

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Estudo da integridade superficial após fresamento
do aço UNS 15500 obtido por manufatura aditiva**

Guilherme Cardoso Ribeiro de Barros

Profª. Orientadora: Tatiane da Campos Chuvás

Rio de Janeiro

Junho de 2018

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Estudo da integridade superficial após fresamento
do aço UNS 15500 obtido por manufatura aditiva**

Guilherme Cardoso Ribeiro de Barros

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof^a. Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

Rio de Janeiro

Junho de 2018

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas /Biblioteca Central

B277 Barros, Guilherme Cardoso Ribeiro de
Estudo da integridade superficial após fresamento do aço
UNS15500 obtido por manufatura aditiva / Guilherme Cardoso
Ribeiro de Barros.—2018.
x, 45f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 42-45
Orientadora : Tatiane de Campos Chuvas

1. Engenharia mecânica. 2. Aço inoxidável. 3. Fresagem
(Trabalhos em metal). 4. Impressão tridimensional. I. Chuvas,
Tatiane de Campos (Orient.). II. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha vida.

À minha família que durante toda a minha vida investiu na minha educação e nunca mediu esforços para que eu pudesse chegar onde estou.

À professora Tatiane de Campos Chuvas pela paciência e compreensão durante o período em que me orientou neste trabalho.

Agradeço a todos os professores e funcionários do CEFET/RJ sem a paciência e dedicação dos quais jamais poderia ter terminado este trabalho. Aos técnicos Hiron Akira Yamada Magalhães e Breno pela disposição na preparação das amostras.

À instituição da PUC/RJ, à técnica Mariana Moraes Gioia e ao professor Felipe Gouvea que me disponibilizaram a peça analisada neste trabalho.

RESUMO

A manufatura aditiva é uma nova tecnologia aplicada na área de fabricação mecânica, possibilitando a execução de peças com alta complexidade, alta qualidade e alta produção. Contudo, em determinadas aplicações, ainda são necessárias etapas de usinagem posterior para melhor acabamento superficial de determinados componentes. O estudo sobre a usinabilidade de peças metálicas pré-fabricadas por manufatura aditiva ainda é pouco explorado, mas é de grande importância tecnológica e industrial, pois o comportamento desses materiais pode ser distinto dos obtidos por fundição. O objetivo desse trabalho é colaborar com um estudo inicial sobre o comportamento de uma peça pré-fabricada de aço UNS 15500 por manufatura aditiva (impressão 3D) quando submetida a usinagem por fresamento sob diferentes parâmetros de corte, principalmente a velocidade de corte. Para isso foi analisada a integridade superficial do material após usinagem com base em dados de rugosidade e dureza superficial. Os resultados mostraram que a rugosidade superficial, embora tenha variado com a velocidade de corte, não apresentou nenhum padrão reconhecível. Já a dureza superficial diminuiu conforme a velocidade de corte também aumentava.

Palavras chave: Manufatura aditiva, aço UNS 15500, fresamento, integridade superficial

ABSTRACT

The additive manufacturing is a new technology utilized for mechanical fabrication purposes, it makes possible to fabricate complex objects with good quality and high production. Nevertheless, in some applications, stages of later machining are still necessary for better finishing of these components. The study of the machinability of prefabricated parts for additive manufacturing is yet not deep explored, although it has a large importance in the technological and industrial field, since the behavior of these materials can be different from the ones obtained by foundry. The objective of this work is to cooperate with an initial study about the behavior of a prefabricated sample of the stainless steel UNS 15500 made by additive manufacturing (3D Printing) when submitted to milling with different cutting parameters, especially the cutting speed. To do so, the superficial integrity of the material after machining based on roughness and superficial hardness data. The results showed that the roughness, though it has changed with the cutting speed, it hasn't seemed to do it in any pattern. On the other hand, the superficial hardness has become higher with lower cutting speeds.

Key words: Additive Manufacturing, UNS 15500 Steel, Milling, Superficial Integrity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Técnicas de fabricação por manufatura aditiva.....	5
Figura 2: Processo de fabricação FDM.....	6
Figura 3: Amostras fabricadas pelo processo FDM.....	7
Figura 4: Processo de fabricação SL.....	7
Figura 5: Roda de turbina fabricada por SL.....	8
Figura 6: Processo de fabricação <i>Polyjet</i>	8
Figura 7: Peças fabricadas através do processo <i>Polyjet</i>	9
Figura 8: Processo de fabricação LOM.....	10
Figura 9: Peças fabricadas através do processo LOM.....	10
Figura 10: Processo de fabricação de uma impressora 3D SLS.....	12
Figura 11: Peças fabricadas através do processo DMLS.....	12
Figura 12: Microestrutura da liga Ti-6Al-4V fabricado por (a) SLM e (b) EBM.....	13
Figura 13: Esquematisação do processo de fresamento de topo.....	14
Figura 14: Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade).....	18
Figura 15: Perfil teórico de superfície usinada por fresamento frontal.....	20
Figura 16: Amostras estudadas: (a) Dimensões e (b) Direções de fabricação.....	20
Figura 17: Comparação entre as rugosidades superficiais.....	21
Figura 18: Microdureza da superfície usinada com diferentes condições de corte e estado da ferramenta.....	24
Figura 19: Microdureza (HV) Ferramentas novas.....	25
Figura 20: Microdureza (HV) Ferramentas em fim de vida.....	25

Figura 21: Microscopia do aço 15-5 PH, resolução de 100 μ m (a) liga DMLS sem tratamento térmico; (b) liga convencional sem tratamento térmico.....	26
Figura 22: Microscopia do aço 15-5 PH, resolução de 20 μ m (a) liga DMLS sem tratamento térmico; (b) liga convencional sem tratamento térmico.....	27
Figura 23: Impressora EOS M Eosint 280.....	29
Figura 24: Peça impressa utilizada.....	30
Figura 25: Fresadora Diplomat 3001 modelo FVF 2000.....	31
Figura 26: Geometria do inserto utilizado no fresamento.....	31
Figura 27: Peça após processo de fresamento.....	32
Figura 28: Rugosímetro portátil SurfTest SJ 210 utilizado no teste de rugosidade.....	33
Figura 29: Variação do parâmetro R_a (μ m) do material em função dos parâmetros de corte..	35
Figura 30: Variação do parâmetro R_t (μ m) do material em função da velocidade de corte durante o fresamento.....	35
Figura 31: Variação da rugosidade (μ m) do material em função da velocidade de corte durante o fresamento.....	36
Figura 32: Variação da dureza (HV) do material em função da velocidade de corte durante o fresamento.....	38
Figura 33: Comparação entre a variação da dureza (HV) e rugosidade (μ m) do material em função da velocidade de corte durante o fresamento.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da integridade superficial	17
Tabela 2: Composição química do aço inoxidável martensítico UNS S15500 (% de peso).....	22
Tabela 3: Propriedades mecânicas do aço inoxidável martensítico UNS S15500.....	22
Tabela 4: Parâmetros para os ensaios de usinagem.....	24
Tabela 5: Composição química do aço inoxidável EOS PH1 – dados do fabricante (em % de peso).....	28
Tabela 6: Propriedades mecânicas do aço inoxidável EOS PH1 – dados do fabricante.....	29
Tabela 7: Parâmetros de corte para cada condição de fresamento.....	32
Tabela 8: Rugosidade teórica segundo os parâmetros R_a e R_t	34
Tabela 9: Rugosidade de cada superfície.....	37
Tabela 10: Microdureza de cada superfície.....	38

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	2
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Metodologia de trabalho.....	2
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Manufatura Aditiva.....	3
2.1.1. Tipos de processo de prototipagem rápida.....	4
2.2. Fresamento.....	12
2.2.1. Integridade superficial.....	15
2.2.2. Fresamento de material impresso.....	19
2.3. Aço inoxidável martensítico UNS S15500.....	20
2.3.1. Fresamento do aço inoxidável martensítico UNS S15500.....	21
2.3.2. Manufatura aditiva do aço inoxidável martensítico UNS S15500.....	25
3. Material e Métodos.....	27
3.1. Aço inoxidável EOS PH1.....	27
3.2. Fabricação da amostra.....	28
3.3. Fresamento da peça.....	29
3.4. Ensaio de rugosidade.....	31
3.5. Ensaio de microdureza.....	32
4. Resultados e discussões.....	33
4.1. Rugosidade.....	33
4.2. Microdureza das superfícies.....	36
5. Conclusão.....	39
6. Sugestões para trabalhos futuros.....	40
7. Referências bibliográficas.....	41

Capítulo 1

Introdução

Desde os primórdios da civilização a capacidade de desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação foi o que impulsionou a evolução da humanidade, sendo ainda hoje objeto de estudo e aprimoramento. Neste contexto, as tecnologias de manufatura aditiva se apresentam como um futuro promissor do processo fabril, visto que por meio destas é possível se criar peças de geometrias extremamente complexas, com flexibilidade e em relativamente pouco tempo, sendo já bastante utilizadas nas indústrias automobilísticas e aeroespaciais. Estes processos geralmente ocorrem por meio de um arquivo digital que é passado ao maquinário, que por sua vez realiza a construção da peça por meio de finas camadas do material. Dos processos de manufatura aditiva, o processo DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) é capaz de produzir estruturas a partir da sinterização de diversos materiais metálicos em pó, o que é extremamente interessante para a indústria mecânica [1].

Dentre os materiais que vem ganhando espaço nos processos produtivo, o aço inoxidável se destaca devido a sua composição química, com a presença de cromo e em muitas vezes também níquel e molibdênio que lhe conferem uma alta resistência a corrosão e propriedades mecânicas superiores aos aços carbono, o que o torna uma ótima opção para aplicações com diversos tipos de demanda graças a sua capacidade de resistir à oxidação. Em particular, os aços inoxidáveis martensíticos apresentam teor de cromo entre 12% e 18%, sendo endurecíveis através de tratamentos térmicos que lhe conferem uma microestrutura martensítica. Assim, dentre os aços inoxidáveis, esses materiais são mais vulneráveis à corrosão e apresentam uma ótima usinabilidade [2].

Como são fabricadas através da sinterização de pó metálico, as peças produzidas através do processo DMLS apresentam uma superfície rugosa demais para aplicações mecânicas e com frequência necessitam passar por algum processo de usinagem, como o fresamento, para acabamento superficial. Este processo está relacionado à qualidade geral de uma superfície, sendo afetado por diversos parâmetros de usinagem e características do material [3].

1.1. Motivação

Devido à influência dos parâmetros de usinagem na integridade superficial, estudos que visem à compreensão do comportamento dessas superfícies frente a esses parâmetros são de vital importância tecnológica e científica. Em especial, peças obtidas por manufatura aditiva, podem ser aplicadas em situações que necessitem de alto controle superficial, principalmente o nível de rugosidade. Dessa forma, se torna necessário compreender como os parâmetros de corte influenciam no acabamento superficial de peças submetidas a processos de usinagem, pois dessa forma pode-se comparar o comportamento desses materiais com os obtidos com por processos convencionais de fabricação, como a fundição.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é compreender a influência da velocidade de corte e do avanço por dente, e a interação desses parâmetros de corte, na integridade superficial no fresamento de peças de aço inoxidável martensítico UNS 15500 obtidas por manufatura aditiva. Todo o estudo foi focado na análise da rugosidade e dureza superficial após o processo de usinagem.

1.3. Metodologia de trabalho

Para a realização deste trabalho fez-se uma revisão da bibliografia disponível para consulta relacionada aos temas a serem abordados. Foram analisados livros, artigos nacionais e internacionais, trabalhos de conclusão de curso de graduação, teses de mestrado, artigos de congressos, normas e consultas à internet. Após a etapa de consulta bibliográfica, foi obtido junto a PUC/RJ a amostra a ser estudada e então traçada a estratégia para a realização dos experimentos no CEFET/RJ. Em suma, os experimentos realizados foram o fresamento da amostra com diferentes condições de usinagem, análise da rugosidade e medição de microdureza superficial em cada condição. Em posse dos resultados, iniciou-se a etapa de

discussão dos resultados e conclusão. Complementarmente, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas utilizadas no presente trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Manufatura Aditiva

A palavra manufatura significa fabricação, podendo esta ser realizada através de máquinas, processos químicos, robóticos, biológicos ou até mesmo artesanais. Neste cenário, a manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D ou prototipagem rápida, surge como um novo e revolucionário processo de fabricação devido à sua flexibilidade e capacidade de impressão de peças com geometria complexa [4].

O processo consiste na adição em camadas do material em contraponto aos processos de deformação e remoção, mais usuais na fabricação industrial. Nos Estados Unidos, o *America Makes* e o *American National Standards institute* (ANSI) [5] desenvolveram o Mapa da Padronização para a Manufatura Aditiva onde é explicado que a impressão 3D apresenta uma grande variabilidade de materiais utilizáveis, como polímeros, metais ou compósitos, o que torna o processo aplicável a diferentes tipos de indústrias, sendo principalmente aplicado na automobilística, aeronáutica, médica e para prototipagem, porém encontrando espaço até mesmo na indústria civil, podendo ser utilizado para construir casas em apenas alguns dias através da impressão destas em concreto [6].

