

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DO EFEITO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA NO
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PRÓTESES EM LIGAS DE TITÂNIO.**

DIRCEU IZETI FERRAZ DE CAMPOS

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

Santa Bárbara d'Oeste

2014

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DO EFEITO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA NO
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PRÓTESES EM LIGAS DE TITÂNIO**

DIRCEU IZETI FERRAZ DE CAMPOS

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP.

Santa Bárbara d'Oeste

2014

Dedico este trabalho a meu querido pai, que muito trabalhou para poder manter meus estudos na graduação e sempre vibrou com cada conquista profissional que obtive na minha carreira.

Pai, sei que me acompanha ao lado do grande mestre Jesus Cristo, a você meu pai, minha gratidão.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me dar saúde, sabedoria, paciência e vontade.

Sempre senti SUA presença nos momentos de dificuldades, muitas vezes me levando por caminhos que somente hoje após ter percorrido esta caminhada concluo que foi o melhor caminho.

Agradeço a algumas pessoas que sabe o significado desta jornada, o quanto ela exigiu de mim e quanto ela mudou minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luis Helleno pela orientação, paciência, amizade e dedicação, fatores fundamentais para a concretização deste trabalho.

Aos professores que lecionaram neste programa de mestrado desta universidade, meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos ministrados em sala de aula e, por ter conduzido o programa de maneira a proporcionar em cada um de nós uma efetiva participação em relação aos objetivos propostos.

A BAUMER S.A, empresa que trabalhei em 1981, meu primeiro emprego após formado engenheiro, que permitiu a realização dos ensaios no seu processo produtivo, através de seus materiais, máquinas, mão de obra especializada e instrumentos de medição. A Diretoria, Gerências, supervisão e em particular ao engenheiro José Rafael Ronck e ao tecnólogo Leandro Agapito ambos do departamento de processos que muito se dispuseram para realização dos ensaios necessários a conclusão desse trabalho.

Ao tecnólogo Marcelo Vieira, projetista mecânico, e futuro professor pela colaboração na elaboração dos desenhos técnicos.

Ao Prof. Luiz Vicente Neto, que muito me incentivou a voltar cursar o mestrado na UNIMEP, onde o mesmo já cursava.

Agradeço a UNIMEP, pois, iniciei meus estudos de graduação em engenharia e também o meu primeiro emprego, meu primeiro salário e bolsa de estudos nesta instituição; fui aluno da primeira turma de engenharia de produção em julho de 1975.

A todos os funcionários da UNIMEP, pela prestatividade e qualidade de atendimento.

Ao CAPES, pela bolsa de estudos.

Sumário

Lista de Figuras	II
Lista de Tabelas.....	III
Lista de Siglas.....	IV
Lista de notações e símbolos.....	V
Abstract.....	VII
1 Introdução.....	1
1.1 A importância do trabalho	6
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo Geral	6
1.2.2 Objetivo Específico	6
1.3 Método de Pesquisa	7
1.4 Estrutura do Trabalho	8
2 Revisão a Literatura.....	10
2.1 Titânio e suas ligas	10
2.2 Usinagem.....	13
2.2.1 Forças atuante no processo de fresamento.....	18
2.2.2 Fresamento de Ligas de Titânio.....	23
2.2.3 Polimento	28
3 Materiais e Métodos	32
3.1 Etapa 1: Identificação do Corpo de Prova	32
3.2 Etapa 2: Identificação do Processo de Fresamento	32
3.3 Etapa 3: Definição dos Parâmetros de fresamento	35
3.4 Etapa 4: Fresamento dos Corpos de Prova.....	36
3.5 Etapa 5 e Etapa 7: Avaliação dos Corpos de prova após o fresamento e após polimento.....	37
3.6 Etapa 6: Polimentos dos Corpos de prova.....	37
4 Análise dos resultados e Discussões	39
5 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros	43
5.1 Conclusões.....	43
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
6 Referência Bibliográfica.....	45

Lista de Figuras

Figura 1: Etapas do experimento.....	7
Figura 2: Definição do ângulo de cisalhamento ϕ para o modelo da teoria da plasticidade. Fonte: Merchant (1945).....	14
Figura 3: Modelo de separação do cavaco com base na mecânica da fratura dúctil. Fonte: Willian, Patel e Blackman (2010).....	15
Figura 4: Corte ortogonal (Rodrigues,2009)	16
Figura 5: Corte oblícuo (Rodrigues, 2009).....	16
Figura 6: Modelo ideal para contato mestre escravo com raio de canto $R\epsilon$ imerso. (Rodrigues, 2009)	17
Figura 7: Modelo para análise da correção da espessura de corte h em função do ângulo de posição da aresta de corte ψ (Rodrigues, 2009).....	18
Figura 8: Componentes da força de usinagem (Ferraresi, 1977).....	19
Figura 9: Modelo ideal para indicação das velocidades (Rodrigues, 2009).	20
Figura 10: Ângulos de contato no fresamento frontal (Silveira,2007).....	23
Figura 11: Ângulo de posição da ferramenta (Silveira,2007).	23
Figura 12: Vida da ferramenta na usinagem da liga Ti-6Al-4V (Machado et al, 2009)	28
Figura 13: Corpo de Prova utilizado no experimento.	32
Figura 14: Dispositivo de fixação, o material bruto e os lados 1 e 2 do corpo de prova. ...	33
Figura 15: Detalhamento da estratégia de usinagem 1.	33
Figura 16: Detalhamento da estratégia de usinagem 2.	34
Figura 17: Identificação dos Corpos de Prova.	36
Figura 18: Rugosímetro SJ 400-Mitutoyo	37
Figura 19: Tempo do Processo de Fabricação de Próteses em Liga Ti6Al4V.	42

Lista de Tabelas

Tabela 1: Propriedades físicas e químicas do titânio.	10
Tabela 2: Classificação das ligas de titânio.	12
Tabela 3: Composição química da liga Ti-6Al-4V segundo a norma ASTM B 381-71.....	12
Tabela 4: Propriedades mecânicas das ligas de titânio Ti-6Al-4V: comparação entre a liga Ti6Al4V e um aço AISI 1045.	13
Tabela 5: Situações de Parâmetros de fresamento.	35
Tabela 6: Situações de Parâmetros de fresamento.	36
Tabela 7: Produtividade e Custo de usinagem.	39
Tabela 8: Rugosidade após o processo de fresamento.	40
Tabela 9: Rugosidade após o processo de polimento.	41
Tabela 10: Tempo da operação de polimento.	41

Lista de Siglas

ASTM – American Society for testing and Materials

AWF – Ausschubfür Wirtschaftliche Fertigung

CBN – Nitreto Cúbico de Boro

CCC – Cubo de Corpo Centrado

CERMET – Material Composto de Cerâmica e Metal

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral do Brasil

ELI – Extra Low Interstitial

HSC – High Speed Cutting

HSM – High Speed Machining

HSS – High-Speed Steel

PCBN – Nitreto Cúbico de Boro Policristalino

PCD – Diamante Policristalino

PPGEP – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

SMG – Seco Material Groups

Lista de notações e símbolos

Al - Alumínio

Fap - Força de Apoio

f - Avanço por rotação da ferramenta [mm/min-1]

Ff - Força de Avanço

Fp - Força Passiva

Ft- Força Ativa

Fu- Força de Usinagem

Ra- Rugosidade média teórica (μm)

Rt- Profundidade total de Rugosidade teórica (μm)

Ry- Rugosidade máxima (μm)

RE- Raio de ponta da ferramenta (mm)

Ti - Titânio

V - Vanádio

Vc- Velocidade de Corte

Ve- Velocidade Efetiva

Vf- Velocidade de Avanço

Resumo

De CAMPOS, D.I.F.: Análise do efeito da rugosidade da superfície usinada no processo de fabricação de próteses em ligas de titânio. 2014. 53p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

Apesar da crescente aplicação de ligas de titânio na fabricação de componentes da indústria aeronáutica, militar e próteses representados por superfícies complexas e altas exigência físico-química, a etapa de manufatura desse tipo de componente apresenta inúmeras limitações com relação ao tempo de usinagem e à qualidade superficial do produto. Isso faz com que haja uma busca constante para a otimização do processo de manufatura por meio da evolução das inúmeras tecnologias envolvidas. Em virtude disso, esse trabalho visa é analisar o efeito da rugosidade da superfície usinada no processo de fabricação de próteses em ligas de titânio (Ti6Al4V) e, desta forma obter parâmetros de corte otimizados em relação à produtividade e custo do processo de fabricação. Para isso foi desenvolvido um experimento com um corpo de prova de uma prótese de joelho comercial em Liga Ti6Al4V. Foram usinados 20 corpos de prova separado em 4 lote com condições diferentes de usinagem. Os corpos foram usinados em uma empresa do segmento e a rugosidade foi utilizada para verificar a qualidade superficial após as operações de fresamento e polimento. Pode-se concluir com base na produtividade, custo da ferramenta de corte, qualidade superficial e tempo de polimento a melhor condição de usinagem para este processo de fabricação

Palavras-chave: Superfícies Complexas, Ligas de Titânio, Fresamento, Polimento, Rugosidade.

Abstract

De CAMPOS, D.I.F.: Analysis of the effect of surface roughness on machined fabrication process of prostheses in titanium alloys. 2014. 53 p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

Despite the increasing use of titanium alloys in the manufacture of components of the aviation industry , military and prostheses represented by complex surfaces and high physical chemistry requirement , manufacturing step, this type of component has several limitations with respect to machining time and quality surface of the product . This means that there is a constant search for the optimization of manufacturing process through the evolution of numerous technologies involved . As a result , this paper aims to analyze the effect of surface roughness on machined manufacturing prosthetic titanium alloy (Ti6Al4V) process and thus obtain optimal cutting parameters in relation to productivity and cost of the manufacturing process . To this end an experiment was conducted with a specimen of a prosthetic knee Commercial Alloy Ti6Al4V . 20 bodies separate specimens were machined lot with 4 different machining conditions . The bodies were machined in a business segment and the roughness was used to check the surface quality after polishing and milling operations . It can be concluded based on productivity , cost cutting tool , the surface quality and the polishing time melor machining condition for the manufacturing process.

Key words: Sculptured Surfaces, Titanium alloys , milling , polishing , roughness.

1 Introdução

O crescimento da aplicação de ligas de titânio em diversos segmentos da indústria , estimulam o desenvolvimento de novos materiais, assim como, novos processos de usinagem para a fabricação de produtos.

Boyer, Welsch e Collings (1994) descreveram que o titânio e suas ligas teriam um papel importante tanto na indústria aeroespacial (componentes estruturais e de motores) quanto na indústria petroquímica e de bio-materiais.

Este crescimento do uso de ligas de titânio ocorre principalmente em função de suas características, tais como: elevadas temperaturas de fusão; alta dureza a quente, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, ótima relação resistência-peso e biocompatibilidade (RAHMAN; WANG; WONG, 2006).

Dentre as principais aplicações de ligas de titânio na indústria destacam-se:

- Indústria aeronáutica: na fabricação de matriz de painéis tipo sanduíche, os quais compõem as estruturas de componentes das turbinas dos aviões, as partes das asas, engrenagens e revestimentos, entre outros (BHOWMIK *et al.*, 2006; BOYER; WELSCH; COLLINGS 1994);
- Indústria de construção naval: na fabricação de equipamentos e estrutura de pequenas embarcações, navios e submarinos. Nos submarinos, por exemplo, o titânio e suas ligas estão presentes em válvulas, bombas, trocadores de calor, fuselagem, material do casco, sistema de propulsão à água e sistema de tubulação (GORYNIN, 1999 *apud* BRAGA; FERREIRA; CAIRO, 2007);
- Indústria do petróleo: na fabricação de componentes que entram em contato com a água do mar como nos trocadores de calor em plataformas, nos condensadores e em todas as partes estruturais dos mesmos. São usados extensivamente em plantas de refinarias, sistemas de ar condicionado, plantas químicas e em plataformas (TRANTER, 2013);
- Indústria química: equipamentos resistentes à corrosão para a produção de cloro, cloretos, cloratos gases e produtos orgânicos. Equipamentos como vasos, trocadores de calor, tanques, agitadores, tubulações, torres, etc., podem ser feitos de titânio (TITANIUM INDUSTRIES, 2013);
- Indústria médica: Próteses ortopédicas, dentárias, audiológicas, constituintes de bombas de corações artificiais, marca passos, parte de

válvulas para coração e implantes de juntas e ossos. (RYAN; PANDIT; APATSIDIS, 2006; WEN *et al.*, 2001);

- Indústria bélica: Peças de artilharia, armamentos leves, fabricação de mísseis. e em componentes como engrenagens de transmissão em helicópteros, engrenagens de turbinas e trem de aterrissagem de aviões, tanques, veículos terrestres etc..(DEPARTMENT OF DEFENSE MAN TECH, 2013);
- Indústria automobilística: na indústria automobilística, a principal característica do titânio é a relação baixo peso e alta resistência. Peças para eixos, escapamentos, parafusos e diversos produtos começam a ser utilizados em equipamentos de competição. A principal liga de titânio utilizada é a Ti-6Al-4V, que é composta por titânio-alumínio-vanádio. Esta liga pode ser aplicada em peças de acabamentos interno, em engrenagens de transmissão e em partes de motores. A indústria automobilística aplica as ligas de titânio também no segmento de segurança veicular, que são destinadas a blindagem de veículos (DESTEFANI, 1990);
- Outras indústrias: Outros segmentos adotam o uso de ligas de titânio e podem ser facilmente identificável no cotidiano, dentre eles, no lazer e no esporte, alguns exemplos são observados em peças de bicicletas, raquetes de tênis, tacos de golfe, também nas bijuterias, armação de óculos, pratos, faqueiros, acessórios para banheiros, relógios, computadores, filtros, coletes à prova de balas, luvas de proteção e suportes para fins gerais. O titânio também pode ser aplicado na arquitetura devido suas propriedades anticorrosiva e é muito usado para revestimentos.

