figura 51, representa o gráfico com valores da rugosidade média por quadrantes de cada um dos corpos de provas.

Figura 51 - Comparativo entre os valores de rugosidade média para cada corpo de prova.



Fonte: Autor (2022).

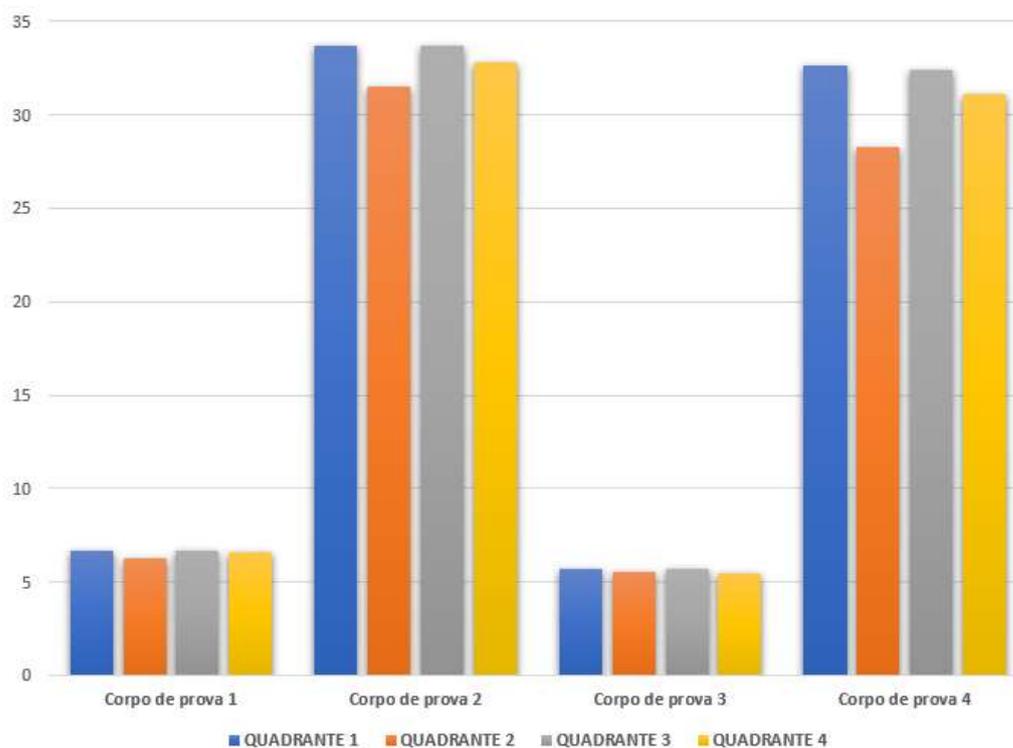
Analisando a Figura 51, pode-se constatar que os corpos de provas 1 e 3, apresentam menores valores de Ra e conseqüentemente melhores acabamentos superficiais. De fato, esse resultado era esperado, haja vista que essas amostras apresentam os menores valores de avanço.

Além disso, quando se estende a análise e realiza um comparativo entre os corpos de provas 1 e 3, constata-se que a o corpo de prova 3, apresenta um melhor acabamento, uma vez que, apresenta menores valores para a rugosidade média.

4.10.2 Comparativo entre os valores de R_t obtidos para os corpos de provas.

De maneira análoga as constatações feitas para a rugosidade média dos corpos de prova, também foi elaborado um gráfico que contém o comparativo dos resultados de rugosidade total obtido para cada corpo de prova. A Figura 52, apresenta esse comparativo.

Figura 52 - Comparativo entre os valores de rugosidade total para cada corpo de prova.