Apesar de ganhar um destaque maior na última década, devido ao grande avanço da eletrônica e o desenvolvimento de novos materiais, esta tecnologia está disponível no mercado desde a década de 80. A primeira técnica de manufatura aditiva, chamada de estereolitografia, foi criada pelo norte americano Chuck Hull na Califórnia e consiste na fotopolimerização de uma resina especial através da luz emitida por uma lâmpada [1].

Desde então, o procedimento vem evoluindo e novos processos foram criados, existindo hoje mais de uma dezena de tecnologias diferentes, dentre as quais se destacam o *Fused Deposition Modeling* (FDM), que se utiliza da deposição de filamentos de polímeros, a *Stereolithography Apparatus* (SLA), criada primeiramente por Hull e posteriormente

aprimorada e o *Selective Laser Sintering* (SLS), que visa a obtenção de peças em 3D através da sinterização em camadas do pó de materiais plásticos, cerâmicos e metálicos, processo este utilizado para fabricação da peça utilizada para o estudo no escopo deste trabalho [1].

2.1.1. Tipos de processos de prototipagem rápida

A fabricação por manufatura aditiva vem evoluindo nas últimas décadas e vários processos foram criados. A Figura 1 mostra alguns dos tipos de técnicas de impressão existentes e suas subdivisões.

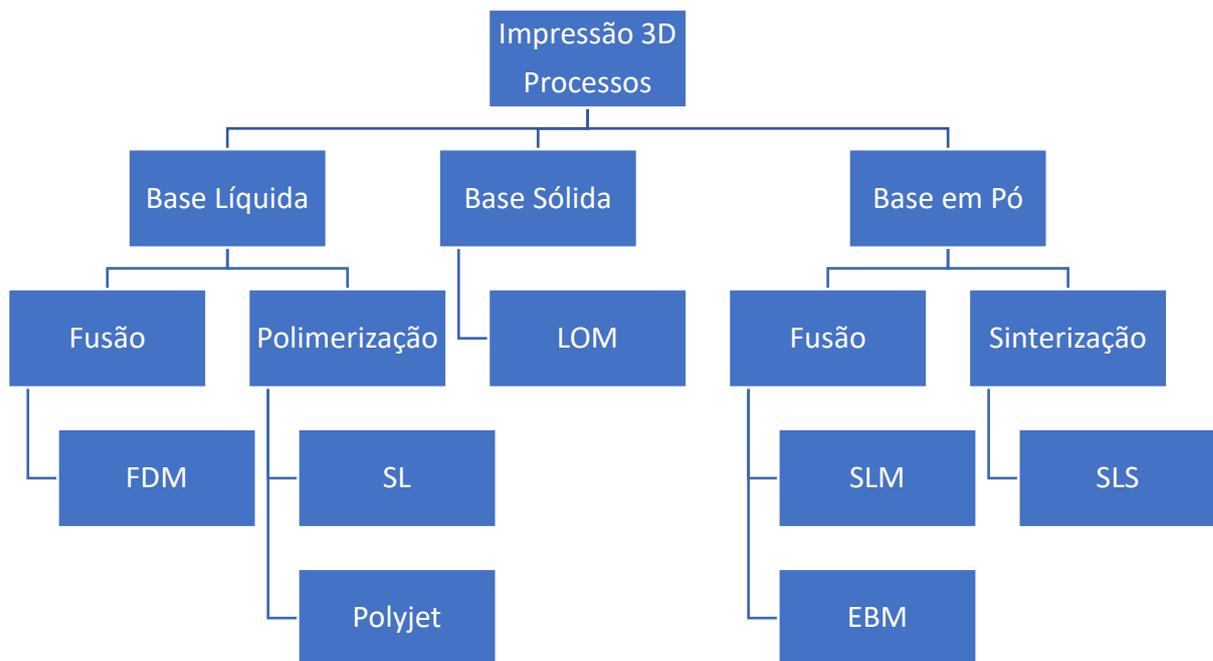


Figura 1: Técnicas de fabricação por manufatura aditiva [7].

Pela Figura 1 podem-se dividir as diferentes técnicas de manufatura aditiva em três categorias básicas: quando o material de impressão está na forma líquida, sólida e em pó. Basicamente todas as técnicas de impressão começam com a elaboração de um desenho desenvolvido em um *software* do tipo *Computer-Aided Design* (CAD), que é passado computacionalmente para a máquina e divide a peça desenhada em camadas virtuais e realiza

a fabricação, ou seja, os processos se diferem apenas no material utilizado e na forma como é realizada a fabricação.

As técnicas que se baseiam no material líquido são subdivididas entre processos de fusão e polimerização (Figura 1), no primeiro a técnica de *Fused Deposition Modeling* (FDM) se utiliza de filamentos de material plástico que são fundidos e extrudados numa espessura muito fina através de um bico de fabricação, conforme mostra a Figura 2. São vários os materiais utilizados por este processo, incluindo elastômeros, como o acrilonitrilabutadienoestireno (ABS), e cera de fundição. Os custos deste tipo de processo são relativamente baixos, se resumindo basicamente em custos de material e acabamento. Praticamente todo o material é utilizado, sendo desperdiçado apenas o material usado como suporte para a impressão de determinadas geometrias e rebarbas. A Figura 3 apresenta peças fabricadas por este processo [8].

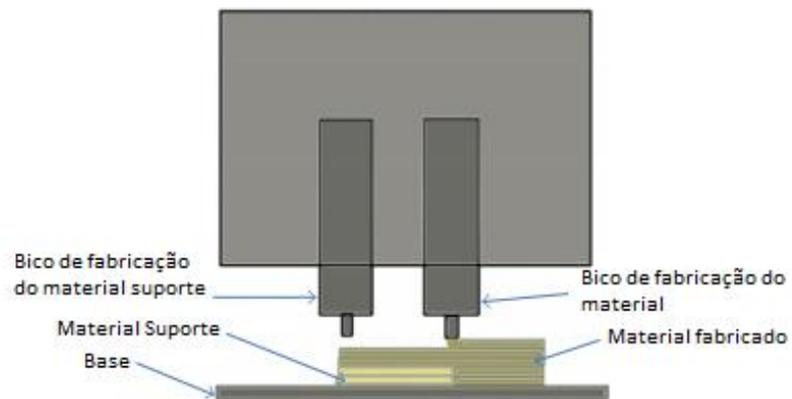


Figura 2: Processo de fabricação FDM [1].



Figura 3: Amostras fabricadas pelo processo FDM [8].

Já os processos que empregam a técnica de polimerização são a Estereolitografia (SL) e o *Polyjet*. Os materiais utilizados por no processo SL são mais específicos, visto que o mesmo se baseia na cura de resinas sensíveis à luz via emissão ultravioleta de um laser quando o raio faz contato com o material. A Figura 4 apresenta um esquema de como funciona o processo e a Figura 5 mostra um exemplo de uma peça fabricada por essa técnica [9].

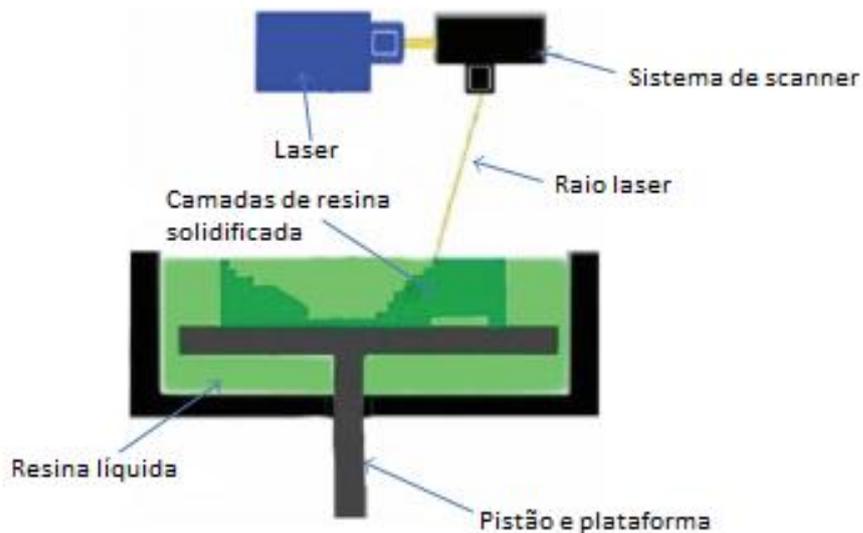


Figura 4: Processo de fabricação SL [6].

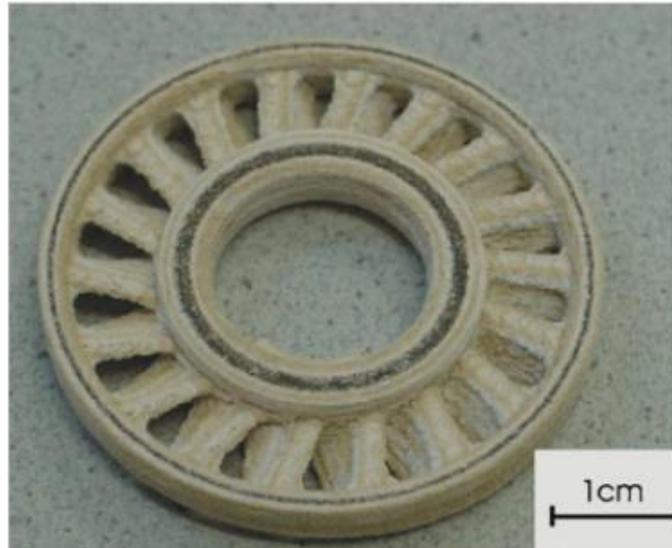


Figura 5: Roda de turbina fabricada por SL [9].

O processo *Polyjet* também se utiliza do endurecimento de um polímero fotossensível, porém a deposição do material é feita através de uma matriz de orifícios que se movimenta no eixo Y, bem como também no eixo X. Neste processo a deposição ocorre no movimento de avanço e a cura no movimento de volta da matriz através da emissão ultravioleta. Assim que a camada é fabricada a plataforma se movimenta para baixo no eixo Z e começa a impressão da próxima camada [10]. O processo está exemplificado na Figura 6 e peças fabricadas pelo processo podem ser vistas na Figura 7.

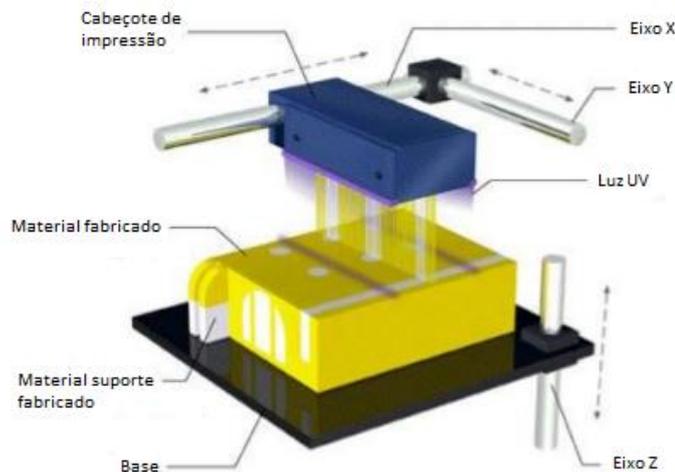


Figura 6: Processo de fabricação *Polyjet* [11].



Figura 7: Peças fabricadas através do processo *Polyjet* [12].

A *Laminated Object Manufacturing* (LOM) é a técnica que se baseia na manufatura de peças através do material sólido. O objeto é fabricado a partir do corte realizado de uma folha do material a ser utilizado. A máquina realiza a impressão de cada camada cortando a folha com um laser concentrado no formato criado pelo *software* através do CAD enviado pelo operador. Após a fabricação da camada, a mesma é laminada por um rolo de compressão aquecido e a plataforma onde a peça é fabricada se movimenta no eixo Z para baixo, possibilitando a construção de uma nova camada até que a peça esteja totalmente formada[13]. É possível ver uma esquematização do processo na Figura 8. Na Figura 9 são apresentados objetos fabricados pela técnica LOM.