Na maioria dos segmentos apresentados acima, os componentes são representados por geometrias prismáticas e nos casos dos componentes aerodinâmicos aplicados na indústria aeronáutica, próteses cirúrgicas e componentes com características ópticas (CHOI; JERARD, 1998; SRIYOTHA, *et al.*, 2006) são representados por superfícies complexas. O principal processo de usinagem para a obtenção deste tipo de geometria é o fresamento.

No entanto, além das excelentes propriedades físico-química do titânio e suas ligas, o mesmo apresenta uma baixa usinabilidade o que contribui para a baixa produtividade e alto custo no processo de usinagem.

Além disso, as exigências de qualidade superficial dos componentes normalmente não pode ser obtida diretamente pelo processo de fresamento, fazendo com que seja

necessário posteriormente um processo de polimento. Este processo também contribui para a baixa produtividade e alto custo do processo de fabricação.

Este fato destaca a importância da usinabilidade no processo de usinagem. A usinabilidade pode ser avaliada em termos de vida da ferramenta (normalmente o mais importante), forças atuantes na ferramenta, potência consumida, acabamento superficial e formação do cavaco (STEMMER, 1995).

A vida útil de uma ferramenta de corte é geralmente expressa como o número de peças usinadas por troca ou afiação da aresta de corte. Em geral, o objetivo do fabricante é conseguir a combinação ideal entre desempenho da ferramenta, número de peças fabricadas e qualidade superficial da peça para uma dada operação de usinagem. Um dos principais parâmetros de corte relacionados com o desgaste da ferramenta é a velocidade de corte, que por sua vez está relacionada com a temperatura gerada na usinagem.

O processo de usinagem de ligas de titânio apresenta as seguintes dificuldades: a baixa velocidade de corte; o alto consumo de insertos; métodos de refrigeração especiais, fluidos de cortes especiais; etc.. Em função disso, a maioria dos estudos desenvolvidos visam a melhoria da produtividade.

Pires (2011) abordou em seus estudos o fresamento de ligas de titânio, com o objetivo de aprimorar o entendimento da usinagem, em especial do processo de fresamento frontal da liga Ti-6Al-4V. Este estudo focou a influência do material do porta-ferramenta (haste de aço e de metal duro) e da geometria da pastilha de corte (ângulo de saída neutro e positivo) sobre a vida da ferramenta. Análises de espectrometria de energia dispersiva (EDS) também foram conduzidas a partir de microscopia eletrônica dos insertos desgastados, permitindo assim a identificação dos elementos químicos presentes e avaliação dos mecanismos de desgaste predominantes no processo de fresamento.

Segundo Rahman, Wong e Zareena (2003), as ligas de titânio possuem características intrínsecas, que promovem uma alta taxa de desgaste da ferramenta, provenientes de altas temperaturas que surgem na interface peça-ferramenta. Os desgastes da ferramenta precisam ser controlados ao longo do processo para, no final, obter uma alta eficiência na remoção de material.

Antoniali (2009) concluiu em seus estudos a relevância da trajetória da ferramenta de corte no momento de início do fresamento, principalmente na liga Ti-6Al-4V, que possui baixo módulo de elasticidade (Ti-6Al-4V - $E=140\text{GP}_a$; Aço SAE 1045 - $E=205\text{GP}_a$), fazendo com que a usinagem da liga de titânio possua forte tendência a vibrações e desgaste da ferramenta.

Além dos estudos da usinabilidade das ligas de titânio, alguns estudos na área da medicina conseguiram associar valores de rugosidade das próteses ortopédicas com velocidade de multiplicação das células ósseas que se sedimentam nas superfícies das próteses após implantadas (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2003).

Este fato destaca a importância da rugosidade no processo de fabricação de próteses em ligas de titânio que é objeto deste estudo.

Silva, Furukita e Oliveira (2000) apontaram que diversos fabricantes produzem próteses com equivalência de tamanho, forma e composição, porém a superfície de contato varia significativamente, em função das diferentes técnicas de acabamento e tratamento superficial. Isto pode interferir diretamente no processo de osseointegração e nos resultados clínicos em longo prazo.

Em função disso, o processo de fabricação de próteses é composto pela operação final de polimento da superfície fresada. Teoricamente, a operação de polimento permite obter uma rugosidade menor em relação à operação de fresamento (Seco, 2011). Isto é verificado em diversos estudos (RUSSEL *et al.*, 1993; QUIRYNEN, 1994; BOLLEN *et al.*, 1996)

Da mesma forma, outros estudos abordam que a heterogeneidade superficial remanescente pós-acabamento e polimento compromete a morfologia das estruturas, permitem a aderência bacteriana e comungam do processo de corrosão (YOUSSEF, 1989; RUSSEL *et al.*, 1993; QUIRYNEM, 1994; QUIRYNEN, BOLLEN, 1995; BOLLEN *et al.*, 1996; BOLLEN *et al.*, 1997).

Alguns estudos abordam que a vida útil das próteses pode reduzir-se substancialmente em função da rugosidade das superfícies usinadas (SOUZA, 1974; DIETER, 1981; SYVERRUD, *et al.*, 1995; HENRIQUES, G.E.P 2000, FERREIRA, *et al.*, 1998).

Outros autores descreveram, ao estudar a qualidade superficial de amostras acabadas em titânio e a sua liga Ti-6Al4V, que as amostras em titânio apresentaram rugosidades maiores em relação às amostras da liga (Ti - $R_a = 0,31 \mu\text{m}$; Ti-6Al4V - $R_a = 0,25 \mu\text{m}$).

VIEIRA, 1967 e JOHANSSON & BERGMAN, 1995, relataram que a melhoria da qualidade superficial pode ser obtida por meio do aperfeiçoamento das características superficiais das estruturas das matérias e dos novos métodos de polimento. O polimento eletrolítico é um destes procedimentos. Considerado como auxiliar ao protocolo de polimento, é utilizado amplamente nos laboratórios comerciais.

CRAIG, *et al.*, 1996, descreveu que o este método possibilita a remoção de pequena quantidade da superfície da estrutura, na ordem de 10^{-12} (angstroms), proporcionando uma nova superfície.

SEDEJ, 1969; ALARCON, 1971; DINELLI, 1972; KAJIMOTO *et al.*, 1981, também consideraram o método de polimento eletrolítico como uma forma para aumentar a resistência da superfície à corrosão.

LAUTENSCHLAGER, MONAGHAN, 1993, embora não tenham avaliado o método, afirmaram que a qualidade superficial do titânio poderia ser melhorada com o polimento eletrolítico.

Além disso, o polimento eletrolítico permite uma redução do tempo para a obtenção da qualidade superficial. As marcas ou riscos deixados pelas lixas em um processo de polimento manual provavelmente são minimizadas.

Esta característica da etapa do polimento destaca-se em função de pesquisas na área médica que relataram a influência da rugosidade das próteses na velocidade de crescimento das células. O crescimento das células ósseas aumenta quando expostas a a liga de titânio Ti-6Al-4V com de rugosidades na escala nanométrica (10^{-9}), comparativamente às ligas tradicionais com rugosidades na escala micrométrica (10^{-6}) (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2003).

Elias (1999) em seus trabalhos apontou que a variação da morfologia das rugosidades, em nível macroscópico ou microscópico, propicia áreas de contato diferentes com as células e biomoléculas, responsáveis pela intensidade e tipos de ligações biológicas individuais. A composição química da superfície determina a estabilidade e a reatividade do implante, que deve ser constituída unicamente por óxido de titânio para evitar que as ligações sejam heterogêneas.

Jachinoski e Silva (2005) também relataram que a resistência à corrosão é baseada na formação do óxido de titânio, que funciona como uma camada protetora. Este comportamento passivo faz com que o titânio possa ser utilizado em implantes cirúrgicos e aparelhos protéticos.

Branemark, Zarb e Albrektsson (1985) divulgaram o conceito de osseointegração como sendo a possibilidade de ancoragem direta da estrutura do implante no osso, submetido a carga funcional, sem que haja a presença de tecido conjuntivo fibroso nesta interface.

1.1 A importância do trabalho

O processo de fabricação de superfícies complexas em ligas de titânio é composto basicamente pelas operações de fresamento e polimento, sendo que a operação de polimento visa obter superfícies com qualidade superficial que não é possível ser obtidas com as tecnologias de fresamento atuais. No entanto, o polimento manual são operações que requerem prática e esforços dos funcionários para a obtenção desta qualidade superficial.

Apesar do tempo do polimento estar diretamente relacionada com a rugosidade da operação anterior (fresamento) existem poucos estudos que abordam esta correlação. Da mesma forma, existem inúmeros estudos que procuram reduzir o tempo da fabricação de próteses abordando apenas os resultados da operação de usinagem, sem fazer uma análise da operação do polimento.

Portanto, este trabalho procura melhorar o processo de fresamento em próteses em liga de titânio por meio do estudo dos parâmetros de corte e a correlação entre a rugosidade da superfície fresada e polida. Espera-se com isso obter os melhores parâmetros de corte em uma visão holística do processo de fabricação de próteses.

1.2 Objetivos

Para melhor esclarecer o objetivo deste trabalho, o mesmo foi separado em objetivo geral e específico.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o efeito da rugosidade da superfície usinada no processo de fabricação de próteses em ligas de titânio (Ti6Al4V) e, desta forma obter parâmetros de corte otimizados em relação à produtividade e custo do processo de fabricação

1.2.2 Objetivo Específico

Dentre os objetivos específicos deste trabalho destacam-se:

- Analisar a relação entre a rugosidade da superfície usinada e os parâmetros e corte especificado pelo fabricante da ferramenta de corte no processo de fresamento;
- Analisar a relação da rugosidade da superfície usinada em diferentes situações de parâmetros de corte e o tempo da operação de polimento para obter um determinado valor de rugosidade;

- Analisar a influência das operações de fresamento e polimento na produtividade e custo do processo de fabricação de próteses em liga de titânio Ti6Al4V.

1.3 Método de Pesquisa

A revisão da literatura deste trabalho foi baseada em livros e artigos científicos sobre os temas de fresamento e usinagem de ligas de titânio.

Para atingir os objetivos propostos foi utilizado um experimento composto por corpos de prova de uma próteses de joelho comercial em liga de titânio Ti6Al4V.

A Figura 1 ilustra as etapas do experimento adotados, sendo que as mesmas serão detalhadas no Capítulo 3.

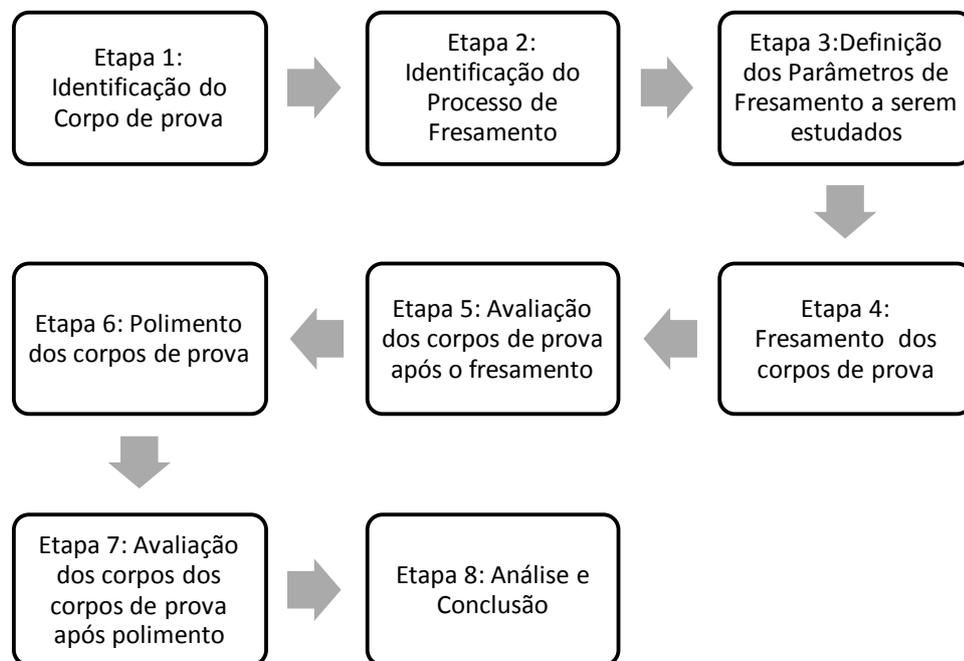


Figura 1: Etapas do experimento.

O experimento foi executado em uma empresa de próteses ortopédicas, envolvendo os departamentos de processos, de produção, de qualidade e laboratório de metrologia.

Inicialmente utilizou-se o fluxo das etapas da Figura 1 baseado na tecnologia do processo de fabricação existente pela empresa e a partir deste processo de fabricação e com basea nos parâmetros de corte (V_c e F_z) do catálogo do fabricante da ferramenta fez uma varredura das possibilidade obtendo 5 condições de parâmetros de usinagem, Denominados neste trabalho como parâmetro A, B,C,D e E. Para um dos parâmetros foi

estudo como condição especial no processo de acabamento denominada como Repasse-Parâmetro C.

O experimento consistiu no fresamento aleatório de um lote contendo 5 corpos de prova para cada parâmetro de corte estabelecido em um centro de usinagem. Os tempos de usinagem foram cronometrados e os corpos de prova e lotes identificados. Após a operação de fresamento os corpos de prova foram encaminhados para o processo de polimento, no qual os tempo de operação foram cronometrados. As medições de rugosidade após as operações de fresamento e polimento foram realizadas no laboratório de metrologia da empresa. Os resultados foram analisados por meio de técnicas estatísticas.

Fatores que pudessem influenciar os resultados das rugosidades das amostras foram levados em consideração, mantidos constantes, tais como, número do lote de material, dimensões, fluido de corte, acomodação das peças e condições ambientais do laboratório de metrologia.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esse trabalho está dividido em 6 (seis) capítulos, conforme descritos a seguir.

