

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

**Análise da usinabilidade da liga Ti-6Al-4V
produzida por manufatura aditiva (SLM) no
fresamento**

Pedro Henrique Francisco Caruso Pedroso

Prof^a Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

Prof Co-orientador: Fábio de Oliveira Campos

RIO DE JANEIRO

Junho 2019

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

**Análise da usinabilidade da liga Ti-6Al-4V
produzida por manufatura aditiva (SLM) no
fresamento**

Pedro Henrique Francisco Caruso Pedroso

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

Prof Co-orientador: Fábio de Oliveira Campos

RIO DE JANEIRO

Junho 2019

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

P372 Pedroso, Pedro Henrique Francisco Caruso
Análise da usinabilidade da liga Ti-6Al-4V produzida por
manufatura aditiva (SLM) no fresamento / Pedro Henrique Francisco
Caruso Pedroso.—2019.
x, 67f. + anexo e apêndices : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2019.

Bibliografia : f. 65-67

Orientadora : Tatiane de Campos Chuvas

Coorientador : Fábio de Oliveira Campos

1. Engenharia mecânica. 2. Usinagem. 3. Fresagem. 4.
Prototipagem rápida. 5. Ligas de titânio. I. Chuvas, Tatiana de
Campos (Orient.). II. Campos, Fábio de Oliveira (Coorient.). III.
Título.

CDD 620.1

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, minha mãe Kátia, meu pai Pedro Paulo, meus irmãos João Pedro e Pedro Paulo por toda compreensão, apoio e suporte durante minha jornada até aqui, agradeço também aos meus avós, tios e primos que sempre estiveram ao meu lado, acreditaram e torceram pelo meu sucesso.

Também a minha parceira Priscila pelo carinho, compreensão e incentivo nesses últimos 2 anos que estamos juntos e aos meus colegas de CEFET/RJ e Enactus, certamente eu não teria conseguido enfrentar a faculdade sem vocês.

Ao professor Fábio Campos pelo apoio nesses últimos meses de orientação, com grandes ensinamentos e experiência que foram determinantes para o sucesso do trabalho, e a professora Tatiane Chuvás por ter apresentado de forma tão inspiradora as disciplinas de processos de fabricação.

Aos meus colegas e amigos de trabalho da Hydratight, por terem me possibilitado o primeiro contato com a área da Engenharia Mecânica e terem me incentivado e inspirado a seguir essa carreira.

E aos meus colegas de trabalho da Vale pela compreensão e apoio nessa reta final da faculdade.

Resumo

Criado na década de 1980, o processo de fabricação por manufatura aditiva era inicialmente chamado de prototipagem rápida e teve como seu propósito inicial uma fabricação ágil, de custo reduzido de protótipos e peças para testes, como parte do planejamento da produção. Com a evolução da tecnologia, a manufatura aditiva passou a ter uma maior versatilidade de materiais e processos, além da melhoria na qualidade das peças fabricadas. Com isso, tornou-se possível a sua utilização também para fabricação de peças funcionais, muito próximas de sua forma final. Dentre os materiais utilizados na fabricação de peças funcionais, pode-se destacar o uso dos metais, como o aço inox, os aços ferramenta, as ligas de titânio, de cromo, de níquel e de alumínio. Em função do custo elevado na fabricação de metais por manufatura aditiva, sua maior demanda atual é para indústrias de ponta como a médica e a aeroespacial, que possuem capacidade financeira de investimento. Apesar da fabricação de peças funcionais, em muitas aplicações é necessária a realização de operações de pós processamento para adequação de algumas propriedades. Pode ser necessária a realização de tratamentos térmicos para obtenção de determinada propriedade mecânica, ou operações de usinagem, principalmente para adequação do acabamento de superfície. O presente trabalho irá explorar o contexto da manufatura aditiva nos últimos anos e no momento atual. Em seguida será avaliada a usinabilidade de uma peça de liga de titânio Ti-6Al-4V, fabricada por SLM (*sintering laser melting*), quando submetida a uma operação de fresamento. Serão variados o avanço por dente e a profundidade de corte para posterior análise das forças resultantes, do desgaste nas ferramentas, do cavaco formado e da rugosidade final da peça para cada operação.

Palavras chave: Manufatura aditiva, titânio, Ti-6Al-4V, fresamento, usinabilidade

Abstract

Created in the 1980s, the process of manufacturing by additive manufacturing was initially called rapid prototyping and had as its initial purpose an agile, cost-effective manufacturing of prototypes testing as part of production planning. With the evolution of technology, the additive manufacturing began to have a greater versatility of materials and processes, besides the improvement in the quality of the manufactured parts. With this, it became possible to use them also to manufacture functional parts, very close to their final form. Among the materials used in the manufacture of functional parts, we can highlight the use of metals, such as stainless steel, tool steels, titanium, chromium, nickel and aluminum alloys. Due to the high cost of metal manufacturing by additive manufacturing, its current greatest demand is for leading industries such as medical and aerospace, which have the financial capacity to invest. Despite the manufacture of functional parts, in many applications it is necessary to perform post-processing operations to suit some properties. It may be necessary to perform thermal treatments to obtain a certain mechanical property, or machining operations, mainly for surface finishing. The present work will explore the context of additive manufacturing in recent years and at the present time. Next, the machinability of a titanium alloy piece Ti-6Al-4V, manufactured by SLM (sintering laser melting) will be evaluated when subjected to a milling operation. The feed per tooth and depth of cut will be varied for subsequent analysis of the resulting forces, wear on the tools, the chip formed and the final roughness of the part for each operation.

Keywords: Additive manufacture, titanium, Ti-6Al-4V, milling, machinability

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – MANUFATURA ADITIVA	4
2.1 A Manufatura aditiva e seus processos	4
2.1.1 Contexto histórico e atual da manufatura aditiva	4
2.1.2 Processos de fabricação por manufatura aditiva	11
2.2 Manufatura aditiva por SLM	15
2.3 Propriedades do titânio e da liga Ti-6Al-4V	21
2.3.1 Introdução ao titânio	21
2.3.2 Metalurgia e propriedades do titânio.....	22
2.3.3 Titânio puro.....	26
2.3.4 Liga de titânio Ti-6Al-4V.....	27
CAPÍTULO 3 - USINAGEM E FRESAMENTO	28
3.1 Fresamento.....	29
3.2 Usinagem em materiais fabricados por manufatura aditiva	31
3.3 Usinagem do titânio	33
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 A amostra.....	35
4.2 Ferramenta e máquina-ferramenta	36
4.3 Planejamento de experimentos.....	38
4.4 Análise das forças de corte	40
4.5 Análise de rugosidade.....	41
4.6 Análise dos cavacos, do desgaste da ferramenta, da superfície dos canais e das rebarbas.....	43
4.7 – Caracterização da liga Ti-6Al-4V fabricada por SLM	44
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
5.1 Análise das forças de corte.....	46

5.2	Análise da rugosidade de superfície	54
5.3	Análise dos canais e das rebarbas	56
5.4	Análise de formação dos cavacos.....	58
5.4	Análise de desgaste da ferramenta.....	60
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO		63
6.1	Conclusão do projeto	63
6.2	Sugestões de trabalhos futuros	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		65
APÊNDICE A - IMAGEM DOS CANAIS		68
APÊNDICE B - IMAGEM DOS CAVACOS.....		70
ANEXO A – COTAÇÃO DE COMPRA DE PEÇA		72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Os 9 pilares da indústria 4.0 [4,5].....	1
Figura 1.2: Exemplos de implantes dentários de material metálico (a), e a ilustração de como funciona a aplicação no osso do maxilar (b) [7].....	3
Figura 2.1: Vista em corte em três dimensões de um molde com malha de treliças, em verde, para otimização do resfriamento (a) e visão mais aproximada da malha e dos canais de resfriamento (b) [11].....	5
Figura 2.2: Visão dos dois modelos de fabricação de moldes para pneus, a esquerda o modelo tradicional e a direita o modelo feito por manufatura aditiva (a), e a aplicação do molde na fabricação das bandas de rodagem otimizadas (b) [13].....	5
Figura 2.3: Adidas Futurecraft 4D (a) e solado geometricamente otimizado para melhoria de performance (b) [14].....	6
Figura 2.4: Processo de otimização topológica para fabricação de peças por manufatura aditiva, onde são verificados os pontos de maior solicitação para realizar a reengenharia da peça, buscando menor quantidade de material e redução do peso [18].....	9
Figura 2.5: Representação de um <i>manifold</i> fabricado pelo método tradicional (a), a representação dos canais internos no bloco do <i>manifold</i> tradicional (b), representação do <i>manifold</i> com design otimizado pela fabricação em manufatura aditiva (c) [19]...	10
Figura 2.6: Esquema do sistema SLM (<i>selective laser melting</i>) [23].....	16
Figura 2.7: Estratégia de varredura [6].....	17
Figura 2.8: Representação de regiões que requerem estruturas de suporte e da peça sendo construída sobre a base e com as estruturas de suporte em construção [6]...	18
Figura 2.9: Efeito degrau de escada em função da espessura da camada [6].....	20
Figura 2.10: Variação do acabamento de superfície em uma mesma peça em função de diferentes ângulos de inclinação das superfícies e consequente efeito degrau de escada [6].....	20
Figura 2.11: Desvio dimensional do foco do laser em função do seu ângulo em relação a normal da plataforma [6].....	21
Figura 3.1: Fresamento cilíndrico tangencial e frontal [29].....	29
Figura 3.2: Representação do efeito da aplicação de uma solicitação transversal (a) e longitudinal (b) à direção Z de adição de camada em função da anisotropia do material [6].....	32

Figura 3.3: Perda ou alteração geométrica de detalhes na direção Z [6].....	32
Figura 4.1: Imagem de uma peça de Ti-6Al-4V fabricada por manufatura aditiva e de mesma geometria da amostra utilizada neste trabalho (a) e imagem em microscópio dos póis de Ti-6Al-4V utilizados em manufatura aditiva [31] (b).....	36
Figura 4.2: Fresadora utilizada nas operações.....	37
Figura 4.3: Ferramenta nova utilizada nas operações de fresamento.....	37
Figura 4.4: Foto da amostra após todas as operações de fresamento. Visão lateral geral da peça (a) e visão frontal aproximada e com a ordem das operações (b).....	39
Figura 4.5: Fixação da amostra no dinamômetro (a), direções F_x , F_y e F_z no dinamômetro após a fixação da peça (b).....	40
Figura 4.6: Equipamentos utilizados em conjunto com o dinamômetro, o amplificadores da fabricante Kistler (a), e a placa de aquisição da fabricante National Instruments (b).....	41
Figura 4.7: Perfilômetro Taylor Hobson (a) e seu apalpador realizando a medição de rugosidade na peça (b).....	42
Figura 4.8: Microscópio do laboratório LAMAT, do CEFET/RJ, utilizado na análise das ferramentas e dos cavacos (a). Câmera portátil com lente microscópica USB AM3715TB Dino-Lite Edge, utilizada na captura de mais imagens dos cavacos e ferramentas (b).....	43
Figura 4.9: Microestrutura de uma liga de titânio Ti-6Al-4V fabricada por SLM.....	45
Figura 5.1: Gráfico de forças do experimento de fresamento.....	46
Figura 5.2: Aumento da espessura do cavaco em função do posicionamento angular do dente da ferramenta.....	48
Figura 5.3: Demonstração de como ocorre a Transformada de Fourier, alterando o domínio do sinal para o domínio das frequências. Em (a) tem-se o sinal como uma soma de outros sinais menores, em (b) tem-se a demonstração de como seria a separação do sinal por frequência, e em (c) o resultado final da transformação.....	49
Figura 5.4: Gráfico resultante da FFT, onde se pode verificar as frequências principais do sinal de forças.....	50
Figura 5.5: Gráfico de forças com o sinal saneado de acordo com os parâmetros definidos.....	51
Figura 5.6: Gráfico representando a influência do avanço na usinagem do Ti-6Al-4V fabricado por SLM.....	52

Figura 5.7: Gráfico representando a influência da profundidade de corte na usinagem do Ti-6Al-4V fabricado por SLM.....	53
Figura 5.8: Influência da profundidade de corte na rugosidade do acabamento de superfície.....	55
Figura 5.9: Influência da velocidade de avanço na rugosidade do acabamento de superfície.....	55
Figura 5.10: Imagem das rebarbas formadas nas operações de fresamento com 0,2 mm de profundidade e avanço de 80 mm/min (a) e 150 mm/min (b).....	57
Figura 5.11: Imagens da superfície do canal, quando há marcas nas duas direções e o fresamento não foi bem executado, operação com 0,2 mm de profundidade de corte e 40 mm/min de velocidade de avanço (a) e quando as marcas estão na direção do avanço, indicando uma boa usinagem, operação de 0,4 mm de profundidade de corte e 40 mm/min de velocidade de avanço (b).....	58
Figura 5.12: Cavacos da operação de fresamento com 40 mm/min de avanço e 0,2 mm de profundidade.....	59
Figura 5.13: Cavacos da operação de fresamento com 80 mm/min de avanço e 0,4 mm de profundidade.....	59
Figura 5.14: Cavacos da operação de fresamento com 150 mm/min de avanço e 0,6 mm de profundidade.....	60
Figura 5.15: Vista frontal das ferramentas de corte nova (a) e usada (b).....	61
Figura 5.16: Vista lateral do desgaste da ferramenta. Imagens da aresta de corte da ferramenta nova (a) e usada (b), e da superfície externa do dente na ferramenta nova (c) e usada (d).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Materiais comercializáveis diretamente processados por AM, por cada processo de AM [22], adaptado pelo autor.....	12
Tabela 2.2: Classificação das tecnologias AM de acordo com seu princípio de processamento das camadas [6].....	13
Tabela 2.3: Representação esquemática do planejamento da trajetória de contorno e/ou preenchimento de acordo com os princípios da tecnologia AM [6].....	15
Tabela 2.4: A variação das propriedades do titânio em função da morfologia dos grãos em sua microestrutura.....	24
Tabela 2.5: A variação das propriedades do titânio em função das fases presentes em sua microestrutura.....	25
Tabela 2.6: Composição química do titânio puro.....	26
Tabela 4.1: Ordem e parâmetros de cada operação.....	38
Tabela 4.2: Sequência das operações de fresamento.....	38
Tabela 5.1: Influência da profundidade de corte e do avanço na usinagem do Ti-6Al-4V fabricado por SLM. Resultados em Newton (N).....	52
Tabela 5.2: Resultados das médias das rugosidades superficiais, em μm , para cada operação de fresamento.....	54

Capítulo 1 - Introdução

Após a revolução industrial voltada para a indústria das telecomunicações, o mundo vive hoje a revolução da Indústria 4.0 e, dentro desse novo mundo, nove pilares tecnológicos têm transformado o cenário industrial (Figura 1.1). Uma delas em específico tem recebido grande destaque nessa última década, a manufatura aditiva (AM – *additive manufacturing*) [1].

Por se tratar de uma tecnologia quase autônoma, necessitando de poucas interferências manuais de um operador, a manufatura aditiva tem sido muito bem vista pela automação da fabricação na indústria 4.0. Esse segmento movimentou 3,07 bilhões de dólares em 2013 e tem projeção de ultrapassar os 21 bilhões de dólares em 2020 [2,3].



Figura 1.1: Os 9 pilares da indústria 4.0 [4,5]

Inicialmente chamado de prototipagem rápida, esse processo de fabricação é muito utilizado para materializar protótipos em três dimensões de forma rápida, barata e eficaz. De forma simplificada, o início do processo ocorre através do projeto digital de uma peça. Na sequência é programando o fatiamento em um determinado número de camadas e, após algumas definições técnicas, a máquina inicia o empilhamento

físico dessas camadas de forma ordenada até que a peça que estava no arquivo do computador esteja pronta e materializada na base de construção da máquina [3,6].

Os principais métodos de manufatura aditiva utilizam como matéria prima polímeros, cerâmicas e metais. Pode-se também classificá-los pelo modo como é feita a deposição dessas matérias primas. Destacam-se os métodos que utilizam leito em pó, jateamento, extrusão ou fotopolimerização [6].

Esse modelo de fabricação favoreceu muito a área de processos de planejamento do produto, onde são definidas as estratégias de mercado, requisitos e restrições para estabelecer o projeto e planejamento de fabricação de um produto.

Para diminuir custos e agilizar o projeto, muitos profissionais dessa área acabam mantendo seus protótipos no ambiente virtual, com visualização através de programas CAD (*computer-aided design*) ou CAM (*computer-aided manufacturing*) que apesar de muito úteis, ainda possuem limitações com relação aos protótipos físicos, que viabilizam testes em condições reais e facilitam a comunicação entre os profissionais envolvidos no projeto [6].

Com o investimento e desenvolvimento da tecnologia, os produtos fabricados têm possibilitado mais utilidades e aplicações, indo além da fabricação de protótipos. Esse avanço também tem permitindo a utilização de diversos materiais e processos para atender diferentes requisitos.

Atualmente, o desafio tem sido a aplicação direta, onde a peça fabricada está pronta para ser utilizada como um produto final. Porém, ainda há muitas dúvidas quanto à qualidade e à precisão dos produtos fabricados por esse processo. Desta forma, a realização de pós-processamentos tem um papel importante para adequar e garantir as tolerâncias das medidas e propriedades [6].

Um exemplo de aplicação direta é a fabricação de próteses dentárias como pontes, coroas, dentaduras e em aplicações de ortodontia (Figura 1.2) e, em função da biocompatibilidade, as ligas de titânio são muito utilizadas neste tipo de aplicação [7].

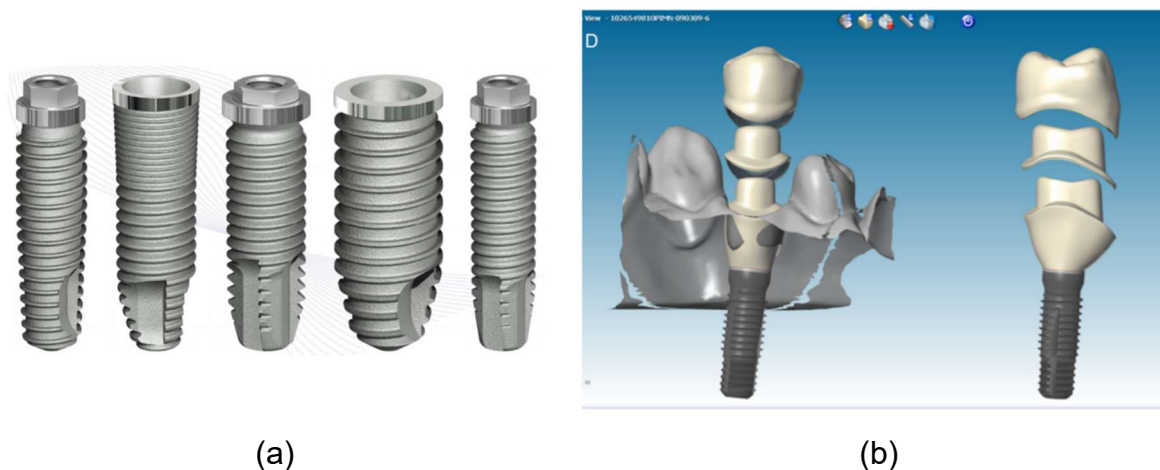


Figura 1.2: Exemplos de implantes dentários de material metálico (a), e a ilustração de como funciona a aplicação no osso do maxilar (b) [7].

Tendo em vista que a manufatura aditiva ainda é recente, principalmente nas aplicações em peças metálicas, ainda há muitas lacunas sobre o comportamento das ligas quando fabricadas por este processo. Dentre elas, pode-se destacar as propriedades como a resistência mecânica, usinabilidade, resistência a fadiga, características microestruturais (metalúrgica), comportamento térmico (tratamento térmico), dentre outras [3].

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas para melhorar o conhecimento e o comportamento desses pós-processamentos quando aplicados em peças feitas por AM, conforme podemos observar nas referências [8,9,10]. Com o objetivo de contribuir com esses estudos, o presente trabalho tem como objetivo analisar a usinabilidade de uma liga de titânio utilizada na fabricação de implantes produzida por um processo de manufatura aditiva.

Neste trabalho foram analisados os resultados do fresamento variando os parâmetros de avanço por dente e profundidade de corte. Foram estudadas as forças de corte, a rugosidade de superfície, a formação dos cavacos, o desgaste da ferramenta e as rebarbas provenientes das operações. O material utilizado foi a liga de titânio Ti-6Al-4V fabricada por um processo de manufatura aditiva chamado fusão seletiva a laser (SLM - *selective laser melting*).

Capítulo 2 – Manufatura aditiva

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre manufatura aditiva, contendo um pouco do histórico e detalhes da operação, em especial da fusão seletiva a laser, processo tema do presente trabalho. Também são apresentadas as características do titânio e da liga Ti-6Al-4V, também tópico do trabalho.

2.1 A Manufatura aditiva e seus processos

2.1.1 Contexto histórico e atual da manufatura aditiva

A manufatura aditiva tem sido apresentada não somente como uma nova alternativa para fabricação de peças, o seu crescimento está ligado as novas possibilidades para criação e aplicação de um produto, desta forma as empresas têm um novo universo para explorar e inovar.

Um produto que antes era fabricado por fundição, forjamento ou usinagem, ficava limitado devido aos parâmetros impostos por esses processos. Com o advento da manufatura aditiva, muitas dessas limitações foram superadas. Através dos processos atuais pode-se fabricar componentes com menos peças, com geometrias mais complexas e com menos peso.

Além da fabricação direta de um produto, a manufatura aditiva pode também ser utilizada para fabricar ferramentas diferenciadas em relação aos processos tradicionais de produção. Essas ferramentas com características únicas advindas da manufatura aditiva serão então utilizadas na produção de produtos diferenciados, ou seja, a AM pode também indiretamente influenciar na criação de uma peça com características singulares [11,12].

Uma dessas aplicações nos processos é a fundição, onde utiliza-se a manufatura aditiva para fabricar de matrizes, modelos e machos que irão dar origem a geometria da peça final. Para a fabricação de moldes metálicos, a AM possibilita a obtenção de geometrias com malhas e canais complexos para os sistemas de refrigeração que otimizam a troca de calor, trazendo grandes vantagens para os processos de fundição em que essas matrizes serão aplicadas, as principais são a velocidade no processo e a redução da falha por fadiga térmica. Na figura 2.1, pode-

se observar como as malhas e os canais são construídos de modo a otimizar a troca térmica e o fluxo de calor [11].