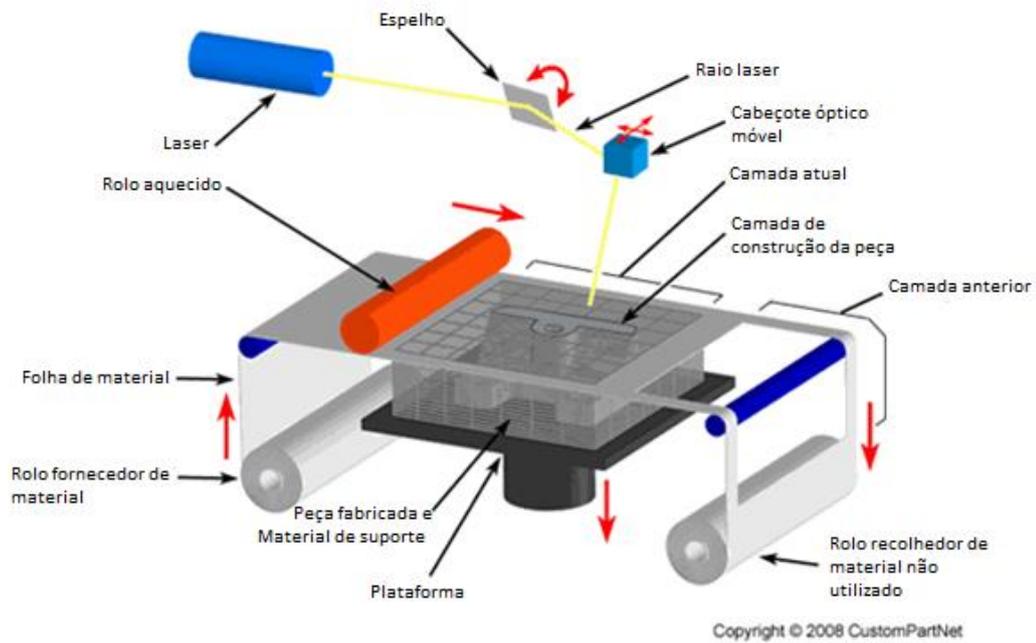


Figura 8: Processo de fabricação LOM [14].

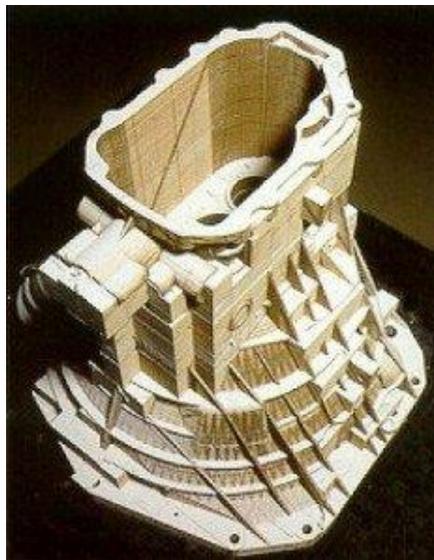


Figura 9: Peças fabricadas através do processo LOM [15].

A Sinterização é uma técnica de união de um material em pó compactado através da energia térmica visando à fabricação de materiais e componentes com densidade controlada. O processo de sinterização pode ser dividido em três etapas, o estágio inicial, o intermediário e o estágio final, onde cada etapa é descrita como um intervalo de mudança de geometria das partículas do pó onde seu formato é totalmente definido. Na etapa inicial é onde começa a

coalescência das partículas através do mecanismo da estricção com a suavização da superfície dessas e formação de contorno de grãos. Logo após, no estágio intermediário, começa o processo de crescimento de grão e conseqüente densificação do material. Por fim, o estágio final é caracterizado pela continuação do processo de crescimento de grão com a diminuição do tamanho das partículas do pó e a formação de sua estrutura final [16].

Wong e Hernandez (1991) [1], na Figura 1, subdividiram as técnicas baseadas no material em pó de forma que o processo *Selective Laser Sintering* (SLS) – que se baseia na sinterização do pó – se encaixasse na categoria denominada por ele de fusão, porém como por definição a sinterização ocorre em uma temperatura um pouco abaixo da temperatura de fusão do material, seria incoerente subdividir o processo desta forma, portanto foi criada uma nova categoria chamada de sinterização, a fim de se fazer a devida distinção dos processos onde ocorrem a sinterização dos que se baseiam na fusão do material. Wong e Hernandez (1991)[1] ainda mencionam outra categoria baseada no material em pó, *Binding*, que poderia ser traduzida com ligação, onde se encontram os processos 3DP e Prometal. Estes processos tratam da ligação das partículas em pó através de um líquido de ligação, porém como estes são processos mais incomuns não foram acrescentados na Figura 1. Portanto, os processos de impressão que utilizam o material em pó podem ser categorizados como por fusão e por sinterização. Conforme Figura 1, os processos onde ocorre a sinterização do material em pó é o *Selective Laser Sintering* (SLS) e onde ocorre a fusão são o *Selective Laser Melting* (SLM) e o *Electron-Beam Melting* (EBM).

No processo SLS, após a peça em CAD ser fatiada pelo *software* da impressora, o pistão de alimentação do pó se movimenta para cima apenas o correspondente à espessura da primeira camada do desenho e um rolo de distribuição passa levando o pó até a área de fabricação. Além de distribuir o pó, o rolo também tem como função compactar o pó de fabricação para a realização da sinterização. Após esta etapa o laser é concentrado através de um sistema de lentes e “imprime”, ou seja, sinteriza o pó de fabricação no formato da primeira camada do desenho. O pistão de fabricação então se movimenta para baixo e o processo recomeça até que a peça esteja totalmente fabricada. O processo está ilustrado na Figura 10 [17].

Assim que o processo de fabricação dentro da impressora se encerra, a peça é retirada e separada do material não sinterizado. Enquanto este é reaproveitado para futuras fabricações, a peça geralmente necessita de algum procedimento para acabamento superficial, dependendo de sua aplicação. O processo SLS ainda pode ser chamado de *Direct Metal Laser*

Sintering (DMLS) quando o material em pó for algum tipo de metal, um exemplo de peça fabricada por esta técnica pode ser visualizado na Figura 11 [17]. A peça utilizada neste trabalho foi fabricada através do processo DMLS.

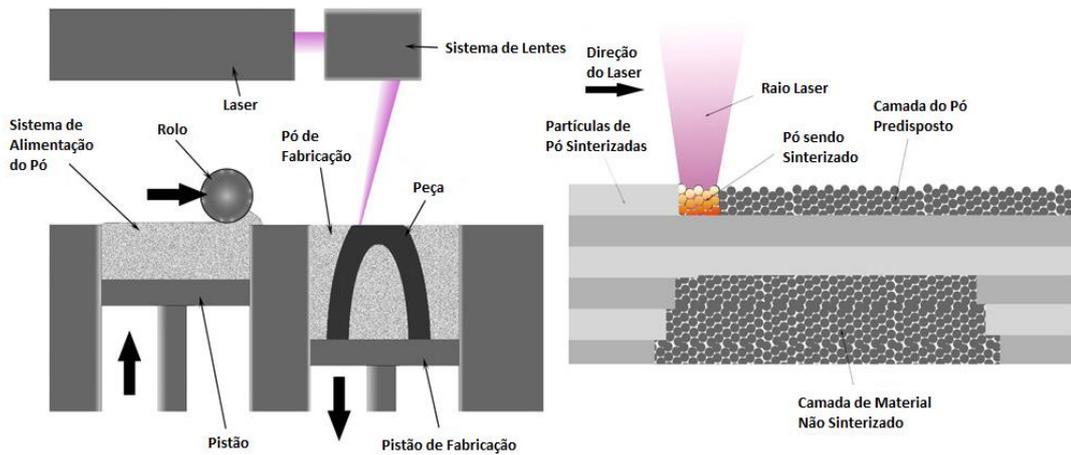


Figura 10: Processo de fabricação de uma impressora 3D SLS [18].

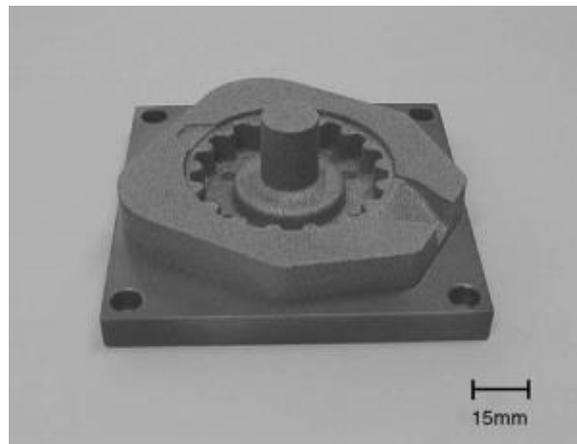


Figura 11: Peças fabricadas através do processo DMLS [17].

A técnica SLM possui basicamente a mesma estrutura do processo SLS, seguindo o mesmo procedimento, porém a diferença deste é a fusão do material. Existe uma combinação de um laser de alta energia com um material de temperatura de fusão não muito alta, portanto,

uma peça feita por SLM tende a apresentar uma estrutura não porosa, visto que todo o material é fundido [19].

EBM também segue o mesmo princípio dos dois últimos processos discutidos anteriormente, porém ao invés da utilização de um laser concentrado, se utiliza elétrons acelerados por um potencial de 60 kV e concentrados através de lentes eletromagnéticas. O sistema de resfriamento do material acaba sendo mais lento neste processo do que no SLM, o que acaba influenciando na microestrutura final da peça. Essa diferença foi estudada por Murrel *al*, (2011) [20] e as microestruturas da liga de titânio Ti-6Al-4V fabricadas pelo processo EBM e SLM podem ser vistas na Figura 12. É possível notar nas microscopias que a fase α é predominante no processo SLM e placas de martensita predominante em EBM, devido à diferença de resfriamento dos processos.

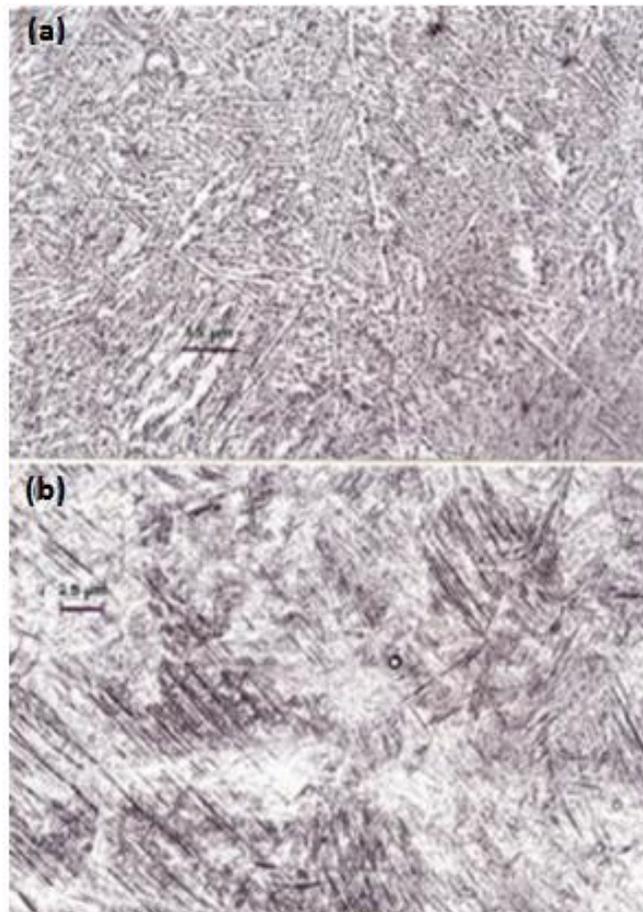


Figura 12: Microestrutura da liga Ti-6Al-4V fabricado por (a) SLM e (b) EBM (2,5 μm) [20].

2.2. Fresamento

O termo usinagem se refere a uma gama de processos de manufatura onde ocorra a remoção de material, ocasionando a formação de cavaco, visando dar forma a uma peça. As primeiras referências a respeito de processos deste tipo datam de aproximadamente 300 mil anos a.C., quando as armas, facas e pontas de lanças eram feitas através de pedras lascadas. Juntamente com o homem, o processo entrou em uma evolução gradual, passando por inúmeras transformações e aprimoramentos até chegar aos dias atuais onde se tornou o processo de fabricação mais comum, transformando em cavaco em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas [21].

Dentre os processos classificados como usinagem, se encontra o fresamento. Segundo Ferraresi (1969) [22] este é um processo mecânico de usinagem caracterizado pela utilização de ferramenta multicortante, denominada fresa, que possui arestas cortantes colocadas simetricamente ao redor de um eixo. A ferramenta entra em um movimento de rotação em torno deste eixo possibilitando que as arestas cortantes removam o material, sendo o movimento de avanço realizado, geralmente, pela mesa onde a peça é fixada.

Ainda dentro deste processo, o mesmo pode ser classificado basicamente de duas formas: fresamento frontal (ou de topo) e fresamento tangencial. O processo utilizado para o estudo realizado neste trabalho foi o fresamento de topo, onde os dentes da ferramenta são fixados na superfície plana desta, assim, a superfície gerada devido ao processo de usinagem é perpendicular ao eixo de rotação da fresa, conforme demonstrado na Figura 13.

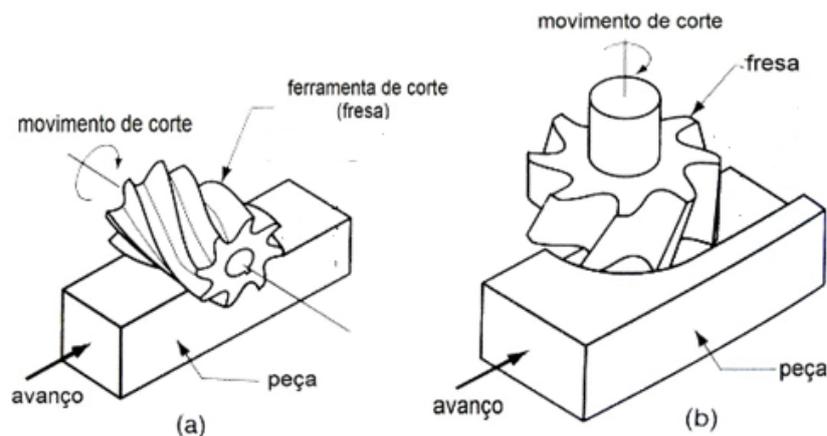


Figura 13: Esquematização do processo de fresamento de topo [22].