Capítulo 1 - Introdução: este capítulo aborda a utilização de ligas de titânio na indústria, o processo de fabricação e a importância da rugosidade neste processo. Da mesma forma, aborda a importância deste trabalho, os objetivos e o método de pesquisa utilizado.

Capítulo 2 - Revisão da Literatura: este capítulo descreve-se o conceito de ligas de titânio, suas propriedades, o crescimento das aplicações e aborda os vários segmentos da indústria que o utilizam. Além disso, aborda também o processo de fabricação por meio do fresamento de ligas de titânio, assim como, as dificuldades de usinagem, as altas taxas de desgaste de inserto de corte, Por fim aborda o processo de polimento.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos: este capítulo detalha as etapas utilizadas no desenvolvimento do experimento, assim como, detalha os materiais utilizados, os parâmetros de corte do processo de fresamento e as variáveis de controle.

Capítulo 4 - Análise dos resultados e discussões: este capítulo apresenta os resultados obtidos na operação de fresamento e polimento dos corpos de prova e faz as discussões destes resultados.

Capítulo 5 - Conclusões e sugestões para futuros trabalhos: este capítulo traz as conclusões deste trabalho baseadas nos objetivos discutidos no Capítulo 1 e as sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 6 - Referência Bibliográfica - Referência bibliográfica utilizada na apropriação do conhecimento necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

2 Revisão a Literatura

Os tópicos a seguir abordam o uma revisão da literatura sobre titânio e suas ligas e o processo de usinagem.

2.1 Titânio e suas ligas

O Titânio é um metal de brilho prateado que destaca-se na indústria em função de sua característica físico-química conforme pode ser observado na

Tabela 1: Propriedades físicas e químicas do titânio.

Característica	Valor
Ponto de fusão	1668 °C
Ponto de ebulição	3287 °C
Massa específica	4,54 g /cm ³
Módulo de tensão de elasticidade	Acima de 12,7 x 10 ⁻⁴ Mpa
Alta reatividade	Desvantagem no processamento
Combina-se facilmente com outros elementos	Gases nitrogênio e oxigênio
Estrutura cristalina hexagonal compacta até 882 °C	Fase α
Acima de 882 °C estrutura cúbica de corpo centrado	Fase β
Elevada resistência a corrosão	Água do mar, cloretos, hno ₃ , hcl, h ₂ so ₄
Não tóxico	Seu pó é carcinogênico
Biocompatível	Usados em implantes ortopédicos e dentários

Fonte: Budinski e Budinski (1999) Froes (2000) apud Braga, Ferreira e Cairo (2007).

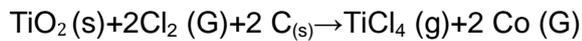
O titânio é o nono elemento mais abundante na Terra e tem forte afinidade com o oxigênio formando uma camada de óxido de titânio em suas ligas.

A obtenção do titânio é feita por meio da ilmenita (FeTiO₃) que é um dos minerais que contém o titânio e está presente na maioria dos minerais da crosta terrestre. A ilmenita foi descoberta por volta de 1791 por William Gregor (BARKSDALE, 1966).

Apesar da ilmenita ter origem nas montanhas de Ilmen, na Rússia, são exploradas em quantidades consideráveis a partir das areias das praias, notadamente na Índia e no Brasil (DANA, 1969).

A *Millenium Inorganic Chemicals Mineração Ltda* é a única produtora de dióxido de titânio da América do Sul, localizada no município de Mataracá (PB) e foi responsável por produzir aproximadamente 80% do beneficiamento nacional do titânio. Os principais municípios produtores de titânio no Brasil são Mataracá (PB), Santa Bárbara de Goiás (GO), Floresta (PE) e São Francisco de Itabapoana (RJ) (DNPM, 2012).

O processo de obtenção do titânio desenvolvido por Kroll (1940) é considerado um dos métodos mais difundidos para a obtenção de titânio puro em pó (rutilo natural ou sintético). Neste processo o óxido de titânio é clorado juntamente com o carbono formando o elemento $TiCl_4$, conforme apresentado na reação abaixo:



O processo desenvolvido por Hunter (1910) usa como agente redutor o sódio metálico e os dois processos são quimicamente similares, diferindo apenas em detalhes operacionais.

Toda as reações, nestes processos, são desenvolvidas sob atmosfera inerte (hélio ou argônio), pois a grande reatividade do titânio com gases que estão presentes na atmosférica, podem contaminar o produto final (BRAGA; FERREIRA; CAIRO, 2007).

A partir do titânio, a indústria desenvolve inúmeras ligas para aplicações específicas, sendo que, as ligas de titânio apresentam, em geral, resistência mecânica comparável a dos aços, com cerca de 50% de sua densidade. Além disso, as ligas de titânio apresentam uma resistência mecânica 400% superior às ligas de alumínio, com densidade 50 % superior (ANTONIALLI, 2009).

As principais propriedades das ligas de titânio são: elevadas temperaturas de fusão; alta dureza a quente; excelentes propriedades mecânicas; alta resistência à corrosão; ótima razão resistência/peso e biocompatibilidade.

Considerando as fases cristalográficas do titânio, suas ligas serão classificadas como ligas alfa, ligas beta e ligas (alfa+beta).

As ligas α apresentam boa resistência mecânica e tenacidade, mas possuem pouca conformabilidade, devido a estrutura cristalina da fase α (HC).

As ligas β apresentam boa conformabilidade, devido a estrutura cristalina β (CCC), e boa resistência a fadiga a frio e a quente, porém têm grande vulnerabilidade à contaminação pela atmosfera.

As ligas ($\alpha+\beta$) apresentam uma combinação das características das duas fases presentes em sua microestrutura apresentando boa conformabilidade, boa resistência a fadiga à frio, mas são frágeis em altas temperaturas.

As ligas ($\alpha+\beta$) permitem o tratamento térmico, o que não acontece com as ligas α (SCHAEFFER, 2001).

Em termos gerais, pode-se dizer que as ligas α apresentam maior dureza a quente e soldabilidade, enquanto as ligas β apresentam maior conformabilidade e endurecibilidade. Ligas alfa-beta, como a liga Ti-6Al-4V, apresentam todas estas propriedades em um nível intermediário (ANTONIALLI, 2009).

A classificação das ligas de titânio estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação das ligas de titânio.

Alfa (α)	Alfa + Beta ($\alpha + \beta$)	Beta (β)
Ti-8Al-Mo-V	Ti-7Al-4Mo	Ti-13V-11Cr-3Al
Ti-6Al-2Co-Ta-Mo	Ti-4Al-3Mo-V	Ti-Al-8V-5Fe
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Ti-3Al-2,5V	
Ti-0,2Pb	Ti-6Al-4V	
Ti-5Al-2,5Sn	Ti-8Mn	

Fonte: Schaeffer (2001)

A liga de titânio Ti6Al4V destaca-se no uso da indústria e é composta por 6% de Al e 4% de V. Apresenta as duas fases estruturais (cerca de 50% de α e 50% de β). A porcentagem de alumínio estabiliza a fase α e aumentando a temperatura de transformação. Além disso, a presença de alumínio nesta liga aumenta a resistência mecânica a altas temperaturas e a porcentagem de vanádio aumenta a resistência mecânica.

A liga Ti-6Al-4V, cuja composição química e propriedades mecânicas pode ser observada na Tabela 3, atende a diversos segmentos, tais como, aeroespacial, nano-aeroespacial, trocadores de calor, indústria química, indústria naval, indústria nuclear, indústria bélica, indústria para produtos de consumo, como bicicletas, e aplicações biomédicas como também na indústria de próteses ortopédicas.

As propriedades mecânicas desta liga, no estado recozido, solubilizado e envelhecido e as propriedades do aço AISI 1045 trefilado são apresentadas para comparação na Tabela 4.

Tabela 3: Composição química da liga Ti-6Al-4V segundo a norma ASTM B 381-71.

ELEMENTOS	Al	V	Fe	O	N	H	C	Ti
TEOR (% EM PESO)	5,50-6,75	3,50-4,50	Máx. 0,40	Máx. 0,20	Máx. 0,05	Máx. 0,125	Máx. 0,10	Balanço

Fonte: Knoll e Schaeffer (2006)

Tabela 4: Propriedades mecânicas das ligas de titânio Ti-6Al-4V: comparação entre a liga Ti6Al4V e um aço AISI 1045.

Material	Tensão ruptura (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Dureza (HV)	Densidade (g/cm ³)	Condutividade térmica (W/M.K)
Ti-6Al-4V recozido	895	825	110	340	4,43	7,3
Ti-6Al-4V Solubilizado Envelhecido	1035	925	-----	360	-----	7,5
AISI-1045 trefilado	625	530	207	179	7,84	50,7

Fonte: Ezugwu e Wang (1997)

2.2 Usinagem

Define-se usinagem todo o processo de fabricação em que haja a remoção do material (cavaco) por meio da ação de uma ferramenta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

A usinabilidade é a propriedade dos materiais em permitir a sua remoção por meio de uma ferramentas de corte, ou seja, materiais de difícil usinagem oferecem problemas tais como desgaste rápido ou superaquecimento da ferramenta (STEMMER, 1995).

A usinabilidade pode também ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, o índice de usinabilidade, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a um padrão. A usinabilidade de um material está associada a pelo menos um dos seguintes fatores: a vida da ferramenta de usinagem, a taxa máxima de remoção de material, os esforços de corte, o acabamento superficial e as características do cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

A usinabilidade dos materiais pode ser avaliada em termos de vida da ferramenta, normalmente o mais importante, forças atuantes na ferramenta, potência consumida, acabamento superficial e formação do cavaco (STEMMER, 1995).

Os ensaios de usinabilidade não são apenas importantes para comparar a usinabilidade em diversos materiais, eles possibilitam a definição de condições de usinagem que resultarão em ganho de produtividade e redução de custos (CAMARGO, 2002).

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) relataram que o método mais empregado é o de longa duração, no qual os materiais em análise são usinados em diferentes velocidades de corte até o fim da vida da ferramenta, ou até atingir um valor de desgaste pré-determinado, podendo ser um desgaste de flanco ou de cratera. Isto permite obter a velocidade de corte para uma dada vida da ferramenta.

A proporção entre a velocidade de corte do material ensaiado sobre a velocidade de corte do material padrão define o índice de usinabilidade (IU). Quando I.U. é maior que 1, significa que o material testado apresenta uma usinabilidade maior em relação ao material padrão. O material padrão mais utilizado é o aço AISI B1112 ou equivalente SAE 1112.

Além da usinabilidade, existem inúmeros parâmetros de corte relacionados com o mecanismo de formação do cavaco, os quais não há consenso de um modelo analítico para a definição das variáveis e resultados do processo de usinagem ou até mesmo de evento unitário da formação do cavaco. Atualmente os modelos analíticos aceitos estão baseados na teoria da plasticidade dos materiais (ASTAKHOV, 2006).

A Figura 2 ilustra o modelo proposto por Merchant (1945), baseado na teoria da plasticidade.

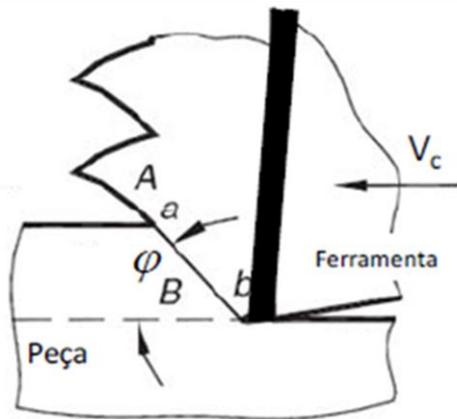


Figura 2: Definição do ângulo de cisalhamento ϕ para o modelo da teoria da plasticidade.
Fonte: Merchant (1945)

Neste modelo, o cavaco é formado por um processo de cisalhamento que se limita a aproximadamente um único plano iniciando-se na aresta de corte para a superfície da peça a frente da ferramenta. Este plano foi denominado plano de cisalhamento e, o ângulo que este faz com a superfície gerada, é definido como o ângulo de cisalhamento ϕ .

Em que:

- V_c - Velocidade de corte;
- A - região do cavaco sendo formado;
- B - região a ser transformada em cavaco.

Outros autores, dentre eles, Shaw (1954) e Willian (2010), propuseram outros modelos, sendo que destaca-se uma nova abordagem analítica para a modelagem da usinagem de um material com base na mecânica da fratura dúctil, conforme ilustrado na Figura 3.

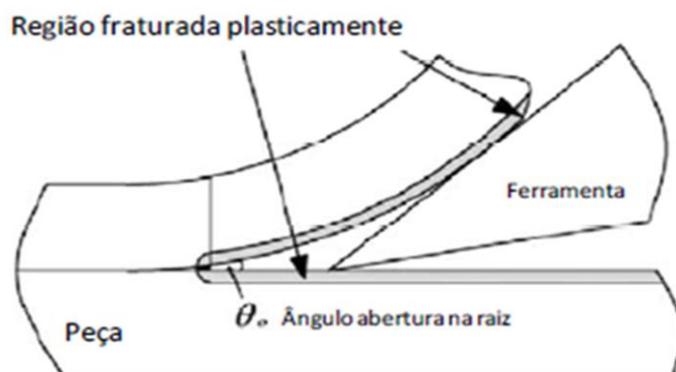


Figura 3: Modelo de separação do cavaco com base na mecânica da fratura dúctil.
Fonte: Willian, Patel e Blackman (2010).

Além destes modelos, inúmeras tecnologias surgem na busca de melhoria da produtividade dos processos de usinagem, dentre as quais destaca-se a tecnologia HSC (*High Speed Cutting*).

O conceito de tecnologia HSC teve seu desenvolvimento nos trabalhos de C. Salomon para a empresa alemã Friedrich Krupp AG, dando origem à Patente Alemã nº. 523594 em 27/04/1931 (SCHULZ, 1996).