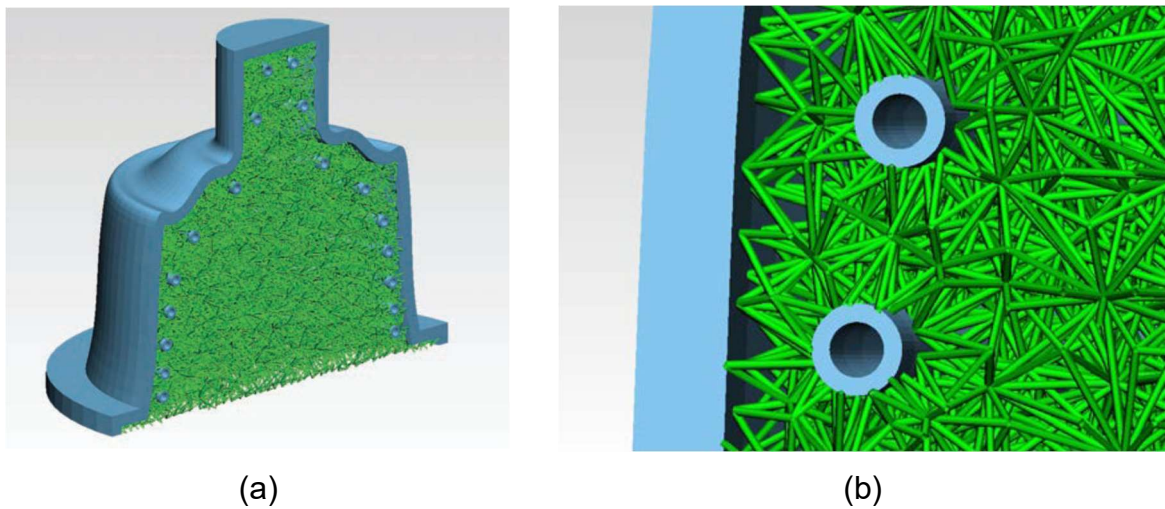
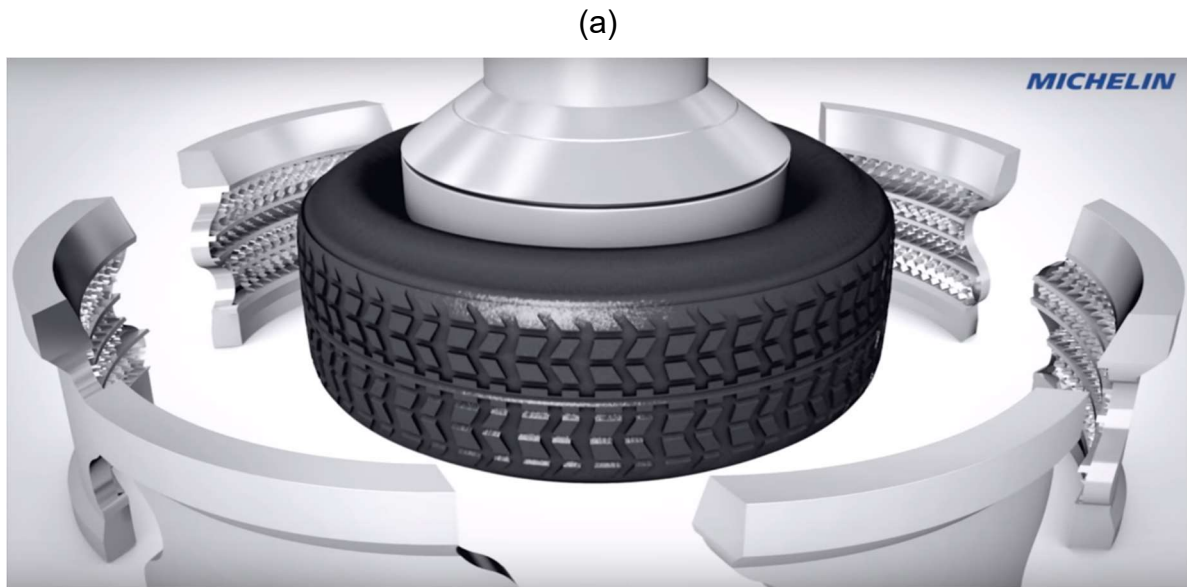


Figura 2.1: Vista em corte em três dimensões de um molde com malha de treliças, em verde, para otimização do resfriamento (a) e visão mais aproximada da malha e dos canais de resfriamento (b) [11].

Outra vantagem em fabricação de matrizes por AM é na complexidade da peça final que elas irão produzir. Um exemplo é a fabricação de pneus, a Michelin tem utilizado moldes fabricados por manufatura aditiva com grande quantidade de detalhes, o produto final é um pneu com bandas de rodagem otimizadas. A geometria superficial desses pneus aumenta a sua durabilidade e melhora a sua aplicação. Na figura 2.2, pode-se observar de forma simplificada a diferença entre os processos da manufatura aditiva e o tradicional, e como funciona a sua aplicação na fabricação final dos pneus [12].





(b)

Figura 2.2: Visão dos dois modelos de fabricação de moldes para pneus, a esquerda o modelo tradicional e a direita o modelo feito por manufatura aditiva (a), e a aplicação do molde na fabricação das bandas de rodagem otimizadas (b) [13].

Atualmente já existe a utilização da manufatura aditiva como um processo de fabricação em grande escala para o público geral, a fabricante esportiva Adidas possui um tênis chamado de Adidas Futurecraft 4D. Esse tênis utiliza bem o potencial da manufatura aditiva aplicando de forma eficiente as suas vantagens, por exemplo, utilizando a liberdade geométrica para otimizar a propulsão, o amortecimento, estabilidade e conforto, de acordo com cada parte do pé (Figura 2.3). Desta forma proporciona uma maior performance, e ao mesmo tempo produz um design atrativo para venda ao grande público [14,15,16].



(a)

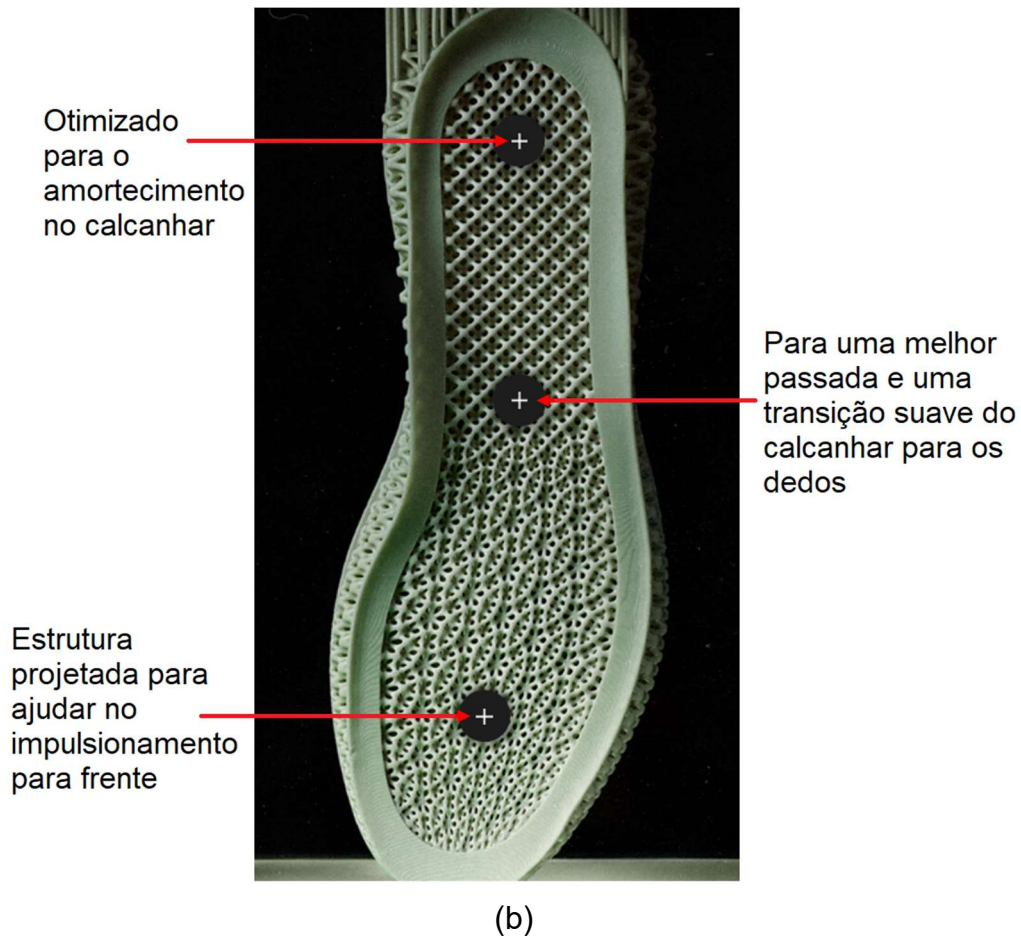


Figura 2.3: Adidas Futurecraft 4D (a) e solado geometricamente otimizado para melhoria de performance (b) [14].

Porém não foi sempre assim, no início a manufatura aditiva foi muito voltada para a fabricação de protótipos, por isso recebeu o nome de prototipagem rápida. Em sua maioria eram de polímeros, por conta do seu bom processo de solidificação, baixo ponto de fusão e baixa reação com a atmosfera do ambiente de fabricação [3,6].

Os protótipos são geralmente peças com baixo volume de produção e para aplicações específicas. Assim, se torna muito custoso criar todo um ferramental para sua fabricação, ainda mais se for levado em conta que se trata de um protótipo e provavelmente haverá mudanças no projeto, que poderão tornar as ferramentas de sua criação inúteis para as versões futuras. Nesse contexto a manufatura aditiva possibilitou a fabricação dos protótipos de forma rápida e eficiente. Em pouco tempo o protótipo é fabricado exatamente na quantidade necessária e muito próximo de sua forma final, evitando a utilização de outras ferramentas e processos que agregam custo ao projeto [6,17].

Além de otimizar o custo e agilidade na fabricação de protótipos, o desenvolvimento da tecnologia tem possibilitado a fabricação de peças mais resistentes e com melhor acabamento, o que permite que elas também pudessem ser utilizadas não só como modelo visual ou de validação geométrica, mas sim como modelo para testes em condições reais, com o objetivo de avaliar especificações importantes como as propriedades mecânicas. Atualmente tem-se inclusive a possibilidade de fabricar peças finais, prontas para aplicação direta [3,6].

Tanto para protótipos quanto para aplicação final, uma grande demanda que o mercado exigido é a de produtos cada vez mais personalizados e isso faz com que os setores de fabricação tenham que produzir uma maior variedade, em menor escala e com menor custo [3]. A manufatura aditiva permite essa possibilidade além de outras vantagens sobre os métodos tradicionais [6].

Dentre as vantagens do processo a mais evidente é a liberdade geométrica, permitindo a criação de peças com geometrias inovadoras, que podem buscar um melhor aspecto visual, ou mesmo fazer uma reengenharia de uma peça existente para a otimização topológica. Nesse tipo de otimização, a tecnologia é aproveitada para reduzir a quantidade de material usado em uma peça e isso gera uma vantagem para a maioria das aplicações, que é a diminuição do peso da peça. Uma segunda vantagem é a redução dos custos em relação a geometria inicial, uma vez que a reengenharia da peça proporciona a redução de matéria prima, redução de tempo e de energia necessária para a fabricação. Esses benefícios são importantes principalmente para as indústrias que mais pesquisam e desenvolvem AM atualmente, que são a aeroespacial e a médica. Na Figura 2.4, pode-se ver um exemplo de como é o processo de reengenharia de uma peça, que passa pela análise da montagem, dos pontos de maiores esforços e a reconstrução com menos material onde não é necessária uma maior resistência [3,6,18].

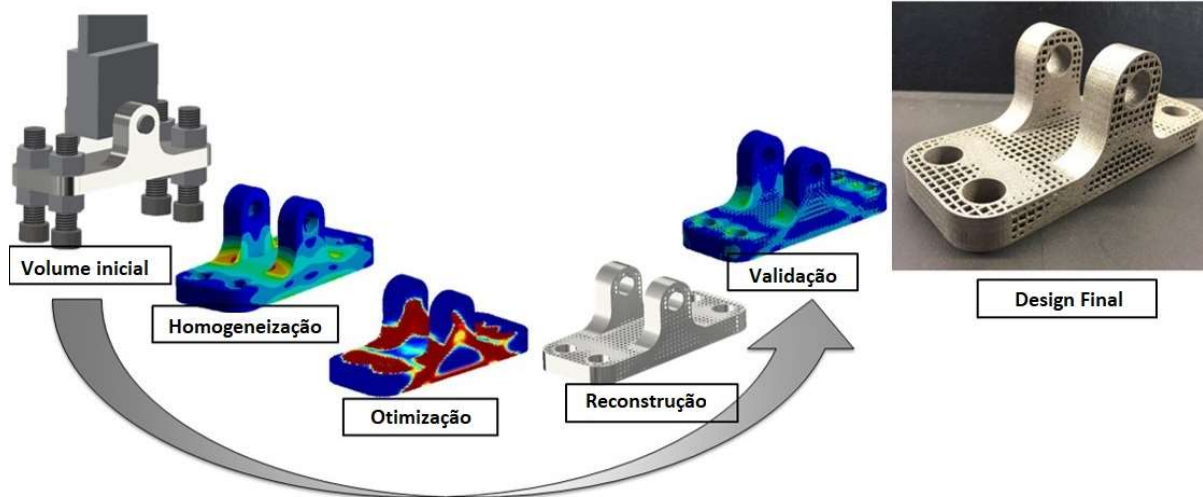
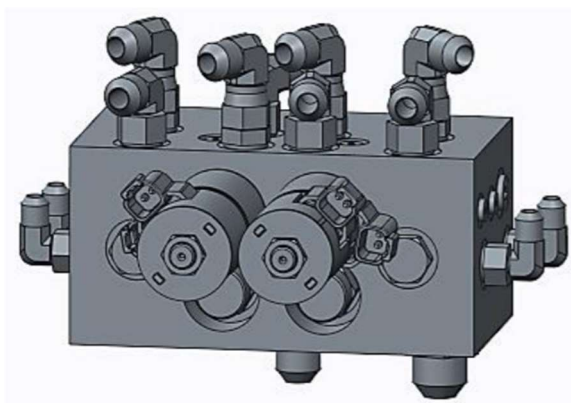
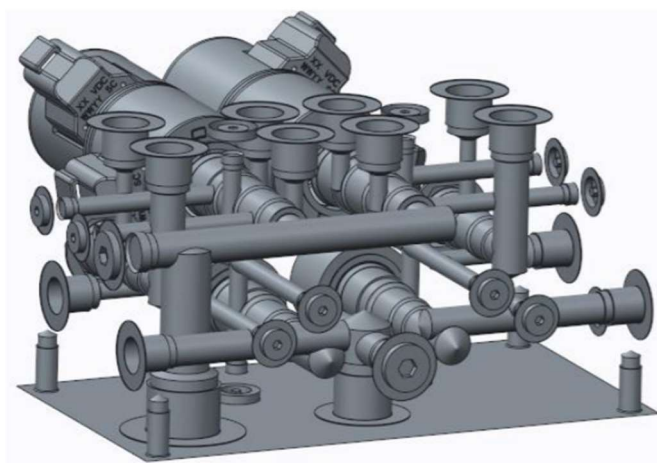


Figura 2.4: Processo de otimização topológica para fabricação de peças por manufatura aditiva, onde são verificados os pontos de maior solicitação para realizar a reengenharia da peça, buscando menor quantidade de material e redução do peso [18].

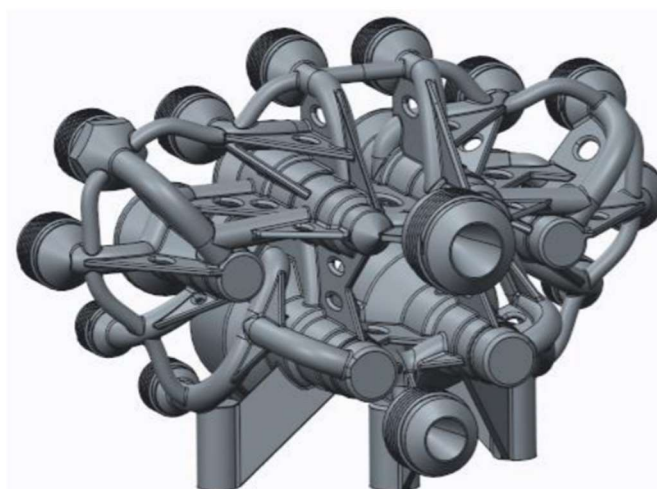
A liberdade geométrica permite também outras vantagens como a redução de peças em um componente. A tecnologia permite que ao invés de fabricar várias peças para montá-las e conectá-las. O fabricante pode optar pela manufatura aditiva e já fabricar o componente em uma forma mais acabada, como ao final da montagem. Esse processamento gera boas consequências, por exemplo, diminuir as chances ocorrer vazamentos em pontos que antes eram conexões e soldas, diminuir o gasto com peças de diferentes fornecedores e simplificar a cadeia logística. Onde antes era necessário o contato e a logística com diversos fornecedores de peças, passou-se a ter a redução para o fornecedor de AM, verticalizando a produção. Na Figura 2.5 é mostrada a representação de um *manifold* da empresa Atlas Copco: na Figura 2.5a tem-se o *manifold* fabricado pelo método tradicional, em que um bloco é usinado para a formação dos canais (Figura 2.5b) e as válvulas e conexões são posteriormente unidos para a formação da peça final composta por duas válvulas, seis entradas e doze saídas. Já na Figura 2.5c tem-se o modelo fabricado por manufatura aditiva, em que é fabricada uma peça única, sem conexões, com ganho de performance no fluxo do fluido e redução de peso em 92% [3,6,19].



(a)



(b)



(c)

Figura 2.5: Representação de um *manifold* fabricado pelo método tradicional (a), a representação dos canais internos no bloco do *manifold* tradicional (b), representação do *manifold* com design otimizado pela fabricação em manufatura aditiva (c) [19].

Uma outra vantagem que se deve destacar é o prolongamento no atendimento de peças *aftermarket* (pós-venda), uma vez que o estoque não precisa mais ser físico e sim virtual. O fornecedor de peças pode manter o arquivo digital por um longo tempo e fabricar apenas a quantidade solicitada a qualquer momento, evitando a manutenção de grandes ferramentais, de alto custo e que necessitam de quantidades mínimas de pedido para que a venda tenha um retorno desejável [3,16].

Além da dessa redução de estoque físico, a redução no desperdício tem sido uma vertente muito demandada pelo mercado e pelos governos. Nesse contexto a manufatura aditiva possui uma grande taxa de aproveitamento da matéria prima, devido a reutilização do material que não foi solidificado ou fundido a peça. Todavia deve-se ter cuidado com esse reaproveitamento, pois a umidade e a troca térmica durante a fabricação de uma peça podem afetar o material remanescentes [1,3].

Dentre as desvantagens, a mais significativa é o alto custo de investimento. As máquinas de AM ainda podem chegar a USD 1.000.000,00, e além desse custo inicial, a matéria prima também gera um custo alto e contínuo, junto com a mão de obra especializada, que atualmente ainda é escassa e por isso custa caro. Sobre a matéria prima, o fornecimento de pó metálico ainda é não está bem implementado e são poucos os fornecedores, dificultando assim a cadeia de fornecimento [3,20,21].

O alto custo necessário para a fabricação das peças reflete em seu preço final de venda, conforme apresentado no Anexo A, onde pode-se observar a diferença de valores entre duas cotações de uma mesma peça de aço inoxidável 316L, uma fabricada por manufatura aditiva DMLS com preço final de USD 6.046,00, outra fabricada pelos métodos tradicionais com preço final de R\$26,00 por quilo.

2.1.2 Processos de fabricação por manufatura aditiva

Existem diversos processos de manufatura aditiva que variam principalmente na forma como a peça é fabricada, e por esse motivo outras especificações dos processos também variam como: materiais, finalidade da peça, tempo de fabricação e custo [1].

Com relação aos materiais, pode-se destacar os polímeros, metais e cerâmicas. Mais especificamente a Tabela 2.1, mostra os tipos de materiais e quais são os processos que podem ser utilizados para a fabricação [1].

Tabela 2.1: Materiais comercializáveis diretamente processados por AM, por cada processo de AM [22], adaptado pelo autor.

	Extrusão de material	Fotopolimerização em cuba	Jateamento de material	Fusão de leito em pó	Jateamento de aglutinante	Deposição com energia direcionada
ABS	X					
Policarbonato	X					
Compósito	X					
ABS/Policarbonato	X					
PLA	X					
Polieterimida	X					
Acrílico		X	X			
Acrilato		X	X			
Epóxi		X	X			
Poliamida (Nylon)						
11 e 12				X		
Puro				X		
Preenchido com vidro				X		
Preenchido com carbono				X		
Preenchido com metal (Al)				X		
Com polímero	X					
Poliestireno				X		
Polipropileno				X		
Poliéster ("Flex")				X		
PEEK	X			X		
Elastomero	X			X		
Ligas de Alumínio				X	X	X
Ligas de Cr-Co				X	X	X
Ouro				X		
Ligas de Níquel				X	X	X
Prata				X		
Aço inox				X	X	X
Titânio comercial				X	X	X
Ti-6Al-4V				X	X	X
Aço ferramenta				X	X	X

A Tabela 2.2 mostra os principais tipos de processo de manufatura aditiva com base tipo de deposição de material, pode-se notar que há diversos tipos de processos em manufatura aditiva.

Tabela 2.2: Classificação das tecnologias AM de acordo com seu princípio de processamento das camadas [6].

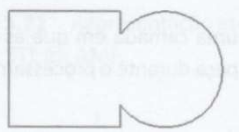

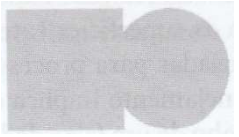

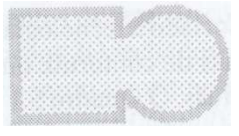
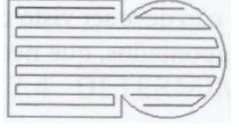

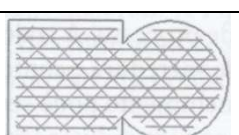
Classificação das tecnologias AM	Descrição dos princípios	Algumas tecnologias na categoria
Fotopolimerização em cuba	Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz*	Estereolitografia (<i>stereolithography</i> – SL), produção contínua com interface líquida (<i>continuous liquid interface production</i> – CLIP), tecnologia da empresa Invision-TEC, outros
Extrusão de material	Material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado	Modelagem por fusão e deposição (<i>fused deposition modeling</i> – FDM), MakerBot, RepRap, Fab@Home, outros
Jateamento de material	Material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva	PolyJet, impressão por múltiplos jatos (<i>MultiJet printing</i> – MJP), tecnologia da Solidscape, outros
Jateamento de aglutinante	Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir matérias em pó	Impressão colorida por jato (<i>ColorJet Printing</i> – CJP), tecnologia da VoxelJet, tecnologia da ExOne, outros
Fusão de leito de pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó	Sinterização seletiva a laser (<i>selective laser sintering</i> – SLS), sinterização direta de metal a laser (<i>direct metal laser sintering</i> – DMLS), fusão seletiva a laser (<i>selective laser melting</i> – SLM), LaserCUSING, fusão por feixe de

Classificação das tecnologias AM	Descrição dos princípios	Algumas tecnologias na categoria
		elétrons (<i>electron beam melting</i> – EBM), outros
Adição de lâminas	Lâminas recortadas de material são unidas (coladas) para formar um objeto	Manufatura laminar de objetos (<i>laminated object manufacturing</i> – LOM), tecnologia da Solido, deposição seletiva de laminados (<i>selective deposition lamination</i> – SDL), outros
Deposição com energia direcionada	Energia térmica é usada para fundir materiais à medida que estes são depositados	Forma final obtida com laser (<i>laser engineered net shaping</i> – LENS), deposição direta de metal (<i>direct metal deposition</i> – DMD), revestimento a laser tridimensional (<i>3D laser cladding</i>), outros

*Observação: os processos que utilizam projeção de luz UV (com ou sem máscara) e cujo material não fica necessariamente em uma cuba estão inclusos nesse grupo

Além da fonte de energia também se faz necessário o estudo da trajetória que ela irá percorrer no plano de fabricação para a fusão de uma camada. Esse parâmetro varia bastante dependendo da tecnologia aplicada como mostra a Tabela 2.3. Para as tecnologias que utilizam fabricação em metal, geralmente a trajetória é planejada para o contorno da camada e seu preenchimento. Na Figura 2.3 pode-se observar como ocorre o planejamento de contorno e preenchimento para cada tipo de tecnologia disponível de manufatura aditiva, essa estratégia varia de acordo com a matéria prima e o método de aplicação da energia [6].