Fonte: Autor (2022)

Analisando a Figura 52, é possível concluir que os corpos de provas 1 e 3, apresentam menores valores de R_t . Todavia, esse resultado já era esperado, haja vista que essas amostras apresentam os menores valores de avanço. Outrossim, vale mencionar que quando se estende à análise a um comparativo entre os corpos de provas 1 e 3, constata-se que o corpo de prova 3, apresenta menores valores que valores para R_t e consequentemente melhor acabamento superficial.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho, teve como objetivo analisar como os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e regiões usinadas), influenciam no acabamento final dos corpos de provas produzidos através da impressão 3D, utilizando como material o filamento ABS. Desse modo pôde-se concluir que:

1. Mesmo a manufatura aditiva sendo moderno, eficiente e promissor, ainda precisa evoluir, haja vista que o acabamento final das peças se apresenta como um ponto fraco desse método;
2. A combinação da manufatura aditiva com o processo de torneamento, garantiu um melhor acabamento superficial as peças;
3. Ao se variar os parâmetros de usinagem, constatou-se que o avanço (f), apresentou-se como parâmetro que possuiu maior influência sobre os resultados das rugosidades média e total. Entretanto a variação da velocidade de corte (V_c) e de locais de medição, não apresentaram influência sobre os resultados obtidos da rugosidade média e rugosidade total.
4. Os corpos de provas que apresentaram melhores resultados foram aqueles submetidos ao menor avanço.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência desses parâmetros (velocidade de corte, avanço) em outros materiais, como o PLA.
- Analisar a influência do raio de ponta da ferramenta sobre a rugosidade média e total.
- Analisar e realizar o comparativo da influência da variação dos parâmetros de impressão (altura de camada, nível de preenchimento e velocidade de impressão) com os obtidos nesse trabalho.
- Analisar a influência dos parâmetros (velocidade de corte, avanço e raio de ponta da ferramenta) em outros processos de usinagem, como o fresamento.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. T. F. **Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de engenharia, Universidade de Porto. Porto, Portugal, 2017.
- ALAFAGHANI, A et al. **Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method**. *Journal of Manufacturing Processes* no. 36:164-174; 2018.
- ALBUQUERQUE, A. J. **Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas**. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Espanha, 2014.
- ANTAS, A. F. F. **Utilização das tecnologias de prototipagem rápida na área médica**. Porto, Portugal, 2007.
- APRENDA a usar diferentes diâmetros de bicos para impressoras 3D! **3DLAB**, 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/bicos-para-impressoras-3d/#:~:text=Um%20dos%20di%C3%A2metros%20padr%C3%B5es%20dos,e%20pode%20trazer%20v%C3%A1rios%20benef%C3%ADcios.>>. Acesso em 16 dez 2021.
- ARAUJO, G. G.; DETREGIACHI FILHO, E.; OLIVEIRA, L. L.; HERRERA, V. E. **A Impressão 3D e os Parâmetros que influenciam no Produto Final**. In: SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção, 2017, Bauru - SP. Anais do XXIV Simpósio de Engenharia de Produção, 2017. v. XXIV.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 4287**: informação e documentação: rugosidade - método do perfil: termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- AZIMI, P. et al. **Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments**. EUA, 2016.
- BAJI, D; CELENT, L; JOZIC, S. **Modeling of the Influence of Cutting Parameters on the Surface Roughness, Tool Wear and Cutting Force in Face Milling in Off-Line Process Control**. *Strojniški Vestnik – Journal Of Mechanical Engineering*, [s.l.], v. 58, n. 11, p.673- 682, 15 nov. 2012.
- BARROS, A. M. P. C. **Síntese e caracterização de um polímero biodegradável. Mestrado em Química da Universidade do Minho**, 2011. Disponível em:<<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/18454/c382ngela20Maria20Pu ga20Caridade20de20Barros.pdf>>. Acesso em 09 mar. 2022
- BATES-GREEN, K., HOWIE, T. **Materials for 3D Printing by Fused Deposition**. Edmonds Community College, 2017. p. 21.
- BELL, C. **3D Printing with Delta printers**. Nova Iorque: Springer Science+Business Media. 2015.
- Bernardo, M. P et al. **Processamento e aplicação de biomateriais poliméricos: avanços recentes e perspectivas**. *Quim. Nova*, Vol. 44, No. 10, 1311-1327, 2021.

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHYSSOLOURIS, G. **Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review**. In: Int. J. Adv. Manuf. Technol. Atenas, Grécia, v. 83, p. 389-405, 2015.

BRIZOLLA, E. S. **Análise comparativa da influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade em torneamento de aço de baixo carbono**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, 2016.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. **Fundamentals of machining and machine tools**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1989.

CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENARO, M.; **Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development**. Trieste, Italy, 2013. p.25-60

CASTILLO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 2005. p. 134.