Salomon, através da usinagem de diversos materiais com variação da velocidade de corte, notou que a temperatura de usinagem aumentava à medida que se aumentava a velocidade de corte, até atingir uma determinada faixa de velocidade de corte, na qual a temperatura começava a reduzir-se à medida que se aumentava a velocidade de corte. Com tal descoberta, define-se a Tecnologia HSC como sendo uma tecnologia de usinagem realizada com velocidades de corte que ultrapassam a faixa de alta temperatura.

Apesar da definição da Tecnologia HSC de Salomon ser considerada atualmente, Schulz (1996), formulou outra definição baseada em sua aplicação industrial, tendo como

referência a velocidade de corte no processo de usinagem convencional. Tem-se então que a Tecnologia HSC é uma tecnologia de usinagem realizada com velocidades de corte que ultrapassam de 5 a 10 vezes as convencionais para um determinado material.

Para melhor compreender os elementos de um sistema de usinagem, os mesmos podem ser considerados separadamente e suas interações dinâmicas substituídas por distribuições estáticas, que inteiradas, resultarão nas condições dinâmicas do sistema (ASTAKHOV, 1999).

Modelos ideais citados por Kronenberg (1996) e Trend (1984) são utilizados para estudos de usinagem. Considerando o par ferramenta-peça, tem-se esses elementos representados geometricamente nas Figura 4 - 7.

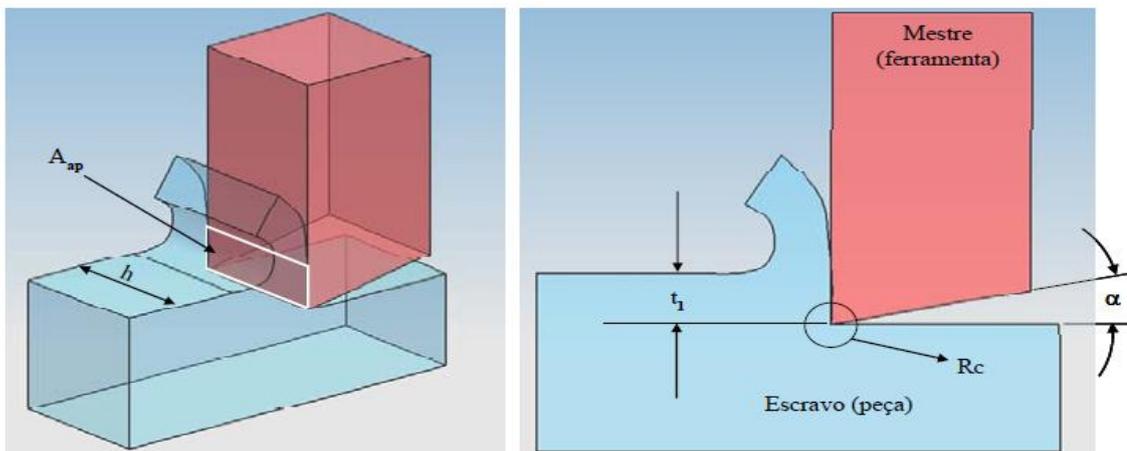


Figura 4: Corte ortogonal (Rodrigues,2009)

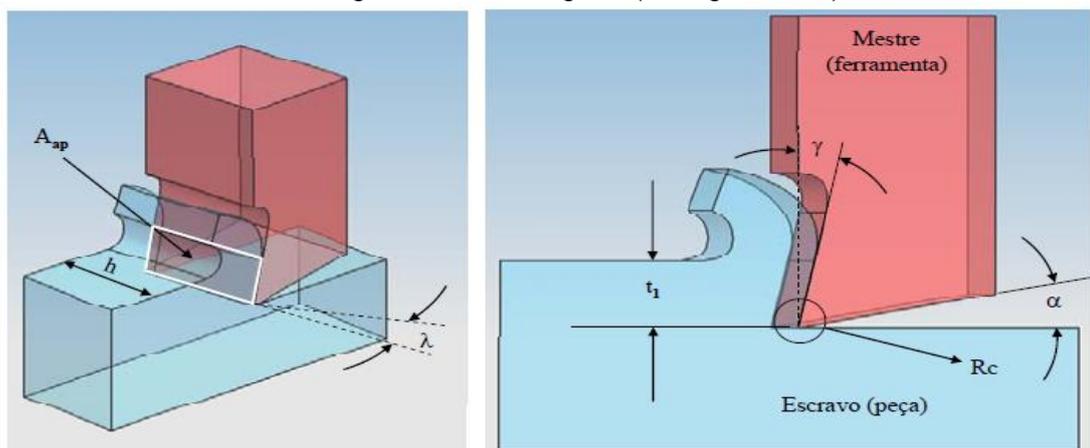


Figura 5: Corte oblíquo (Rodrigues, 2009)

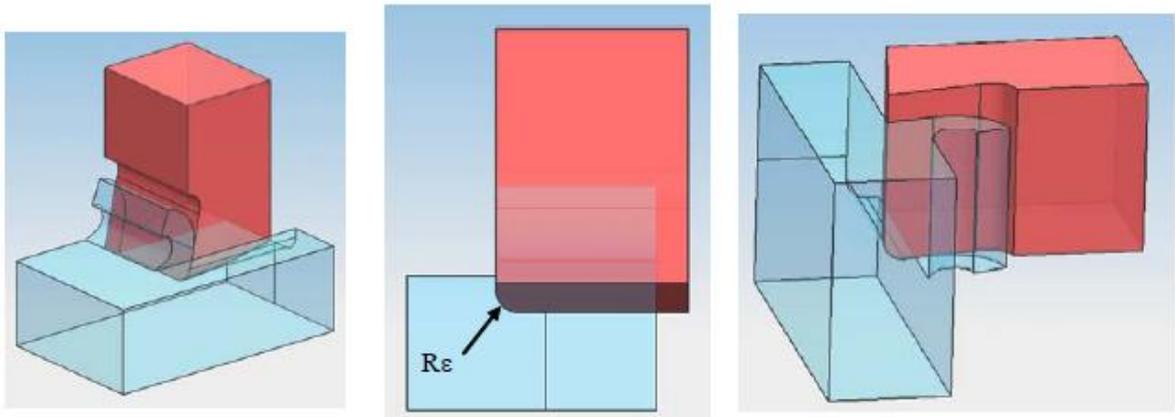


Figura 6: Modelo ideal para contato mestre escravo com raio de canto $R\epsilon$ imerso. (Rodrigues, 2009)

Considerando a Figura 7, referente à operação de fresamento, pode-se notar que em função da rotação (n), do avanço (f_z) e ângulo de posição relativo à aresta de corte em relação a superfície trabalhada (ψ), tem-se as seguintes relações:

$$h = Re - R \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

$$Re = \sqrt{R^2 - \frac{R^2 \cdot dy^2}{(R + fz)^2} + dy^2} \quad (2)$$

$$\psi = \text{arc sen} \left[\frac{dy}{Re} \right] \quad (^\circ) \quad (3)$$

$$dx = \sqrt{R^2 - \frac{R^2 \cdot dy^2}{(R + fz)^2}} \quad (4)$$

Em que:

- h = Espessura de corte;
- Re = Raio da elipse formada pela trajetória da aresta de corte quando da imposição de uma velocidade de avanço V_f ;
- R = Raio da ferramenta que irá realizar a operação, ou seja, raio do elemento mestre que irá rotacionar e transladar simultaneamente.

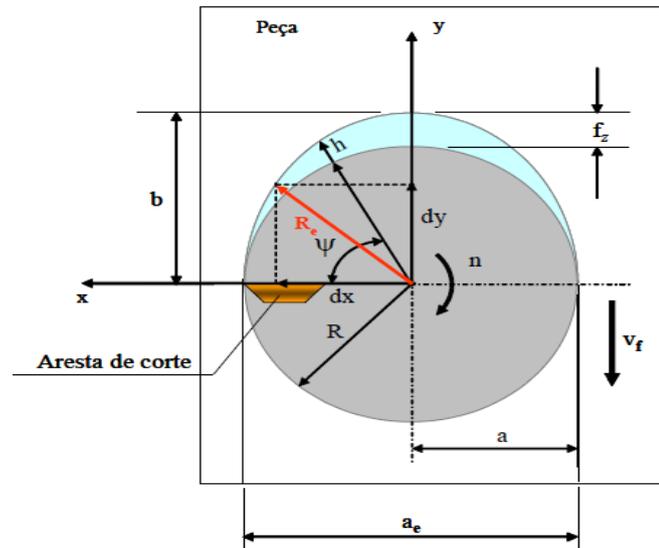


Figura 7: Modelo para análise da correção da espessura de corte h em função do ângulo de posição da aresta de corte ψ (Rodrigues, 2009).

A posição da linha de centro da ferramenta em relação a peça também influi em relação ao impacto e ao atrito no início e no final do contato entre a aresta de corte e a peça, afetando a vida útil da ferramenta e conseqüentemente o acabamento.

A partir destes elementos pode-se iniciar os estudos das forças e potência de corte atuante no processo de usinagem.

Existem duas abordagens para o cálculo das forças e potências de corte, uma teórica, em que é utilizada a teoria de formação do cavaco e utilizando-se de algumas simplificações como a suposição de corte ortogonal e outra abordagem que utiliza o método empírico, em que atinge equações e coeficientes por meio de procedimentos experimentais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Neste trabalho foi utilizada a última abordagem, devido ao fato de ser satisfatoriamente precisa e amplamente utilizada na indústria, assim como, nos tópicos seguinte será enfatizado a operação de fresamento.

2.2.1 Forças atuante no processo de fresamento

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) definem o fresamento como uma operação de usinagem que apresentam como características principais, o corte feito pela ferramenta chamada fresa, que apresenta arestas de corte dispostas em torno de seu eixo, o movimento de corte que é feito pela rotação da fresa e o movimento de avanço, geralmente feito pela mesa da máquina-ferramenta, na qual é fixada a peça.

O fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer (FERRARESI, 1977).

“Considerando as características de uma operação de fresamento, a potência de corte consumida varia a todo instante devido à variação do número de dentes no corte e da espessura do cavaco.” (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001, p.218).

A força de usinagem (F_u) é a força total atuante na cunha cortante da ferramenta durante a usinagem. Inicialmente, como não é conhecido a direção nem o sentido dessa força, é necessário trabalhar com suas componentes conhecidas: força ativa (F_t), força passiva (F_p) e força de apoio (F_{ap}).

No entanto, a força ativa pode ser decomposta em força de corte (F_c) e força de avanço (F_f), que são as forças principais que atuam no plano de trabalho (plano formado pela velocidade de corte e pela velocidade de avanço).

Na Figura 8 e Figura 9 pode-se observar as referidas forças: velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_f) e velocidade efetiva (V_e).

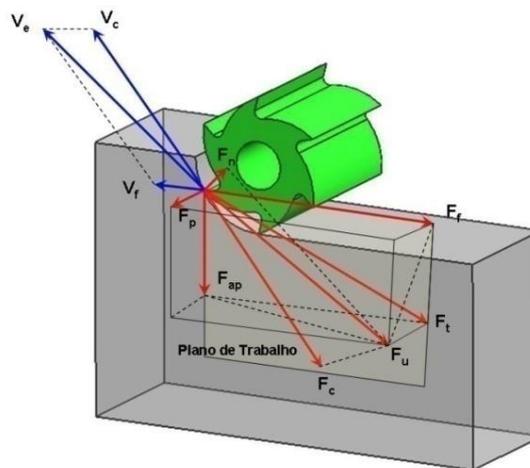


Figura 8: Componentes da força de usinagem (Ferraresi, 1977).

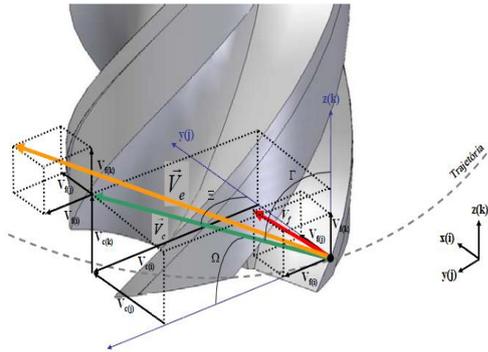


Figura 9: Modelo ideal para indicação das velocidades (Rodrigues, 2009).

Com isso a força de corte pode ser obtida por meio da equação 5:

$$F_c = K_s * S \quad (5)$$

Em que:

- K_s = pressão específica de corte [N/mm²];
- S = área da secção de corte [mm²].

Kienzle (apud FERRARESI, 1977) apresentou em 1951 uma relação para determinar a pressão específica de corte em função da espessura de corte (h). Kienzle observou no gráfico, em coordenadas bilogarítmicas, o comportamento da pressão específica de corte em função da espessura de corte (h) para um par ferramenta-peça, que os pontos se alinhavam numa reta. Assim pode-se estabelecer a equação 6.

$$K_s = \frac{K_{S1}}{h^Z} \quad (6)$$

Em que:

- K_{S1} = constante específica do material para uma secção de corte [N/mm²];
- Z = coeficiente angular da reta [adimensional];
- h = espessura de corte [mm].

Considerando a Figura 8, nota-se que a força ativa (F_t) é a projeção da força de usinagem (F_u) sobre o plano de trabalho e a força (F_c), também conhecida por força principal de corte, é a projeção da força de usinagem (F_u), sobre a direção de corte (dada pela velocidade de corte). A força de avanço (F_f) é a projeção da força de usinagem (F_u) sobre a direção de avanço. A força de apoio (F_{ap}) é a projeção da força de usinagem (F_u), sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho. A força

de compressão (F_n) é a projeção da força de usinagem (F_u), sobre a direção perpendicular à superfície principal de corte (FERRARESI,1977).

Ferraresi (1977) demonstrou que por meio da determinação da força de corte e da força de avanço, pode-se calcular as potências de corte.

A força de corte e a força de avanço são responsáveis pelo dimensionamento dos motores das máquinas-ferramenta, para a realização do movimento de corte e pelo movimento de avanço (FERRARESI,1977).