Tabela 2.3: Representação esquemática do planejamento da trajetória de contorno e/ou preenchimento de acordo com os princípios da tecnologia AM [6].

Planejamento da Trajetória de Contorno e/ou Preenchimento	
	<p>Tecnologias que necessitam somente do contorno:</p> <ul style="list-style-type: none"> - tecnologias de adição de material em lâminas (por exemplo LOM) <p>Obs: podem requerer trajetória fora do contorno da peça para recortar/picotar o material</p>
	<p>Tecnologias que necessitam somente do preenchimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> - tecnologias de jateamento de material (por exemplo, PolyJet, MultiJet Printing, outros)
	<ul style="list-style-type: none"> - tecnologias de fotopolimerização em cuba que utilizam projeção (por exemplo, tecnologias da empresa EnvisionTEC, Carbon3D, Gizmo3D Gizi series, outros)
	<ul style="list-style-type: none"> - tecnologias de fotopolimerização em cuba que utilizam máscaras. Obs: necessitam de informação geométrica fora do contorno da peça para bloquear a passagem da luz
	<p>Tecnologias que combinam contorno e preenchimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> - tecnologia de jateamento de aglutinante (por exemplo, ColorJet Printing, VoxelJet, outros)
	<ul style="list-style-type: none"> - tecnologias de extrusão de material (por exemplo, FDM, RepRap, outros)
	<ul style="list-style-type: none"> - tecnologia de fusão de leito de pó (por exemplo: SLS, DMLS, SLM, outros) - tecnologia de deposição com aplicação direta de energia (por exemplo, LENS, DMD, outros)
	<ul style="list-style-type: none"> - tecnologia de fotopolimerização em cuba com laser (por exemplo, SL, outros)

2.2 Manufatura aditiva por SLM

Nos processos que envolvem a fabricação metálica as peças são aplicadas principalmente nas indústrias aeroespacial, automobilística e médica. Isso ocorre

devido ao alto custo que envolve o processo. Desta forma fica mais viável para indústrias de ponta realizarem o alto investimento, para que tenham também o alto retorno com as vantagens da tecnologia [3].

A manufatura aditiva de metais também varia pelo método de alimentação da matéria prima, que pode ser por filamento/arame ou pós, e pela fonte de energia que pode ser por laser, plasma ou feixe de elétrons. Dentre estes pode-se destacar os métodos que envolvem a fusão e sinterização de pós metálicos que utilizam o laser ou feixes de elétrons como energia para a fusão dos pós [3,6].

Independente da fonte de energia, os processos por fusão de pós metálicos se iniciam com preparação da camada de pó, em seguida é feita uma varredura na camada para que a área desejada tenha os seus pós fundidos entre si, após o término de uma camada, a plataforma base se desloca para baixo dando espaço para que uma nova camada seja preparada. Todo esse processo deve ter a atmosfera controlada por vácuo ou gás inerte para evitar a oxidação [3]. A Figura 2.6 apresenta a forma de processamento por manufatura aditiva utilizando laser.

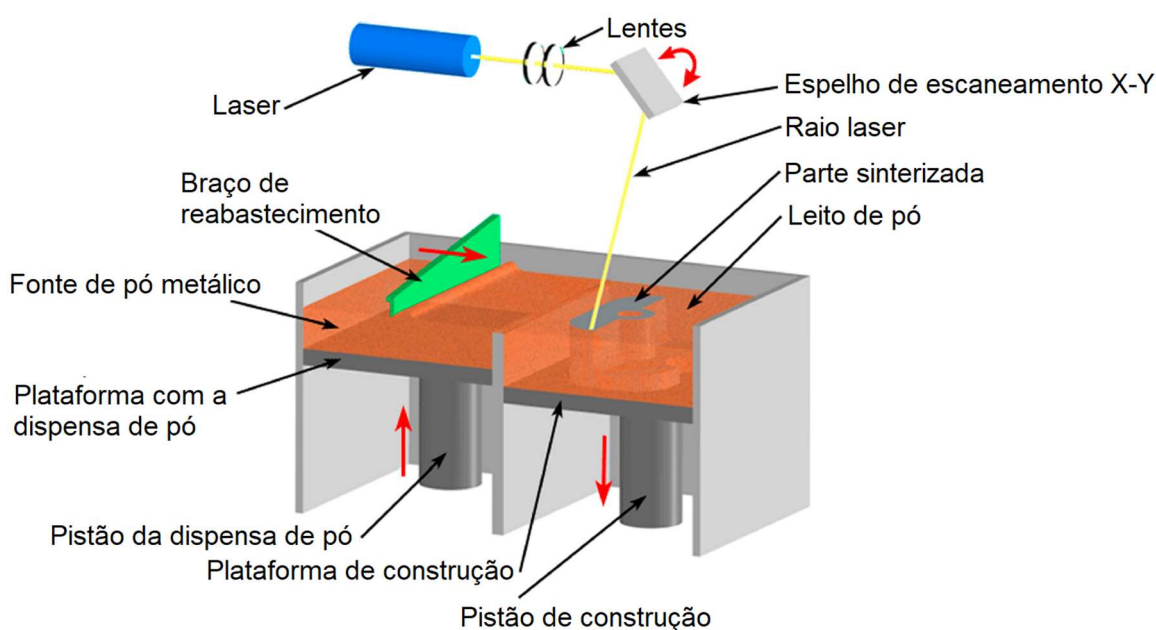


Figura 2.6: Esquema do sistema SLM (*selective laser melting*) [23].

Mesmo sendo processos muito semelhantes, onde a principal diferença fica sendo no método de energia aplicada, pode-se destacar que o método por feixe de elétrons permite uma maior velocidade, porém isso pode afetar no acabamento final, deixando uma superfície mais rugosa e menos precisa [6].

Além da escolha do processo, da fonte de energia e do tipo de matéria prima, outros parâmetros são importantes em um planejamento de uma fabricação por manufatura aditiva como a orientação de fabricação, o posicionamento da peça no volume de construção, a definição da base e estruturas de suporte, a definição da espessura das camadas e a trajetória de contorno e preenchimento (Figura 2.7) [6].

A análise da orientação de fabricação deve ser utilizada para otimizar o processo de várias formas, como a produtividade, a qualidade, a precisão e o custo. Ainda não há um modelo específico que define qual a melhor orientação de uma peça e sendo assim a experiência e observação do projetista acabam sendo determinantes [6].

A definição da espessura das camadas, ou o fatiamento da peça, tem influência direta no acabamento de superfície e na produtividade de forma inversamente proporcional, ou seja, um melhor acabamento demanda um maior fatiamento da peça e conseqüentemente leva a uma menor produtividade, e vice-versa [6].

O volume de construção deve ser analisado principalmente pelo viés econômico. Como a manufatura aditiva é um processo de alto custo, o melhor aproveitamento do volume de construção da máquina pode levar a uma maior viabilidade do processo, além disso a própria passagem da fonte de energia pode ser agilizada e otimizada levando a uma maior produtividade em função do arranjo volumétrico da fabricação [6].

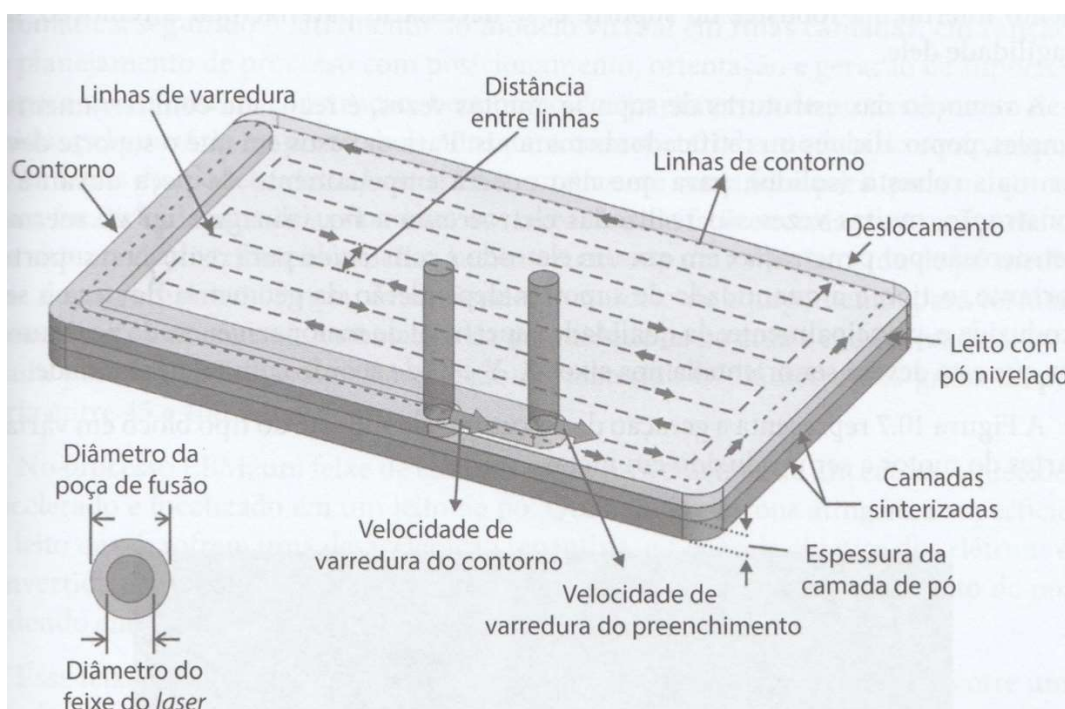


Figura 2.7: Estratégia de varredura [6].

Trazendo para o contexto da Indústria 4.0, a velocidade do processo será sempre um fator determinante, visto que o objetivo é a fabricação de peças em larga escala. Desta forma, independente do processo utilizado, pode ser mais vantajoso optar por uma fabricação mais veloz em detrimento do melhor acabamento possível diretamente pela manufatura aditiva, e ao final utilizar a usinagem como um pós-processamento para que o acabamento esteja dentro da tolerância permitida [6,23].

Outro parâmetro que fará com que seja necessário um pós-processamento de acabamento é a necessidade de suportes. Nos processos AM por sinterização de pós metálicos os suportes podem ser necessários para evitar o deslocamento da peça durante a fabricação, que também ajuda na dissipação de calor e ajuda a evitar empenamentos (Figura 2.8). Porém ao final da construção, eles devem ser removidos por um processo de usinagem ou eletroerosão, que também pode ajudar a garantir o acabamento de superfície necessário para a aplicação [6,23].

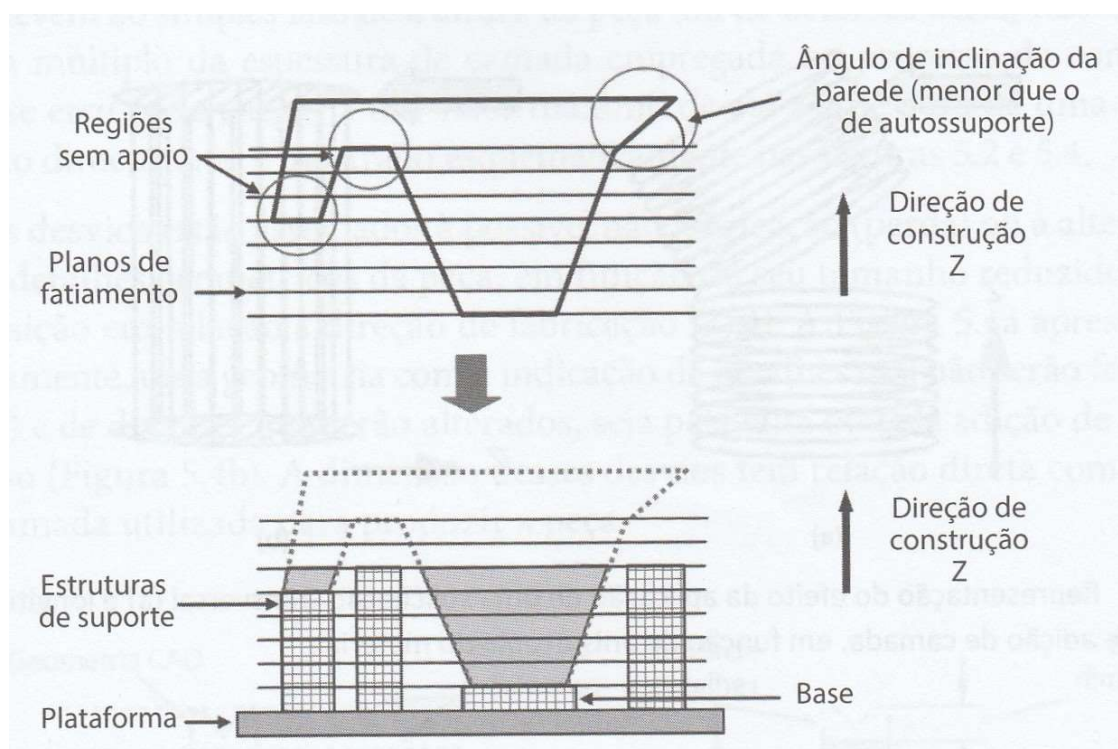


Figura 2.8: Representação de regiões que requerem estruturas de suporte e da peça sendo construída sobre a base e com as estruturas de suporte em construção [6].

A integridade de superfície desejada em uma peça fabricada por manufatura aditiva também pode levar a outra operação de pós processamento, onde a peça será trabalhada por um processo de usinagem para atingir os requisitos mínimos para a sua aplicação.

A integridade de superfície de uma peça pode ser definida por vários fatores como o acabamento, as propriedades mecânicas e as propriedades metalúrgicas de uma superfície [24].

O acabamento é caracterizado principalmente pelas ondulações, falhas e pela rugosidade. A rugosidade é um parâmetro que deve ser definido em um projeto, dentro de uma margem de tolerância. Já as ondulações e falhas são erros de fabricação e devem ser controlados e minimizados, apesar de muitas vezes serem inerentes a operação devido a vibrações, gradientes de temperatura e forças elásticas e dinâmicas. Este parâmetro é definido como micro irregularidades finas ou erros micro geométricos, em uma superfície. O projetista define a rugosidade de uma superfície de acordo com objetivo buscado [24].

A rugosidade é definida principalmente pela altura, espaçamento e o padrão dos picos em uma superfície. Existem normas que definem métodos e cálculos para definição desses parâmetros [24].

O acabamento de superfície é um desafio na manufatura aditiva. O processo da manufatura aditiva de metais por sinterização por laser possui algumas restrições e limitadores com relação ao acabamento de superfície da peça. Sabe-se que a tecnologia está em evolução e em alguns casos consegue-se fabricar a peça já com a qualidade final desejada, mas essa não é a realidade para a maioria das aplicações. O pós-processamento se faz necessário nesse tipo de manufatura aditiva podendo ser a limpeza, usinagem e/ou tratamento térmico. Algumas das causas são inerentes ao processo como o efeito degrau, os desvios dimensionais, estruturas de suporte e foco do laser [3].

O efeito degrau ocorre devido as camadas tenderem a ter ângulos retos em suas extremidades fazendo com que a peça tenha desvios em relação ao padrão, ainda que a espessura seja muito fina. Comparando com um modelo matemático, pode-se na teoria integrar a espessura das camadas em tamanhos infinitesimais e assim chegar na geometria perfeita, porém sabe-se que é impossível fabricar camadas com limites infinitesimais, e assim tem-se um erro derivado do efeito degrau. Conforme Figura 2.9 [3].

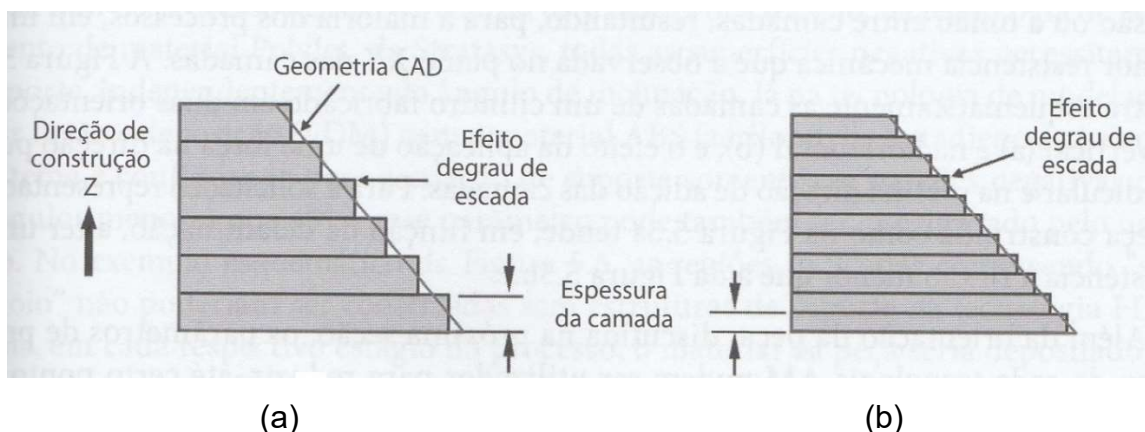


Figura 2.9: Efeito degrau de escada em função da espessura da camada [6].

Esse erro fica evidenciado quando se aumenta a inclinação da peça. Assim, o planejamento da fabricação pode melhorar o acabamento de superfície evitando ângulos agudos na direção z (vertical), deixando que os detalhes mais importantes fiquem no eixo x-y (Figura 2.10) [3].

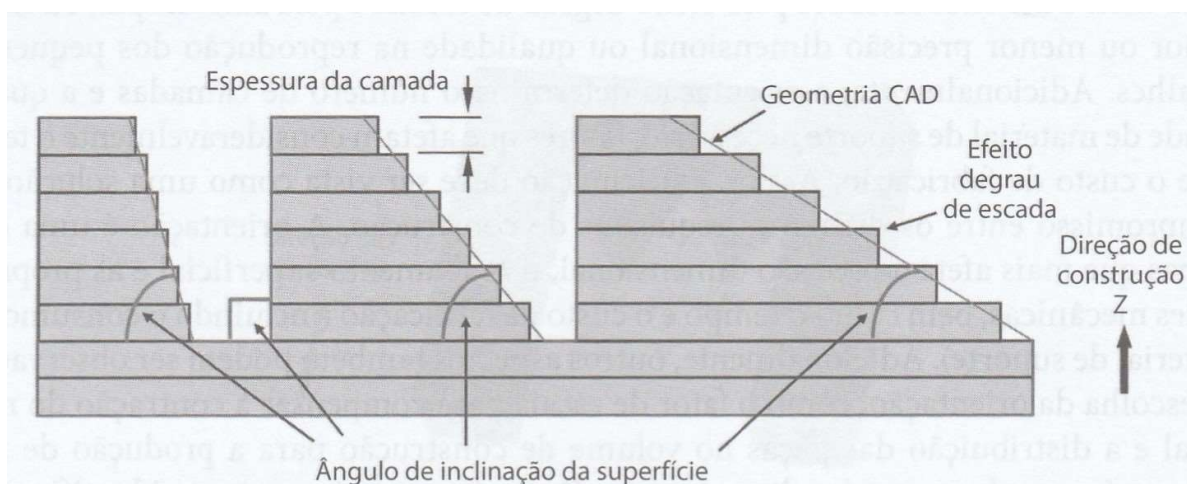


Figura 2.10: Variação do acabamento de superfície em uma mesma peça em função de diferentes ângulos de inclinação das superfícies e consequente efeito degrau de escada [6].

Com relação a técnica de manufatura aditiva utilizando laser, um parâmetro que afeta a qualidade do acabamento das peças são os parâmetros utilizados na sinterização dos pós metálicos. Dependendo do ângulo com o qual o laser é

posicionado pode-se ter uma distorção no foco, levando a imperfeições no acabamento da peça (Figura 2.11) [3].

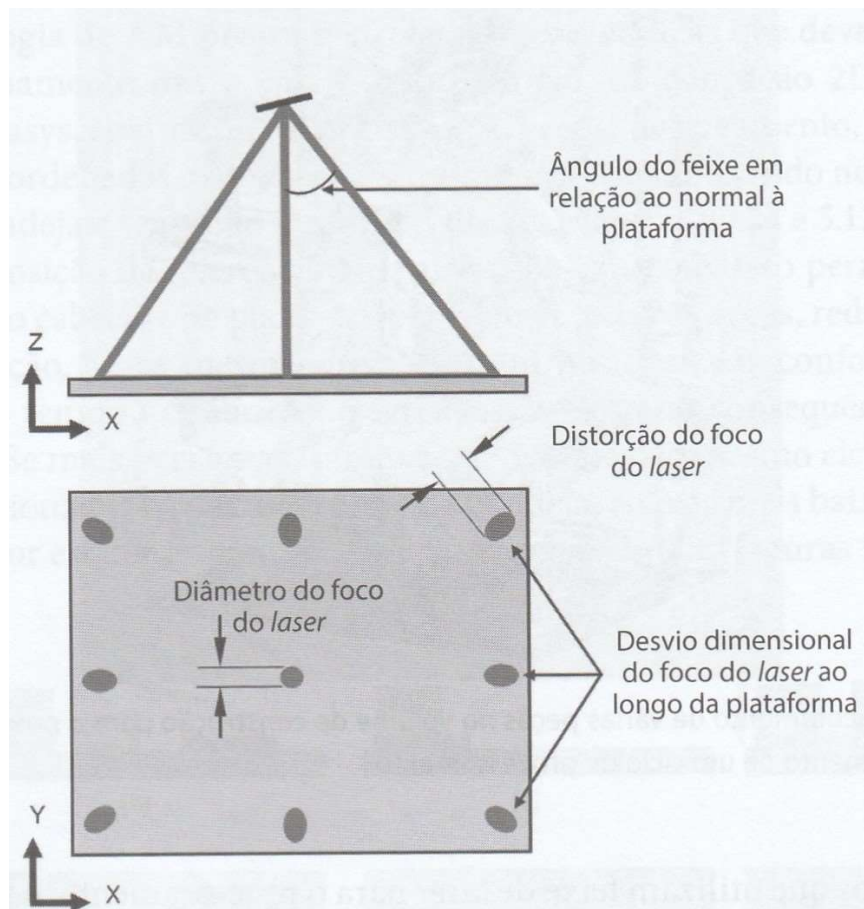


Figura 2.11: Desvio dimensional do foco do laser em função do seu ângulo em relação a normal da plataforma [6].

2.3 Propriedades do titânio e da liga Ti-6Al-4V

Nesta seção são apresentadas as propriedades mecânicas e metalúrgicas típicas do titânio e da liga com alumínio e vanádio.

2.3.1 Introdução ao titânio

Um dos metais mais utilizados como matéria prima para a fabricação por manufatura aditiva é o titânio. Ele é um dos elementos mais abundantes no planeta, porém é encontrado na natureza em forma de óxido, e fazer o tratamento do mineral

para obtenção do metal de titânio é muito caro e, por isso, com alto valor de mercado [25].

Em termos gerais, o titânio e suas ligas são considerados “leves”, ou seja, de baixa densidade, e que também possuem alta resistência mecânica e resistência a corrosão. Essas propriedades fazem com que ele seja muito utilizado pela indústria aeroespacial e, em função da biocompatibilidade de algumas de suas ligas, também é muito utilizado na indústria biomédica [25].

O uso das ligas de Ti em indústrias aeroespaciais é especialmente atrativo em função de suas propriedades em altas temperaturas, que são limitadas em função do avanço de sua oxidação. Em particular, as ligas de TiAl, também são muito utilizadas em temperaturas mais baixas [25].

2.3.2 Metalurgia e propriedades do titânio

No estudo da metalurgia dos metais, o conhecimento sobre suas estruturas cristalinas é fundamental para o maior entendimento de suas diversas propriedades. Uma estrutura cristalina é a forma padrão como os íons e átomos de um material estão organizados e neste contexto o titânio e suas ligas possuem duas estruturas cristalinas, α (hcp – hexagonal compacta) e β (ccc – cúbica de corpo centrado) e são suscetíveis a transformações alotrópicas em função da temperatura de dos elementos de liga presentes no material [25,26].

