UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEONILDO BERNARDO PIVOTTO

**Aplicação de insertos de metal duro com diferentes acabamentos no torneamento da liga
Ti-15Mo**

SÃO CARLOS – SP

2020

LEONILDO BERNARDO PIVOTTO

**Aplicação de insertos de metal duro com diferentes acabamentos no torneamento da liga
Ti-15Mo**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Projeto, Materiais e Manufatura

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Carlos Eiji Hirata
Ventura

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.

A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-
SE DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA
EESC-USP.

SÃO CARLOS – SP

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P579a Pivotto, Leonildo Bernardo
Aplicação de insertos de metal duro com
diferentes acabamentos no torneamento da liga Ti-15Mo /
Leonildo Bernardo Pivotto; orientador Carlos Eiji
Hirata Ventura. São Carlos, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de
Concentração em Projeto, Materiais e Manufatura --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2020.

1. Usinagem. 2. Desgaste. 3. Vida de ferramenta.
4. Ti-15Mo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Tecnólogo **LEONILDO BERNARDO PIVOTTO.**

Título da dissertação: "Aplicação de insertos de metal duro com diferentes acabamentos no torneamento da liga Ti-15Mo".

Data da defesa: 24/07/2020

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Dr.-Ing. **Carlos Eiji Hirata Ventura**
(Orientador)
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Prof. Dr. **Daniel Iwao Suyama**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Dr. **Rodrigo Lima Stoeterau**
(Escola Politécnica – EP/USP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Carlos de Marqui Junior**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

DEDICATÓRIA

Aos meus avós, Maria, Leonildo, Maria José e João Bernardo. Que mesmo sem formação universitária se orgulhavam da dedicação e esforço dos netos.

Ao eterno amigo dos tempos de Unesp, Jailison Silveira, analista do Tesouro Nacional e coordenador geral de modelagem econômica na Secretaria de Política Econômica, que nos deixou tão precocemente em 2020.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Cida e Claudio, e irmãs Bruna e Nathália, pelo carinho e compreensão da distância e falta de tempo para visitas e bons momentos juntos.

Ao meu orientador e colega de trabalho Carlos Ventura, pela dedicação e acompanhamento do projeto desde o início até o seu fim. Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Manufatura Inteligente, os alunos Aristóteles, Denis, Denny, Bruno, Michele e Savella, pelas contribuições e discussões sobre o tema.

À chefia do departamento de engenharia mecânica da UFSCar e seus membros, pelo apoio de diferentes tipos e confiança no desenvolvimento desse projeto. Em especial Marcos, Djalma, Hugo, Samira, Janaína, Marilda, Vitor, Armando, Luis, Bruce, Rafael Aroca e Mariano. Aos colegas do departamento de engenharia elétrica, Heitor, Zé Roberto, Vanusa, Daniel e Rafael.

Ao carinho e amor mais que especial de Lidiane, que eu tive a imensa felicidade de conhecer na reta final desse trabalho.

Aos alunos da graduação em engenharia mecânica e da equipe de extensão Baja. Impossível nomear todos aqui, mas que muito contribuíram através de suas dúvidas para que a escrita do texto fosse a mais clara possível.

À amizade de Agnaldo, Leandro, André, Aleksei, Diogo, Renan, André Lima, Eduardo, Fernando, Michael, Renato, Vinícius, Gian, Denis Vinícius Zaneti, Moab, Claudio, Alexandre, Fernando Oliveira, Marcelo, Larissa, Josi e Ana Rita.

À Fapesp, pelo financiamento dos equipamentos e materiais utilizados.

RESUMO

PIVOTTO, L. B. Aplicação de insertos de metal duro com diferentes acabamentos no torneamento da liga Ti-15Mo. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