CHENG, Guo-jian et al. **Industry 4.0 Development and Application of Intelligent Manufacturing**. 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (isai), Hong Kong, p.407-410, jun. 2016. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISAI.2016.0092>. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7816745>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Editora, 1986.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid prototyping: principles and applications**. Ed 3. New York, EUA, 2010. ISBN: 978-9810245160.

COLACO, G. A.; MEDEIROS, I. D. M. **Análise da influência dos parâmetros de usinagem sobre a rugosidade no torneamento cilíndrico externo em corte a seco e com abundância de fluido de corte**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 34^o., 2014, Curitiba. Anais. Curitiba: ABEPRO, 2014. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2014_TN_STO_196_109_23480.pdf>. Acesso em 19 mar. 2022.

CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J. I.; RUIZ, J. E.; UKAR, E. **Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations**. *Materials*, v. 11, n. 12, p. 2583, 2018.

CUNICO, M. **Impressoras 3D: o novo meio produtivo**. 1. ed. Curitiba: Concep3D Pesquisas Científicas Ltda. 2015.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: MM Editora, 1999.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

DMG-Mori. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=oaIOrQi2HLM>>. Acesso em 01 mai 2022.

FERNANDES, J. F. M. **Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2016.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FERREIRA, A. C.; LAFRATTA, F.H. **Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas**. Santa Catarina, Brasil, 1998.

FERREIRA, L. A. S.; PESSAN, L. A.; JUNIOR, E. H. **Comportamento mecânico e termo-mecânico de blendas poliméricas pbt/abs**. In: Polímeros: [s.n.]. v. 7, n. 1, p. 67–97, 1997.

FILAMENTO PARA IMPRESSORA 3D. **3DLAB**, 2020. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/categoria-produto/filamento-para-impressora-3d/filamento-petg/>>. Acesso em 05 mar 2022.

FISCHER, M.; **Estudo para readequação, ao de uma impressora 3d de baixo custo para impressão de materiais poliméricos de alta temperatura de processamento**. 2018. Trabalho de conclusão de curso - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2018.

FRACARO, J. **Rugosidade**. Londrina, 2014. Color. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/janainaf/metrologia/aulas/AULA_16.pdf/at_download/file>. Acesso em 06 abr 2022.

FRESAMENTO. **Sandvik**, 2021. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/silent_tools/silent-tools/pages/milling.aspx>. Acesso em 06 jan 2022.

FUNDAMENTOS dos Processos de Usinagem. USP, 2011. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>>. Acesso em 15 mar 2022.

GARLOTTA, D. **A Literature Review of Poly (Lactic Acid)**. Journal of Polymers and the Environment 9, p. 63–84, 2001.

GEBHARDT, A., & HOTTER, J.-S. **Additive Manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing**. (C. Verlag, Ed.) Cincinnati, Ohio, Estados Unidos: Hanser Publications, 2016.

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

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª.ed. São Paulo: Atlas S/A, 2002.

GORNI, A. A. **Prototipagem rápida, a revolução 3D**. Plástico Industrial, São Paulo, nov. 2013. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/Gorni_PI_Nov2013.pdf>. Acesso em 16 mar 2021.

GRIMM, T. **Rapid prototyping benchmark: 3D printers**. T. A. Grimm Associates Inc. 2003. Disponível em: <<http://www.tagrimm.com/benchmark>>. Acesso em 25 nov 2021.

GTMAX 3D, 2022. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3dpro/gtmax3d-core-h5-simplify3d>>. Acesso em 15 mar 2022.

GUESSASMA, S., ZHANG, W., Zhu, J., BELHABIB, S., & NOURI, H. **Challenges of additive manufacturing technologies from an optimization perspective**. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, 6, (A9), p. 1-13, 2015.

GUIA: A tecnologia de impressão 3D. **Brasilia Fab Lab**, 2017. Disponível em: <<https://medium.com/bsbfablab/guia-a-tecnologia-de-impress%C3%A3o-3d-2d8b6b8cb5e5>>. Acesso em 17 fev 2022.