Essas estruturas estão diretamente ligadas ao comportamento do material e as suas propriedades, como a deformação plástica, a taxa de difusão, a resistência a fluência e o trabalho a quente [25].

O titânio puro é estável na fase α em temperatura ambiente, quando atinge aproximadamente 882 °C ocorre a transição de α para β . Conforme dito, os elementos de liga, também influenciam na estabilização dessas estruturas e assim a composição de uma liga de Ti pode aumentar ou diminuir essa temperatura de transição [25].

Alguns elementos são neutros e não afetam consideravelmente a transição de α - β , como o Zr e o Sn. Outros elementos são estabilizadores β , e fazem com que a temperatura de transição seja mais baixa, com exemplo temos o Fe, Mg, Mo e V. Para a estabilização da fase α , ou seja, uma maior temperatura de transição, tem-se

principalmente o Al, que está presente em muitas ligas comerciais amplamente usadas, porém pode-se mencionar também o O, N e C [25].

Dentre as ligas comerciais tem-se o titânio puro, as ligas α , as ligas α com pequenas porcentagens de β , que são chamadas de ligas quase- α . Aumentando os teores de estabilizadores β , tem-se as ligas $\alpha+\beta$ que são as mais utilizadas, e por fim as ligas β com elementos estabilizadores de fase β [25].

As formas como estão organizadas as fases α e β no material são chamadas microestruturas, que também são fundamentais para o conhecimento do comportamento esperado das ligas [25].

Pelas geometrias e tamanhos de cada fase e a forma com que estão organizadas essas microestruturas, tem-se um melhor entendimento das propriedades da liga e analogamente, pode-se buscar que o material tenha determinada microestrutura para que atenda aos requisitos de sua aplicação [25].

Para alcançar uma certa microestrutura, são realizados procedimentos de trabalhos a frio onde consegue-se um refinamento de grão e tratamentos térmicos, que consistem em aquecer o material até determinada temperatura e por um determinado tempo, e então resfria-lo a uma taxa estipulada.

Controlando todos esses parâmetros, e tendo o conhecimento dos elementos de liga, que conforme mencionado anteriormente tem papel fundamental na formação das fases do material, pode-se determinar com uma certa precisão, qual será a microestrutura final [25].

Os tratamentos térmicos também podem dar origem a fases α diferentes na microestrutura, a α' que possui arranjo cristalino hexagonal e a α'' que possui arranjo cristalino ortorrômbico. Tanto a fase α' quanto a α'' são utilizados em aplicações mais específicas, possuem microestrutura martensíticas e são obtidas pela têmpera, que é um tratamento térmico com alta taxa de resfriamento, com temperaturas iniciais de 900 °C [25].

As microestruturas do titânio podem ser classificadas pelo tamanho de grão, fino ou grosseiro, e pela organização das fases, que além da martensítica, pode ser lamelar ou equiaxial. Essas características influenciam nas propriedades conforme tabela abaixo: [25]

Tabela 2.4: A variação das propriedades do titânio em função da morfologia dos grãos em sua microestrutura.

Grãos finos	Grãos grosseiros	Propriedade	Lamelar	Equiaxial
○	○	Módulo de elasticidade	○	+/- (textura)
+	-	Resistência	-	+
+	-	Ductilidade	-	+
-	+	Resistência a fratura	+	-
+	-	Iniciação de fratura por fadiga	-	+
-	+	Propagação de fratura por fadiga	+	-
-	+	Resistência a fluência	+	-
+	-	Superplasticidade	-	+
+	-	Comportamento sob oxidação	+	-

Tendo em vista que os elementos de liga influenciam na composição das fases do titânio e na sua microestrutura, conseqüentemente também influenciam nas propriedades mecânicas do material [25].

A fase α tem uma maior resistência, uma melhor resistência a fluência e uma maior anisotropia, desta forma o Al por exemplo tem influência direta nessas propriedades. Já a fase β , tem uma melhor ductilidade e uma melhor taxa de difusão, e assim o V presente na liga tem influência nessas propriedades [25].

Abaixo segue uma tabela com mais dados sobre como as fases α e β influenciam nas propriedades mecânicas do titânio [25].

Tabela 2.5: A variação das propriedades do titânio em função das fases presentes em sua microestrutura

	α	$\alpha + \beta$	β
Densidade	+	+	-
Resistência	-	+	++
Ductilidade	- / +	+	+ / -
Resistência a fratura	+	- / +	+ / -
Resistência a fluência	+	+ / -	-
Comportamento sob corrosão	++	+	+ / -
Comportamento sob oxidação	++	+ / -	-
Soldabilidade	+	+ / -	-
Conformação a frio	--	-	- / +

Além da influência nas propriedades por estabilizar as fases e a microestrutura, os elementos de liga também podem alterar o material por conta de suas próprias características [25].

Como exemplo podemos citar o Al, que é menos denso que o Ti, e o V que é mais denso, assim uma liga α tende a ter uma densidade menor que uma liga β em função da densidade dos elementos de liga [25].

Existem hoje mais de 100 ligas diferentes de titânio, sendo que apenas 20 ou 30 delas são comercialmente atrativas, e destas 20 a mais utilizada é o Ti-6Al-4V. Esta liga é responsável por 50% das vendas de titânio, já a segunda maior é o titânio puro, que representa aproximadamente 25% [25,27].

2.3.3 Titânio puro

O Ti comercialmente puro, é considerado o titânio sem elementos de liga, apesar de possuir baixas proporções de alguns elementos, onde se adiciona principalmente o Oxigênio, porém algumas impurezas também são encontradas por serem inerentes ao processo de fabricação do titânio, como o Nitrogênio, o Carbono, o Hidrogênio e o Ferro. Em consequência dessa composição química, o titânio puro possui baixa resistência mecânica em comparação com as ligas de titânio, porém a sua reação com o oxigênio cria naturalmente uma camada de óxido passiva, resistente a corrosão em temperatura ambiente [25,27,28].

Essa camada passiva melhora e aumenta de espessura com o aumento de temperatura, porém em 650 °C essa resistência diminui rapidamente, e passa a ser necessária uma proteção inerte para o trabalho do titânio [28].

Ele é muito utilizado em aplicações onde deseja-se uma boa resistência a corrosão, sem a necessidade de altas resistências mecânicas, como tanques, trocadores de calor, vasos de processamento químicos e usinas de geração de energia elétrica [27].

No geral o Ti puro é considerado de boa ductilidade e de baixa resistência a tração porém como já mencionado, apesar de puro ele ainda varia em relação a composição química e ainda que os outros elementos estejam em baixas proporções, fazem diferença e alteram as propriedades do material [27,28].

Para diferenciar essas composições químicas, o titânio puro é amplamente comercializado em 4 tipos diferentes. O tipo 1 tem a menor resistência, mas possui uma boa conformabilidade, já tipo 4 tem a maior resistência e uma conformabilidade moderada [27,28].

Tabela 2.6: Composição química do titânio puro

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Nitrogênio, máx.	0,03	0,03	0,05	0,05
Carbono, máx.	0,08	0,08	0,08	0,08

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Hidrogênio, máx.	0,015	0,015	0,015	0,015
Ferro, máx.	0,20	0,30	0,30	0,50
Oxigênio, máx.	0,18	0,25	0,35	0,40

Esses elementos atuam ocupando os interstícios, que são espaços na estrutura cristalina, e aumentam a resistência do material. Na Tabela, percebe-se que o Ti tipo 4 é o que possui maiores proporções de elementos em sua composição química, e conforme já mencionado, possui conseqüentemente a maior resistência mecânica.

2.3.4 Liga de titânio Ti-6Al-4V

A liga de titânio Ti-6Al-4V é uma liga $\alpha+\beta$, é constituída pelo elemento de liga Al, que é um estabilizador α , e pelo V que é estabilizador β . Esta liga é considerada a mais popular e representa mais de 50% das ligas utilizadas hoje em dia. Por se tratar de uma liga $\alpha+\beta$ consegue-se equilibrar as boas propriedades de cada fase em um único material [25,27].

A liga Ti-6Al-4V é muito utilizada para aplicações de alta performance com requisitos de alta resistência que vão além das aplicações de resistência a corrosão do Ti puro, como exemplo a indústria aeroespacial, em vasos de pressão, turbinas de avião e implantes médicos [28].

É uma liga que possui uma boa combinação de resistência mecânica, dureza e resistência a corrosão. Essas propriedades são alcançadas pelo refinamento dos grãos e do resfriamento da região β ou $\alpha+\beta$, com posterior envelhecimento para a decomposição da martensita formada na têmpera [25]. Possui boa resistência a fratura quando em estado recozido e, quando tratada termicamente, possui uma boa relação de resistência por densidade. Apesar disso, por ser uma liga com pouco estabilizadores β , precisa de uma rápida têmpera para resultados significativos de aumento de dureza e resistência [27].

Capítulo 3 - Usinagem e fresamento

A usinagem é um processo de fabricação muito antigo e apesar dos materiais e técnicas atuais serem diferentes, os princípios são os mesmos. Pela definição, usinagem é o processo de fabricação onde é dada a geometria e acabamento desejado através da remoção de material, chamados de cavaco [24,29].

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados atualmente, e mesmo com a implementação de novas tecnologias, como a manufatura aditiva, o processo ainda continua sendo largamente empregado [24,29].

Por ser um por ser um processo antigo e de ampla aplicação, foi adquirida experiência sobre o funcionamento e parâmetros de suas operações, todo esse conhecimento fez-se importante ao longo do tempo, isso porque trata-se de um processo com um grande número de variáveis e assim não é possível avaliar todos os parâmetros e definir como exatamente ocorrerá o processo [24,29].

Desta forma a usinagem se tornou um processo de aplicação prática e assim, determinando e calculando os principais parâmetros e definindo um limite de tolerância, consegue-se chegar ao resultado desejado [24,29].

Dentre as principais especificações a serem definidas em uma usinagem, pode-se destacar: tipo do material, propriedades desejadas, medidas, tolerâncias, desgaste da ferramenta, custo e produtividade. Também em uma usinagem um dos princípios básicos para entender como ocorre o processo é a formação do cavaco, e controlando esse parâmetro pode-se chegar a um resultado mais preciso e com melhor qualidade [24,29].

Além desses parâmetros básicos, o mais importante a ser definido é qual o tipo de processo será utilizado. Existem diversos processos e máquinas de usinagem e a sua escolha será determinante no resultado final [24,29].

A ordem das operações também é um parâmetro importante a ser definido em um planejamento de usinagem. O método de Taguchi pode ser utilizado em diversos processos produtivos, inclusive para operações de usinagem, desta forma foi selecionado para definição das operações deste trabalho [30].

Este método consiste em definir níveis de cada parâmetro, e assim possibilitar de forma mais fácil a identificação das variáveis de cada operação. Ao delinear uma sequência de operações com ajustes intermediários, um nível de identificação é

relacionado a cada parâmetro variável, gerando um código específico para aqueles parâmetros definidos [30].

3.1 Fresamento

Pode-se destacar como principais processos de usinagem: torneamento, fresamento, furação, mandrilhamento, brochamento e retificação. O presente trabalho tem como foco o processo de fresamento [24,29].

O fresamento é um processo onde a ferramenta é fixada em um eixo e permanece girando enquanto a mesa se movimenta levando a peça de encontro a fresa [24,29].

As principais operações de fresamento são o fresamento tangencial, o fresamento frontal e o fresamento de topo (Figura 3.1). Cada um possui características diferentes e deve ser definido de acordo com o objetivo e a disponibilidade de materiais, ferramentas e maquinários [24,29].

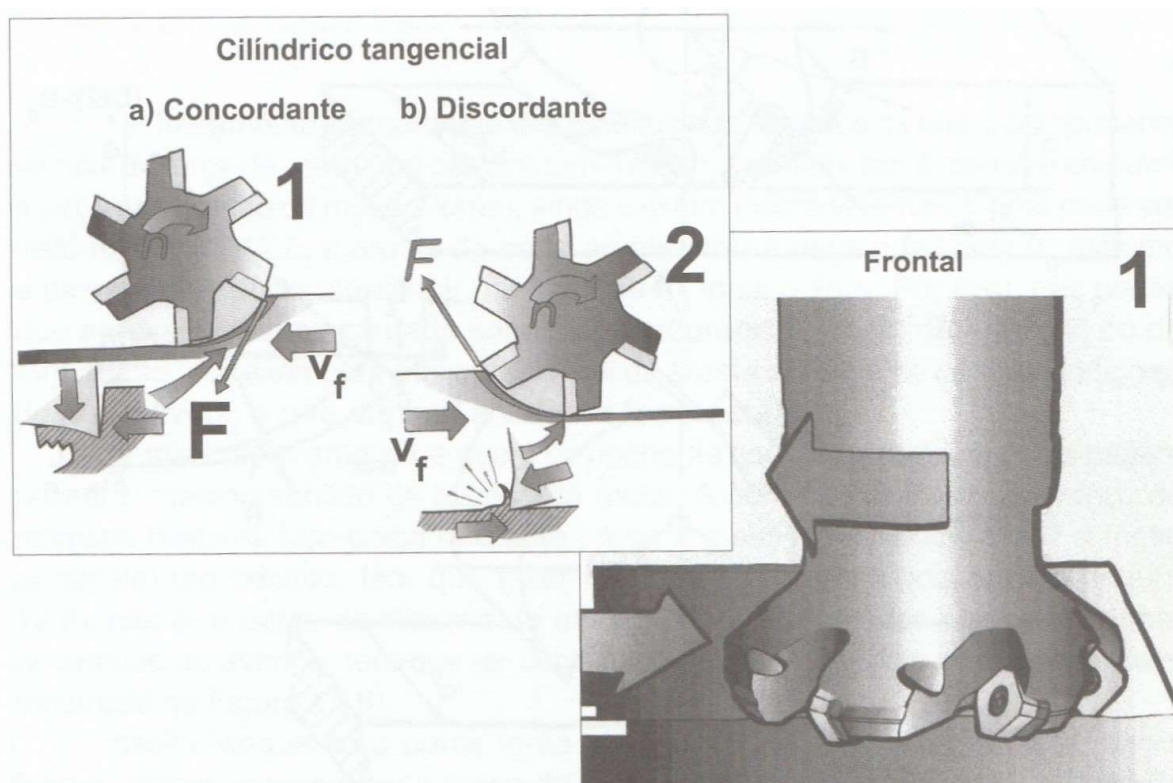


Figura 3.1: Fresamento cilíndrico tangencial e frontal [29].

O fresamento é reconhecido como um processo versátil, em que pode ser feito o desbaste, onde o objetivo principal é a retirada de material e assim pode-se definir os parâmetros para uma maior produtividade. Ou pode-se realizar o acabamento,

onde o objetivo principal é a qualidade final da peça, ou seja, os parâmetros devem ser ajustados para um acabamento melhor e mais preciso [24,29].

Assim como em toda operação adequada de usinagem, no fresamento é necessário conhecer o material que será trabalhado, e mais especificamente a sua dureza, que será determinante na definição dos parâmetros do processo [24,29].

Conhecendo o material da peça e estabelecido o tipo de processo, é preciso então definir alguns parâmetros de corte como a velocidade de corte, a velocidade de rotação da ferramenta (n), a velocidade de avanço (v_f) e a profundidade de corte e a força de corte (F), alguns destes parâmetros estão referenciados na Figura 3.1 [24,29]. Além da definição dos parâmetros é importante que as forças de corte envolvidas no processo sejam estudadas. O seu cálculo é necessário para dimensionar a potência, selecionar a ferramenta e verificar se a máquina e seus componentes suportam a operação [24,29].

A força de usinagem é calculada com base na força principal de corte, na força de avanço e na força de profundidade, outras forças envolvidas também podem ser destacadas como a força ativa, a força de compressão e a força de apoio [24,29].

A determinação da força de usinagem não é simples, pois está ligada a diversos fatores, e sendo assim faz-se necessário uma análise conjunta de dados, principalmente da influência destes na área de corte e na pressão específica de corte [24,29].

O material da peça irá influenciar dependendo tanto da sua dureza quanto da presença de elementos de liga, ou seja, ainda que dois materiais tenham a mesma dureza, um elemento de liga específico pode fazer com que a força de usinagem aumente em função de consequências metalúrgicas. A proposta mais próxima para determinar a força pelo material, é a utilização da tensão limite de ruptura, obtida por ensaio de tração, porém há uma ressalva, pois, esse ensaio é um processo estático, já a usinagem é um processo dinâmico [24,29].

O material da ferramenta está diretamente ligado as forças de contato e atrito, assim também deve ser considerada para uma boa análise de corte, bem como a sua geometria que influencia na formação dos cavacos e a variação dos seus ângulos de posição e inclinação que podem aumentar ou diminuir as forças na usinagem [24,29].

O avanço influencia tanto no aumento quanto na diminuição da força de corte, isso porque aumentar o avanço faz com que ocorra uma diminuição do atrito e também um aumento de material deformado que se transforma em cavaco, esses fatores

levam a diminuição da pressão específica de corte. Por outro lado, ocorre também o aumento da área de corte que ao final acaba sendo mais significativo e, sendo assim, o aumento do avanço aumenta a força de usinagem [24,29].

Para o fresamento, a força de corte tem a formação de cavaco irregular e desta forma se utiliza os valores médios que apresentam resultados satisfatórios e próximos da realidade [24,29].

Outros fatores também podem ser considerados para uma melhor determinação da força de usinagem, como a velocidade de corte, o fluido de corte e o desgaste da ferramenta [24,29].

O desgaste e a avaria da ferramenta são inerentes em uma operação de corte, o controle e estudo dessas ocorrências ajudam a controlar melhor o processo e garantir uma maior produtividade e um melhor acabamento. As avarias são defeitos como trincas, quebras e lascas que podem ocorrer na ferramenta, já o desgaste é o processo natural de perda microscópica de material durante uma operação de usinagem. O seu controle é feito principalmente pela medição das larguras, profundidades e distâncias das crateras e flancos [24,29].

O estudo da temperatura ajuda a otimizar a produtividade com a qualidade do acabamento e o desgaste da ferramenta, isso porque, ao se buscar uma maior produtividade tende-se a aumentar as velocidades de corte e de avanço, porém esse aumento eleva as temperaturas envolvidas na operação, o que é deletério para todo o conjunto peça, máquina e ferramenta [24,29].

3.2 Usinagem em materiais fabricados por manufatura aditiva

Como já discutido no Capítulo 2 o processo de manufatura aditiva trabalha na fabricação da peça com a construção e fusão de camadas em uma direção específica, e isso pode levar a uma anisotropia do material que poderá ser um problema no momento da usinagem. Pois sem uma homogeneidade no material, há uma maior dificuldade em definir os parâmetros de fresamento [24,29].

Nos processos de fabricação por manufatura aditiva a orientação de fabricação e a qualidade da matéria prima podem levar a diferentes resistências mecânicas ao longo da peça, como visto na Figura 3.2, isso gera uma anisotropia, sendo essa característica um dos grandes desafios na parametrização do fresamento [3,24,29].

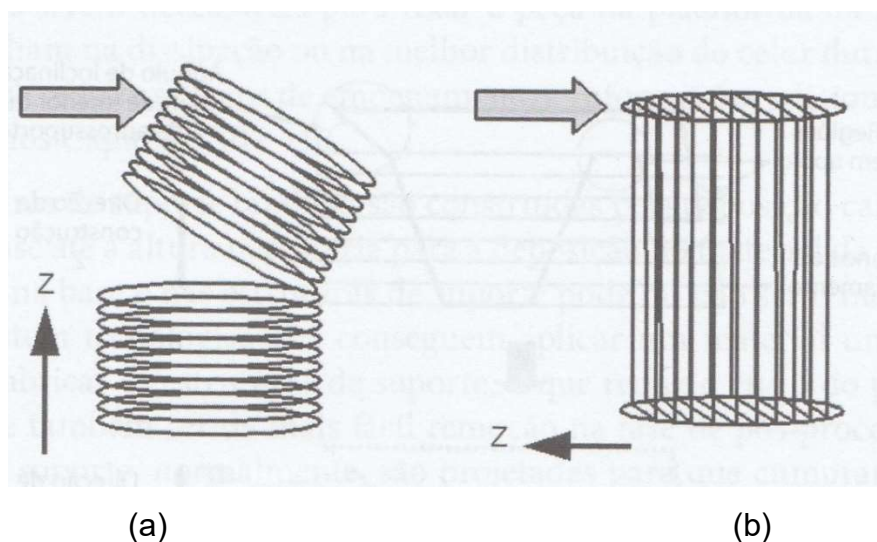


Figura 3.2: Representação do efeito da aplicação de uma solicitação transversal (a) e longitudinal (b) à direção Z de adição de camada em função da anisotropia do material [6].

Como o processo é composto pelo empilhamento de camadas, a espessura dessas camadas pode ser um fator que leva a um erro dimensional, conforme apresenta a Figura 3.3. Esse fator de erro deve ser considerado e pode exigir a fabricação com sobremetal para ajustes em usinagem no pós-processamento. Dependendo da geometria da peça esse fator pode inclusive ser agravado, visto que mesmo a manufatura aditiva tendo a grande vantagem de criar geometrias inovadoras, elas seriam limitadas por essa usinagem de sobremetal [6].

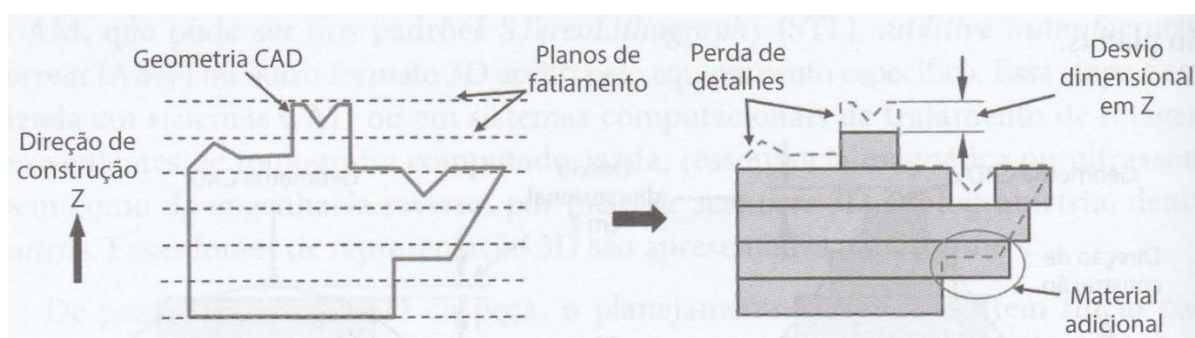


Figura 3.3: Perda ou alteração geométrica de detalhes na direção Z [6].

Tecnologias de sinterização por laser normalmente não necessitam estruturas de suporte para a fabricação, pois o próprio pó metálico atua como apoio para as camadas, porém podem ser necessários, ajudando inclusive para a dissipação de

calor, desta forma se faz necessário o pós-processamento de corte e acabamento para retirar esses suportes [6,22].

3.3 Usinagem do titânio

O titânio é considerado um material difícil de ser usinado, porém atualmente já há uma grande quantidade de estudos sobre o seu comportamento e consegue-se chegar a bons resultados seguindo os procedimentos corretos [25,27].

Apesar de precisar apenas de uma força de corte um pouco maior do que a força necessária para a usinagem de aços, o titânio possui uma microestrutura que desfavorece e dificulta as operações [28].