Os movimentos no processo de fresamento são sempre relativos a peça em relação a ferramenta de corte, sendo que a peça é considerada imóvel por convenção. Esses movimentos podem ser categorizados de duas formas, como ativos, aqueles que interferem diretamente na remoção de material e como passivos, que não participam diretamente na formação de cavaco [23].

Dentro da categoria de movimentos ativos estão o movimento de corte, definido como o movimento relativo entre a peça e a ferramenta, que acarreta numa única formação de cavaco durante uma volta desconsiderando o movimento de avanço, sendo este também considerado como ativo e definido como o movimento que, juntamente com o movimento de corte, acarreta na remoção contínua de material durante várias revoluções. O movimento efetivo de corte é descrito como o resultante da atuação dos dois movimentos, de corte e de avanço [22].

As velocidades são um importante parâmetro de usinagem, pois a depender destas taxas de deslocamento podem ser obtidos diferentes resultados para a peça a ser usinada, como seu acabamento superficial, devendo ser devidamente escolhidas de acordo com o material a ser processado. A velocidade de corte, tendo como referência a aresta de corte, é a velocidade instantânea segundo a direção do movimento de corte e para o processo de fresamento pode ser definida através da Equação 1 [23].

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

Onde,

v = velocidade de corte[m/min]

d = diâmetro da ferramenta[mm]

n = Número de rotações por minuto[rpm]

Outra velocidade importante é a velocidade de avanço, velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta segundo a direção do movimento de avanço, sendo obtida através da Equação 2 [23].

$$v_a = a \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

Onde a é o avanço, dado em $mm/revolução$ ené o deslocamento da ferramenta na direção de avanço. Grandezas de corte são parâmetros da usinagem que devem ser ajustados na máquina direta ou indiretamente. Um desses é denominado como a profundidade de corte e definida como a largura de penetração da ferramenta na peça. Além do avanço, já definido anteriormente, no caso da fresa que possui mais de um dente, ainda se faz necessário definir o avanço por dente, que é a representação do percurso de avanço de cada dente da ferramenta medido na direção de avanço da ferramenta, sendo representado pela Equação 3 [23].

$$a = a_z \cdot z \text{ [mm/rev]} \quad (3)$$

Onde,

a_z = Avanço por dente[mm/rev]

z = Número de dentes da ferramenta

2.2.1. Integridade superficial

O acabamento final de uma peça usinada pode envolver diversos tipos de processos, variando de acordo com a aplicação e o material trabalhado. Esses podem ser feitos através de deformações plásticas, aplicação de calor, processos químicos e outros. O termo integridade superficial é muito mais amplo do que apenas analisar uma camada da superfície. Segundo Machado (2011) [24] a integridade superficial abrange as solicitações da superfície bem como camadas mais profundas da peça. A Tabela 1 mostra uma classificação das modificações realizadas em superfícies e subsuperfícies usinadas.

Tabela1: Classificação da integridade superficial [24].

Integridade Superficial	Acabamento	Ondulações		
		Falhas		
		Rugosidades		
	Alterações Subsuperficiais	Fatores Mecânicos	Deformações Plásticas	
			Rebarbas	
			Alteração de Microdureza	
			Micro ou Macrotrincas	
			Tensões Residuais	
			Recristalização	
		Fatores Metalúrgicos	Transformações Metalúrgicas	

De acordo com Machado (2011) [24], o acabamento de uma superfície usinada pode ser subdividido em três categorias:

- Ondulações: consiste em uma geometria irregular de espaçamento maior do que o considerado no caso das rugosidades, podendo ocorrer devido a um mal posicionamento da peça na máquina-operatriz, devido a uma temperatura indevida ou a uma força de corte que cause vibração da ferramenta;
- Rugosidades: muito parecidas com as ondulações, porém são caracterizadas como irregularidades muito finas, sendo inerentes ao processo de usinagem;
- Falhas: interrupções no delineamento de uma peça, sendo ocasionadas por defeitos em geral na peça, como bolhas, trincas e inclusões, sendo inesperadas e indesejadas.

Diferentemente das duas primeiras categorias, a rugosidade não se trata de uma situação indesejada a qual se deve evitar, antes se trata de um parâmetro de usinagem que muitas vezes pode ser o determinante no processo, a depender da aplicação da peça.

A norma NBR ISO 4287 (2002) [25] trata de definições e parâmetros para a determinação do estado de uma superfície, nela são definidos métodos para se avaliar a integridade superficial de uma peça segundo parâmetros de rugosidade, dentre os quais o mais

largamente utilizado se encontra o desvio aritmético médio, caracterizado como R_a e definido através da Equação 6 como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem, sendo as ordenadas Z ilustradas na Figura 14.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (6)$$

Onde,

l = Comprimento na direção do eixo X

$Z(x)$ = Altura do perfil analisado de acordo com a posição x

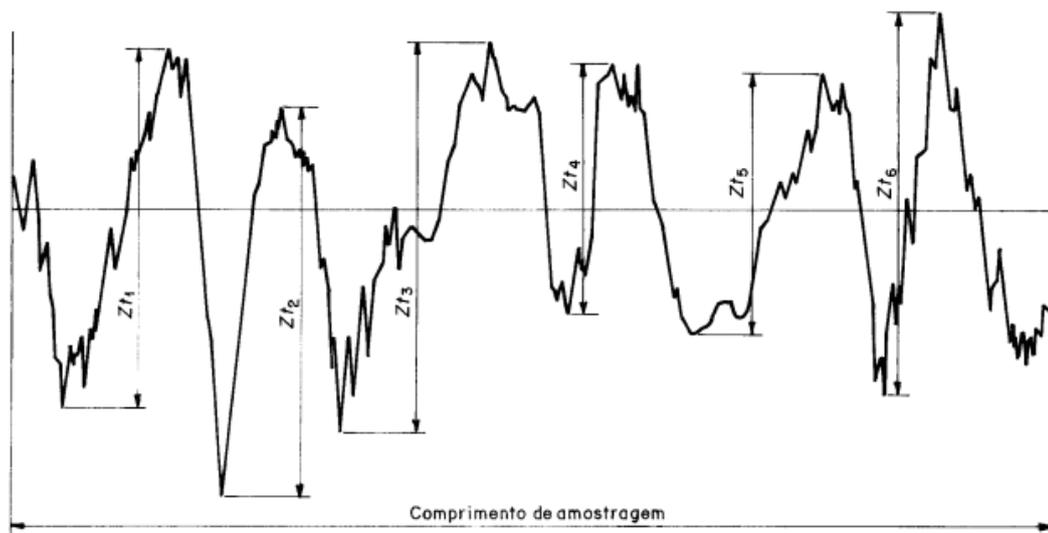


Figura 14: Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade) [25].

O desvio aritmético médio é muito utilizado principalmente por efeitos ocasionais não influenciarem seu valor devido ao fato de se tratar de uma média. Em contrapartida, apenas o R_a não é suficiente para se caracterizar uma superfície usinada, pois diferentes geometrias superficiais sob solicitações na prática apresentam um comportamento totalmente diferente embora apresentem R_a similar [24].

Outro parâmetro de rugosidade utilizado para descrever uma superfície usinada é a altura total do perfil (R_t), descrita como a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento em avaliação, segundo a NBR ISO 4287 (2002) [25]. A altura total do perfil é utilizada em casos em que se faz necessário ou desejável determinar a altura máxima de rugosidade, pois esta está diretamente ligada à presença de defeitos ou irregularidades da superfície [24].

Apesar de estarem relacionados a diversos outros fatores, os parâmetros R_a e R_t podem ser teoricamente calculados em operações de usinagem convencional, sendo os resultados assim obtidos apenas indicativos. Tendo-se um processo de fresamento de topoos valores de R_a e R_t podem ser obtidos através das Equações 7 e 8, respectivamente [24], onde as variáveis estão ilustradas na Figura 15.

$$R_a = \frac{r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \left(\frac{a_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (7)$$

$$R_t = \frac{a_z}{\tan C + \cot D} \quad (8)$$

Onde,

r_ε = Raio da ponta da ferramenta [mm]

a_z = Avanço por dente [mm]

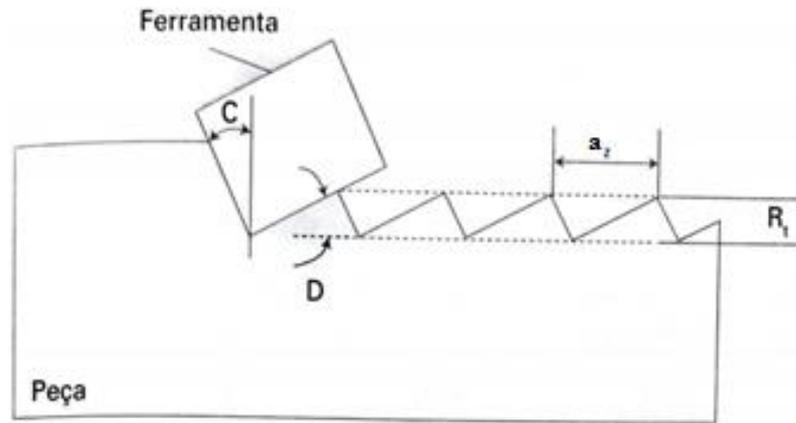


Figura 15: Perfil teórico de superfície usinada por fresamento frontal [24].

2.2.2. Fresamento de material impresso

As técnicas de manufatura aditiva produzem, devido à natureza inerente aos processos, peças com superfície porosa e irregular, que geralmente precisam ser finalizadas, por algum processo de usinagem para dar acabamento e atingir especificações de projeto, como rugosidade. A fim de compreender melhor o comportamento do processo de fresamento em materiais fabricados por técnicas de impressão 3D, Morel *et al*, (2018) [26] estudaram a rugosidade superficial – medida na face paralela a direção de sinterização – do aço maraging 300 fabricado pelo processo DMLS com diferentes direções de sinterização após o fresamento, conforme ilustra a Figura 16.

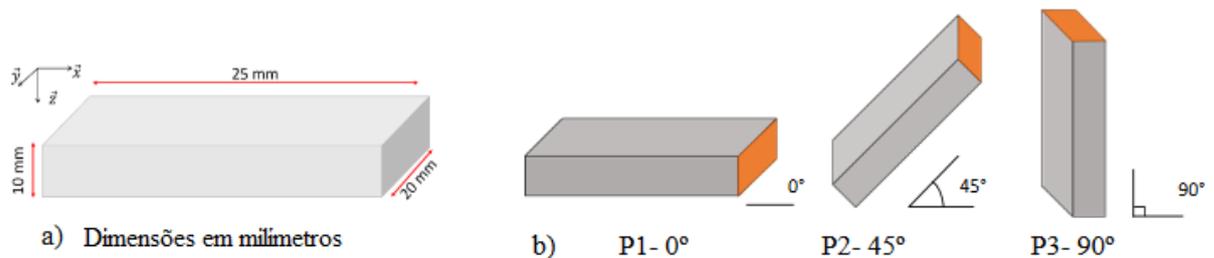


Figura 16: Amostras estudadas: (a) Dimensões e (b) Direções de fabricação [26].

A Figura 17 mostra que a menor rugosidade após o processo de sinterização foi de $3 \mu\text{m}$ para R_a , obtida na amostra cuja superfície final era paralela a plataforma de construção da impressora. Já após o fresamento, a menor rugosidade foi de $0,37 \mu\text{m}$, com velocidade de corte de 100 m/min com direção de sinterização de 45° .