Segundo Witte (1998), a potência de corte pode ser expressa pela equação 7.

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} [kW] \quad (7)$$

Em que:

- F_c = força de corte [N];
- V_c = velocidade de corte [m/min].

Potência de avanço pode ser expressa pela seguinte equação 8: (WITTE,1998).

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^3} [kW] \quad (8)$$

Em que:

- F_f = força de avanço [N];
- V_f = velocidade de avanço [mm/min].

Considerando as equações 9 e 10, respectivamente de velocidade de corte (V_c) e velocidade de avanço (V_f) e substituindo-as na relação P_c/P_f pode-se obter a relação entre a Força de corte (F_c) e a Força de avanço (F_f).

$$V_f = f \cdot n [mm/min] \quad (9)$$

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} [m/min] \quad (10)$$

Em que:

- f = avanço por volta [mm/volta];
- n = rotação da ferramenta [min^{-1}];
- d = diâmetro da ferramenta [mm].

Desta forma, tem-se para o torneamento que a força de corte (F_c) é 4,5 vezes maior que a força de avanço (F_a) (FERRARESI, 1977). No caso do fresamento, considerando um ferramenta de corte com o diâmetro (d) igual a 10 mm e avanço (f) igual a 1 mm/volta, isto é, sendo (d) muito pequeno e (f) muito grande, tem-se a relação P_c/P_f muito pequena. Neste caso, tem-se que a força de corte (F_c) é 140 vezes maior que a força de avanço (F_a).

Para o fresamento calcula-se uma potência média de corte utilizando um valor médio da pressão específica de corte (K_{sm}). Para que o cálculo do valor médio da pressão específica de corte seja feito utilizando-se um valor médio da espessura de corte (h_m).

Assim, tem-se potência de corte para o fresamento por meio da Equação 11.

$$P_c = \frac{K_{s_m} \cdot a_e \cdot a_p \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \text{ [kW]} \quad (11)$$

Em que:

- P_c = potência média de corte no fresamento [kW];
- K_{sm} = pressão média específica de corte [N/mm^2];
- a_e = penetração trabalho [mm];
- a_p = profundidade ou largura de usinagem [mm];
- a_f = velocidade de avanço da mesa [mm/min];
- K_{s1} = pressão específica de corte [N/mm^2];
- h_m = espessura média de corte no fresamento [mm];
- z = coeficiente angular de corte [adimensional].

A espessura média de corte é dada em função dos ângulos de contato (ϕ_1 e ϕ_2) entre a fresa e a peça e, em função do ângulo de posição (χ) da ferramenta em relação à peça conforme representados em Figura 10 e Figura 11.

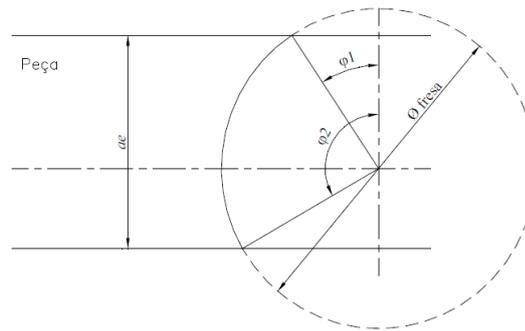


Figura 10: Ângulos de contato no fresamento frontal (Silveira,2007).

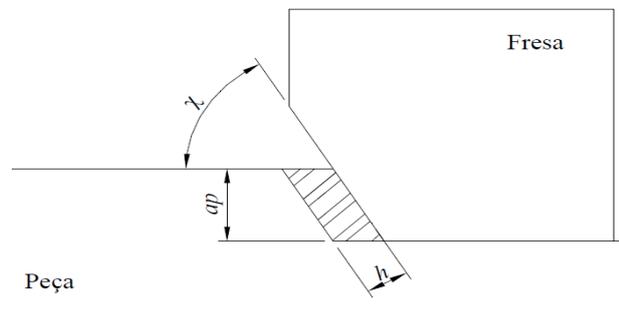


Figura 11: Ângulo de posição da ferramenta (Silveira,2007).

A espessura média de corte pode ser dada pela equação 12:

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z \cdot \text{sen} \chi \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) [\text{mm}] \quad (12)$$

Em que:

- φ_1 = ângulo entre o ponto de saída (ou entrada no fresamento concordante) do dente e a vertical;
- φ_2 = ângulo entre o ponto de entrada (ou saída no fresamento concordante) do dente e a vertical;
- χ = ângulo de posição da ferramenta;
- f_z = avanço por dente da ferramenta [mm/dente].

2.2.2 Fresamento de Ligas de Titânio

A produção mundial de titânio em 2011 foi de 6,7 Mt, um aumento de 4,7% em relação a 2010. Consequência da expansão de 3,9% da economia global no ano de 2011 (DNPM-2011). A maior parte dos componentes fabricados em ligas de titânio são usinados, devido principalmente às características geométricas de diversos segmentos industriais,

dentre eles, da indústria de próteses ortopédicas e de implantes em geral, que na maioria das vezes, não são atendidas por processos de conformação plástica.

O início do processo de usinagem de titânio ocorreu por volta de 1950 na empresa TMCA (*Titanium Metals Company of America*).

No entanto, apesar do titânio ser conhecido desde de 1800, o desenvolvimento de suas ligas e da tecnologia de usinagem somente se intensificou nas duas últimas décadas. Principalmente em desenvolvimento de novos produtos que requerem suas propriedades, como também em substituição a outros materiais de propriedades inferiores ao de suas ligas.

As ligas de titânio apresentam baixíssima usinabilidade, o que causa a baixa vida da ferramenta em termos de tempo de usinagem e volume de material removido no processo. A reatividade química das ligas de titânio, considerada alta, com os materiais da ferramenta e sua baixa condutividade térmica (aproximadamente 7,3 W/(m.K) proporcionando alta temperatura na interface (cavaco/ferramenta/peça), dificultando a usinagem desta liga, favorecendo os mecanismos de difusão (BHAUMIK; DIVAKAI; SINGH, 1995).

Em qualquer operação de usinagem e também no fresamento sempre são acompanhados de vibrações entre a peça e a ferramenta. Várias são as origens das fontes de vibração: vibrações causadas por folgas/defeitos da máquina-ferramenta; vibrações geradas em outras máquinas-ferramenta e transmitidas através do solo; falta de homogeneidade do material da peça; corte interrompido; vibrações geradas pelo próprio processo de usinagem (vibrações auto-excitadas) (TOBIAS, 1961).

O titânio tem um baixo módulo de elasticidade, grande zona elástica e alto limite de resistência à tração. Quando submetido à pressão de corte, o titânio deforma-se elasticamente quase duas vezes mais que aço-carbono, com grande recuperação elástica na superfície de folga da ferramenta. Desta forma, a espessura de corte próxima à aresta torna-se bastante variável ocorrendo uma ação vibratória (chatter) conforme a ferramenta entra na zona de corte. Isto resulta em um menor ângulo de folga efetivo, aumento do atrito e desgaste prematuro do flanco.

No fresamento, o ciclo deformação e recuperação elástica é ainda mais crítico, pois faz com que a espessura de cavaco seja variável, incentivando mais ainda a vibração. Outro fator importante para o surgimento de vibrações auto-excitadas é o processo de “cisalhamento termoplástico adiabático” em que os cavacos de titânio são formados, gerando altas forças de corte dinâmicas, chegando até 30 % do valor das forças estáticas (EZUGWU; WANG, 1997; RAHMAN; WONG; ZAREENA, 2003).

Muitos aspectos devem ser considerados durante a usinagem de ligas de titânio, tais como baixo módulo de elasticidade (que é um fator incentivador de vibrações), altas temperaturas e pressões de corte, alta afinidade química com os materiais das ferramentas e problemas com integridade superficial das peças usinadas (FARIAS; DELIJAIKOV; BATALHA, 2011).

Um fator diretamente relacionado ao custo de fabricação é a taxa de remoção de material que no caso do titânio, na última década, o volume foi duplicado, enquanto o valor para a usinagem do alumínio quintuplicou. Hoje é possível atingir taxas de remoção de 10 litros por minuto na usinagem do alumínio, enquanto que no titânio pode-se obter taxas de 0,5 litros por minuto (ADELE *et al.*, 2012).

Adele *et al.* (2012) descreveram que para atingir o volume de arranque de cavacos/tempo semelhante ao da usinagem do alumínio na usinagem de ligas de titânio para obtenção da geometria final da peça, elevados avanços de corte são necessários na ferramenta, o que conduzem a elevadas forças de corte e novos desafios para os fabricantes de máquinas e ferramentas.

Manter excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas é um dos principais motivos da utilização das ligas de titânio, principalmente na indústria aeroespacial. Também é essa característica, altamente nociva em termos de usinabilidade, pois dificulta a deformação plástica necessária para a formação do cavaco (MACHADO; WALLBANK, 1990).

Segundo Ezugwu e Wang (1997), cerca de 80% do calor gerado fica retido na ferramenta e 20% no cavaco, uma das causas do desgaste prematura da ferramenta de usinagem.

Machado *et al.* (2009) explica que o titânio, quando ligado a alumínio (Al), manganês (Mn), estanho (Sn) ou vanádio (V), produz ligas de baixa densidade com excelente resistência mecânica e à corrosão, o que dificulta a usinagem.

Segundo Komanduri e Turkovich (1981), o cavaco serrilhado nas ligas de titânio é formado devido ao início da instabilidade no processo de corte que resulta do amolecimento e mecanismo de encruamento na zona primária de cisalhamento. Desta forma sugeriram também que a formação das bandas concentradas de cisalhamento (também chamada de cisalhamento adiabático), ocorrem devido às baixas propriedades térmicas (baixa condutividade térmica e baixo calor específico) destas ligas e a consequente concentração de energia térmicas nestas bandas.

As bandas de cisalhamento adiabáticas são manifestações da instabilidade termodinâmicas resultando na concentração de grandes deformações de cisalhamento

em camadas delgadas. Esta deformação localizada é acompanhada por uma grande elevação local da temperatura, que é uma condição necessária para se obter o cisalhamento adiabático (MOLINARI; MUSQUAR; SUTTER, 2002).

Flom e Komanduri (1989) e Turkovich (1983) descreveram as principais características presentes na usinagem de titânio e suas ligas:

- O titânio e suas ligas não possuem alta condutividade térmica, por isso, o calor gerado na usinagem não se dissipa rapidamente, concentrando a maioria do calor na ponta da ferramenta e não nos cavacos como nos metais, desgastando rapidamente a ferramenta;
- O titânio possui uma forte tendência de ligação ou reatividade química com os materiais das ferramentas de corte, provocando rápido desgaste e/ou falhas da ferramenta;
- A instabilidade termoplástica está presente durante a usinagem do titânio, isso cria um mecanismo de formação de cavaco único para o titânio, onde as tensões de cisalhamento não são uniformes e são localizadas em uma estreita faixa;
- Alta temperatura de corte e as altas tensões são concentradas perto da ponta da ferramenta, devido o comprimento do contato entre a ferramenta e o cavaco ser extremamente curto;
- Cavacos serrilhados criam flutuações na força de corte, esta situação é promovida quando ligas alfa-beta, como no caso da liga Ti-6Al-4V, são usinadas;
- A força vibracional, juntamente com a alta temperatura, exerce um carregamento concentrado de micro-fadigas sobre a ferramenta de corte, que se acredita ser parcialmente responsável pelo acentuado desgaste de flanco.

Por todos estes motivos a escolha da ferramenta adequada para uma determinada operação e a determinação correta das condições de usinagem representam um papel importante no trabalho com metais.

Isso se acentua na produção seriada, na qual divergências na escolha dos parâmetros de corte e ferramenta podem acarretar variações notáveis nos custos de fabricação.

O tempo de vida da ferramenta e a otimização do processo é muito importante, pois o fator custo adquire um caráter de extrema importância neste cenário de intensa competitividade no qual qualidade e produtividade são itens fundamentais.

Ferramentas com insertos de carboneto de tungstênio não atendem às necessidades devido à afinidade química entre as ferramentas e as ligas de titânio. Desta forma, camadas aplicadas nas ferramentas de cortes com materiais que não tem afinidade química com o titânio tem sido desenvolvidas. Isto evita a afinidade química, aumenta a vida útil e melhora de acabamento (FARIAS *et al.*, 2011).

O uso de revestimentos como TiN, TiCN e TiAlN aplicados sobre componentes estruturais é amplamente reconhecido por aumentar o desempenho das ferramentas de corte (LIU *et al.*, 2010).

Makino *et. al* (1998), mostraram que uma pequena quantidade de oxigênio aumentava a dureza do TiN, tornando o TiNO um candidato ideal para recobrir as ferramentas de corte.

Segundo Farias, Delijaikov e Batalha (2011), a condição de laminação das camadas em função de temperaturas no processo de usinagem obtidas por simulação foi avaliada e neste estudo utilizou-se uma ferramenta com nove camadas aplicadas por CVD na seguinte sequência: TiN/TiC/TiN/TiC/TiN/TiC/TiN/TiCN/TiN, com espessura total de 10 µm. Os autores discutiram que dependendo da sequência de aplicação das camadas, pode-se obter diferentes características de resistência à condição de laminação.

Bhaumik, Divakaie, Singh (1995) apresentaram um estudo indicando que insertos em CBN podem ser usados economicamente para a usinagem de ligas de titânio. Segundo eles o sucesso do CBN é em função da sua elevada tenacidade a fratura juntamente com uma dureza elevada especialmente em altas temperaturas.

Selecionados adequadamente os parâmetros de usinagem para uma determinada liga de titânio, taxas razoáveis de produção podem ser alcançadas com custos satisfatórios (DONACHIE, 1989).

Fluídos de corte cloretados devem ser evitados na usinagem de componentes de ligas de titânio que serão submetidos a altas temperaturas de trabalho. A presença do cloro torna o titânio suscetível à corrosão sob tensão (FREESE; VOLAS; WOOD, 2001).