GUIA completo para o uso do Filamento PLA. **3dprocer**, 2019. Disponível em: <<https://3dprocer.com.br/guia-completo-para-o-uso-do-filamento-pla/>>. Acesso em 19 dez 2021

HAMOD, H. **Suitability of Recycled HDPE for 3D printing filament**. Degree Thesis – Degree Program: Plastics Technology, Arcada University of Applied Science, Finlândia, 2014.

HARBER, R. H., HARBER, R., SCHMITTDIEL, M., DEL TORO, M. S. **A classic solution for the control of a high-performance drilling**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 47, p. 46-49, 2007.

HORNE, R; HAUSMAN, K. K. **3D printing for dummies**. John Wiley & Sons, 2017.

HÜBNER, H. B. **Estimação da rugosidade gerada no processo de fresamento frontal via redes neurais artificiais**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/141160/000992082.pdf?sequence=1>>. Acesso em 06 abr 2022.

IMPRESSORAS 3D: tipos e funcionamento. **Eletrogate**, 2021. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/impressoras-3d-como-funcionam-e-quais-os-tipos-existentis/>>. Acesso em 17 mar. 2022.

IMPROVING Top Layers. **Zortrax**, 2022. Disponível em: <<https://support.zortrax.com/top-layers/>>. Acesso em 21/06/2022

INASAKI, I; KARPUSCHEWSKI, B.; LEE, H.-S., **Grinding chatter - origin and suppression**. Annals of the CIRP, p. 515–534, 2001.

INDÚSTRIAS ROMI S.A. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=yIMftRD5DhU>>. Acesso em 01 mai 2022.

JUNEJA, B. L.; SEKHON G. S.; SETH, N. **Fundamentals of metal cutting and machine tools**. 2. ed. New Delhi: John Wiley & Sons, 1987.

JUNIOR, S. **Solidworks 2016: modelagem 3D de peças, chapas metálicas e superfícies**. 1. ed. São Paulo: Senai. 2017.

KÖNIG, W; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen**. Aachen, Alemanha: Springer Verlag, p. 565, 1997.

LAYER THICKNESS in 3D Printing: an additive manufacturing basic. Disponível em: < <https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/>>. Acesso em 15 jan 2021.

LEONARDO, L. S. **Avaliação de uma impressora 3d baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em pla**. Orientador: Carlos Henrique Ahrens. 2015. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

LIU, R., WANG, Z., SPARKS, T., LIOU, F., & NEDIC, C. **Stereo vision-based repair of metallic components**. Rapid Prototyping Journal, 23(1), p. 65-73, 2017.

LOPES, A. et al. **Impressão 3D: imaginar, planejar e materializar**. Disponível em: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/seed_lab/caderno_impressao_3d.pdf>. Acesso em 20 jan 2022

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, p. 371, 2009.

MANUFATURA híbrida e a tecnologia na indústria 4.0. **Portogente**, 2019. Disponível em: <<https://portogente.com.br/noticias/opiniaio/108294-manufatura-hibrida-e-a-tecnologia-na-industria-4-0>>. Acesso em 16 mar 2022.

NEWMAN, S. T., ZHU, Z., DHOKIA, V., & SHOKRANI, A. **Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, p. 467–470, 2016.

NUNES, L.T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais e Processos de Fabricação, Faculdade de Engenharia – Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

O que é e como funciona a impressão SLA?. **Engiprinters**, 2020. Disponível em: < <https://engiprinters.com.br/o-que-e-e-como-funciona-a-impressao-sla-d90/>>. Acesso em 17 mar 2022.

O que é o Preenchimento de uma Impressão 3D?. **Impressão 3D Portugal**, 2021. Disponível em: < <https://impressao3dportugal.pt/o-que-e-o-preenchimento-de-uma-impressao-3d/>>. Acesso em 17 mar 2022.

QIN, Jian; LIU, Ying; GROSVENOR, Roger. **A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 52, p.173-178, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711630854X?via=ihub#bib>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

QUAL a temperatura ideal para cada tipo de filamento?. **3dprocer**, 2019. Disponível em: <<https://3dprocer.com.br/qual-a-temperatura-ideal-para-cada-tipo-de-filamento/>>. Acesso em 13 nov 2021.

QUAL a influência da temperatura na impressão 3D?. **3DLAB**, 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/temperatura-na-impressao-3d/>>. Acesso em 16 dez 2021.