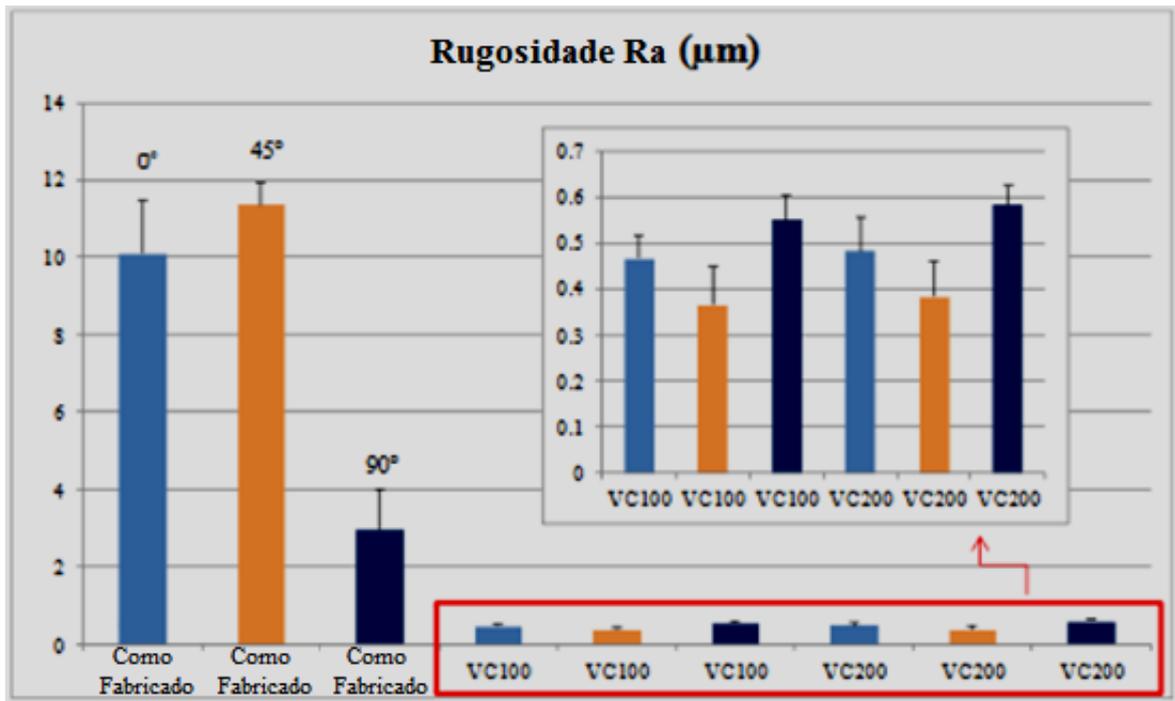


Figura 17: Comparação entre as rugosidades superficiais[24].

Já Alexander *et al.*(2015) [27], estudaram a usinabilidade de amostras de paredes finas da liga de titânio Ti6Al4V produzida através do processo EBM e concluíram que o fresamento de superfícies com baixa rigidez é um processo dinamicamente instável que produz vibrações e deslocamentos relativamente altos entre a peça e a ferramenta de corte, sendo que no fresamento convencional essas vibrações são menores e a rugosidade superficial significativamente mais alta devido a formação de cavaco na zona de corte.

2.3. Aço inoxidável martensítico UNS S15500

O material utilizado para a fabricação da peça a ser analisada neste estudo é o aço inoxidável martensítico UNS S15500, também conhecido como aço inoxidável 15-5 PH, que segundo o fabricante AZO Materials [28], é uma modificação do aço 17-4 PH desenvolvido na década de 60. A modificação apresenta uma microestrutura mais refinada que aumenta a resistência do material. Ainda segundo o fabricante, o material possui baixa temperatura de endurecimento e boa resistência à corrosão, podendo sua resistência e ductilidade serem aprimoradas através de tratamento térmico, tratando-se de um aço endurecível por precipitação. Este material é utilizado em aplicações de engenharia que exijam alta resistência à corrosão, alta resistência mecânica e dureza. A Tabela 2 mostra a composição química do material em questão e a Tabela 3 algumas propriedades mecânicas do mesmo.

Tabela 2: Composição química do aço inoxidável martensítico UNS S15500 (% de peso) [28].

Fe	Cr	Ni	Cu	Mn	Si	Nb + Ta	C	P	S
75	14,48	4,5	3,5	≤ 1	≤ 1	0,3	≤ 0,07	≤ 0,04	≤ 0,03

Tabela 3: Propriedades mecânicas do aço inoxidável martensítico UNS S15500 [28].

Limite de Resistência	1380 MPa
Tensão Normal de Escoamento	1275 MPa
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Alongamento	10 %
Dureza	429 HV

2.3.1. Fresamento do aço inoxidável martensítico UNS S15500

Aços endurecíveis por precipitação apresentam ótimas propriedades associadas a uma boa resistência à corrosão, devido a este fato, o aço 15-5 PH é especialmente usado nas indústrias aeroespaciais, nucleares e médica, sendo necessário para essas indústrias um cuidado especial com a integridade superficial do material, visto que a mesma apresenta uma

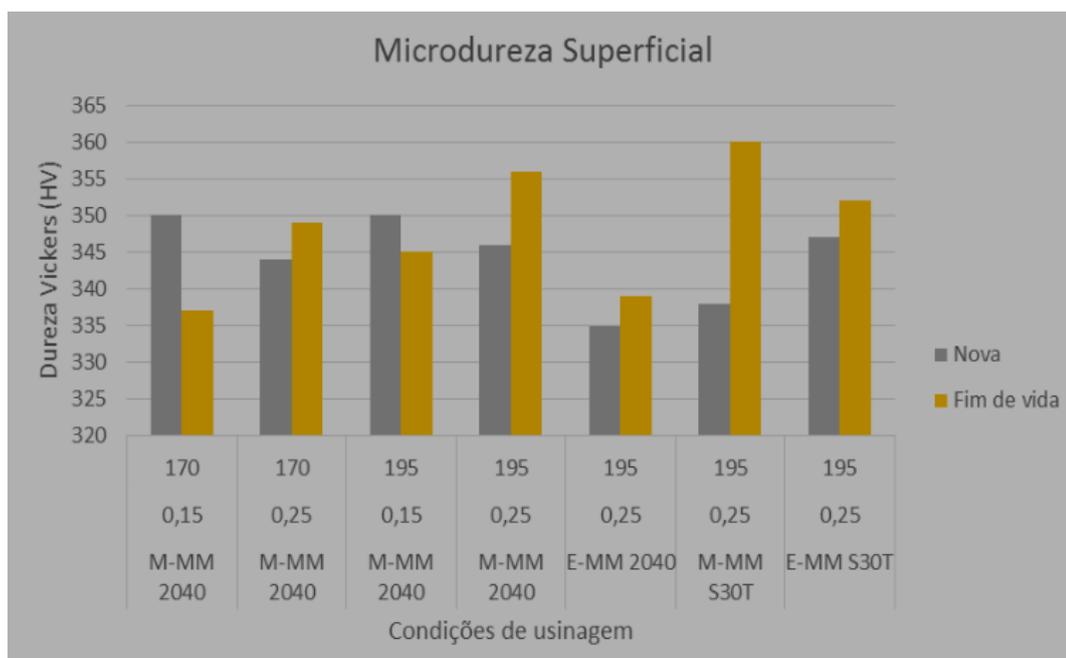
relação direta com a resistência à fadiga das peças fabricadas. No âmbito das tensões residuais geradas no processo, sabe-se que tensões de compressão podem ser benéficas para a peça. Entretanto, altas tensões residuais trativas prejudicam muito a vida em fadiga dessas [29].

Ao contrário do que se pode pensar, cada etapa do processo de fabricação do material influencia na integridade superficial, apesar do último processamento desempenhar um papel crucial para o resultado final [30]. Ao estudar os efeitos do fluido de corte no fresamento do aço 15-5 PH, Fernando (2006) [31] analisou a rugosidade da amostra usinada com aplicação do fluido e obteve que com uma fresa de 19,05 mm de diâmetro e profundidade de corte 4,0 mm para o desbaste e 1,0 mm para o acabamento, para a velocidade de corte de 100 m/min, os valores de rugosidade R_a variaram entre 0,55 μm e 0,98 μm (diferença de 0,43 μm) sendo que quando esta velocidade foi alterada para 120 m/min o resultado obtido foi entre 0,57 μm e 0,72 μm (diferença de 0,15 μm).

Com o propósito de investigar a influência dos parâmetros de usinagem durante o fresamento na ocorrência de encruamento superficial no aço em questão, Pereira (2014) [32] realizou ensaios de microdureza comparando-se superfícies usinadas com profundidade de corte igual a 1,00 mm sob duas velocidades de corte (170 m/min e 195 m/min) e com ferramentas de corte novas e em fim de vida. O autor concluiu que a dureza superficial não apresentou nenhuma relação com os parâmetros de corte e o estado da ferramenta (Figura 18). Ao analisar a dureza ao longo da subsuperfície usinada, a partir de 0,5 μm de profundidade, a menor dureza encontrada foi de 212HV e a maior de 283HV, sendo que foi observado uma tendência de que valores obtidos com ferramentas novas (Figura 19) fossem menores do que valores obtidos com ferramentas em fim de vida (Figura 20). Os parâmetros utilizados pelo autor em cada ensaio podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros para os ensaios de usinagem [32].

Ensaio	Ferramenta	v_c (m/min)	a_z (mm/dente)	v_a (mm/min)	Rotação (rpm)	Situação
E1	M-MM 2040	170	0,15	772	2516	Nova
E2	M-MM 2040	170	0,25	1288	2576	Nova
E3	M-MM 2040	195	0,15	886	2955	Nova
E4	M-MM 2040	195	0,25	1477	2955	Nova
E5	E-MM 2040	195	0,25	1476	2955	Nova
E6	M-MM S30T	195	0,25	1476	2955	Nova
E7	E-MM S30T	195	0,25	1476	2955	Nova
E8	M-MM 2040	170	0,15	772	2516	Fim de Vida
E9	M-MM 2040	170	0,25	1288	2576	Fim de Vida
E10	M-MM 2040	195	0,15	886	2955	Fim de Vida
E11	M-MM 2040	195	0,25	1477	2955	Fim de Vida
E12	E-MM 2040	195	0,25	1476	2955	Fim de Vida
E13	M-MM S30T	195	0,25	1476	2955	Fim de Vida
E14	E-MM S30T	195	0,25	1476	2955	Fim de Vida

**Figura 18:** Microdureza da superfície usinada com diferentes condições de corte e estado da ferramenta [32].

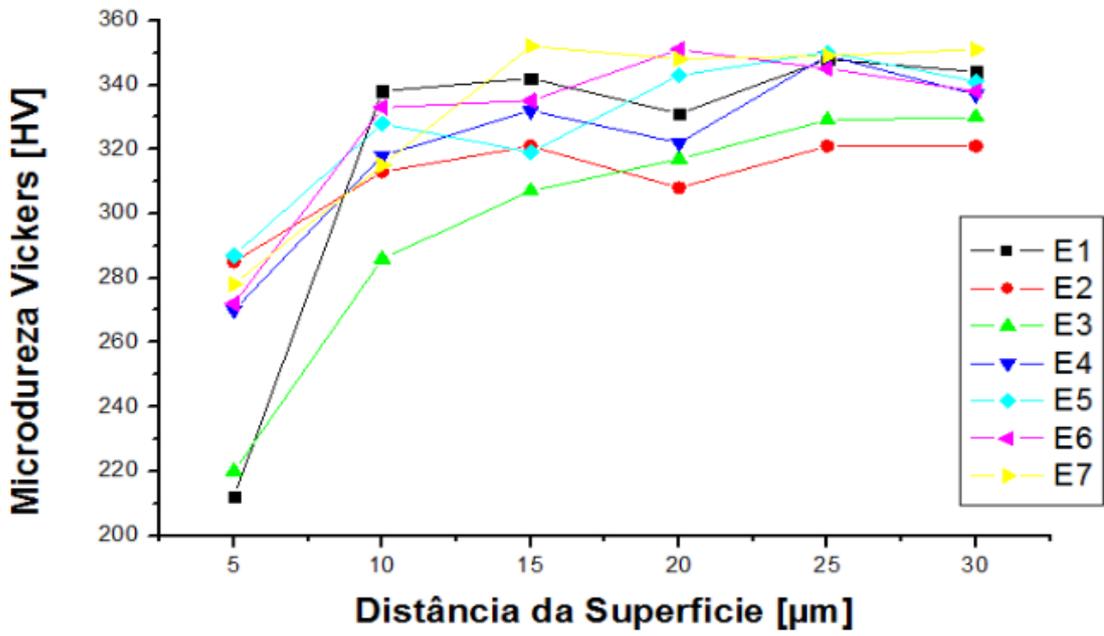


Figura 19: Microdureza (HV) - ferramentas novas [32].

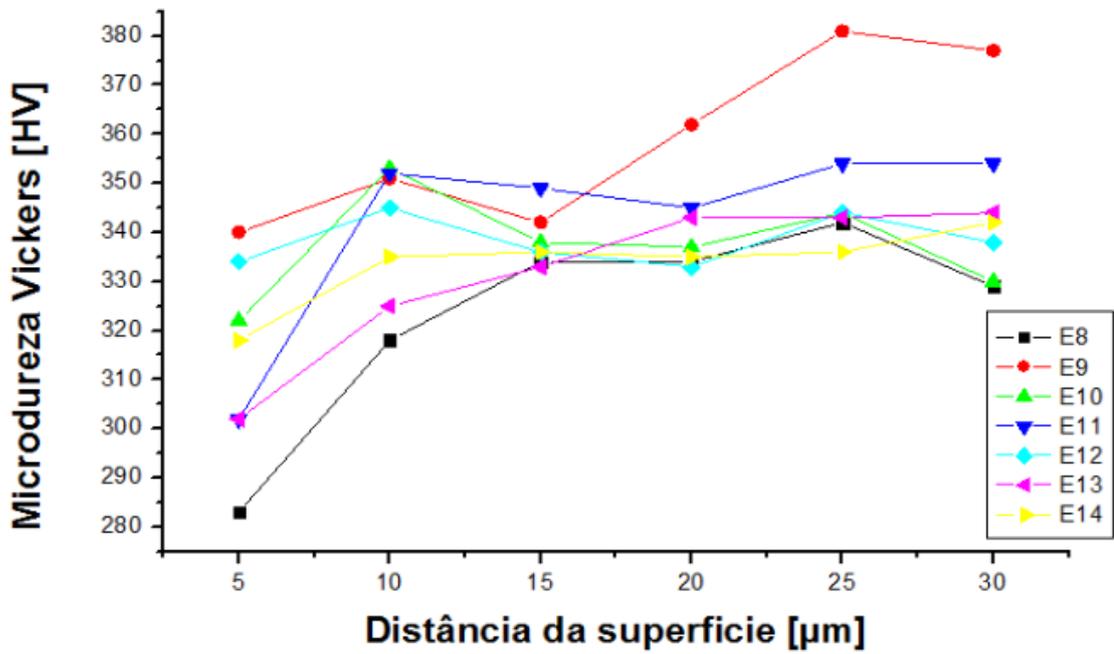


Figura 20: Microdureza (HV) - ferramentas em fim de vida [32].