Por conta disso as operações de usinagem de titânio costumam ser de alto custo, porém definindo corretamente os parâmetros do processo, pode-se alcançar boas taxas de produção, com bom acabamento e com custo razoável [25].

Uma das características do titânio que afeta em sua usinabilidade é a baixa condução de calor. Quando submetido a uma operação de usinagem o calor gerado demora mais para ser dissipado, o que leva a um maior desgaste da ferramenta e conseqüentemente a um maior custo devido as trocas dessas ferramentas [25,27].

O que também pode causar de defeitos superficiais é a baixa resistência a fadiga do titânio, principalmente em operações de esmerilhamento, para contornar esse problema é essencial que a ferramenta esteja sempre bem afiada nas operações, desta forma consegue-se prolongar a vida do titânio [27].

O baixo módulo de elasticidade do titânio também é um ponto que deve ser considerado ao realizar operações de usinagem, como possui uma maior “elasticidade” pode ser necessário uma melhor fixação do sistema, bem como que as ferramentas estejam sempre bem afiadas [25,27].

Para uma boa operação de usinagem de titânio, os parâmetros a serem definidos são os mesmos necessários para uma operação de usinagem de aços e outros metais, dentre elas já mencionadas nesse trabalho, podemos destacar novamente a escolha da ferramenta, as forças, a velocidade e a configuração da máquina [27].

Tendo em vista esses parâmetros, as usinagens de ligas de titânio devem seguir algumas estratégias. Como o titânio possui baixa condução de calor, o ideal é

realizar a usinagem com baixas velocidades de corte, evitando que seja gerado muito calor. Analogamente deve-se utilizar o melhor avanço possível, já que esse parâmetro afeta menos a geração de calor [27].

A utilização de bastante fluido de corte ajuda a dissipar o calor e assim contornar a má condução de calor do titânio, além disso ainda ajuda a remover os cavacos e diminuir a força de corte [25,27]. Manter a ferramenta de corte sempre bem afiada, melhora o acabamento de superfície.

Capítulo 4 – Materiais e métodos

O presente trabalho tem como objetivo analisar a usinabilidade da liga de titânio Ti-6Al-4V fabricada por fusão seletiva a laser quando submetida a uma operação de fresamento. Este capítulo apresenta os métodos experimentais utilizados para realização das análises, bem como os equipamentos e ferramentas utilizados.

Os resultados obtidos serão comparados com outras pesquisas encontradas na bibliografia, em que foram analisados parâmetros próximos dos definidos nesse trabalho em uma peça de mesmo material, porém fabricada por outro processo que não a manufatura aditiva.

4.1 A amostra

A amostra que foi submetida à operação de fresamento possui geometria simples conforme Figura 4.1a. Ela foi fornecida pelo Biofabris - Instituto Nacional de Ciência & Tecnologia em Biofabricação, laboratório da UNICAMP. Seu material é uma liga de titânio, Ti-6Al-4V, e foi fabricada pelo por um processo de manufatura aditiva, mais especificamente o SLM, onde os pós utilizados na fabricação possuem morfologia esférica e diâmetro variável conforme Figura 4.1b.

A máquina utilizada é da empresa EOS modelo M 270, esse equipamento tem a capacidade de fabricar a uma velocidade de até 20 mm³/s. Seu laser é um Yb fiber laser e tem potência de até 200 W, com uma velocidade máxima de escaneamento de 7000 mm/s.

Para a fabricação da peça analisada nesse trabalho, foi utilizado laser a uma potência de 170 W, com velocidade de escaneamento de 1250 mm/s e espaçamento de 0,1 mm. O parâmetro de construção da peça ficou definido em 0,03mm de espessura por camada.

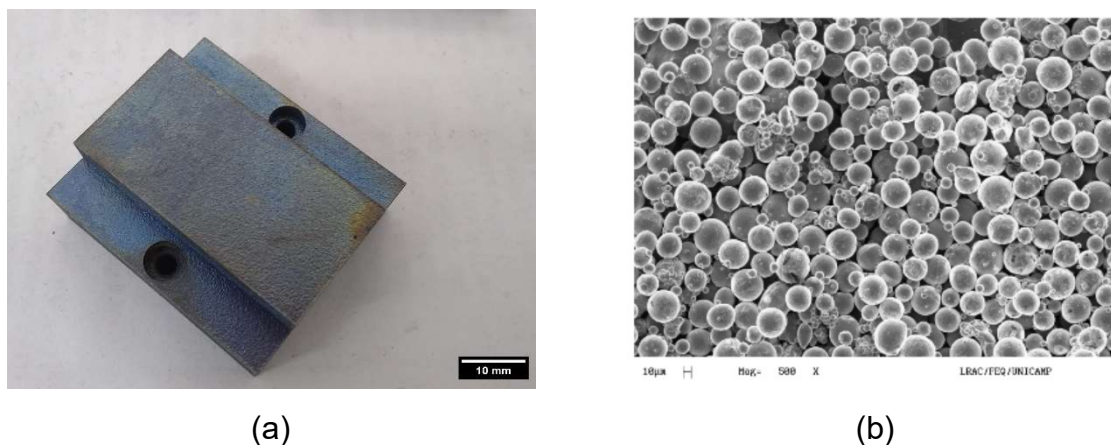


Figura 4.1: Imagem de uma peça de Ti-6Al-4V fabricada por manufatura aditiva e de mesma geometria da amostra utilizada neste trabalho (a) e imagem em microscópio dos pós de Ti-6Al-4V utilizados em manufatura aditiva [31] (b).

4.2 Ferramenta e máquina-ferramenta

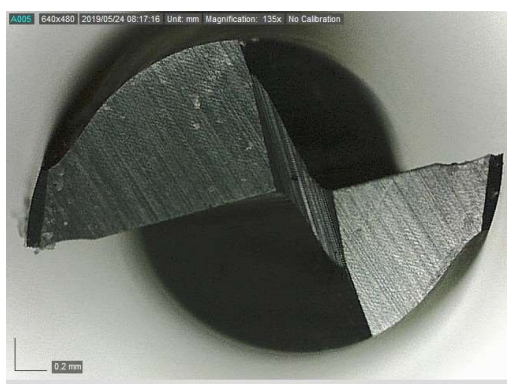
A fresadora utilizada para o trabalho foi o modelo Diplomat FVF 2000, de fabricação da empresa brasileira DEB'MAQ (Figura 4.2).

Essa máquina possui uma mesa com dimensão de 230 mm x 1067 mm que pode se deslocar nos eixos, x, y e z. Sendo que o deslocamento no eixo y é automático e pode ser configurado, já o deslocamento no eixo x é somente manual. O avanço automático no eixo y é configurável eletronicamente por meio de um painel digital da empresa Heidenhain, e com isso é possível fixar o valor de avanço para a operação realizada. Seu motor principal tem uma potência de 3 HP ou 2,23 kW, e sua rotação pode ser configurada girar de 60 rpm até 4200 rpm.



Figura 4.2: Fresadora utilizada nas operações.

A ferramenta utilizada para as operações que serão analisadas é uma fresa de metal duro para acabamento fabricada pela empresa DORMER, como mostrado na Figura 4.3. Foram utilizadas duas unidades, uma para cada etapa, e ambas possuem um diâmetro de 3 mm.



(a)



(b)

Figura 4.3: Ferramenta nova utilizada nas operações de fresamento.

4.3 Planejamento de experimentos

Para o planejamento dos experimentos foi realizado um planejamento fatorial completo 3^2 , utilizando como fatores o avanço por dente e a profundidade de corte. A escolha para esses parâmetros se deve ao fato de que o avanço é de extrema importância, tendo influência direta nas forças de corte, rugosidade e rebarba, e a profundidade de corte, além de influenciar na força, pode ter impacto na formação de rebarba. Assim, são dois parâmetros de extrema importância, além de estarem ligados à quantidade de material removido e, por consequência, ao tempo de usinagem.

A Tabela 4.1 apresenta os valores dos três níveis para cada fator. Os valores foram escolhidos levando em consideração outros estudos feitos sobre a usinabilidade de ligas de titânio.

Tabela 4.1: Parâmetros de cada operação

b (mm)	0,6	+1 -1	+1 0	+1 +1
	0,4	0 -1	0 0	0 +1
	02	-1 -1	-1 0	-1 +1
		40	80	150
		f_z (mm/min)		

Tabela 4.2: Sequência das operações de fresamento

Ordem da operação	f_z	b
1º corte	-1	-1
2º corte	-1	0
3º corte	-1	+1
4º corte	0	-1

Ordem da operação	f_z	b
5º corte	0	0
6º corte	0	+1
7º corte	+1	-1
8º corte	+1	0
9º corte	+1	+1

A ordem das operações foi montada de acordo com a metodologia utilizada por Taguchi. Esse procedimento foi executado tanto para a primeira réplica (lado I), quanto para a segunda réplica (lado II). Ao final de toda a operação a peça final ficou conforme Figura 4.4.

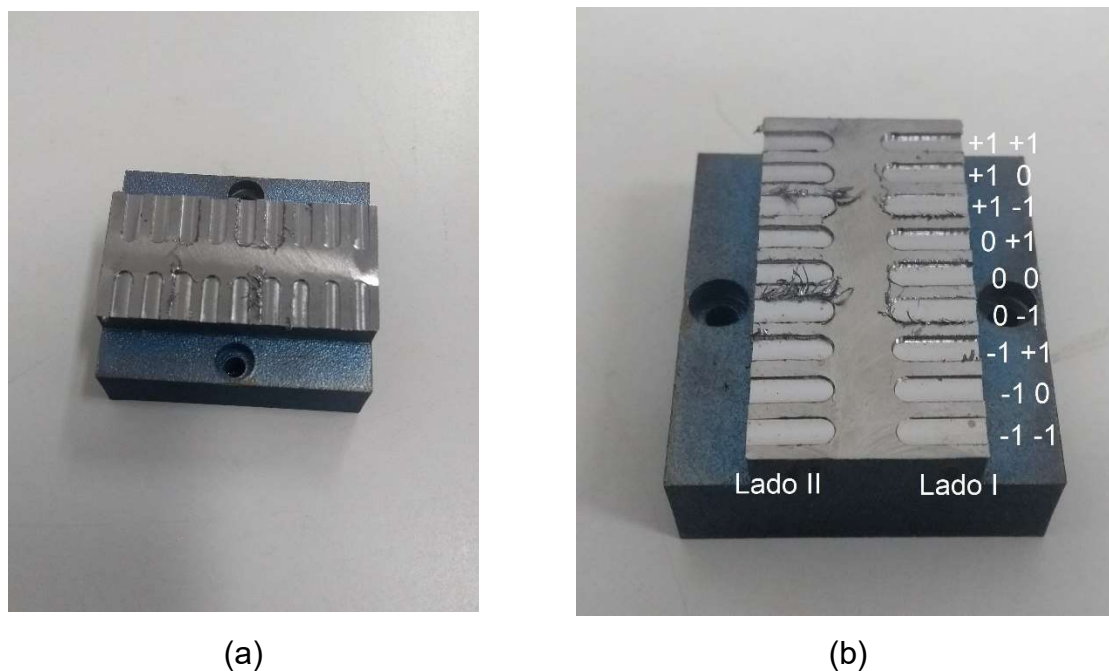


Figura 4.4: Foto da amostra após todas as operações de fresamento. Visão lateral geral da peça (a) e visão frontal aproximada e com a ordem das operações (b).

Inicialmente foi realizada a planificação da peça e em seguida duas etapas de fresamento. Para a planificação foram utilizadas pastilhas de metal duro a uma rotação de 1040 rpm e, em função da limitação de espaço para fixação da peça, foram

dados passes manuais pelo eixo x da máquina até que a peça estivesse totalmente plana e pronta para as operações de análise.

A sequência das duas etapas da operação está descrita nas Tabela 4.2 e os avanços e as profundidades de corte são informados na Tabela 4.1.

Para todas as operações deste trabalho não foi usado nenhum fluido de corte. A rotação da ferramenta utilizada foi de 3800 rpm ($V_c = 35$ m/min).

4.4 Análise das forças de corte

Durante as operações de fresamento, foram adquiridas as forças de corte por meio de um dinamômetro instalado na fresadora. O equipamento ficou acoplado à mesa e a peça fixada por dois parafusos no dinamômetro, conforme Figura 4.5.

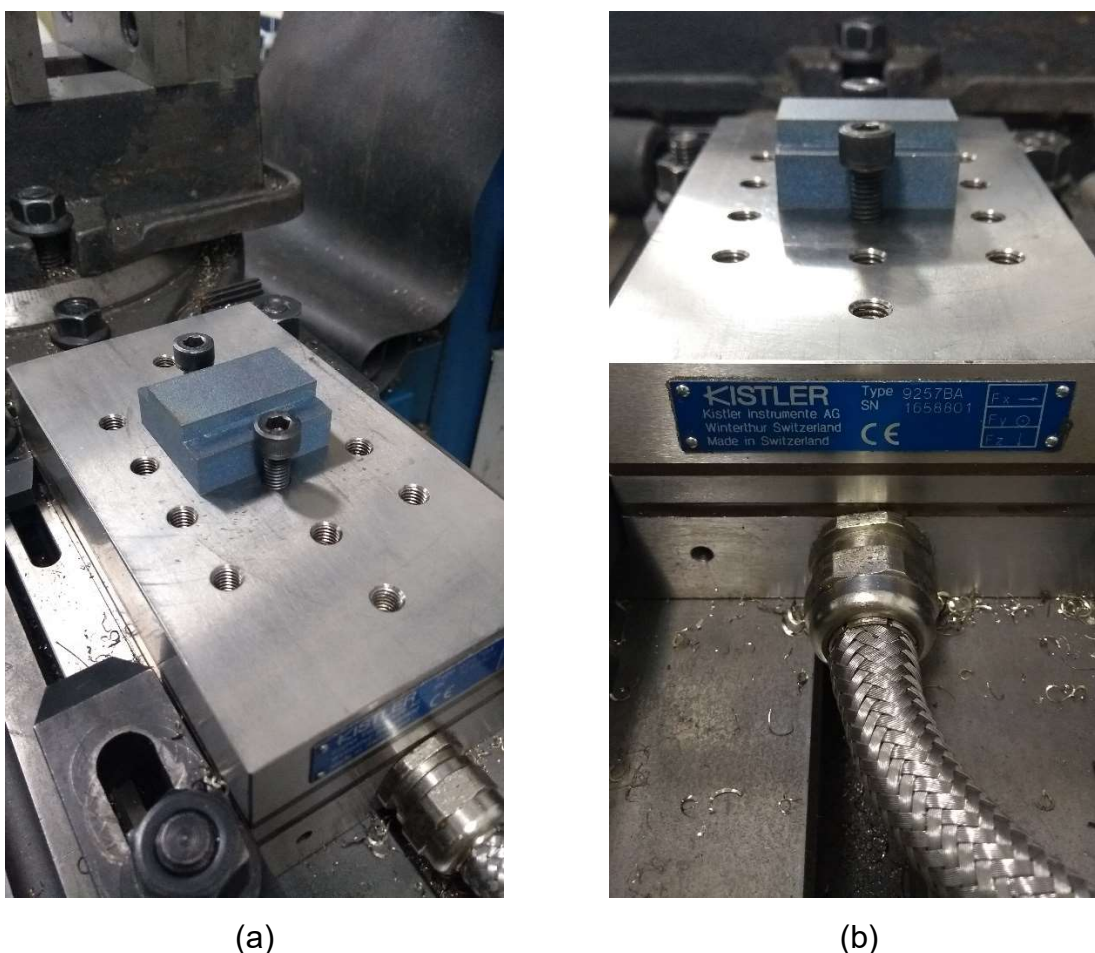


Figura 4.5: Fixação da amostra no dinamômetro (a), direções F_x , F_y e F_z no dinamômetro após a fixação da peça (b).

O dinamômetro utilizado foi o da fabricante Kistler, modelo 925 7BA, conectado a um amplificador também da Kistler (Figura 4.6a) à uma placa de aquisição de dados da National Instruments (Figura 4.6b). Esses equipamentos permitiram que as forças de corte nos eixos x , y e z pudessem ser registradas e plotadas graficamente na tela do computador.

Seu funcionamento consiste em converter a tensão em Volts relativa as forças para Newton, a unidade de medida de força no Sistema Internacional. A taxa de conversão utilizada inicialmente foi de 5 mV/N, porém com o aumento das forças passou-se a utilizar 2,5 mV/N para que todo o sinal fosse captado. A taxa de aquisição utilizada foi de 1kHz.

Cada uma das 9 operações de cada etapa foi registrada e em seguida trabalhada no programa MATLAB para a análise das forças.



(a)



(b)

Figura 4.6: Equipamentos utilizados em conjunto com o dinamômetro, o amplificador da fabricante Kistler (a), e a placa de aquisição da fabricante National Instruments (b).

4.5 Análise de rugosidade

A análise de rugosidade foi realizada no Laboratório de Microusinagem Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRJ, utilizando um perfilômetro da empresa Taylor Hobson, modelo Talysurf 50 (Figura 4.7a). O equipamento possui medição vertical máxima de 1 mm com resolução de 16 nm e um espaçamento horizontal máximo de 50mm e com aquisição de dados de 0,5 μ m. Seu

apalpador possui um ângulo de 90° com um diamante de $2\ \mu\text{m}$ de diâmetro (Figura 4.7b).

Para a análise da rugosidade, é necessário filtrar o sinal adquirido pelo equipamento com o objetivo de retirar os sinais advindos da geometria própria da peça. Para isso foi definido um cut-off de 15 vezes $0,08\ \text{mm}$ com base na norma ISO 4288-1996, que especifica que, para um fresamento, o recomendado é de pelo menos 5 vezes o avanço por dente, sendo assim os parâmetros de medição estão com uma boa margem para a análise.

O procedimento de medição consistiu em 3 análises de cada canal onde foi realizado o fresamento, para cada lado da peça, totalizando assim 6 análises para cada parâmetro de operação.



Figura 4.7: Perfilômetro Taylor Hobson (a) e seu apalpador realizando a medição de rugosidade na peça (b).

4.6 Análise dos cavacos, do desgaste da ferramenta, da superfície dos canais e das rebarbas

Para cada réplica, foi utilizada uma ferramenta nova. Ao final das 9 operações de corte a que cada uma foi submetida, foram guardadas para posterior análise em laboratório. Os cavacos foram recolhidos após cada operação e guardados em pequenos envelopes para posterior análise em laboratório.

As análises foram realizadas no LAMAT do CEFET-RJ, com a utilização de um microscópio da empresa Metripex/PZO-Labimex e uma câmera da empresa Olympus Soft Imaging Solutions, modelo UC 50 (Figura 4.8a).



(a)



(b)

Figura 4.8: Microscópio do laboratório LAMAT, do CEFET/RJ, utilizado na análise das ferramentas e dos cavacos (a). Câmera portátil com lente microscópica USB AM3715TB Dino-Lite Edge, utilizada na captura de mais imagens dos cavacos e ferramentas (b).

As ferramentas e os cavacos foram fixados a base do microscópio e foi utilizado uma lente de 0.63. Foram capturadas imagens das duas ferramentas utilizadas e

também as imagens de uma ferramenta nova, de mesmas especificações. Os cavacos analisados foram os das operações -1 -1, 0 0 e +1 +1, e foram capturadas imagens dos cavacos em geral para análise qualitativa.

Adicionalmente, foram registradas as imagens dos canais e das rebarbas, e mais imagens dos cavacos e das ferramentas, as capturas foram feitas no laboratório de microfresamento da COPPE/UFRJ com o uso de uma câmera portátil com lente microscópica USB AM3715TB Dino-Lite Edge (Figura 4.8b). Essa máquina possui resolução de 640 x 480 pixels, e também foi utilizada com o objetivo de observar qualitativamente a formação dos cavacos e o desgaste das ferramentas.

4.7 – Caracterização da liga Ti-6Al-4V fabricada por SLM

Conforme discutido no Capítulo 3, para a análise completa de uma liga metálica, é importante ter conhecimento de sua microestrutura. Como não foi possível realizar essas medições neste trabalho, para a caracterização será usada como base a referência [32] que realizou o estudo na mesma peça deste trabalho, de liga de titânio Ti-6Al-4V fabricada por SLM.

Pela imagem da Figura 4.10, pode-se observar a formação de martensita acicular α' . Esse tipo de microestrutura ocorre em função do rápido resfriamento do material após o aquecimento pela passagem do laser, é importante ressaltar que a peça do estudo não apresentou nenhum dos defeitos comuns provenientes de fabricação por SLM e nem porosidade excessiva, confirmando que o resultado da fabricação foi uma peça totalmente densa.

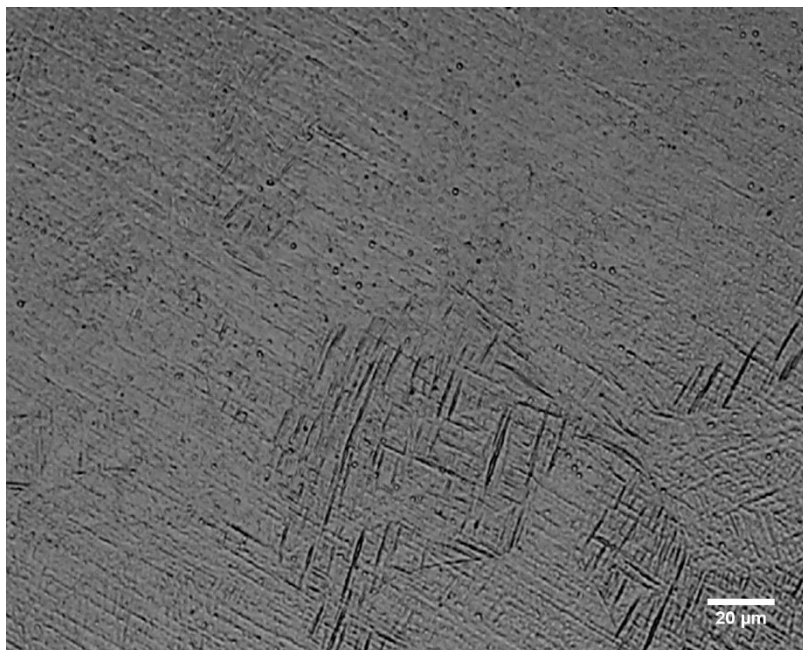


Figura 4.10: Microestrutura de uma liga de titânio Ti-6Al-4V fabricada por SLM.

O mesmo trabalho também realizou a medição de dureza Vickers do material. Após cinco medições utilizando cargas de 30 kgf por ciclos de 20 s, uma dureza de 39,2 HV foi encontrada.

Capítulo 5 – Resultados e discussões

O presente capítulo apresenta os resultados experimentais encontrados e as análises e discussões feitas, incluindo os resultados para as forças de corte, rugosidade, rebarba e as ferramentas.

5.1 Análise das forças de corte

Os sinais das forças de corte envolvidas nas operações foram gerados pelo dinamômetro, conforme já mencionado na seção 4.2. Neste processo os sinais de F_x , F_y e F_z foram registrados com uma frequência de aquisição de 1000 Hz e gravados no computador, em um arquivo de texto. Esse valor de frequência significa que a cada segundo, as forças nos três eixos eram registradas 1000 vezes.

Com esse registro, foi possível plotar um gráfico para cada operação, utilizando o programa MATLAB, e assim começar a analisar as forças em cada operação. Os gráficos plotados ficam no formato conforme Figura 5.1.