QUAL Bico Escolher para Minha Impressora 3D?. **Acelera 3D**, 2019. Disponível em: . Acesso em 18 abr 2022.

SCHOTTE, Greg. **A Brief History of Additive Manufacturing**. TriMech Blog, 2019. Disponível em: <https://blog.trimech.com/a-brief-history-of-additive-manufacturing>. Acesso em 09 mar. 2022.

SECCO, D. C. **Fresamento de aços para moldes e matrizes em condições criogênicas**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais e Processos de Fabricação, Faculdade de Engenharia - Unesp - Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2015.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 1984. v. 3.

SIEMENS. **Nossa História, Material Extrusion**, 2021. Disponível em: <<https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/our-story/glossary/materialextusion/53981>>. Acesso em 9 mar. 2022

SIEMENS. **RAPID Advances in 3D Printing**, 2021. Disponível em: <<https://new.siemens.com/global/en/company/stories/researchtechnologies/additivemanufacturing/additive-manufacturing.html>>. Acesso em: 09 mar. 2022.

SOLUÇÕES de ferramentas de troca rápida. **Sandvik**, 2021. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/quick-change-solutions.aspx>>. Acesso em: 06 jan 2022.

SORTE, R.T.B. **Influência do Fluido de Corte na Usinagem de Polímeros**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2020.

STRATASYS INC. Steven Scott Crump. Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects. Minneapolis, EUA, 1989.

TEDESCO, M. E. **Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, RS, 2007.

THOMAZETTI, J. L. **Integração eletrônica em impressora 3D com cinemática delta invertida**. Trabalho de conclusão de curso – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019.

TIPOS de preenchimento no Cura! Veja como configurar o infill neste software!. **3DLAB**, 2021. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/tag/tipos-de-preenchimento/#:~:text=Às%20impress%C3%B5es%203D%20de%20baixa,por%20fornecerem%20impress%C3%B5es%20mais%20r%C3%A1pis.>>. Acesso em 15 dez 2021.

TORNO CNC. **CIMM**, 2022. Disponível em: <<https://www.cimm.com.br/portal/produtos/exibir/28914-torno-cnc-ck500>>. Acesso em 16 mar 2022.

TORNO platô. **CLARK MACHINE**, 2021. Disponível em: <<https://www.clarkmachine.com.br/produto/torno-plato-clark-modelo-tp2000/>>. Acesso em 16 mar 2022.

TORNO revolver. **M&S Industrial**, 2021. Disponível em: <<https://mesindustrial.com.br/torno-revolver/>>. Acesso em: 16 mar 2022.

TORNO vertical. CIMHSA MÁQUINAS OPERATRIZES, 2021. Disponível em: <<https://www.cimhsa.com.br/por/p/product/product/produtos/34/torno-vertical-c5112ex10-5.htm>>. Acesso em: 16 mar 2022.

TRENT, E. M. **Metal cutting**. 2 ed. Londres: Butterworths & Co., 1984.

Usinagem I – Aula 3: Furação. UFRJ, 2016. Disponível em: <<http://www.mecanica-ufrj.educacao.ws/util/b2evolution/media/blogs/annacarla/UsinagemI/Aula3-Furacao.pdf>>. Acesso em 23 abr 2022.

VELOCIDADE de impressão 3d: melhores configurações para sua aplicação. **Wishbox**, 2020. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/velocidade-de-impressao-3d/>>. Acesso em 15 dez 2021.

VOLPATO, N., et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. Edgar Blücher, São Paulo, 2007.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Edgard Blücher, São Paulo, 2017.

WALSH, R. A.; CORMIER, D. **Machining and Metalworking Handbook**. 3. ed. [S. l.] McGraw-Hill, 2005. ISBN 0-07-145787-9.

WOHLERS, T. T. **Wohlers report 2008**. Colorado: Wohlers Associates, 2008.

ZHOU, Keliang; LIU, Taigang; ZHOU, Lifeng. **Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges**. 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (fskd), Zhangjiajie, p.2147-2152, ago. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/fskd.2015.7382284>. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7382284>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

7 formas de aumentar a velocidade da impressão 3D sem perder qualidade!. **3DLAB**, 2018. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/aumentar-a-velocidade-da-impressao-3d/>>. Acesso em 15 dez 2021