2.3.2. Manufatura aditiva do aço inoxidável martensítico UNS S15500

Com relação à usinagem, estudos sobre o comportamento de materiais impressos ainda são poucos, principalmente os materiais metálicos. Contudo, alguns estudos vêm sendo realizados em materiais metálicos impresso, principalmente com relação as suas propriedades mecânicas. Khalid Rafi *et al*, (2013) [33] estudaram propriedades como tensão limite de escoamento, resistência mecânica e resistência à fadiga, além de caracterizar as fraturas em amostras do aço 15-5 PH obtidas via impressão 3D, onde as tensões foram comparadas em relação a orientação de fabricação das camadas da peça. Os autores concluíram neste trabalho que os exemplares fabricados na orientação horizontal obtiveram propriedades mecânicas melhores comparado àqueles fabricados na orientação vertical. A resistência à fadiga também apresentou comportamento muito próximo ao padrão do mesmo material forjado.

Já Kevin M. Coffy (2014) [34] analisou a microestrutura do aço 15-5 PH submetido a fabricação por impressão 3D através do método DMLS, chegando a conclusão de que o tamanho dos maiores grãos da austenita prévia presente no material impresso estavam na faixa de 6,7 μm a 5,6 μm , diferente do mesmo material fundido e recozido, cuja austenita prévia apresentou tamanho de grão na faixa de 31,8 μm a 26,7 μm , mostrando assim como o material fabricado pelo primeiro processo pode apresentar propriedades mecânicas melhores que o último. As microestruturas de ambos os materiais podem ser vistas na Figura 21. A Figura 22 apresenta a mesma microestrutura, com maiores ampliações.

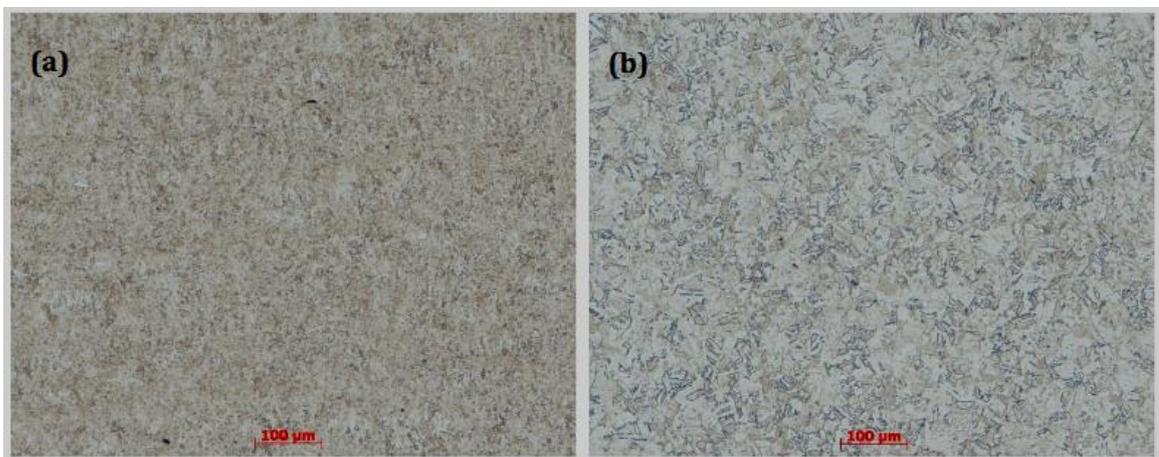


Figura 21: Microscopia do aço 15-5 PH, resolução de 100 μm (a) liga DMLS sem tratamento térmico; (b) liga convencional sem tratamento térmico [34].

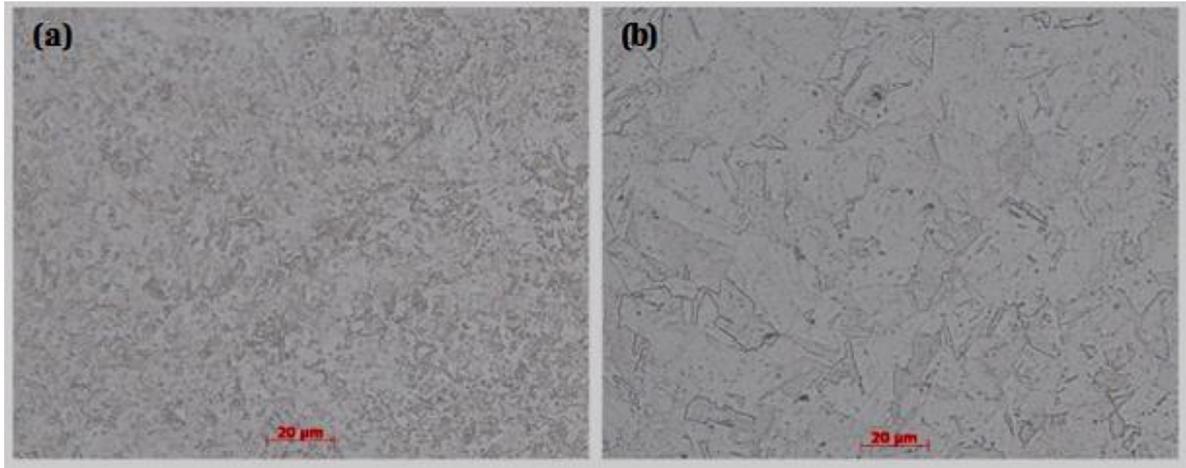


Figura 22: Microscopia do aço 15-5 PH, resolução de 20 μ m (a) liga DMLS sem tratamento térmico; (b) liga convencional sem tratamento térmico [34].

Capítulo 3

Material e métodos

No presente capítulo são descritos o material e os métodos utilizados para realização deste trabalho, sendo estes a fabricação da amostra através do processo de manufatura aditiva (DMLS), o processo de fresamento, análise de rugosidade das superfícies usinadas, ensaio de dureza das superfícies.

3.1. Aço inoxidável EOS PH1

O material utilizado para a fabricação da amostra foi o aço inoxidável EOS PH1 na forma em pó. A composição química do material é equivalente à dos aços DIN 1.4540 e UNS S15500. O material é um aço endurecível por precipitação e possui ótimas propriedades mecânicas e uma boa resistência à corrosão, sendo utilizado em aplicações que exijam uma combinação entre resistência à corrosão, dureza e resistência mecânica. O material é geralmente utilizado para a fabricação de protótipos e pequenos componentes que precisem de esterilidade. A composição química do aço pode ser vista conforme a Tabela 5 e as propriedades mecânicas na Tabela 6.

Tabela 5: Composição química do aço inoxidável EOS PH1 (em % de peso) – Fornecido pelo fabricante

Cr	Ni	Cu	Mn	Si	C	Mo	Nb
14,0 – 15,5	3,5 – 5,5	2,5 – 4,5	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 0,07	≤ 0,5	0,15 – 0,45

Tabela 6: Propriedades mecânicas do aço inoxidável EOS PH1 – Fornecido pelo fabricante.

Limite de Resistência (MPa)	1200 ± 50
Tensão Normal de Escoamento (MPa)	930 ± 75
Alongamento (%)	14
Dureza (HV)	429
Rugosidade Superficial – após jateamento (μm)	$R_a \sim 5.0$ $R_z \sim 25.0$

3.2. Fabricação da amostra

A amostra foi fabricada na impressora EOS M Eosint 280 (Figura 23), no Laboratório Fabricação Digital da PUC Rio através do processo de impressão DMLS, com resolução de $20\mu\text{m}$. A peça fornecida para este trabalho pode ser vista na Figura 24.



Figura23: Impressora EOS M Eosint 280 [35].



Figura24: Peça impressa utilizada.

3.3.Fresamento da peça

A peça foi usinada na fresadora Diplomat 3001, modelo FVF 2000 (Figura 25) no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do CEFET/RJ através do processo de fresamento de topo utilizando uma ferramenta intercambiável de metal duro com diâmetro de 20mm e com dois insertos, modelo XDMT090308HXPA120 (Figura 26) sendo o comprimento $LI = 9,0$ mm, a largura $W = 6,0$ mm, a espessura $S = 3,0$ mm e o raio da ponta da ferramenta $r_{\epsilon} = 0,8$ mm.



Figura 25: Fresadora Diplomat 3001 modelo FVF 2000.

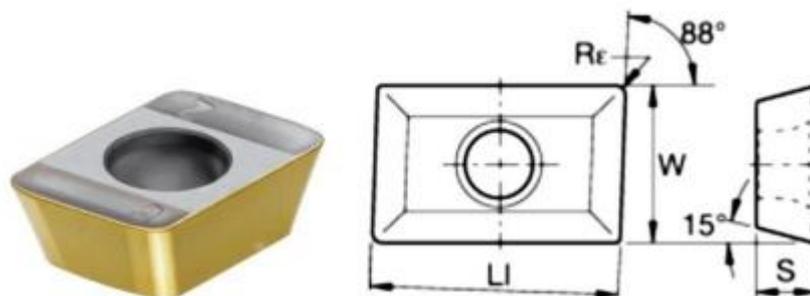


Figura 26: Geometria do inserto utilizado no fresamento.

Foram usinadas na amostra 5 superfícies. Os fresamentos foram realizados com emulsão e utilizando a mesma ferramenta, devido à pequena área de cada superfície. As velocidades de corte foram definidas em: 80, 100, 120, 140 e 160m/min. O processo foi

realizado com um passe de profundidade de 0,5mm e velocidade de avanço da mesa mantida constante de 85mm/min em todas as superfícies.

A rotação da máquina foi calculada através da Equação 1 e a velocidade de avanço através da Equação 2, sendo a Equação 3 utilizada para se obter o avanço por dente, assim os parâmetros utilizados para cada condição podem ser vistos na Tabela 7. A peça após o processo de usinagem pode vista na Figura 27.

Tabela 7: Parâmetros de corte para cada condição de fresamento

Condição	Rotação da árvore (rpm)	Avanço por dente (mm/dente)	Velocidade de corte (m/min)
1	1270	0,033	80
2	1590	0,026	100
3	1910	0,022	120
4	2230	0,019	140
5	2550	0,017	160

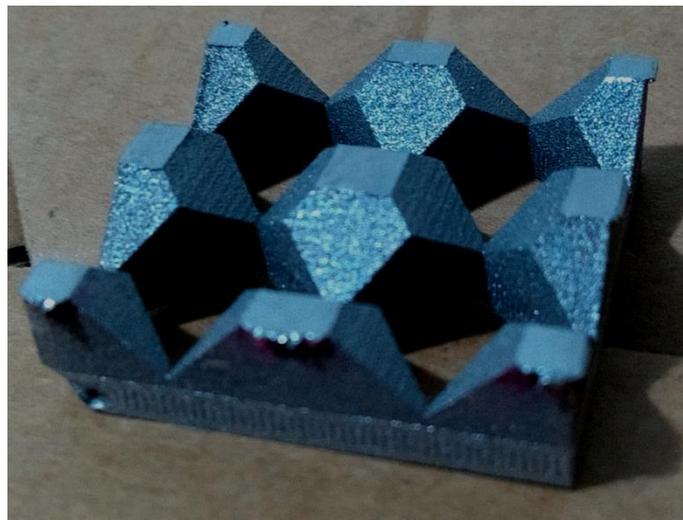


Figura 27: Peça após processo de fresamento.

3.4. Ensaio de rugosidade

O ensaio de rugosidade foi realizado com o rugosímetro portátil Surftest SJ 210 (Figura 28) com 3 amostragens e *cut-off* igual a 0,25 mm. A velocidade de deslocamento do apalpador foi de 0,5 mm/s.



Figura 28: Rugosímetro portátil Surftest SJ 210 utilizado no teste de rugosidade.

3.5. Ensaio de microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, através do durômetro da marca Wilson Instruments, modelo 422 MVD. Foram realizados ensaios de microdureza Vickers com carga de 1kgf para realizar três identificações em cada face usinada, a fim de se avaliar o efeito da velocidade de corte da usinagem na dureza superficial do material.