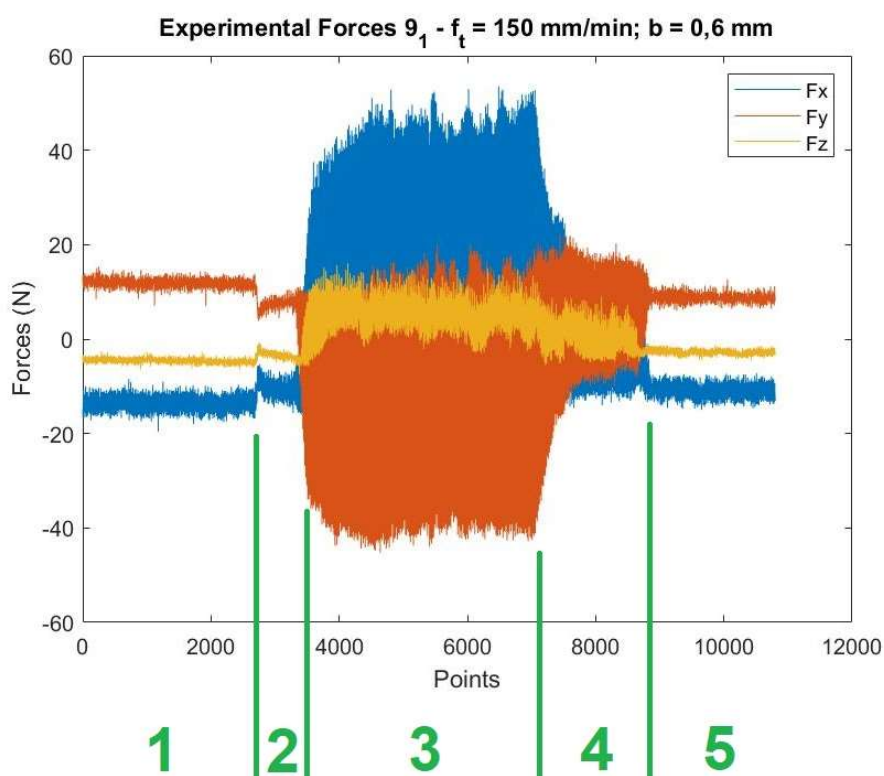


Figura 5.1: Gráfico de forças do experimento de fresamento

O gráfico foi separado em cinco regiões de análise sinalizadas na cor verde. Na primeira região a ferramenta ainda não encostou na peça a ser usinada e o sinal é apenas um ruído no dinamômetro. Na região 2 pode-se observar a alteração do sinal, que ocorre no momento em que a ferramenta toca a peça. Na região 3 a ferramenta já se encontra totalmente sobre a peça, realizando a usinagem, neste momento tem-se as forças de corte máximas. Na região 4 é quando a ferramenta chega em sua posição final e é retirada da peça no sentido de Fz. Por fim, na região 5, a ferramenta e a peça não estão mais em contato e o sinal volta a ser somente o ruído no dinamômetro.

Para uma análise mais assertiva, é necessário tratar os dados registrados pelo dinamômetro a fim de ajustar o gráfico e retirar as regiões que não são de interesse. Nesse trabalho será analisada apenas a região 3, que é onde a ferramenta está totalmente usinando a peça e ocorrem as forças de corte máxima.

Primeiramente deve-se verificar se os dados registrados estão dentro do esperado de acordo com os cálculos teóricos. Em uma operação de fresamento em que a ferramenta possui 2 dentes, as forças de corte devem aparecer no formato aproximado de uma senóide, com dois picos de força para cada revolução da ferramenta.

Esses máximos ocorrem em função do aumento da espessura do cavaco, como se pode observar na Figura 5.2. No momento em que o dente encosta na peça e começa a deformar e remover material, ocorre o início do sinal das forças, que aumentam proporcionalmente em função da posição angular do dente. Ao atingir 90° , tem-se a força máxima e, em seguida, as forças voltam a decair até que o dente não esteja mais em contato com a peça.

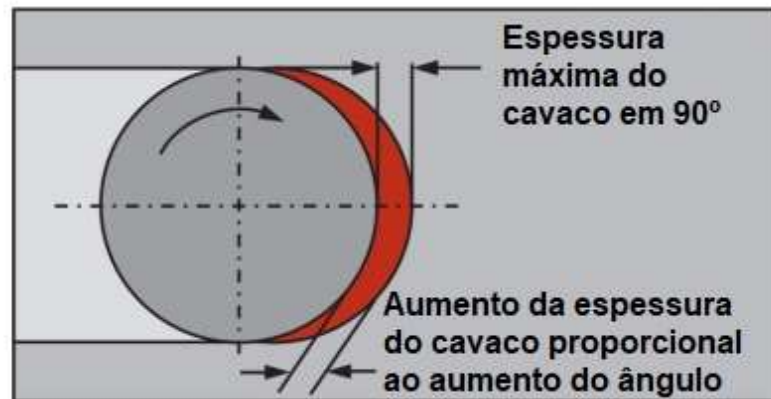


Figura 5.2: Aumento da espessura do cavaco em função do posicionamento angular do dente da ferramenta.

Com base nesse conceito teórico, espera-se que na prática os sinais de força estejam de acordo com a rotação da ferramenta. Para isso define-se a frequência principal (f_{sp}) das operações através da equação 5.1.

$$f = \frac{n}{60} = \frac{3800 \text{ rpm}}{60 \text{ s}} = 63,33 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

Para confirmar se as frequências principais registradas pelo dinamômetro estão conforme o calculado na equação 5.1, foi realizada uma Transformada de Fourier Rápida (FFT). Essa operação realiza a transformação do domínio do sinal para o domínio das frequências, decompondo o sinal em somas de ondas senoidais de mesma frequência, e assim consegue-se verificar qual a frequência principal (Figura 5.3).

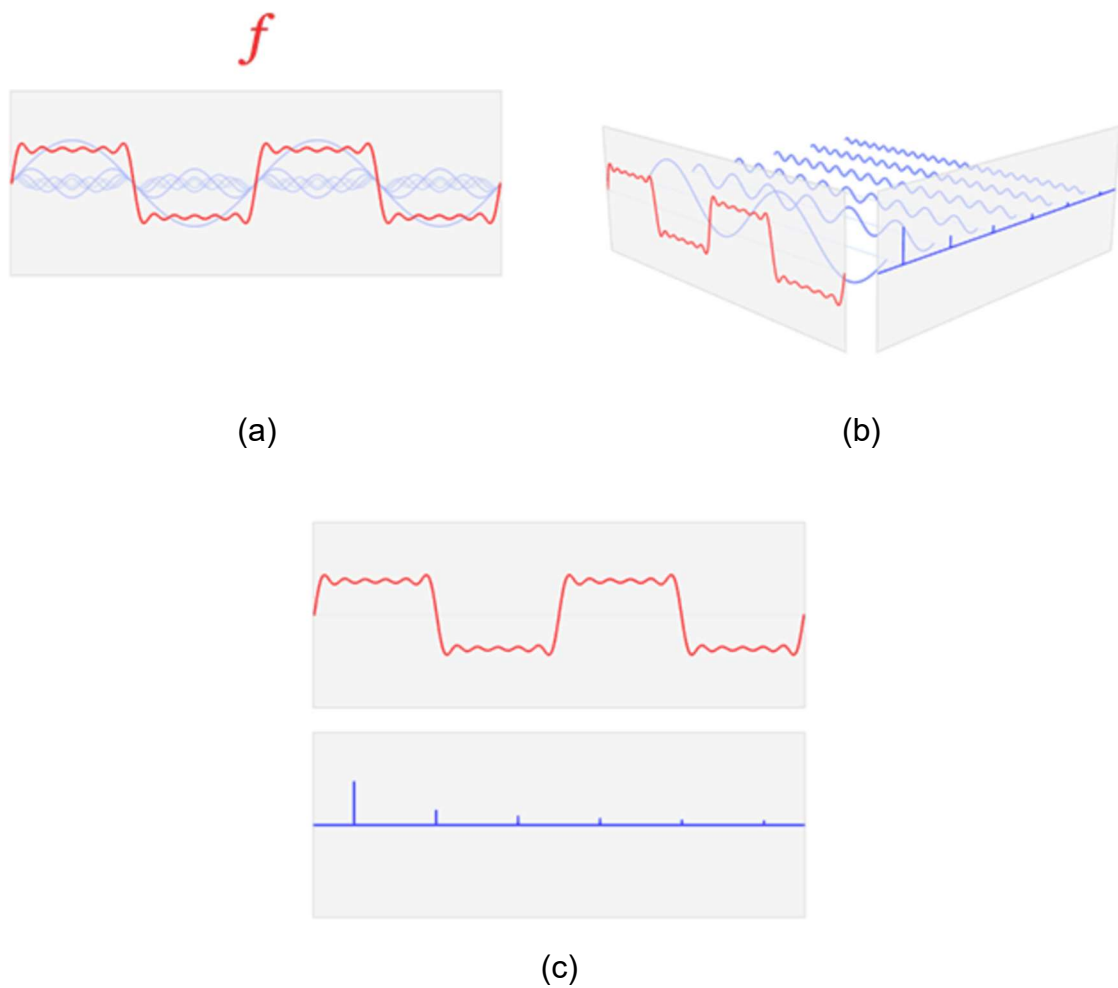


Figura 5.3: Demonstração de como ocorre a Transformada de Fourier, alterando o domínio do sinal para o domínio das frequências. Em (a) tem-se o sinal como uma soma de outros sinais menores, em (b) tem-se a demonstração de como seria a separação do sinal por frequência, e em (c) o resultado final da transformação.

Utilizando o programa MATLAB e o comando de FFT, foi plotado um gráfico para cada operação, e todos tiveram a forma aproximadamente conforme a Figura 5.4. Pode-se observar que as frequências de maior amplitude são múltiplos de 63 Hz, que foi o resultado obtido na equação 5.1. Desta forma fica confirmada a correta aquisição das frequências pelo dinamômetro, sem ruídos significantes. Caso contrário, um filtro digital seria aplicado para remoção dos ruídos nas frequências indesejadas.

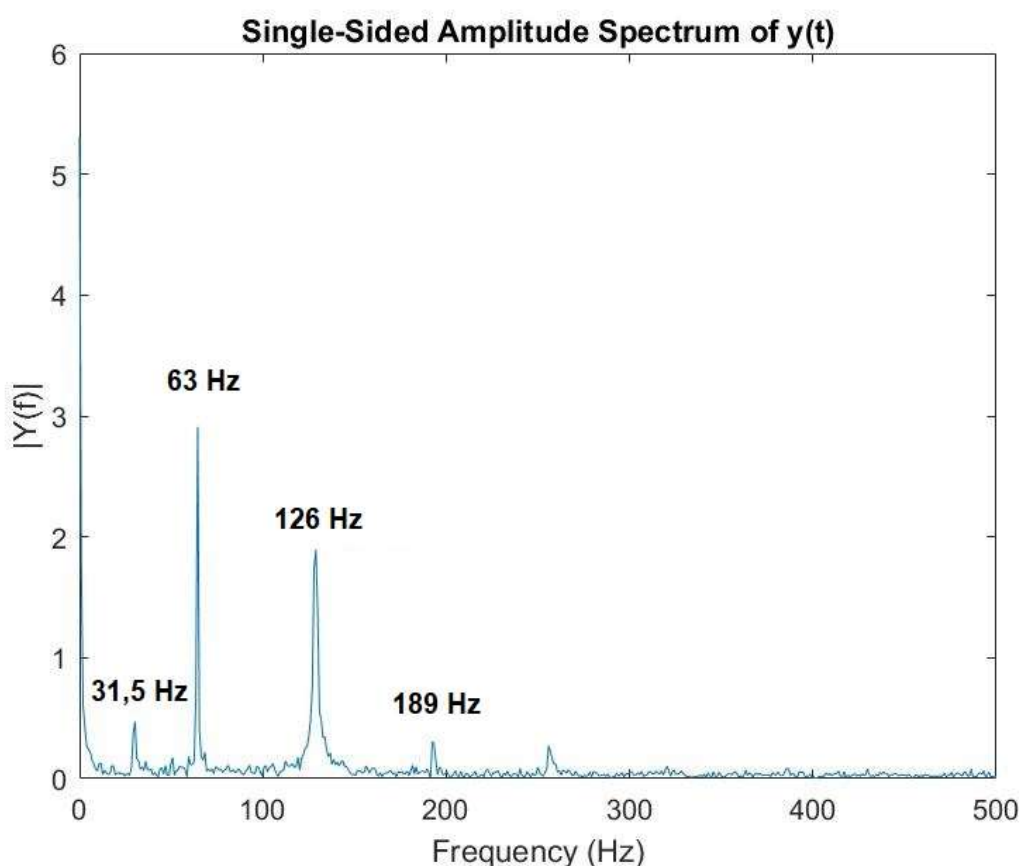


Figura 5.4: Gráfico resultante da FFT, onde se pode verificar as frequências principais do sinal de forças.

Após a verificação das frequências principais das operações, foi feita um saneamento do sinal adquirido retirando-se a força F_z que não é de interesse desse trabalho e levando o sinal para o ponto 0 no eixo das forças, reduzindo o efeito dos ruídos.

Como o interesse do estudo é analisar a região 3, conforme explicado na Figura 5.1, ficou definido como padrão analisar a força durante 40 rotações que ocorreram nessa região. Foram utilizadas um número razoável de rotações para mitigar as variações das forças que ocorrem durante o processo.

Ao realizar essas operações no MATLAB, o sinal dos dados em cada operação ficou próximo ao formato da Figura 5.5.

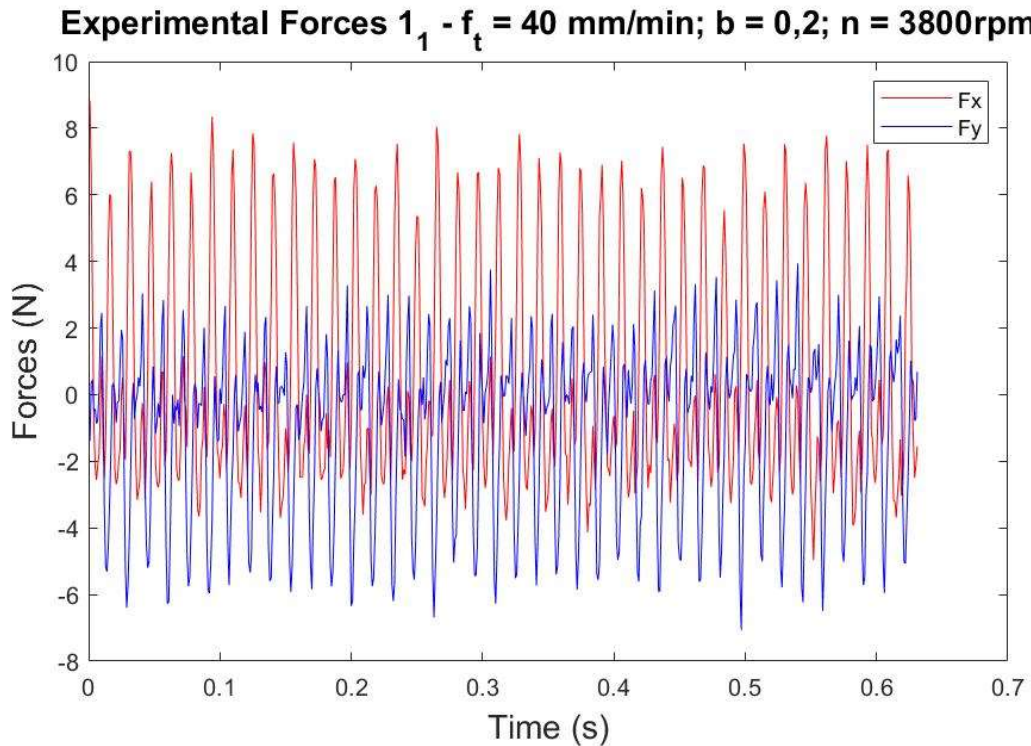


Figura 5.5: Gráfico de forças com o sinal saneado de acordo com os parâmetros definidos.

Com os dados que geraram os gráficos de cada operação e também fazendo o uso do MATLAB, foram calculadas as forças resultantes para cada ponto e, por fim, foi calculada a média dos máximos de cada rotação dessas forças. Foi trabalhado com o máximo da força, pois é o valor mais crítico durante a operação.

O resultado final foi a média das forças resultantes máximas em cada operação, e com isso é possível analisar a influência da velocidade de avanço e da profundidade de corte nas operações de fresamento de Ti-6Al4V fabricado por SLM. As barras de erro correspondem a $\pm 1.96\sigma$, ou seja, um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 5.1: Influência da profundidade de corte e do avanço na usinagem do Ti-6Al-4V fabricado por SLM. Resultados em Newton (N).

		profundidade de corte (mm)		
		0,2	0,4	0,6
velocidade de avanço (mm/min)	40	13,481	23,886	70,298
	80	56,945	82,287	84,798
	150	61,264	94,955	98,363

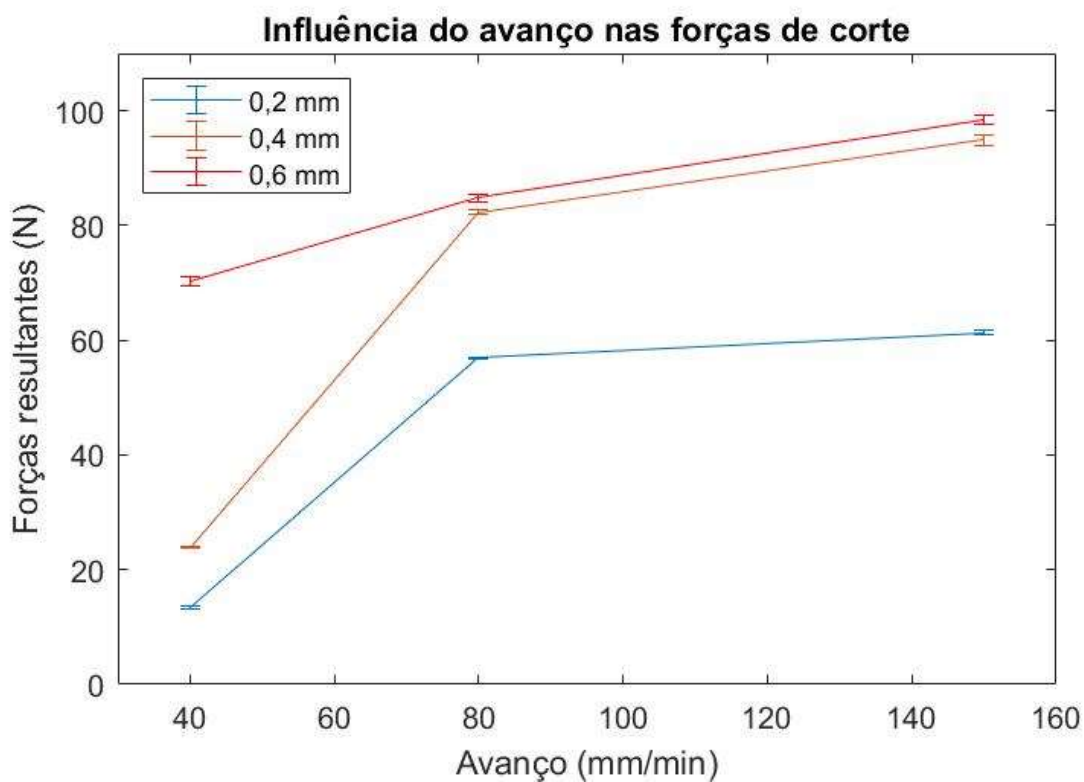


Figura 5.6: Gráfico representando a influência do avanço na usinagem do Ti-6Al-4V fabricado por SLM.

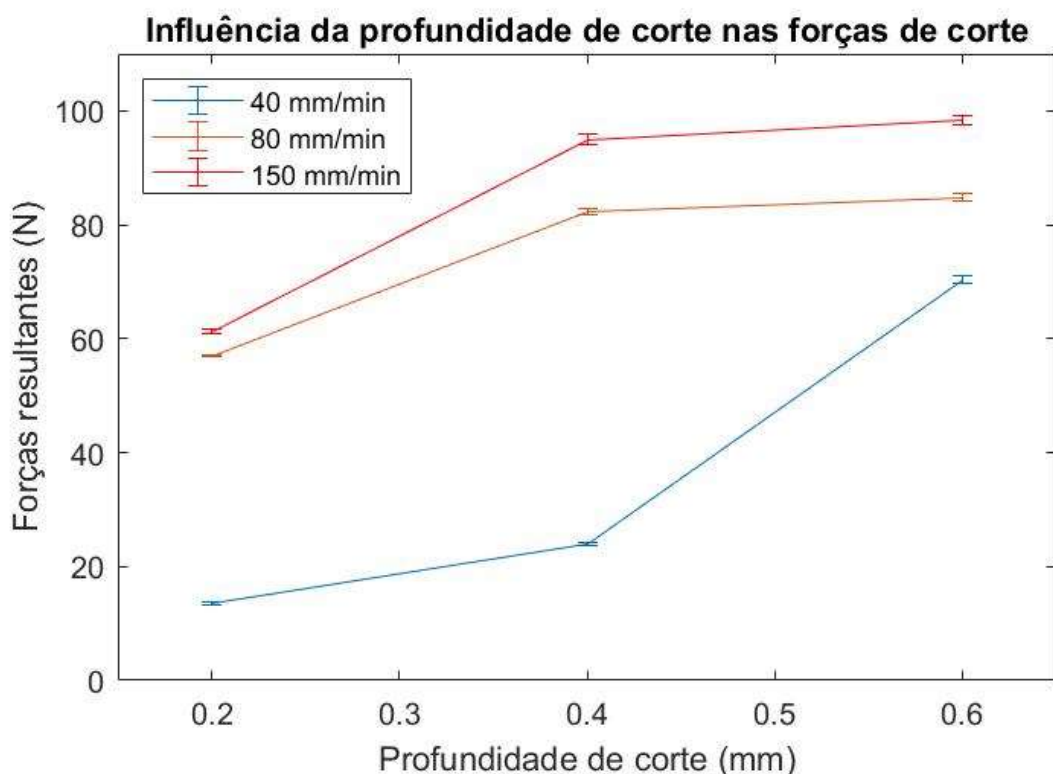


Figura 5.7: Gráfico representando a influência da profundidade de corte na usinagem do Ti-6Al-4V fabricado por SLM.

Como pode-se observar no gráfico da Figura 5.6, para profundidades menores, como 0,2 mm e 0,4 mm, as forças de corte nas operações de fresamento são mais sensíveis a variação da velocidade de avanço. Já para profundidades de corte maiores, como a de 6 mm, o aumento é praticamente linear independente em função da velocidade de avanço.

Ao analisar o gráfico da Figura 5.7, pelo ponto de vista das velocidades de avanço, pode-se observar que a menor velocidade de avanço, 40 mm/min, apresentou pouca variação de força entre as profundidades de corte de 0,2 mm e 0,4 mm, porém quando essa profundidade foi aumentada em mais dois milímetros, chegando a 0,6 mm, as forças praticamente triplicaram, mostrando que baixos avanços são mais sensíveis a maiores profundidades. Já as velocidades maiores, 80 mm/min e 150 mm/min, apresentaram maior variação na força quando há o aumento na profundidade de corte de 0,2 mm para 0,4 mm, e as variações de força para o aumento a 0,6 mm ficam somente em 3% e 3,5%.

Ambos os resultados eram esperados já que tanto o avanço por dente como a profundidade de corte aumentam a área de contato entre a ferramenta e o material, aumentando, assim, a quantidade de material removido e a força necessária para remoção.