Alguns estudos abordam com sucesso o uso da refrigeração criogênica, dentre elas: pré-resfriamento da peça; refrigeração criogênica indireta com a pulverização do jato criogênico e tratamento criogênico direto de ferramentas de corte (YILDIZ; NALBANT 2008). Por ser ambientalmente amistoso, o nitrogênio líquido é o meio mais utilizado.

Silva (2004) descreveu que na usinagem de acabamento da liga de titânio Ti-6Al-4V, aplicando usinagem a altas velocidades de corte (HSM - *High Speed Machining*) e fluídos

de corte à alta pressão (HPC - *High Pressure Cutting*), permite-se obter o aumento de produtividade e aumento de vida útil da ferramenta. Além de prolongar a vida das ferramentas, e que, a técnica HPC produziu valores de rugosidade da superfície, aceitáveis e ligeiramente superiores aos produzidos por meio da técnica convencional.

Isto pode ser observado na Figura 12, na qual a vida da ferramenta na usinagem da liga Ti-6Al-4V com várias ferramentas CBN (T1, T2, T3) e ferramenta de carboneto não revestidos (T4), com fluxo convencional de refrigerante (CCF) , alta pressão de refrigerante de 11 MPa, (HP 11 Mpa) e 20,3 MPa (HP 20,3 MPa).

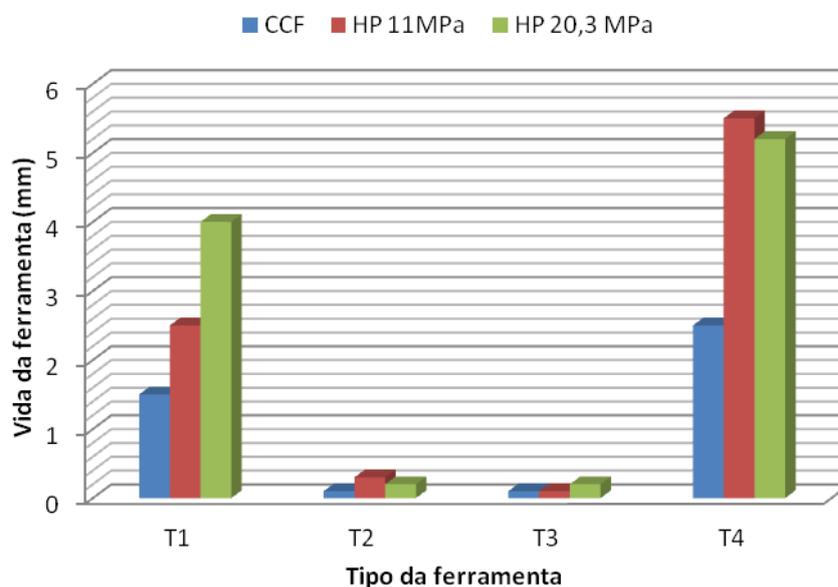


Figura 12: Vida da ferramenta na usinagem da liga Ti-6Al-4V (Machado et al, 2009)

Venugopal, Paul e Chattopadhyay (2007) descreveram como diminuir as elevadas taxas de desgaste das ferramentas por meio de aplicação de um fluido lubrificante-refrigerante. Concluíram que a aplicação de nitrogênio líquido (LN2), que possui excelente capacidade refrigerante aliada ao fato de não ser agressivo ao meio ambiente apresenta bons resultados na diminuição das taxas de desgaste das ferramentas.

Ezugwu, Booney e Yamae (2003) em suas pesquisas concluíram que pode-se aumentar a eficiência da refrigeração utilizando um sistema com bocal duplo para alimentação do fluido de corte, direcionando um bocal na superfície secundária de folga e outro bocal direcionado sobre a superfície de saída do cavaco.

2.2.3 Polimento

Segundo Ribeiro, 2013, o processo de polimento é utilizado com o objetivo de obter superfícies com baixa rugosidade e o polimento consiste de um processo de alisamento

manual ou mecanizado da superfície com o auxílio de tecidos , pastas abrasivas ou micro esferas a fim de atingir um nível específico de rugosidade superficial.

O TEC, 2013 definiu o polimento com um processo de suavização superficial que pode ser usado em uma ampla variedade de materiais, sendo que, ele pode ocorrer por meio de duas etapas. A primeira envolve o alisamento da superfície por meio da reformulação dos picos de rugosidade da superfície da estrutura. Na segunda etapa tem-se a remoção do material em função do tipo de polimento.

Dentre os processos utilizados no polimento destacam-se o processo de acabamento por arraste e processo de acabamento por disco centrífugo. O processo de acabamento por arraste pode ocorrer pelo processo de polimento úmido ou pelo processo de polimento à seco, ambos muito utilizados para o polimento de próteses de joelho, componentes femurais, válvulas, pistões, caixas de relógios e peças decorativas etc. (O TEC, 2013)

O processo polimento por arraste consiste em um processo que, as peças são posicionadas em um suporte especial e arrastadas em movimento circular em alta velocidade em um recipiente cheio de elementos (Chips) para rebarbação e polimento. O movimento em alta velocidade cria alta pressão de contato entre as peças e estes elementos, produzindo resultados em um curto espaço de tempo com alta precisão de arredondamento dos cantos.

O processo de polimento por arraste úmido é utilizado para materiais de pequeno volume e alta quantidade (granel). Isso permite que as peças sejam rebarbadas e polidas em um único processo.

O processo de polimento por arraste a seco é desenvolvido para dar um polimento de alto brilho à peças de carboneto e cerâmica, pois na maioria dos casos o polimento manual com pastas irá gerar um alto tempo.

Com estes processos, peças de qualquer formato e peso podem ser rebarbadas, alisadas e polidas em um tempo curto. Nas máquinas as peças são fixadas em suportes rotativos e arrastados de uma forma personalizada de processamento. Em máquinas de acabamento por arraste é especialmente adequado para peças como endoscópios, perfuradores de osso, implantes, prendedores cirúrgicos, parafusos ósseos, placas ósseas e outras peças de alta qualidade.

O processo de acabamento por disco centrífugo consiste em um processo de acabamento em massa, e foi desenvolvido para o tratamento superficial de peças. O processo é realizado em um recipiente cilíndrico, que está aberto no topo e no fundo possui um disco que promove o movimento centrífugo. Durante a operação, as peças e a

media (chips) de rebarbação ou polimento no qual estão imersos, rotacionam em alta velocidade, criando um efeito toroidal.

O processo de eletropolimento consiste em um processo de remoção eletroquímica de material para peças metálicas, usando uma fonte externa de corrente elétrica. Isto é usado para polimento, passivação e rebarbação de superfícies.

Durante o processo, material é removido da peça (anodo), que fica imerso em um eletrólito especialmente desenvolvido para um material em particular, desta forma reduz consideravelmente a rugosidade da superfície.

Tem-se com vantagens do eletropolimento, as superfícies metálicas puras, nenhuma ação sobre a superfície cristalina do material, Melhora na resistência a corrosão, superfície permanentemente lustrosa.

Além disso, o processo de polimento pode ocorrer de forma manual ou mecanizado, sendo que ao contrário do que poderia pensar, o polimento mecanizado não atinge os níveis de qualidade superficial do polimento manual. Isso ocorre em função do operador poder variar a pressão de polimento ao longo da geometria a ser polida, o que não é possível no processo de polimento automatizado. Desta forma, apesar do alto tempo do polimento manual, o mesmo é amplamente utilizado no ambiente industrial.

Entretanto diversos fatores têm influências significativas para que um polimento adequando seja atingido, dentre eles as reflexões da superfície polida e a técnica do polimento.

Com relação às reflexões da superfície, uma superfície pode ser classificada em função da reflexão dos raios de luz. Em uma superfície irregular os raios se refletem em diversas direções, inclusive se cruzando, com isso, uma superfície pode ser considerada "áspera" em função da imagem refletida nesta superfície torna-se irreconhecível. Da mesma, uma superfície pode ser considerada "lisa" em função das reflexões serem definidas e ordenada e, conseqüentemente obtendo uma imagem sem deformações.

Com relação à técnica de polimento destaca-se os seguintes elementos:

- Preparo da superfície polida por meio de outro processo de usinagem (esmerilhamento, lixamento, ou diretamente após o processo de torneamento ou fresamento, etc.);
- Encerrar o polimento assim que a última imperfeição for removida;
- No processo de polimento, a quantidade de material removida é maior quanto maior for a dureza do material;

- Utilizar ferramentas de polimentos limpas;
- Proceder boa limpeza da peça e da mão do polidor quando mudar para um meio de granulação mais fina para evitar contaminação da granulação anterior a qual poderia resultar em riscos na superfície a polir e, polir em direção deslocada a 45°, sempre que mudar para uma granulação mais fina, em relação à direção de polimento anterior, evitando assim depressões e desnivelamentos;
- Iniciar com uma ferramenta dura e se usar pasta, iniciar com uma pasta mais grosseira;
- Mudar para uma ferramenta mais macia mantendo a mesma pasta;
- Usar uma ferramenta de dureza intermediária e uma pasta de granulação média;
- Mudar para uma ferramenta mais macia com a mesma pasta e,
- Ao final usar uma ferramenta com pasta de granulação fina.

Com relação a avaliação da superfície polida, a mesma pode ser realizada por meio de comparação a uma outra superfície padrão ou por meio de instrumento para medição de rugosidade e reflexão de luz.

3 Materiais e Métodos

Este capítulo tem como objetivo detalhar as etapas do método de pesquisa utilizado durante os experimentos realizados conforme as etapas descritas na Figura 1 (Ver página 7).

3.1 Etapa 1: Identificação do Corpo de Prova

Conforme pode ser observado na Figura 13, o corpo de prova utilizado no experimento é uma prótese de joelho comercial em Liga de titânio Ti6Al4V com dimensões aproximadas de \varnothing 65X56 mm.



Figura 13: Corpo de Prova utilizado no experimento.

3.2 Etapa 2: Identificação do Processo de Fresamento

O processo de fresamento foi realizado em um centro de usinagem vertical, modelo Discovery 560, fabricado pelas Indústrias ROMI S.A com as seguintes especificações técnicas: Rotação máxima: 7.500 RPM; Avanço rápido: 30.000 mm/min (Eixos X e Y) e 20.000 mm/min (Eixo Z); Máximo avanço programável: 15.000 mm/min; Comando CNC Siemens 810D e Potência Máxima de corte: 12,5 / 9 [cv/Kw].

Em função da geometria do corpo de prova e da característica do dispositivo de fixação, o processo de usinagem ocorreu em 2 lados iguais do corpo de prova (Lado 1 e 2). A partir de um material bruto com dimensões aproximadas de \varnothing 65X56 mm, o lado 1 foi fixado por meio de uma placa mecânica universal e usinado com as geometrias finais do corpo de prova. A partir disso, o lado 2 foi fixado por meio de um outro dispositivo com geometria de contato igual à geometria do corpo de prova e usinado com as geometrias finais do corpo de prova. A Figura 14 ilustra o dispositivo de fixação, o material bruto e os lados 1 e 2 do corpo de prova.

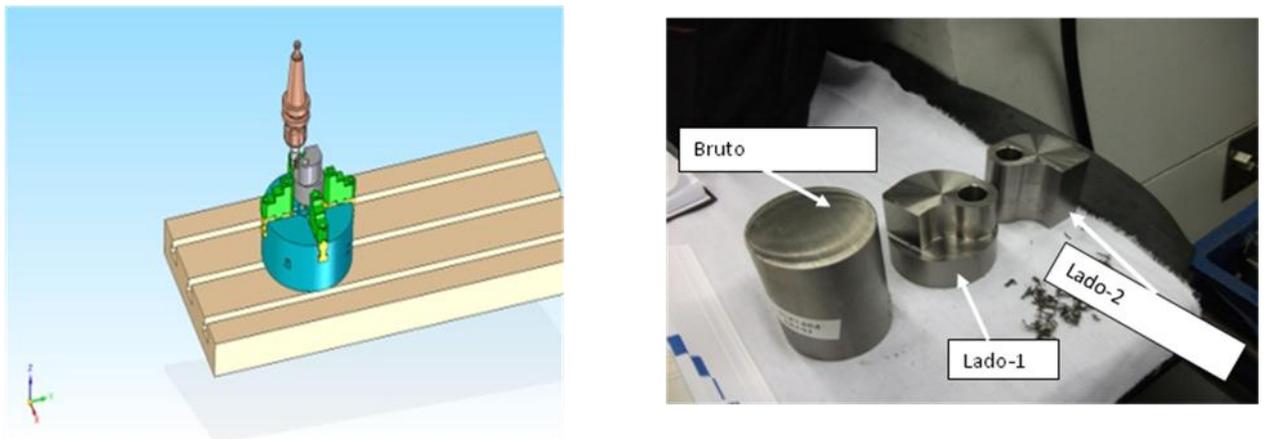


Figura 14: Dispositivo de fixação, o material bruto e os lados 1 e 2 do corpo de prova.

A usinagem de cada lado do corpo de prova foi realizada por uma única operação de fresamento com a mesma ferramenta de corte e estratégias de usinagem. A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa $\varnothing 16\text{mm}$ com três arestas de cortes para inserts intercambiáveis (R217.69-2020.3-09TA) e inserts (XOMX 090304 TR ME 06 -F40M) Ambos ferramentas comerciais fornecidas pela Seco Tools.

As Figura 15 e Figura 16 ilustram os parâmetros de estratégia de usinagem utilizados no processo de fresamento, assim como, pode-se observar na Figura 15 a posição a ser utilizada para a medição da rugosidade.