Capítulo 4

Resultados e discussão

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos, sendo estes a rugosidade superficial das faces usinadas e a microdureza de cada superfície do material feito pelo processo DMLS.

4.1. Rugosidade

A rugosidade teórica foi analisada segundo os parâmetros R_a e R_t , calculada segundo as Equações 7 e 8, sendo o avanço por dente em cada condição mostrado na Tabela 8 e os ângulos C e D iguais a 44° e 15° , respectivamente, conforme a Figura 26. Os resultados dos cálculos teóricos para os dois parâmetros podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8: Rugosidade teórica segundo os parâmetros R_a e R_t .

Condição	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por dente (mm/dente)	R_a (μm)	R_t (μm)
1	80	0,033	0,085	0,378
2	100	0,026	0,053	0,298
3	120	0,022	0,038	0,252
4	140	0,019	0,028	0,218
5	160	0,017	0,023	0,195

Na Figura 29 pode-se observar a relação entre o parâmetro R_a experimental e o teórico, assim como na Figura 30 a relação entre o parâmetro R_t experimental e teórico.

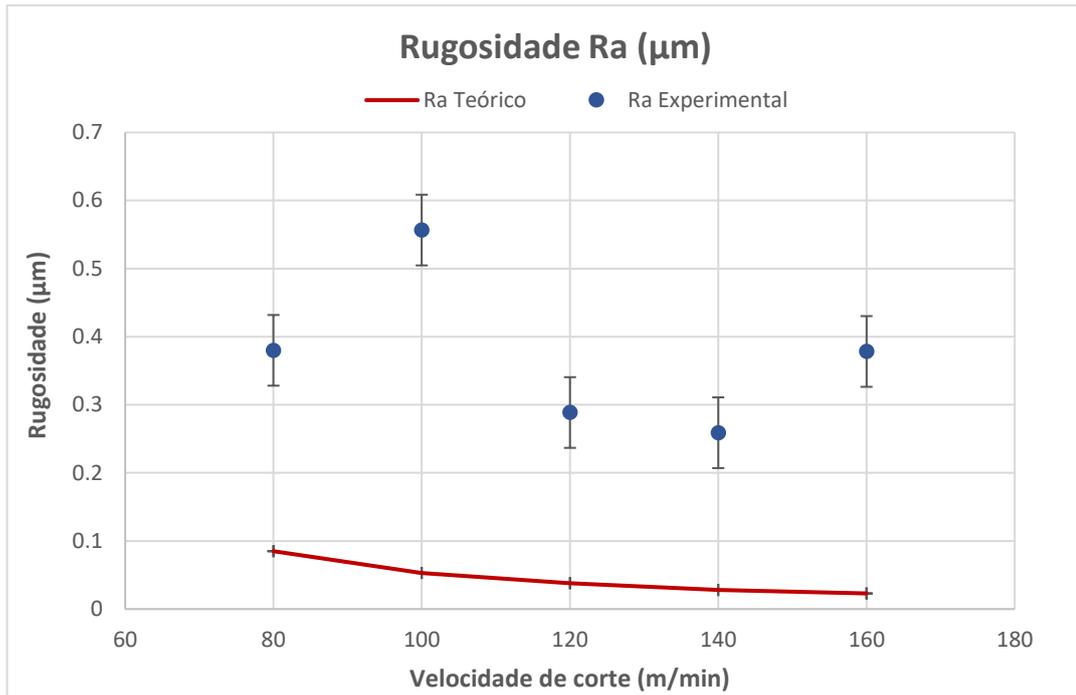


Figura 29: Variação do parâmetro R_a (μm) do material em função dos parâmetros de corte.

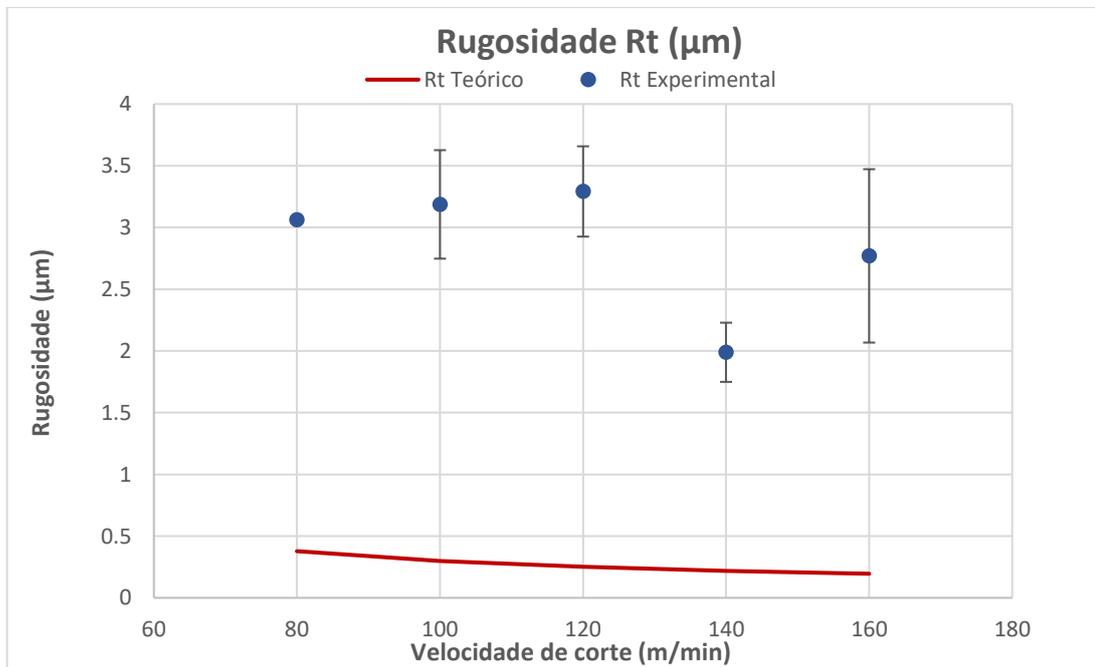


Figura 30: Variação do parâmetro R_t (μm) do material em função da velocidade de corte durante o fresamento.

Observando os dados apresentados nas Figuras 29 e 30 é possível notar uma variação entre a rugosidade teórica a e rugosidade real. A diferença entre as rugosidades teóricas e experimentais pode ser explicada devido a uma fixação não ideal da amostra devido ao seu pequeno tamanho, o que pode ter acarretado em vibrações excessivas que tornaram a superfície mais irregular. Também pode ter ocorrido um fluxo irregular de cavaco na zona de corte, o que prejudica a qualidade superficial da peça usinada.

Por meio do gráfico obtido com os resultados do teste de rugosidade (Figura 31) pode-se observar que ambos os parâmetros não aparentam ter nenhuma relação padronizada com a velocidade de corte, visto que estes oscilaram conforme a velocidade de corte e o avanço por dente foram alterados. Os maiores índices de R_a encontrados foram aqueles submetidos às condições 1 e 2 e os maiores índices de R_t obtidos foram aqueles nas condições 2 e 3. A amostra que apresentou melhor integridade superficial foi a submetida à condição 4, tanto para o parâmetro R_a quanto para o R_t , o que caracterizaria esses parâmetros como ótimos para o processo de fresamento desse material. Contudo, esses valores ainda são muito superiores aos valores teóricos, aproximadamente 9500% para R_a e 700% para R_t . Os resultados experimentais podem ser vistos na Tabela 9.

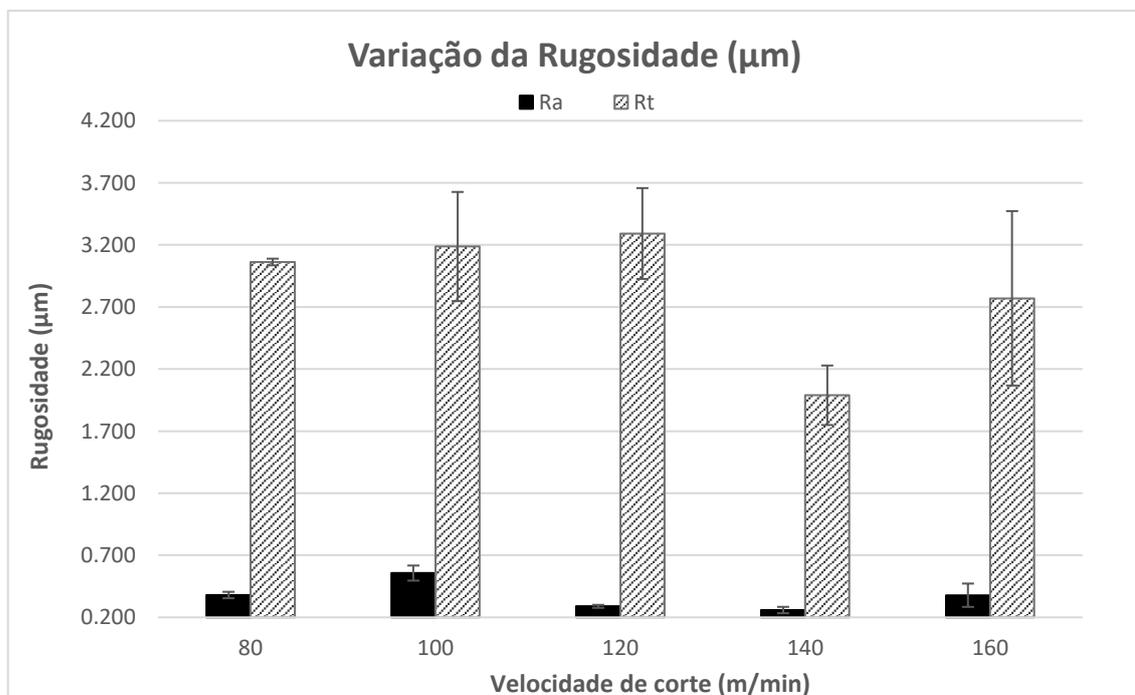


Figura 31:Variação da rugosidade (μm) do material em função da velocidade de corte durante o fresamento.

Tabela 9: Rugosidade de cada superfície.

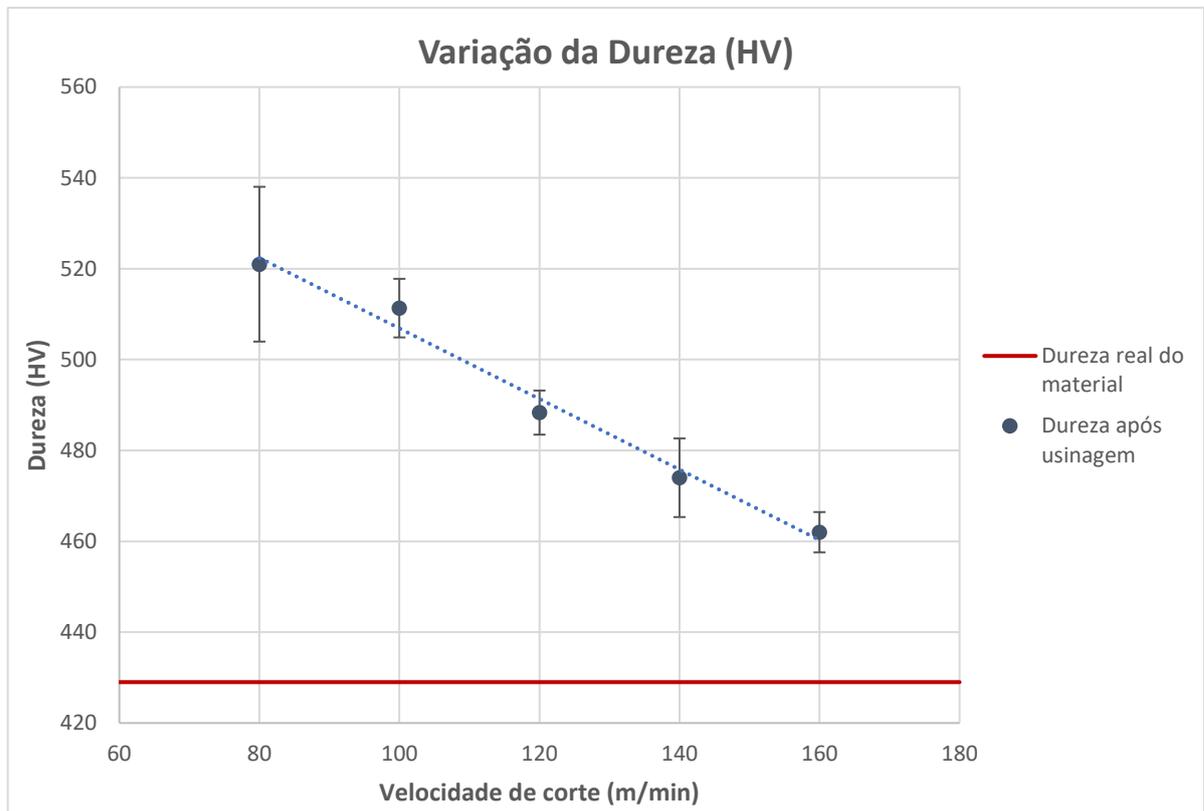
Condição	Velocidade de corte (m/min)	Ra (μm)	Rt (μm)
1	80	$0,380 \pm 0,052$	$3,062 \pm 0,054$
2	100	$0,557 \pm 0,122$	$3,187 \pm 0,879$
3	120	$0,289 \pm 0,024$	$3,292 \pm 0,732$
4	140	$0,259 \pm 0,051$	$1,989 \pm 0,479$
5	160	$0,378 \pm 0,188$	$2,770 \pm 1,405$

4.2. Microdureza das superfícies

Os resultados de dureza do material podem ser vistos na Tabela 10. Através do gráfico representativo da variação da dureza na superfície da amostra com a velocidade de corte durante a usinagem (Figura 31), ao contrário do que foi obtido por Pereira (2014) [30] que conclui que os parâmetros de corte durante o fresamento no aço obtido convencionalmente não influenciavam a dureza na superfície usinada, é possível perceber que no material obtido por manufatura aditiva existe uma diminuição da dureza no aço inoxidável EOS PH1 conforme a velocidade de corte no fresamento aumenta. Esse fenômeno poderia ser explicado devido ao encruamento superficial do aço, visto que quanto mais baixa é a velocidade de corte mais o material usinado é deformado, devido ao maior tempo de contato com a ferramenta de corte, aumentando assim a tensão de cisalhamento no material que por sua vez ao ser submetido a esse campo de tensões, faz com que, naquele local, as discordâncias interajam entre si e com o campo reduzindo a mobilidade dessas e sendo necessária uma maior quantidade de energia para que o material possa ser deformado localmente de novo.