5.2 Análise da rugosidade de superfície

De forma similar a análise das forças, foi analisado também o parâmetro de rugosidade de superfície após cada operação comparando as variações de acordo com o aumento do avanço e da profundidade de corte. Os resultados obtidos foram registrados na Tabela 5.2 e nos gráficos das Figura 5.8 e 5.9. Novamente, as barras de erro correspondem a $\pm 1.96\sigma$, ou seja, um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 5.2: Resultados das médias das rugosidades superficiais, em μm , para cada operação de fresamento.

		profundidade de corte (mm)		
		0,2	0,4	0,6
velocidade de avanço (mm/min)	40	0,115	0,123	0,148
	80	0,133	0,148	0,188
	150	0,144	0,239	0,263

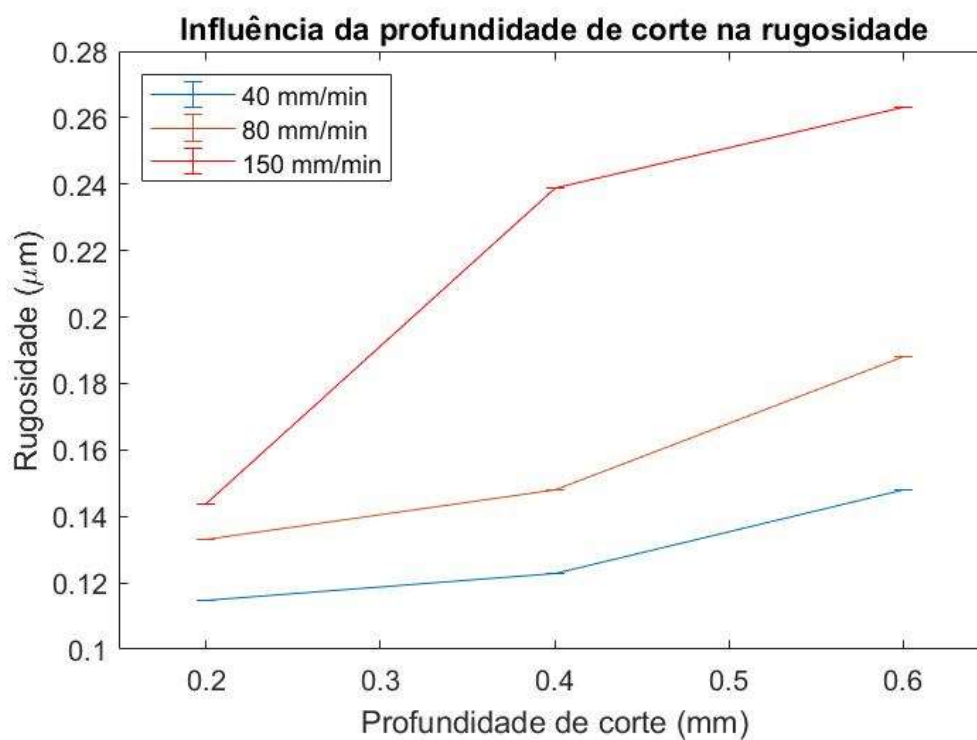


Figura 5.8: Influência da profundidade de corte na rugosidade do acabamento de superfície

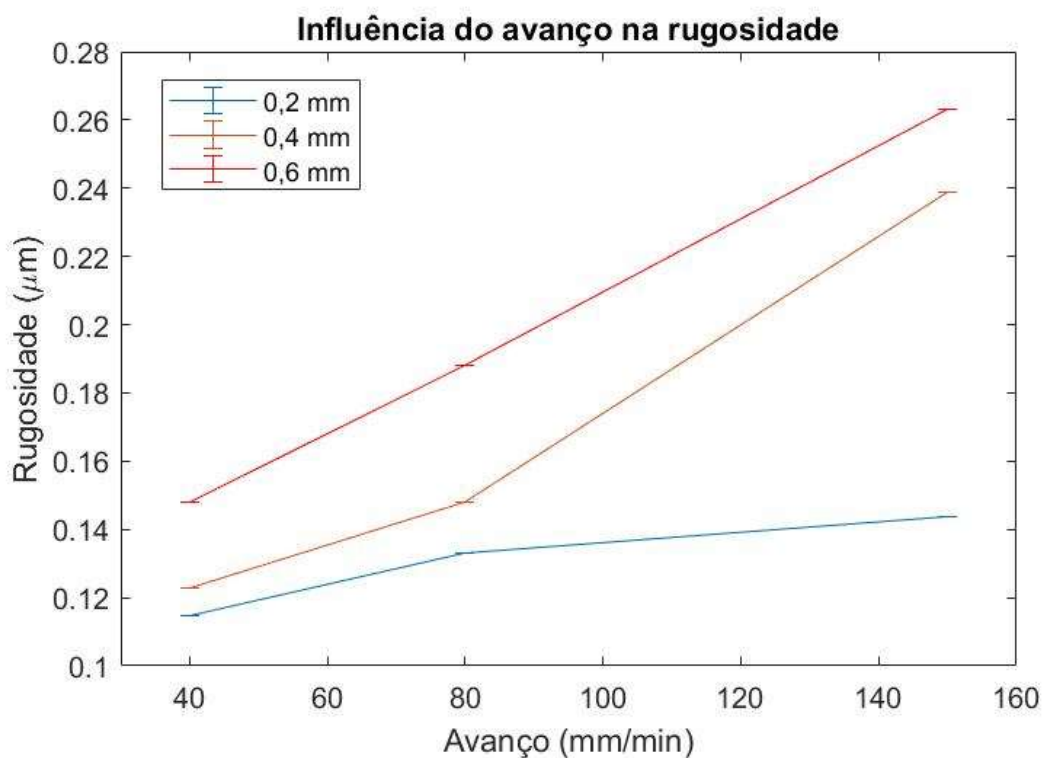


Figura 5.9: Influência da velocidade de avanço na rugosidade do acabamento de superfície

Conforme discutido no Capítulo 3, o titânio é um metal de difícil usinagem e mais ainda quando se trata de suas ligas, como a de Ti-6Al-4V. Uma das razões é baixa condutividade de calor, o que gera um maior desgaste da ferramenta, que por sua vez leva a uma operação de corte inapropriada e conseqüentemente tem-se um acabamento de superfície de maior rugosidade. Esse comportamento das ligas de titânio também pode ser observado neste estudo ao analisarmos os gráficos.

Na Figura 5.8, verifica-se que com uma velocidade de 40 mm/min, a rugosidade fica na faixa dos 0,100 μm a 0,150 μm , independente da profundidade. Já para as velocidades maiores, de 80 mm/min e 150 mm/min, a rugosidade aumenta bastante em função do aumento da profundidade, e somente a 0,2 mm a rugosidade permanecesse abaixo dos 0,150 μm nas duas operações.

Analisando pela perspectiva do aumento da profundidade, o resultado de rugosidade também fica entre 0,100 μm a 0,150 μm em todas as operações de 0,2 mm, e com o aumento da profundidade nas velocidades de 80 mm/min e 150 mm/min verifica-se o aumento da rugosidade do acabamento de superfície.

Esses resultados são esperados, uma vez que o aumento do avanço por dente leva a maiores sulcos na superfície do canal usinado e a maiores rugosidades. O aumento da profundidade de corte pode acarretar em um aumento da vibração e também ocasionar piora no acabamento.

5.3 Análise dos canais e das rebarbas

O método indicado para analisar as rebarbas seria utilizar o perfilômetro para verificar as variações de forma gráfica e assim fazer as comparações entre as operações, porém em função da limitação de amplitude do equipamento as análises serão de forma qualitativa por meio das imagens registradas.

Visualmente, pode-se observar que as maiores rebarbas ficaram nas operações 0 -1 e +1 -1. As imagens estão na Figura 5.10 e inclusive na foto geral da peça na Figura 4.4b na Seção 4.2. Ambas as operações são referentes às menores profundidades realizadas neste trabalho, 0,2 mm, nas duas maiores velocidades de avanço, 80 mm/min e 150mm/min.

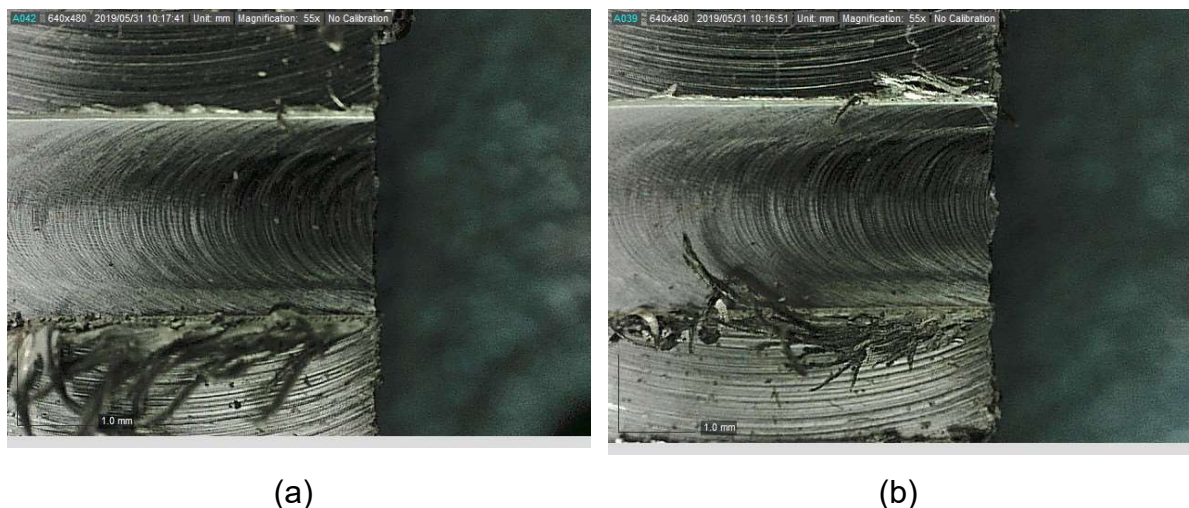
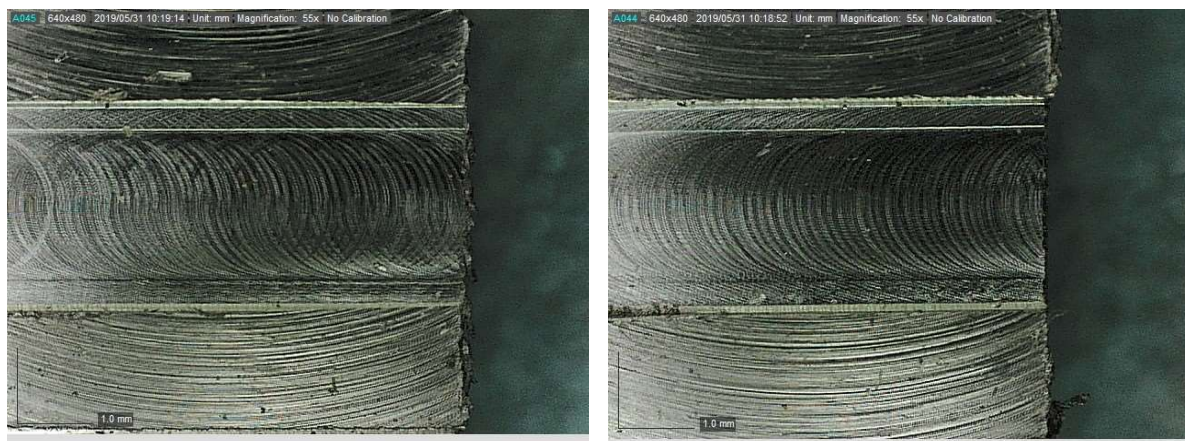


Figura 5.10: Imagem das rebarbas formadas nas operações de fresamento com 0,2 mm de profundidade e avanço de 80 mm/min (a) e 150 mm/min (b)

A análise dos canais também foi feita por meio das imagens capturadas pela câmera, conforme Capítulo 4 e as imagens dos canais de todas as operações da réplica I estão no Apêndice A.

Na Figura 5.11a pode-se observar que na operação -1 -1, onde há baixa profundidade de corte e baixa velocidade de avanço, as marcas indicam que houve corte nas duas direções (*back cutting*), e não somente na direção do avanço conforme Figura 5.11b.

Conforme já estudado no artigo [31], isso ocorre porque não há material suficiente para a formação dos cavacos e assim a ferramenta não corte a peça, mas apenas a deforma plasticamente, com o aumento do avanço e o retorno elástico a ferramenta já está em contato com material suficiente para realizar o corte, porém como o material já ultrapassou as bordas de 180° as marcas do canal apresentam essa forma em sua superfície.



(a)

(b)

Figura 5.11: Imagens da superfície do canal, quando há marcas nas duas direções e o fresamento não foi bem executado, operação com 0,2 mm de profundidade de corte e 40 mm/min de velocidade de avanço (a) e quando as marcas estão na direção do avanço, indicando uma boa usinagem, operação de 0,4 mm de profundidade de corte e 40 mm/min de velocidade de avanço (b).

5.4 Análise de formação dos cavacos

Conforme falado no Capítulo 3, um dos parâmetros importantes para se avaliar uma operação de usinagem é a formação dos cavacos, visto que estão diretamente ligados as forças de corte e a qualidade final da peça.

Os cavacos foram recolhidos em todas as operações, e nesta seção serão avaliadas qualitativamente e morfologicamente as operações -1 -1, 0 0 e +1 +1 através das imagens registradas conforme comentado no Capítulo 4. As imagens dos cavacos de todas as operações da réplica I estão registradas no Apêndice B.

Nas operações -1 -1, observa-se que para os menores valores de velocidade de avanço e de profundidade de corte foram gerados cavacos menores e com um maior padrão na formação em relação ao tamanho (Figura 5.12a), porém pode-se observar também que os cavacos não tiveram um corte homogêneo, gerando uma superfície quebradiça (Figura 5.12b).

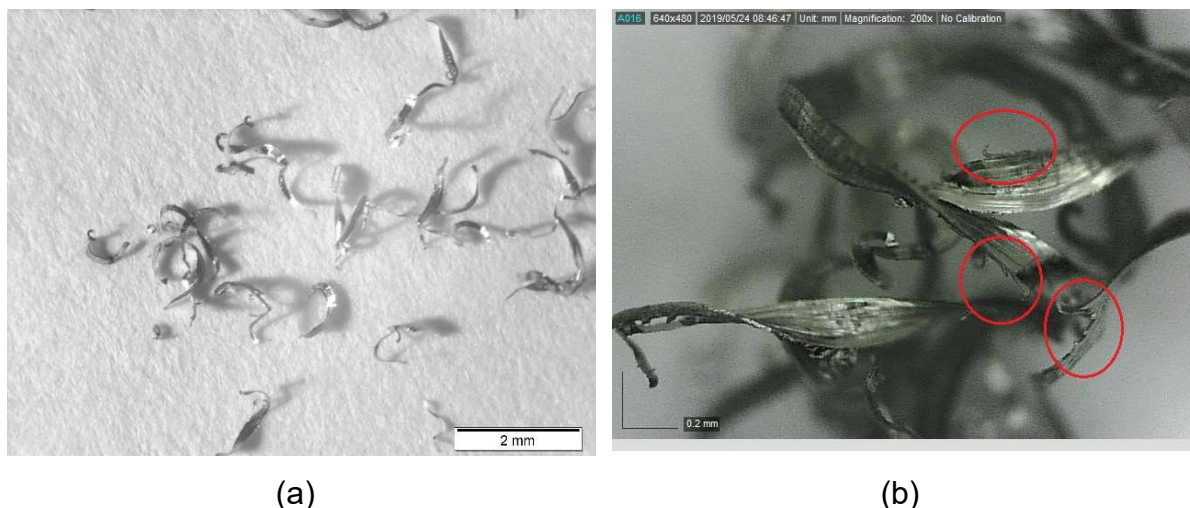


Figura 5.12: Cavacos da operação de fresamento com 40 mm/min de avanço e 0,2 mm de profundidade.

Para os cavacos da operação 0 0, que seria uma operação intermediária dentro deste estudo, pode-se observar na Figura 5.13 que há uma formação de cavacos sem padrão, com cavacos maiores e cavacos menores, sem forma definida. Com isso pode-se concluir que a ferramenta não consegue realizar a quebra dos cavacos de forma homogênea nesses parâmetros de operação.

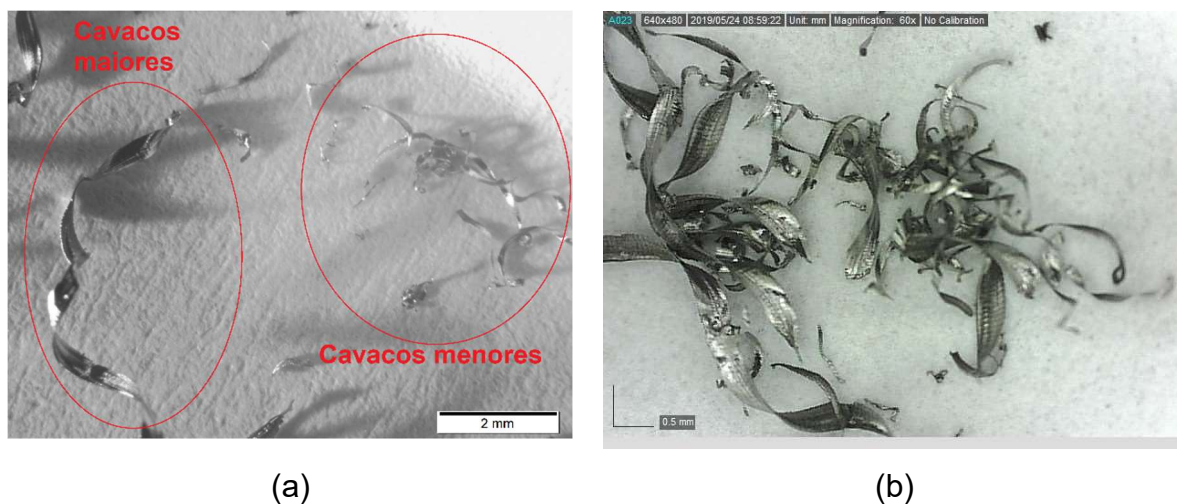


Figura 5.13: Cavacos da operação de fresamento com 80 mm/min de avanço e 0,4 mm de profundidade.

Observando os cavacos da operação +1 +1, verifica-se a formação de cavacos grandes e conforme Figura 5.14a a ferramenta não realizou de forma efetiva a quebra

do cavaco, na imagem estão destacados os pontos onde o cavaco deveria ser quebrado para uma melhor operação de usinagem.

Na Figura 5.14b, pode-se observar melhor a morfologia e a superfície dos cavacos dessa operação, verifica-se que há um padrão na superfície dos cavacos.

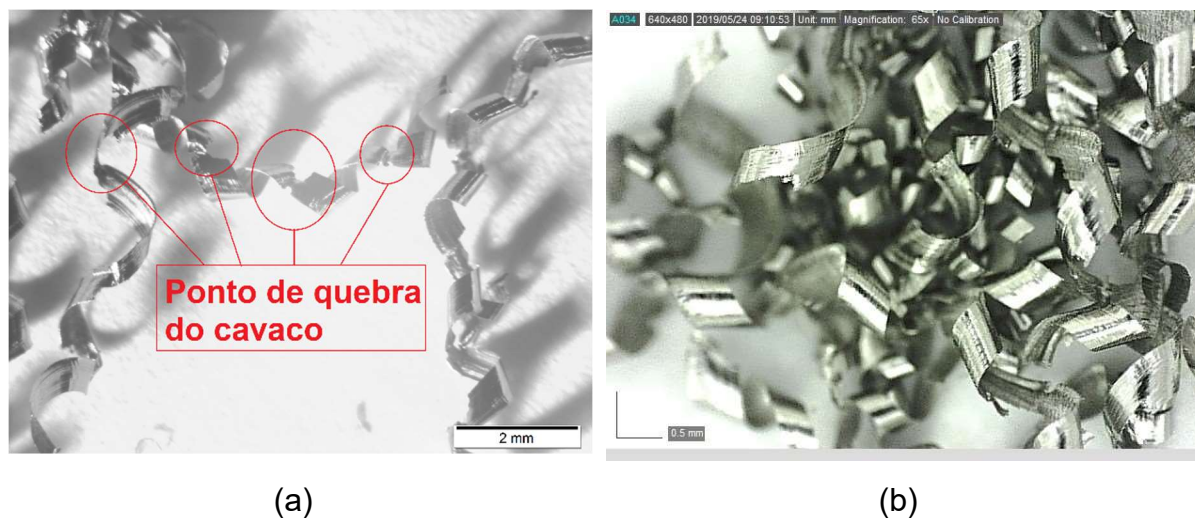
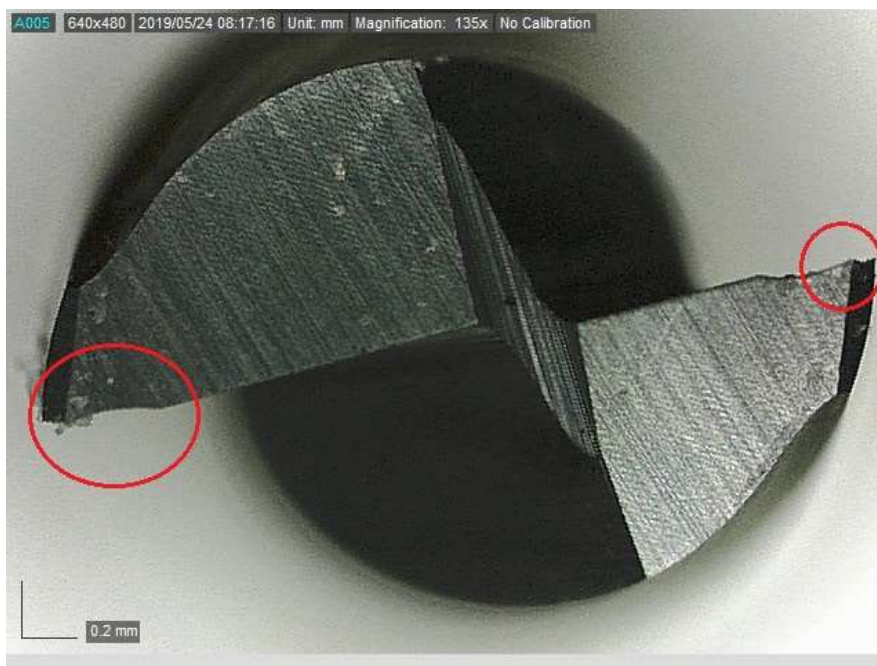


Figura 5.14: Cavacos da operação de fresamento com 150 mm/min de avanço e 0,6 mm de profundidade.

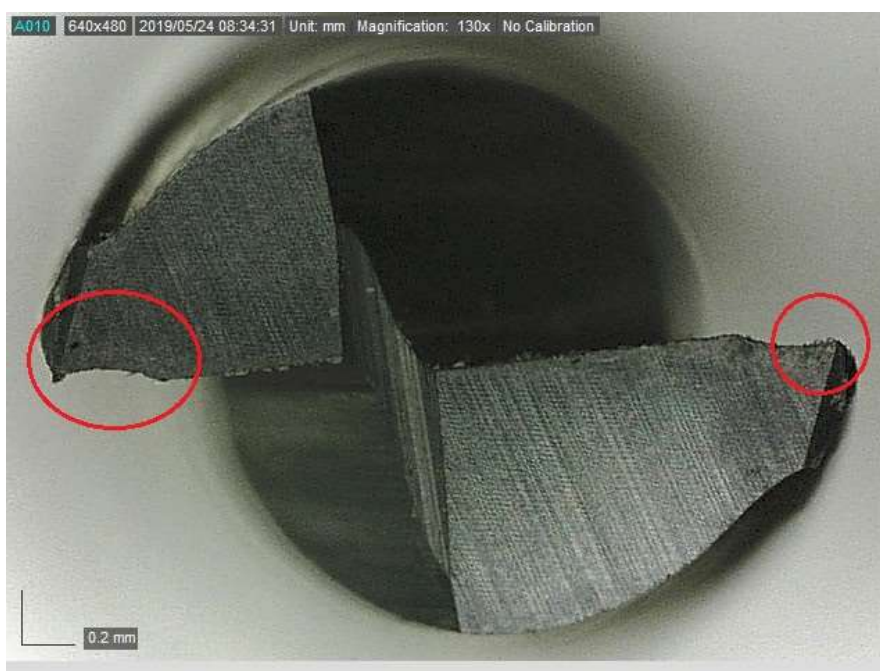
5.4 Análise de desgaste da ferramenta

As imagens apresentadas nesta seção irão avaliar qualitativamente o desgaste das ferramentas após as operações de fresamento e compará-las com imagens das ferramentas novas, foram registradas imagens com diferentes vistas para melhor análise.