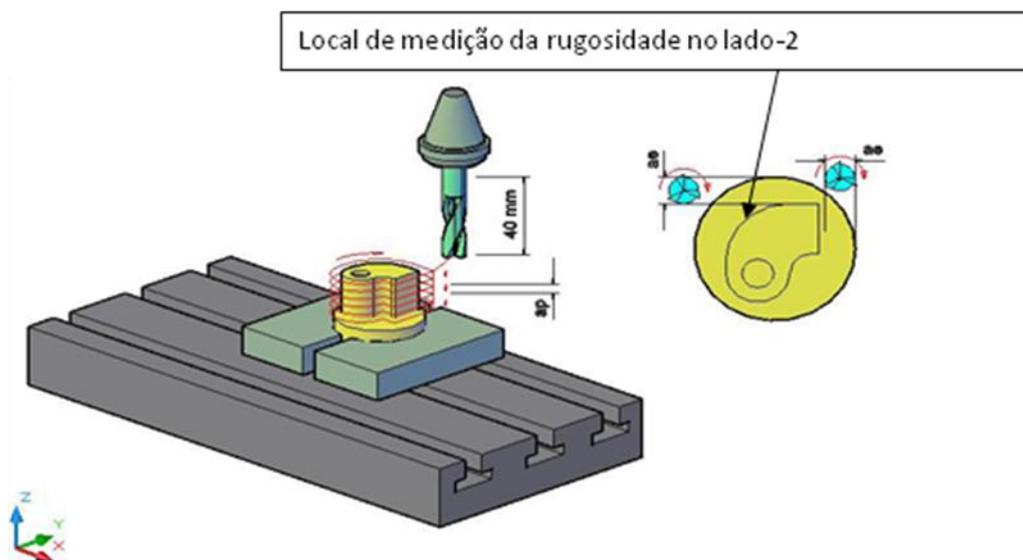


Figura 15: Detalhamento da estratégia de usinagem 1.

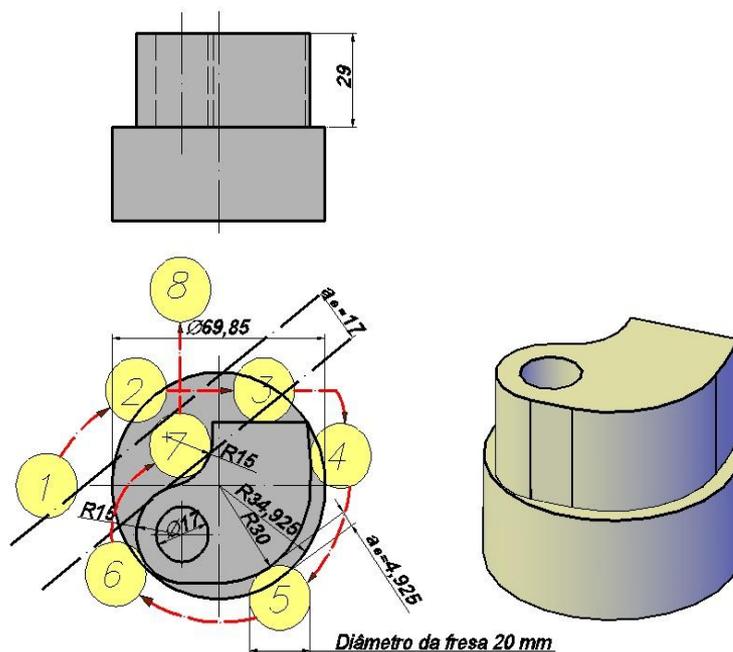


Figura 16: Detalhamento da estratégia de usinagem 2.

Dentre os parâmetros da estratégia de usinagem destacam-se:

- Balanço da ferramenta de corte = 40 mm;
- Profundidade de Corte (a_p) = 2,7 mm;
- Profundidade Lateral (a_e) = variável no contorno da peça. No local de medição da rugosidade o a_e corresponde à 4,925 mm.;
- Movimento de corte concordante;

A operação de usinagem foi realizado com fluido de corte Rocol Ultracut 370 Óleo solúvel Semi-Sintético de Alta Diluição com diluição constante de 50:1. O fluido foi direcionado diretamente no local da usinagem com uma pressão constante de 2 bar.

Com relação ao fator de uso dos insertos da ferramenta de corte foi considerado o critério de fim de vida do inserto baseado experiência da empresa, que atualmente trabalha em um regime de 9 peças (18 Lados) para cada conjunto de 3 insertos.

Este critério de vida das ferramentas de corte apresentam uma variabilidade em seus valores, mesmo em condições de trabalhos semelhantes. Os modelos estatísticos baseiam-se em estudos da distribuição de frequências que exigem grande quantidades de testes e são de difícil aplicação prática. A constatação e a consideração da existência de uma dependência estocástica entre quebra e desgaste, normalmente usada pelos modelos probabilísticos, são questionáveis sob o ponto de vista estatísticos (Seco, 2011).

Considerando o exposto acima a determinação do critério de vida da ferramenta foi baseado na experiência do fabricante.

Em função disso, para eliminar a influência do desgaste da ferramenta sobre a rugosidade, utilizou um critério de um conjunto novo de inserto para cada 5 (cinco) Lado 2. Desta forma, o experimento adotou um fator de uso de (5/18) 27,7% em relação a vida útil da ferramenta.

Para os parâmetros de corte na situação B ($V_c = 90\text{m/min}$ e $F_z = 0,08\text{ mm/aresta}$), foi utilizado a quantidade de 4peças (8 Lados)/3pastilhas. Isto ocorreu em função do acabamento superficial obtido, da vibração da máquina e avarias das arestas de cortes. Desta forma, adotando-se um fator de uso semelhante as demais situações de parâmetros de corte, utilizou-se um critério de um conjunto novo de inserto para cada 2 (dois) Lado 2. Com isso, o experimento adotou um fator de uso de (2/8) 25% em relação a vida útil da ferramenta.

3.3 Etapa 3: Definição dos Parâmetros de fresamento

Considerando os parâmetros especificados pelo fabricante da ferramenta de corte para a usinagem da liga de titânio Ti6Al4V que variam em: Velocidade de corte (V_c) de 90 à 105 m/min e Avanço por aresta (F_z) de 0,04 à 0,08 mm/min⁻¹, adotou-se, conforme pode-se observar na Tabela 5, 4 (quatro) lotes de usinagem

Tabela 5: Situações de Parâmetros de fresamento.

Parâmetros	Lote A	Lote B	Lote C	Lote D
V_c [m/min]	105	90	105	90
F_z [mm/min ⁻¹]	0,04	0,08	0,04	0,06
V_f [mm/min]	200	344	200	272
n [min ⁻¹]	1672	1433	1672	1432
Estratégia de Acabamento (Sobremetal) [mm]	0	0	0,05	0

Dentre os lotes de usinagem destacam-se:

- Lote A: Em função de apresentar a maior rotação e o menor avanço por aresta, esta situação apresenta melhores condições de usinagem em relação as demais situações;

- Lote B: Em função de apresentar a menor rotação e o maior avanço por aresta, esta situação apresenta a pior condições de usinagem em relação as demais situações;
- Lote C: Esta situação é igual a situação apresentado no Lote A, diferenciando-se apenas na adição de uma operação de acabamento com sobremetal de 0,05 mm;
- Lote D: Na busca de um equilíbrio entre as situações dos Lotes A e B e aumento da produtividade, adotou-se a menor velocidade de corte e um avanço por aresta médio.

3.4 Etapa 4: Fresamento dos Corpos de Prova

Para cada lote apresentado na Tabela 5 foram usinados sequencialmente 5 amostras conforme ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Estas amostras foram identificadas para posterior acompanhamento nas etapas de medição de rugosidade e polimento (Ver Figura 17).

Tabela 6: Situações de Parâmetros de fresamento.

Lote A	Lote B	Lote C	Lote D
Peça 1	Peça 6	Peça 11	Peça 16
Peça 2	Peça 7	Peça 12	Peça 17
Peça 3	Peça 8	Peça 13	Peça 18
Peça 4	Peça 9	Peça 14	Peça 19
Peça 5	Peça 10	Peça 15	Peça 20



Figura 17: Identificação dos Corpos de Prova.

Nesta etapa foram obtidos os dados de produtividade e custo da usinagem considerando apenas o fator ferramenta de corte.

3.5 Etapa 5 e Etapa 7: Avaliação dos Corpos de prova após o fresamento e após polimento

A avaliação dos corpos de prova após o fresamento e o polimento ocorreu por meio da medição da rugosidade média Ra (μm) em uma posição fixação na superfície do corpo de prova (Ver Figura 15). Para esta medição utilizou um rugosímetro modelo SJ 400 fabricado pela empresa Mitutoyo, que encontra-se no laboratório de metrologia da empresa em que realizou-se o experimento, conforme ilustrado na Figura 18.



Figura 18: Rugosímetro SJ 400-Mitutoyo

Para a medição da rugosidade utilizou-se os seguintes parâmetros: Cut-off igual a 0,8 mm e a quantidades de Cut-Off igual a 5.

3.6 Etapa 6: Polimentos dos Corpos de prova

O polimento dos corpos de prova foi realizado pelo setor especializado neste operação da empresa, sendo que para evitar a influência manual do processo, o mesmo foi utilizado por um único funcionário, equipamento e de forma aleatória.

O processo de polimento consistiu no: lixamento da superfície fresada por meio de uma lixa Trizact 407 EA A-60 (3M); polimento desta superfície por meio do contato em uma roda de Sisal e por último, o polimento por meio do contato em uma roda de polir de algodão.

Neste processo destaca-se ainda as seguintes características:

- Politriz de Coluna: (Rodas de Sisal e Algodão), 02 eixos; 7,5 Cv e 1750 rpm
- Lixadeira de Fita: 3,5 Cv;3500 rpm;
- Correia de Lixa: Trizact A 60 (carbeto de silício);
- Massa de lustrar: Cod.021492: Al-ACR;
- Roda de Sisal: Ø10" x 2";
- Massa auto brilho: Cod.0201827;
- Roda de Pano: Ø 10" x 2";
- Polidor com experiência de cerca de 20 anos.

4 Análise dos resultados e Discussões

Neste capítulo será descrita a análise os resultados obtidos através dos ensaios de medição realizados nos corpos de prova, assim como a análise da produtividade e custo de usinagem.

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos durante o processo de fresamento dos lotes A, B, C e D.

Tabela 7: Produtividade e Custo de usinagem.

ITENS CONSIDERADOS	LOTE-A	LOTE-B	LOTE-C (REPASSE)	LOTE-D
Tempo de Usinagem [min]	33	19	66	26
Produtividade [pç/h]	1,8	3,15	0,9	2,3
Custo unitário do inserto [R\$]	33,42	33,42	33,42	33,42
Fator de uso do Inserto [pç/inserto]	9/3	4/3	9/3	9/3
Custo da usinagem (Inserto) [R\$/h]	40,5	158,3	40,5	40,5
Custo por peça [R\$]	22,5	50,5	45	17,6

Baseado na Tabela 7, pode-se verificar que:

- o lote B apresentou a melhor produtividade (3,5 pç/h) e o maior custo de usinagem (R\$158,3/h);
- o lote C apresentou o maior tempo de usinagem, devido a operação adicional de acabamento. Com isso, apresentou a pior produtividade (0,9 pç/h);
- o lote D apresentou o menor custo por peça (R\$ 17,6);

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos com a rugosidade após o processo de fresamento dos lotes A, B, C e D.

Tabela 8: Rugosidade após o processo de fresamento.

LOTE-A		LOTE B		LOTE-C		LOTE D	
N. Peça	Ra (μm)						
1	1,06	6	1,33	11	0,42	16	1,29
2	1,05	7	1,33	12	0,42	17	1,31
3	1,06	8	1,32	13	0,43	18	1,30
4	1,06	9	1,34	14	0,42	19	1,28
5	1,05	10	1,32	15	0,43	20	1,32
Média	1.06	Média	1.33	Média	0,42	Média	1,30
Desvio Padrão	0,005	Desvio Padrão	0,008	Desvio Padrão	0,005	Desvio Padrão	0,016

Baseado na Tabela 8, pode-se verificar que:

- todos os lotes apresentam um desvio padrão pequeno em relação ao valor da média dos dados;
- a rugosidade dos corpos de prova variou em função dos valores de avanço por aresta aplicado na usinagem, ou seja, o lote B ($F_z = 0,08$) apresentou uma rugosidade superior ao lote D ($F_z = 0,06$), que apresentou uma rugosidade superior ao Lote A ($F_z = 0,06$);
- o lote C apresentou uma melhoria significativa de rugosidade em função da adição da operação de acabamento com sobremetal uniforme de 0,05mm;
- a flutuação de avanço entre os lotes A, B e D ($F_z = 0,04 - 0,08\text{mm}$) refletiu em um aumento de 0,27 μRa (25,6%);

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos com a rugosidade após o processo de polimento dos lotes A, B, C e D.

Tabela 9: Rugosidade após o processo de polimento.

LOTE-A		LOTE B		LOTE-C		LOTE D	
N. Peça	Ra (μm)						
1	0,10	6	0,10	11	0,14	16	0,13
2	0,14	7	0,12	12	0,14	17	0,12
3	0,11	8	0,14	13	0,10	18	0,10
4	0,11	9	0,10	14	0,14	19	0,11
5	0,12	10	0,14	15	0,13	20	0,13
Média	0,12	Média	0,12	Média	0,13	Média	0,12
Desvio Padrão	0,015	Desvio Padrão	0,020	Desvio Padrão	0,017	Desvio Padrão	0,013

Baseado na Tabela 9, pode-se verificar que a rugosidade após a operação de polimento apresentou valores similares entre os lotes, ou seja, não foi possível observar influência da rugosidade do processo de fresamento na rugosidade final dos corpos de prova. . Considerando todos os corpos de prova como uma única amostra, a mesma possui uma rugosidade média de 0,12 μm Ra com um desvio padrão de 0,016, o corrobora com a afirmação acima.

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos com o tempo do processo de polimento dos lotes A, B, C e D.

Tabela 10: Tempo da operação de polimento.