Tabela 10: Microdureza Vickers de cada superfície

Condição	Velocidade de corte (m/min)	Microdureza (HV)
1	80	521 ±34
2	100	511 ±13
3	120	488 ±10
4	140	474 ±17
5	160	462 ±9

**Figura 32:** Variação da dureza (HV) do material em função da velocidade de corte durante o fresamento.

Na Figura 32 observa-se uma comparação entre a variação de dureza e rugosidade com a velocidade de corte. Ao analisar os resultados nota-se que não há uma relação direta entre rugosidade e dureza, ou seja, não se pode concluir que o aumento dos valores de

rugosidade está diretamente relacionado a um aumento de dureza superficial das peças usinadas. Esse resultado corrobora com a possível explicação para os altos valores de rugosidade das amostras, pois possivelmente não houve aumentos significativos das forças de usinagem das amostras com a deformação plástica do material, que poderia resultar em vibrações durante a usinagem e prejudicar a qualidade superficial da mesma. Dessa forma, fica mais evidenciado que pode ter ocorrido um problema na fixação das amostras que acabou por prejudicar a rugosidade das mesmas.

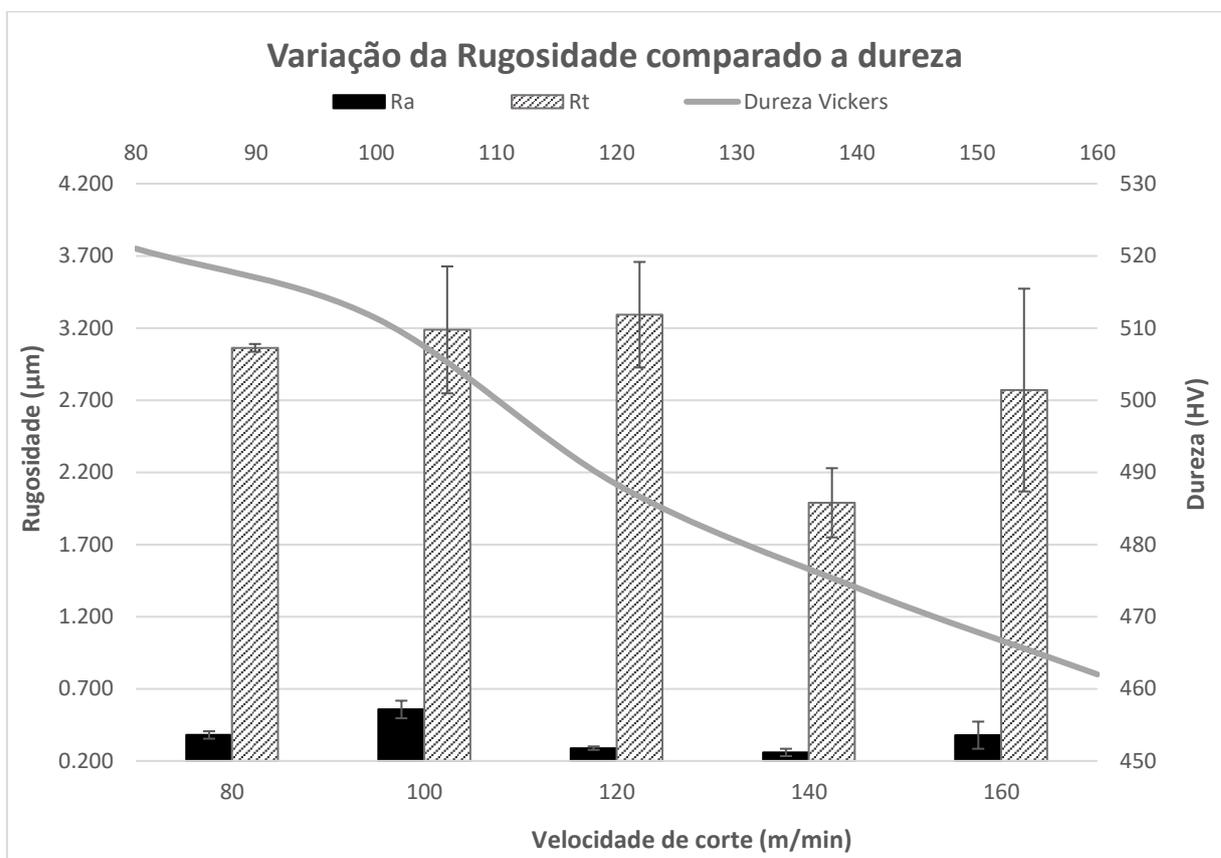


Figura 33: Comparação entre a variação da dureza (HV) e rugosidade (μm) do material em função da velocidade de corte durante o fresamento.

Com base nos dados obtidos, verifica-se que a velocidade de 140m/min seria mais recomendada para a usinagem desse tipo de material, pois não alterou muito a dureza superficial das peças e proporcionou melhor acabamento do mesmo. Esse resultado mostra que, ao contrário do esperado para um material fundido, o aumento da velocidade de corte não necessariamente melhoraria a qualidade superficial das peças usinadas.

Capítulo 5

Conclusão

Após análise bibliográfica e obtenção dos resultados, seguindo o objetivo deste trabalho de analisar os efeitos dos parâmetros de usinagem na integridade superficial do material em questão, foi possível concluir que:

1. A velocidade de corte durante o fresamento influi diretamente na integridade superficial, principalmente nos valores de dureza superficial.
2. A velocidade de corte alterou significativamente a dureza superficial do material, sendo que quando maior a velocidade menor a dureza superficial do material.
3. A interação entre velocidade de corte e avanço por dente durante o fresamento de topo produziu uma variação oscilatória na rugosidade superficial do material segundo os parâmetros R_a e R_t .
4. Para fins de acabamento, a melhor situação obtida foi na condição 4, com velocidade de corte igual a 140m/min, segundo ambos os parâmetros (rugosidade e dureza).

Capítulo 6

Sugestões para trabalhos futuros

1. Realizar análise microestrutural para cada condição de usinagem a fim de se verificar a ocorrência de encruamento superficial.
2. Comparar a integridade superficial após fresamento do mesmo material obtido por manufatura aditiva produzida através de diferentes orientações de sinterização.
3. Verificar as forças de corte durante o fresamento do material para verificar sua influencia na integridade superficial da peça.
4. Comparar a integridade superficial entre peças obtidas através de processos de fabricação convencionais e entre peças obtidas através de processos de manufatura aditiva.

Referências Bibliográficas

- [1]WONG, K. V.; HERNADEZ, A, “A Review of Additive Manufacturing”, USA, *International Scholarly Research Network*, vol. 2012, 10 p, June 2012.
- [2]INFOMET, Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=206>> Acessado em: 06 de jun. 2018.
- [3]DULEBA, B. *et al.* “Materials and finishing metods of DMLS manufactured Parts”, Košice, Slovakia, *Transfer inovácií*, vol. 21, pp.143-148, 2011.
- [4]ALCISTO, J. *et al.* “Tensile Properties and Microstructures of Laser-Formed Ti-6Al-4V”, [California, United States of America], *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 20, pp. 203-212, 2011.
- [5]AMERICA NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; AMERICA MAKES. *Standardization Roadmap for Additive Manufacturing*, New York, United States of America, Feb. 2017.
- [6]LIM, S. *et al.*, “Developments in construction-scale additive manufacturing processes”, [United Kingdom], *Automation in Construction*, vol. 21, pp. 262-268, 2012.
- [7]KRUTH, J. P. Material Inccress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, In: CIRP, 40., 1991, Belgium. *Anais*, Belgium, pp. 603-614, 1991.
- [8]DUDEK, P. “FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements”, *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 58, pp. 1416-1418, 2013.
- [9]BÁRTOLO, P. J. *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*, Portugal, Springer Science & Business Media, 2011.
- [10]BELTRÁN, N. “Characterization of factors influencing dimensional and geometric errors in Poly Jet manufacturing of cylindrical features”, In: The Manufacturing Engineering Society International Conference, Espanha, *Anais*, Espanha, pp. 62-69, 2015.

- [11]ENGATECH, Estados Unidos da América. Disponível em: <<http://engatech.com/difference-fdm-polyjet-3d-printing/>> Acesso em: 03 dez. 2017.
- [12]LWT SISTEMAS, São Bernardo do Campo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.lwtsistemas.com.br/produtos/material-de-impressao-rigido-opaco-polyjet/>> Acesso em: 03 dez. 2017.
- [13]DAS, A. *et al.* “Binder removal studies in ceramic thick shapes made by laminated object manufacturing”, India, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 23, pp. 1013-1017, 2002.
- [14]CUSTOMPARTNET, Estados Unidos da América. Disponível em: <<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>> Acesso em: 07 dez. 2017.
- [15]STAR RAPID, China. Disponível em: <<https://www.starrapid.com/blog/top-7-methods-for-making-3d-rapid-prototypes/>> Acesso em: 07 dez. 2017.
- [16] KANG, S. J. L. *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*. England, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [17]SIMCHI, A. “On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling”. Alemanha, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 319-328, 2003.
- [18]3DILLA, Disponível em: <<http://pt.3dilla.com/impressora-3d/selective-laser-sintering/>> Acesso em: 12 dez. 2017.
- [19] MERCELIS, P.; KRUTH, J. P. “Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting”, Belgium, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 12, pp. 254-265, 2006.
- [20] MURR, L. E. *et al.* “Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies”, United States of America, *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 28, pp. 1-14, 2011.
- [21] TRENT, E. M. *Metal cutting*, 2 ed., Londres, Editora Butterworths & Co., 1984.
- [22] FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo, Editora Blucher, 1969.

- [23] MACHADO, A. R. *Teoria da usinagem dos materiais*, São Paulo, Editora Blucher, 2009.
- [24] MACHADO, R. A.; *Teoria da usinagem dos materiais*. 2 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.
- [25] BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 4287, *Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade – Método do Perfil – Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade*, 2002.
- [26] MOREL, C. *et al.* “Part surface roughness on laser sintering and milling of maraging steel 300”. In: 14th International Conference on High Speed Manufacturing, Apr 2018. Disponível em: < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01773243/document> > Acessado em: 06 jun. 2018.
- [27] ALEXANDER, I. *et al.* “Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies”. 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems - CIRP CMS, vol. 41, pp. 1023-1026, Russia, 2015.
- [28] AZO MATERIALS, Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9134>> Acesso em: 26 nov. 2017
- [29] MONDELIN, A. “Surface integrity prediction in finish turning of 15-5PH stainless steel”, *1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI)*, pp. 270-275, França, 2011.
- [30] MONDELIN, A. *et al.* “Hybrid model for the prediction of residual stresses induced by 15-5PH steel turning”. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 58, pp.69-85, França, 2012.
- [31] FILHO, F. T. *A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH*. Universidade Estadual de Campinas - comissão de pós-graduação em engenharia mecânica, São Paulo, 2006.
- [32] PEREIRA, L. A. *Influência das condições de fresamento na integridade superficial do aço inoxidável 15-5PH*. Universidade Estadual de Campinas faculdade de engenharia mecânica, São Paulo, 2014.

[33] RAFI, H. K. “A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting”, *Internacional Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, pp. 1299-1309, Inglaterra, nov. 2013.

[34] COFFY, K. M. *Microstructure and chemistry evaluation of direct metal laser sintered 15-5 PH stainless steel*. Dissertação de M. Sc, University of Central Florida, Estados Unidos da América, 2014.

[35] EOS, Disponível em:
<https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m2880> Acesso em: 29 abril 2018