Na Figura 5.15 pode-se observar o desgaste entre a nova (Figura 5.15a) e a usada nas operações (Figura 5.15b), pela perspectiva frontal.



(a)



(b)

Figura 5.15: Vista frontal das ferramentas de corte nova (a) e usada (b).

Na Figura 5.16, pode-se observar as ferramentas em uma perspectiva lateral, e verificar o desgaste nas arestas de corte e na superfície externa da ferramenta.

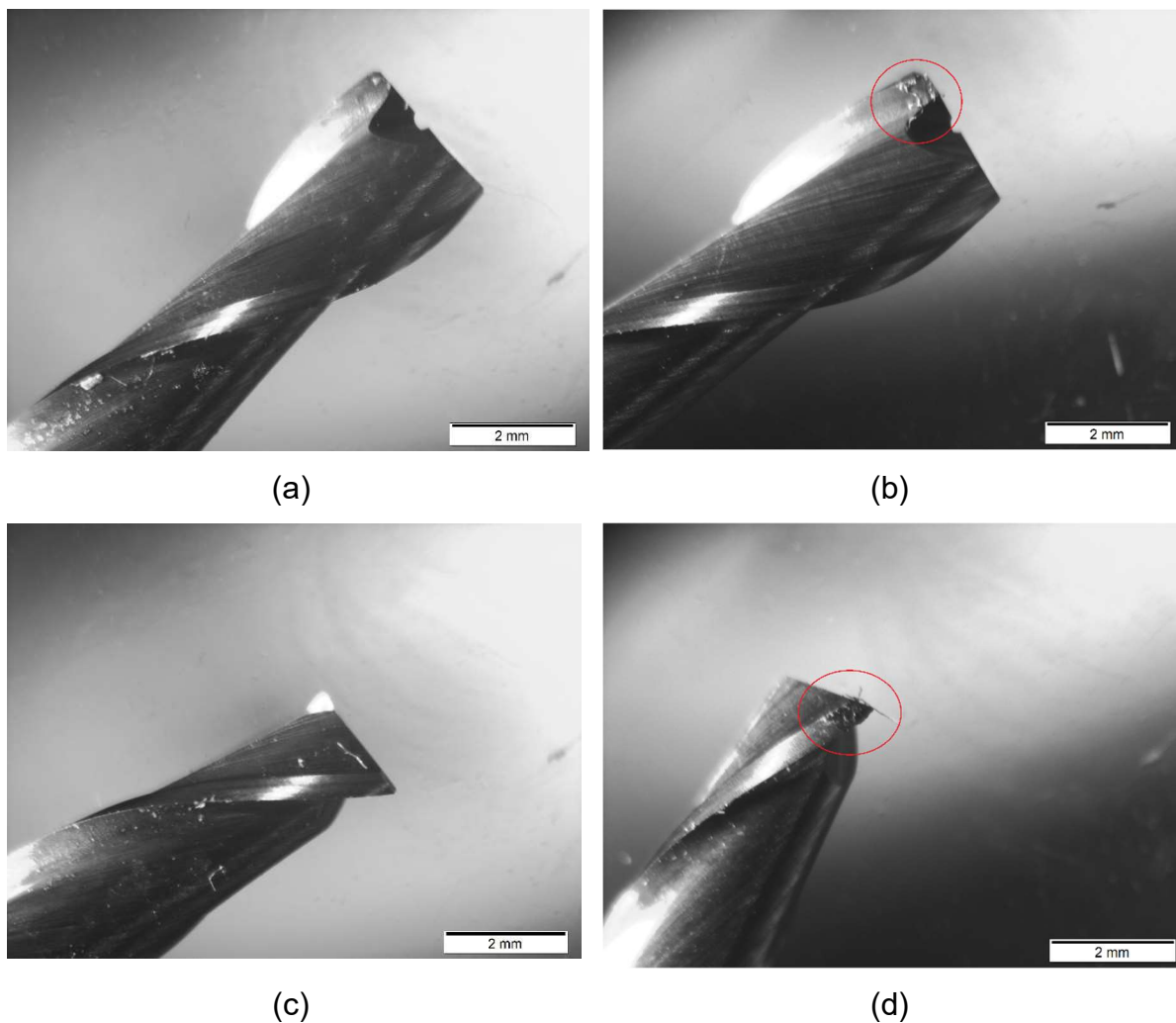


Figura 5.16: Vista lateral do desgaste da ferramenta. Imagens da aresta de corte da ferramenta nova (a) e usada (b), e da superfície externa do dente na ferramenta nova (c) e usada (d).

Na comparação entre a Figura 5.16a e Figura 5.16b pode-se observar a formação de cavaco na aresta de corte o que confirma o estudo do Capítulo 3, em que foi abordada a dificuldade de se usinar as ligas de titânio como o Ti-6Al-4V. Ao comparar as Figuras 5.16c e 5.16d, observa-se o grande desgaste na superfície externa do dente em função da dificuldade de corte dessa liga.

Capítulo 6 – Conclusão

6.1 Conclusão do projeto

O presente trabalho realizou testes de usinagem em uma peça de liga de titânio Ti-6Al-4V, fabricada pelo processo de manufatura aditiva. Foram variadas as profundidades de corte e as velocidades de avanço, com o objetivo de verificar como seria o comportamento dessa liga, fabricada por AM, quando submetida a um dos processos de pós-processamento comuns a essa tecnologia, o fresamento.

- As forças apresentam maiores variações quando em menores velocidades de avanço e profundidades de corte.
- Como é esperado em uma liga de titânio como a Ti-6Al-4V, a rugosidade e a qualidade do acabamento de superfície, dependem de menores velocidades e profundidades, evitando muita geração de atrito e calor.
- Houve um desafio com relação a formação dos cavacos nas operações, que não apresentaram morfologia e tamanhos homogêneos.
- Verificou-se visualmente o grande desgaste das ferramentas, o que também é esperado, por se tratar de uma liga de titânio Ti-6Al-4V.
- Pela formação de rebarbas e pelas imagens dos canais, observou-se o desafio em se usinar o titânio em função de seu baixo módulo de elasticidade.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para próximos trabalhos com objetivo de seguir a linha de pesquisa e aprofundar as análises da peça resultante das operações deste trabalho.

- Registrar imagens no MEV e fazer as medições dos cavacos, das rebarbas e do desgaste das ferramentas.
- Realizar a análise metalográfica.
- Calcular os resultados teóricos com o objetivo de comparar com os resultados práticos.
- Realizar mais operações com os mesmos parâmetros deste trabalho, em outros materiais de titânio, com o objetivo de comparar os resultados.

- Realizar mais operações e variar outros parâmetros como a velocidade de corte que permaneceu a mesma em todas as operações deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] Lasi, H et al. Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, v. 4, p. 239 – 242, 2014.
- [2] Attaran, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business Horizons, v. 60, p. 677-688, 2017.
- [3] Tofail, S. et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, Market uptake and opportunities. Materials Today, v. 21, p. 22 – 37, 2018.
- [4] <<https://www.bcg.com/pt-br/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx>> acessado em: 31 mai. 2019
- [5] <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/as-fabricas-inteligentes-da-industria-4-0>> acessado em: 31 mai. 2019
- [6] Volpato, N. et al. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Bluncher, 2017.
- [7] Elias, C. N. et al. Ultrafine grained titanium for biomedical applications: An overview of performance. Journal of Materials Research and Technology, v. 2, n. 4, p. 340 - 350, 2013.
- [8] Polishetty, A. et al. Cutting Force and Surface Finish Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V. Procedia Manufacturing, v. 7, p. 284 – 289, 2017.
- [9] Rotella, G. et al. Surface integrity of machined additively manufactured Ti alloys. Journal of Materials Processing Tech., v. 259, p. 180 – 185, 2018.
- [10] Pesach, A. et al. Texture analysis of additively manufactured Ti-6Al-4V using neutron diffraction. Additive Manufacturing, v. 23, p. 394 – 401, 2018.
- [11] Brøtan, V. et al. Additive manufacturing for enhanced performance of molds. Procedia CIRP, v. 54, p. 186 – 190, 2016
- [12] <<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14211/Michelin-and-Fives-AddUp-From-Making-Tires-to-Making-Metal-3D-Printers.aspx>> acessado em: 27 nov. 2018

- [13] Michelin Metal Additive Manufacturing. Disponível em:
<<https://www.youtube.com/watch?v=CoVdCbbMq0A>> acessado em: 31 mai. 2019
- [14] <<https://www.forbes.com/sites/andriacheng/2018/05/22/with-adidas-3d-printing-may-finally-see-its-mass-retail-potential/#187002514a60>> acessado em: 27 nov. 2018.
- [15] <<https://www.materialise.com/en/cases/adidas-futurecraft-ultimate-3d-printed-personalized-shoe>> acessado em: 27 nov. 2018
- [16] <<https://news.adidas.com/us/Latest-News/adidas-announces-release-of-futurecraft-4d--officially-ushering-in-the-future-of-sport-performance-f/s/cab3cf86-0f80-4a8d-93c2-e7388f6a908b>> acessado em: 27 nov. 2018
- [17] Chiaverini, V. Tecnologia Mecânica. São Paulo: McGraw-Hill, 1986
- [18] <https://www.engineering.pitt.edu/Sub-Sites/Consortiums/MOST-AM/_Content/Research-and-Facilities/Projects/AM-Projects/> acessado em: 31 mai. 2019
- [19] Nilsson, H. Light Weight Additive Manufactured Mining Components. Lund: Department of Design Sciences Faculty of Engineering LTH, Lund University, 2017.
- [20] Vartnian, K. e McDonald, T. Accelerating Industrial Adoption of Metal Additive Manufacturing Technology. The Minerals, Metals & Materials Society, v. 68, p. 806 – 810, 2016.
- [21] Simons, M. Additive manufacturing—a revolution in progress? Insights from a multiple case study. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 96, p. 735 – 749, 2018.
- [22] Bourrel, D. Materials for additive manufacturing
- [23] Sames, W. J. et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. International Materials Reviews, v.61, p. 315-360, 2016.
- [24] Machado, A., et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Blucher, 2009. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 66, p. 659–681, 2017.
- [25] Leyens, C.; Peters, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinhein: WILEY-VCH, 2003.
- [26] Callister Jr., W. D. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2007.
- [27] Donachie Jr, M. Titanium: a technical guide. Materials Park: ASM International, 2000.

- [28] Kearns, W. Welding Handbook, Volume 4, Metals and Their Weldability. American Welding Society: Miami, 1982.
- [29] Diniz, A. et al. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. Artliber, 2001.
- [30] Correa, E. Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi. GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas, ano 6, nº 1, p. 55-66, 2011.
- [31] Campos, F. O. An experimental study on micromilling of titanium alloy Ti-6Al-4V. XX Colóquio de Usinagem. Uberlândia: 2016.
- [32] Campos, F O. Micromilling of titanium alloys: a comparison between workpieces produced by casting, ECAP and 3D printing (SLM). Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2017.

Apêndice A - Imagem dos canais

Este apêndice apresenta as imagens de todos os canais da réplica I, registradas com o uso da câmera portátil com lente microscópica conforme informado no Capítulo 4.

As imagens estão apresentadas conforme abaixo:

- Figura A.1a – Operação -1 -1
- Figura A.1b – Operação -1 0
- Figura A.1c – Operação -1 +1
- Figura A.1d – Operação 0 -1
- Figura A.1e – Operação 0 0
- Figura A.1f – Operação 0 +1
- Figura A.1g – Operação +1 -1
- Figura A.1h – Operação +1 0
- Figura A.1i – Operação +1 +1

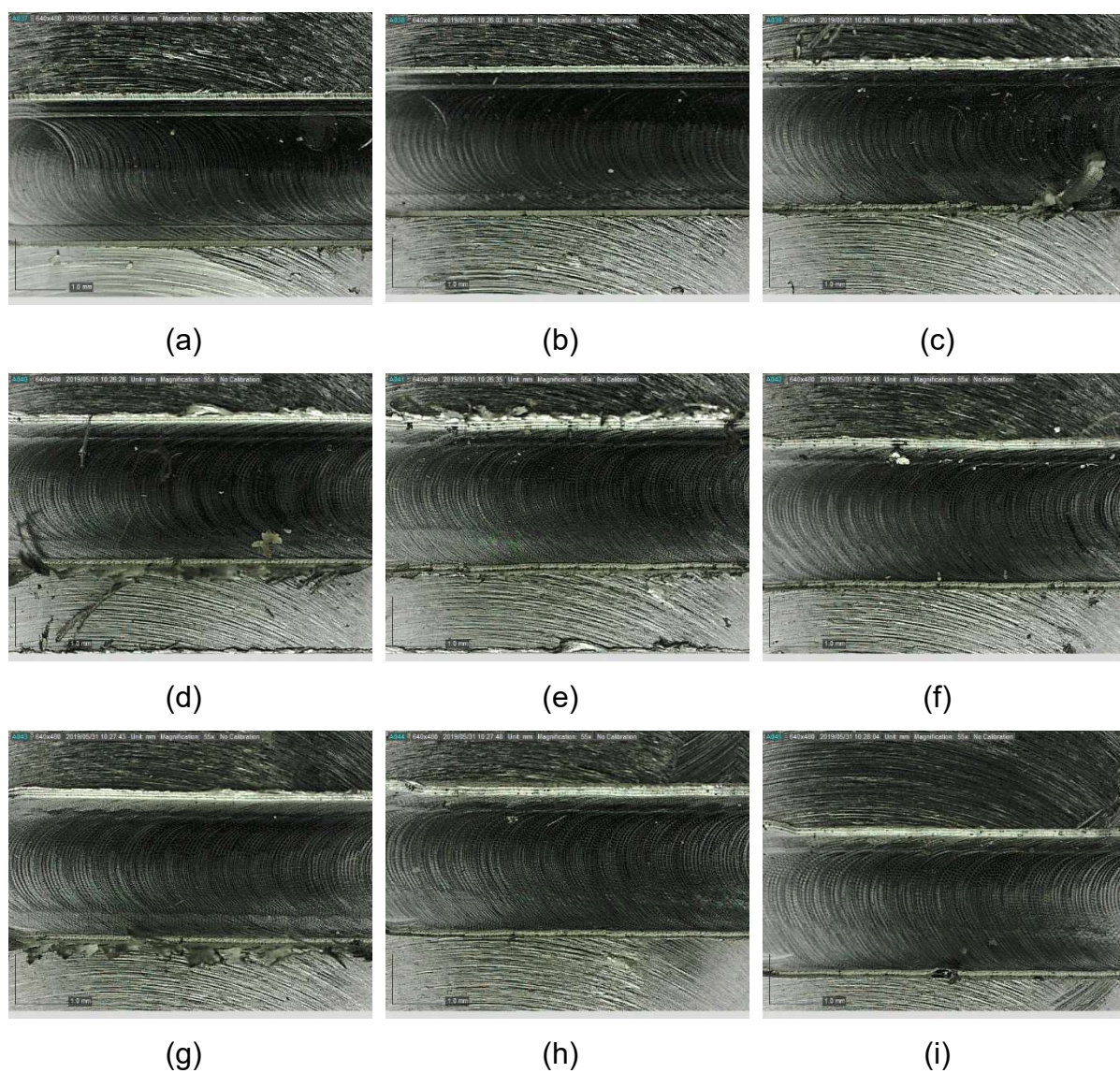


Figura A.1: Imagens dos canais das operações realizadas na réplica I.

Apêndice B - Imagem dos cavacos

Este apêndice apresenta as imagens dos cavacos de todas as operações da réplica I, que foram registradas com o uso da câmera portátil com lente microscópica conforme informado no Capítulo 4.

As imagens estão apresentadas conforme abaixo:

- Figura B.1a – Operação -1 -1
- Figura B.1b – Operação -1 0
- Figura B.1c – Operação -1 +1
- Figura B.1d – Operação 0 -1
- Figura B.1e – Operação 0 0
- Figura B.1f – Operação 0 +1
- Figura B.1g – Operação +1 -1
- Figura B.1h – Operação +1 0
- Figura B.1i – Operação +1 +1

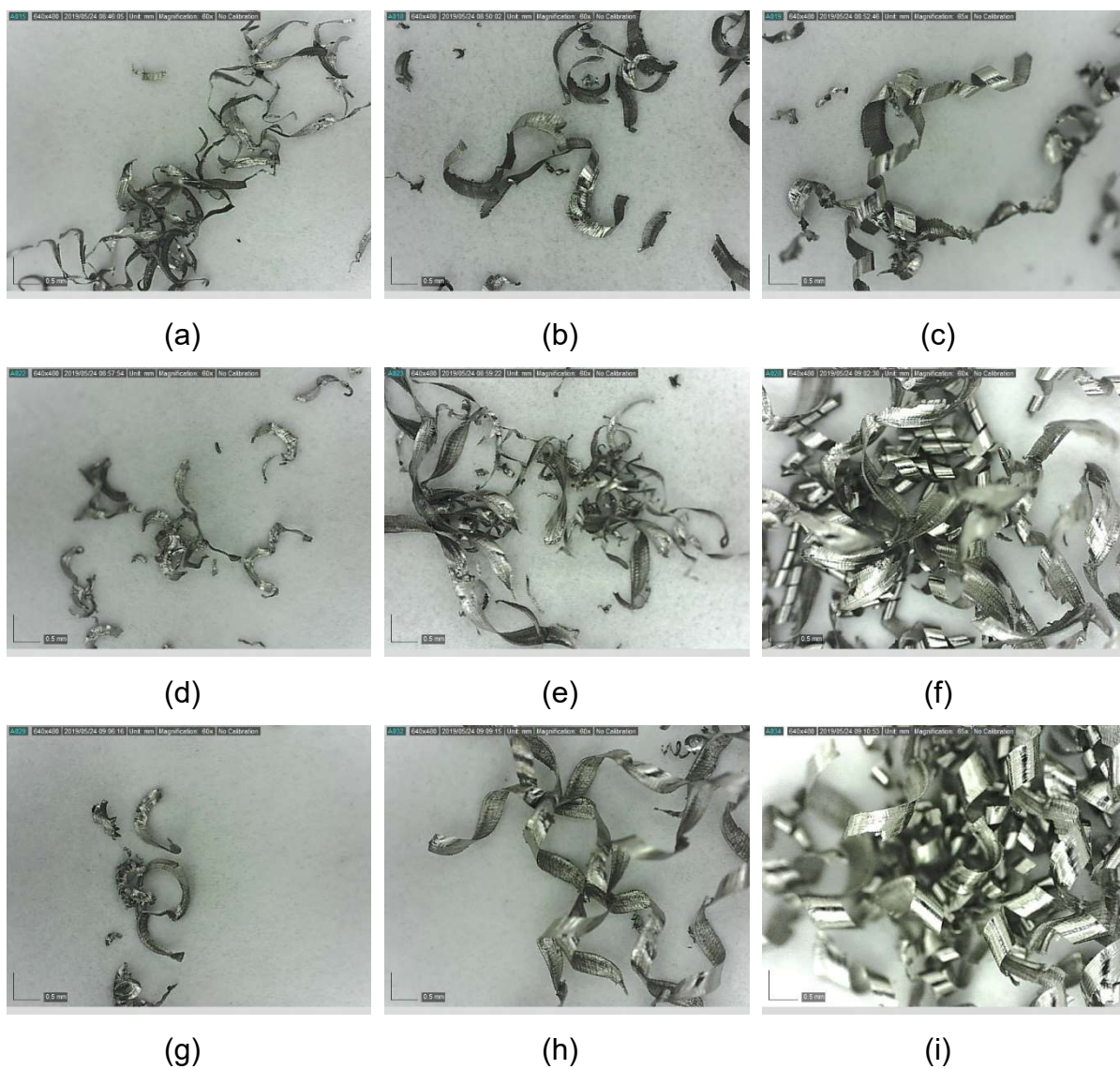



Figura B.1: Imagens dos cavacos formados em cada operação de fresamento realizada na réplica I.

Anexo A – Cotação de compra de peça

Cotações para a compra de uma peça de aço inox 316L, nas dimensões 200mm x 50mm x 50mm. Na Figura A.1 a proposta da empresa Stratasys pelo processo de fabricação por manufatura aditiva DMLS, e na Figura A.2 a proposta da empresa Arinox, com fabricação pelos processos tradicionais.



stratasys[®]

DIRECT MANUFACTURING

Rapid Prototyping
Low-Volume Production Parts
Tooling and Molding
3D Viewing & Markup Software

Stratasys Direct Manufacturing R.O.M. Quote for Prototyping Services

AS9100 & ISO 9001 Certified (Valencia CA, Austin TX, Belton TX, Eden Prairie MN) | ISO 9001 Certified (Poway CA, Phoenix AZ, Tucson AZ)

PREPARED FOR

Pedro Pedroso
CEFET/RJ
Avenida Maracanã, 229
Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 20271-110
Phone: 9-552-1993257948
Email: phcaruso3@hotmail.com

QUOTATION INFORMATION

Quote Number: 2644759-2
Quoted On: 2/6/2019 3:49:51 AM
Reference: RFQ - 570561
Project Engineer: Bryan Mutchler | (512) 655-5003
bryan.mutchler@stratasysdirect.com
Account Manager: Jim Braddick | (512) 650-0406
jim.braddick@stratasysdirect.com


Item	Description	Quantity	Unit	Total
1	 <p>Peça1 - Prisma x y z extents: 7.87 1.97 1.97 inches volume s. area: 30.51 69.75</p> <p>DMLS Essentials+SR: Material=Stainless Steel 316L, Finish=Basic, Surface Treatment=Media Blasting</p> <p><small>*Build Orientation Callout Needed</small></p>	1	\$6,046.00	\$6,046.00
QUOTE TOTAL				\$6,046.00

Figura A.1: Proposta comercial da empresa Stratasys, com fabricação por manufatura aditiva.

Código da Proposta: 2395	
Vendedor: Danila Silva	
E-Mail: danila.vendas@arinox.com.br	Telefone: (11) 2797-8031

Cliente: Pedro Henrique Caruso	
Empresa: CEFET/RJ - Informação para TCC de Engenharia Mecânica	
E-Mail: phcaruso3@hotmail.com	Telefone: 993257948

Produto	Tipo/Espessura	Unidade	Descrição da Medida	Quantidade da Medida	Preço
Barra de Aço Inox Perfil Quadrado	316L	Peça	200mm x 50mm x 50mm	1	R\$ 26,90 / kg

Boa Tarde, Pedro Henrique!

Segue abaixo vossa cotação.

Oferto: barra quadrada inox 316L - 50,80 x 50,80 x 6.000

IPI:- 5%

ICMS:- 4% incluso

ST:- Não tem

Prazo entrega :- 2 dias úteis - Sujeito a antecipação e venda prévia.

Venda mínima à vista 800,00

Mínimo Faturado 1,500,00 p/ 28 dias (análise de crédito 24 a 48h)

Material posto Arinox - São Paulo

Figura A.2: Proposta comercial da empresa Arinox com fabricação pelos processos tradicionais.