LOTE-A		LOTE B		LOTE-C		LOTE D	
N. Peça	Tempo (min)						
1	3,13	6	3,80	11	2,80	16	3,53
2	3,13	7	3,67	12	2,87	17	3,40
3	3,07	8	3,73	13	2,73	18	3,33
4	3,20	9	3,80	14	2,80	19	3,20
5	3,20	10	3,67	15	2,67	20	3,27
Média	3,15	Média	3,73	Média	2,77	Média	3,35
Desvio	0,06	Desvio	0,07	Desvio	0,08	Desvio	0,13

Padrão		Padrão		Padrão		Padrão	
--------	--	--------	--	--------	--	--------	--

Baseado na Tabela 10, pode-se verificar que:

- diferente da situação da rugosidade final dos corpos de prova (Tabela 9), o tempo da operação de polimento variou em função da rugosidade obtida pela operação de fresamento e, conseqüentemente pela variação do avanço por aresta (F_z);
- o Lote C, por apresentar a menor rugosidade após a operação de fresamento ($R_a=0,42$), obteve o menor tempo de polimento (2,77 min). Da mesma, o Lote B, por apresentar a maior rugosidade após a operação de fresamento ($R_a=1,33$), obteve o maior tempo de polimento (3,73 min).

Considerando os tempo de usinagem da Tabela 7 e os tempos médio de polimento da Tabela 10, pode-se obter a proporção entre o processo de fresamento e o processo de polimento no processo de fabricação de próteses em liga de Titânio Ti6Al4V, conforme ilustrado na Figura 19.



Figura 19: Tempo do Processo de Fabricação de Próteses em Liga Ti6Al4V.

Na Figura 19 observa-se que mesmo com a variação do tempo de polimento em relação à rugosidade após a operação de fresamento, este tempo compoem uma proporção pequena, respectivamente 8, 16, 4, 11% em relação ao tempo total de fabricação dos lotes A, B,C e D.

5 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

5.1 Conclusões

A análise da produtividade e do custo de usinagem baseado no consumo de inserto mostrou que o Lote B ($V_c = 90$ m/min; $F_z = 0,08$) apresentou a melhor produtividade e, conseqüentemente o maior consumo de inserto em relação aos demais. O Lote D ($V_c = 90$ m/min; $F_z = 0,06$) e o Lote A ($V_c = 105$ m/min; $F_z = 0,04$), apresentaram, respectivamente um custo por peça usinada de R\$ 17,6 e R\$22,5, tornando-se as melhores opções neste processo de fresamento. O Lote C, apesar de apresentar o mesmo custo com relação ao consumo de inserto em relação aos Lotes A e D, o aumento do tempo de usinagem em função da operação adicional de acabamento tornou o seu custo por peça alto (R\$ 45,00).

A rugosidade dos corpos de prova após a operação de fresamento apresentou uma variação diretamente proporcional à variação do avanço por aresta (F_z) entre os lotes ensaiados. Da mesma forma, a adição de uma operação de acabamento com sobremetal constante de 0,05 mm (Lote C) resultou em uma melhoria significativa de rugosidade em relação aos demais Lotes ensaiados.

Esta variação de rugosidade não foi observada após a operação de polimento. Este fato evidencia que a rugosidade do processo de fresamento não influencia na rugosidade final dos corpos de prova após a operação de polimento. Isto ocorre pois no processo de polimento há uma operação inicial de lixamento que resulta na uniformidade da rugosidade.

No entanto, apesar desta uniformização da operação de lixamento, o tempo de polimento varia diretamente em função da rugosidade obtida pela operação de fresamento e, conseqüentemente em função do avanço por aresta (F_z). Nesse sentido, o Lote C apresenta a melhor condição de usinagem em relação ao tempo de polimento.

Com isso, pode-se concluir que, em função do tempo de polimento compor uma pequena proporção do tempo do processo de fabricação, a decisão sobre o melhor processo de fabricação de prótese em Liga de Ti6Al4V está diretamente relacionado com a produtividade da operação de fresamento, o que neste faz com o processo B seja o melhor processo em relação ao tempo de fresamento e, conseqüentemente ao tempo de fabricação. Esta característica resulta em um alto consumo de ferramenta de corte, o que torna também o processo com maior custo.

Nesse sentido, destaca-se as condições de usinagem dos Lotes A e D como os processos com melhor custo/benefício.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa são sugeridos:

- Pesquisar outros processos de polimento de liga de titânio, visando a melhoria da rugosidade e da produtividade.
- Pesquisar usinagem por fresamento em tecnologia de ultraprecisão aplicada a ligas de titânio visando obter menores rugosidades antes do polimento,
- Pesquisar usinagem com ferramentas de diamante industrial aplicada a fresamento, visando diminuir tempo de polimento
- Pesquisar processos não convencionais de usinagem, visando obter rugosidades inferiores a micrométrica;
- Pesquisar usinagem em ligas de titânio em tecnologia de alta velocidade de corte (HSM) e sua influência na rugosidade;
- Pesquisar aplicações de banhos químicos e eletroquímicos em superfícies de ligas de titânio usinada visando diminuir a rugosidade.

6 Referência Bibliográfica

- ANTONIALLI, A. I. S. **Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- ASTAKHOV, V. P. **Metal Cutting Mechanics**. Boca Raton: CRC, 1999.
- ASTAKHOV, V. P. **Tribology of metal cutting**. Oxford: Elsevier, 2006.
- BARKSDALE, J.; **Titanium its occurrence, chemistry and technology**. 2.ed. New York: Theronald, 1966.
- BHAUMIK, S. K; DIVAKAR, C.; SINGH, A. K. Machining Ti -6Al-4V alloy with a wBN-cBN composite tool. **Materials & Design**, [s.n.], v. 16, n. 4. p. 221-226, 1995.
- BOLLEN, C.M., LAMBRECHTS, P., QUIRYNEN, M. Comparison of. The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-implant mucosistis. *Clin Oral Implants Res*, Copenhagen, v.7, n.3, p.201-211, Sept. 1996.
- BOLLEN, C.M., LAMBRECHTS, P., QUIRYNEN, M. The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-implant mucosistis. *Clin Oral Implants Res*, Copenhagen, v.7, n.3, p.201-211, Sept. 1996.
- BOLLEN, C.M., LAMBRECHTS, P., QUIRYNEN, M. Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: A review of the literature. *Dent Mater*, Oxford, v.13, n.7, p.258-269, 1997.
- BOYER, R. R.; WELSCH, G.; COLLINGS, E. W. **Materials properties handbook: titanium alloys**. Materials Park: ASM International, 1994. 1176 p.
- BRAGA, Neila de Almeida; FERREIRA, Neidenêi Gomes; CAIRO, Carlos Alberto Alves. Obtenção de titânio metálico com porosidade controlada por metalurgia do pó. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 30, n. 2, Apr. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000200037&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- BRÄNEMARK, P. I.; ZARB, G. A.; ALBREKTSSON, T. **Tissue-Integrated Prostheses: osseointegration in clinical dentistry**. Chicago: Quintessence, 1985. 350 p.
- CHOI, B.K.; JERARD, R.B. **Sculptured Surface Machining: Theory and applications**. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 368 p.

- CRAIG, R.G. (Ed.) *Restorative dental materiais*. 10th ed. Saint Louis : Mosby, 1996. p.56-103, 408-436, 500-551.
- DANA, J. D. **Manual de mineralogia**. Rio de Janeiro: LTC, 1969.
- DIETER, G.E. *Metalurgia mecânica*. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981. Cap.12, p.345-384.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**. 2012. Disponível em: <https://sistemas.dnmp.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7366>. Acesso em: 11 jun. 2013.
- DEPARTMENT OF DEFENSE MANUFACTURING TECHNOLOGY PROGRAM. Disponível em: <<https://www.dodmantech.com/award/CY03/index.asp?main=award>>. Acesso em: 15 maio 2013.
- DESTEFANI, J. D. Introduction to Titanium and Titanium Alloys. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook**: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special: Purpose Materials. 10 ed. Materials Park: ASM International, 1990. v. 2, p. 586-591.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N .L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber, 2003. 248 p.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N .L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2001.
- DONACHIE, J. R. **A technical guide**. 2th. Metals Park: ASM International, 1989. 469 p.
- EDWARDS, R. **Cutting Tools**. Londres: The Institute of Materials, 1993.
- ELIAS, C. N. Limpeza e Preparação de Superfície de Implantes Osseointegráveis Máster Screw. **Revista Brasileira de Implantodontia**, Rio de Janeiro, v .5, n.2, p.10-12, 1999.
- EZUGWU, E.O.; WANG, Z.M. Titanium alloys and their machinability: a review. **Journal of Material Processing Technology**, [s.n.], v. 68, p. 262-274, 1997.
- FARIAS, A. de; DELIJAICOV, S.; BATALHA, G. F. Avanços na Usinagem de Ligas de Titânio. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul: [s.n.], 2011.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgar Blucher, 1977. 751 p.

- FERREIRA, I., COSTA, N.G., TOKIMATSU, R.C. *Biomateriais: fadiga dos metais*. [s.l. : s.n.], 1998. p.32-34.
- FLOM, D. G.; KOMANDURI, R. High-speedmachining. In: DAVIS, J. R. (Ed.). *Metalshandbook: machining*. 9. th. Ohio: ASM, 1989. v. 16, p. 597-606.
- HENRIQUES, G.E.P. Desempenho clínico de infra-estruturas de próteses removíveis em titânio comercialmente puro, ligas de titânio alumínio vanádio e cobalto cromo: a deformação plástica de grampos e rugosidade superficial. Piracicaba, 2000. 143p.Tese (Livre Docência) - Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Universidade Estadual de Campinas.
- HUNTER, M. A.; MetallicTitanium. **J. AM.CHEM. Soc.**, [s.n.], v. 32, n. 3, p. 330-336, 1910.
- INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Nanotecnologia gera melhores próteses com liga de titânio**. 2003. Disponível em: <<http://www.inovacao tecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010160031105>>. Acesso em: 18 jun. 2013.
- KNOLL, P. K.; SCHAEFFER, L. Análise microestrutural da liga de titânio $\alpha+\beta$, ti-6al-4v, forjada a quente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [s.n.], 2006, p. 7740-7451.
- KROLL, W. The production of ductileTitanium. **Trans. Electrochem. Soc.**, [s.n.], v. 78, n.1, p. 35-47, 1940.
- KRONEMBERG, M. **Machinings ciencia and application**: theory and pratice for aperationand development of machining process. Oxford: Pergamon, 1996.
- MACHADO, A. R.*et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 2009, 371 p.
- MACHADO, Á. R.; WALLBANK, J. Machining of titanium and its alloys: A review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, [s.n.], v. B204, n. 1, p. 53-60, 1990.
- MERCHANT, M. E. Mechanics of the metal cutting process. **Journal of Applied Physics**, [s.n.], v. 16, p. 267-275, 1945.
- METALS HANDBOOK. **MACHINING**. Materials Park: ASM International, 1989. 944 p.
- QUIRYNEN,1994 The clinicaí meaging of the surface roughness and the surface free energy of intra-oral hard substrata on the microbiology of the supra and subgengival plaque: results of in vitro and in vivo experiments. *J Dent Res*, Washington, v.22, n.1, p.13-16, Oct. 1994.

- RAHMAN, M.; WANG, Z. G.; WONG, Y. S. A review on high-speed machining of titanium alloys. **JSME International Journal**, [s.n.], v. 49, n. 1, p. 11-20, 2006.
- RAHMAN, M.; WONG, Y.S.; ZAREENA, A.R. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Material Processing Technology**, [s.n.], v. 134, p. 233-253, 2003.
- RUSSEL, M.M, MAY, K.B., RAZZOOG, M.E. Polishing sequence for titanium using dental armamentarium: a pilot study. *Jmplant Dent*, Baltimore, v.2, n.2, p.117-121, Summer 1993.
- RYAN, G.; PANDIT, A.; APATSIDIS, D. P. Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications. **Biomaterials**, [s.n.], v. 27, p. 2651-2670.
- SCHAEFFER, L. **Forjamento**: introdução ao processo. Porto alegre: Imprensa Livre, 2001.
- Schulz, H. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Germany, München: Carls Hanser Verlag, 1996. 286 p. ISBN 3-446-18796-0
- SECO. **Fundamentos do fresamento**. Sorocaba: Seco, 2011.
- SILVA, J. C.; Furukita, S. K.; Oliveira, T. V. Análise Comparativa de Superfície de Cinco Implantes de Ósseo-Integração. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ODONTOLOGIA, 13., 2000, Ponta Grossa, **Anais...** Ponta Grossa: [s.n.], p. 27.
- SILVA, R. B. da *et al.* Aumentando a produtividade no torneamento da liga Ti-6Al-4V com acesso à HSM por meio da técnica de aplicação de fluido à alta pressão. In: POSMEC - SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 14., 2004, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: FEMEC/UFU, 2004. p. 1-9. Disponível em: <<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/14/TRB/TRB1436.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2013.
- SOUZA, S.A. Ensaio mecânicos de materiais metálicos. 4.ed. São Paulo: E. Blücher, 1974. Cap.8, p.130-156
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 4. ed.. Florianópolis: UFSC, 1995. 249 p.
- SYVERUD, M., OKABE, T., HER, H. Casting of Ti-6Al-4V alloy compared with pure Ti in an Ar-arc casting machine. *Eur J Oral Sei*, Copenhagen, v.1 03, n.5, p.327 - 330, May 1995.
- TITANIUM INDUSTRIES. c2013. Disponível em: <<http://www.titanium.com/>>. Acesso em: 15 maio 2013.

- TRANTER. Disponível em: <<http://www.tranterphe.com/phe/PDFs/UM-1A%20Portuguese.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2013
- TREND, E .M. **Metal Cutting**. 2th. London: Butterworths, 1984.
- WILLIAMS, .J. G.; PATEL, Y; BLACKMAN, B. R. K. A fracture mechanics Analises off Cutting and Machining. **Engeneering Fracture Mechanics**, [s.n.], v. 77, p. 293-308, 2010.
- YILDIZ, Y.; NALBANT, M. A Review of Cryogenic Cooling in MachiningProcess. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, [s.n.], v. 48, p. 947-964, 2008.