As ligas de titânio possuem propriedades que permitem aplicações nas áreas médica e aeroespacial e as diferenciam de outros metais. Desde o fim do século XX, as ligas titânio-molibdênio têm sido frequentemente aplicadas na fabricação de próteses em razão de sua elevada biocompatibilidade e resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade e boa resistência à corrosão. Em contrapartida, tais características fazem dessas ligas materiais de difícil usinabilidade, resultando em um processo de fabricação de alto custo e baixa produtividade. Neste contexto, pesquisas recentes têm buscado condições de corte que levem à melhoria da integridade superficial do componente usinado e a uma maior vida da ferramenta, o que também pode ser conseguido por meio de uma ferramenta adequada não apenas em termos de material, mas de características superficiais. Assim, este trabalho possui como objetivo relacionar o acabamento de insertos de metal duro retificados com seu desempenho no torneamento da liga Ti-15Mo, analisando-se os tipos e mecanismos de desgaste da ferramenta. Foram comparados insertos retificados com rebolos de diamante com ligante resinoide e tamanho de grão de 15 μm e 46 μm . Após o torneamento e análise dos resultados obtidos, observou-se que insertos retificados com rebolo de menor tamanho de grão possuem melhor acabamento e levam a menores níveis de desgaste da ferramenta, sendo os principais mecanismos causadores a adesão e a difusão.

Palavras-chave: Usinagem. Desgaste. Vida da ferramenta. Ti-15Mo.

ABSTRACT

PIVOTTO, L. B. Application of cemented tungsten carbide inserts with different finishing conditions in turning of Ti-15Mo alloy. 2020. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2020.

Titanium alloys have properties which allow applications in the medical and aerospace fields and differentiate them from other metals. Since the end of the 20th century, titanium-molybdenum alloys have been frequently used in the manufacture of prostheses, due to their high biocompatibility and mechanical strength, low elastic modulus, and good corrosion resistance. In contrast, such characteristics make these materials difficult to machine, resulting in a high cost manufacturing process, with low levels of productivity. Within this context, recent research has sought cutting conditions that lead to an improved surface integrity of the machined component and a longer tool life, which can also be achieved through appropriate tool materials and tool surface characteristics. Thus, this work aims to relate the finishing of ground cemented tungsten carbide inserts to their performance in turning of Ti-15Mo alloy, analyzing types and mechanisms of tool wear. Cutting inserts ground with resin bonded diamond grinding wheels with grain size of 15 μm and 46 μm were compared. After turning and analyzing the obtained results, it was observed that inserts ground with the finer grinding wheel have a better surface quality and lead to lower levels of tool wear, mainly caused by adhesion and diffusion mechanisms.

Keywords: Machining. Wear. Tool life. Ti-15Mo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Configuração das fases α e β do titânio	18
Figura 2	Micrografia da liga Ti c.p. grau 1	19
Figura 3	Micrografia da liga Ti-6Al-4V	20
Figura 4	Exemplos de aplicações da liga Ti-6Al-4V	21
Figura 5	Micrografia da liga Ti-15Mo	21
Figura 6	Diagrama de fases Ti-Mo	22
Figura 7	Principais tipos de desgaste de uma ferramenta de corte	26
Figura 8	Parâmetros para medição de desgaste de ferramentas de corte	27
Figura 9	Curva clássica de desgaste de ferramenta	28
Figura 10	Diagrama clássico de mecanismos de desgaste das ferramentas de corte	32
Figura 11	Distribuição de temperatura na interface ferramenta-cavaco	33
Figura 12	Formação de cavaco segmentado na usinagem do Ti-6Al-4V	34
Figura 13	Rugosidade da superfície usinada em função do comprimento e da velocidade de corte	36
Figura 14	Desgaste da superfície de saída em diferentes condições de corte com lubrificação abundante ($f = 0,15$ mm/rot e $a_p = 0,5$ mm)	37
Figura 15	Detalhe do desgaste da superfície de saída com usinagem a seco ($v_c = 120$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot e $a_p = 0,5$ mm)	38
Figura 16	Gráficos de desgaste de flanco e rugosidade após usinagem da liga Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo a seco e com diferentes parâmetros	39
Figura 17	Imagem indicando presença de processo de difusão no torneamento de Ti-6Al-4V	40
Figura 18	Desgastes obtidos no torneamento de duas ligas de titânio	41
Figura 19	Representação do fluxo de cavaco com relação ao sentido da retificação do inserto	42

Figura 20	Especificação do parâmetro R_{sk}	43
Figura 21	Especificação do parâmetro R_{ku}	44
Figura 22	Representação dos parâmetros Δr e $W\Delta r$	45
Figura 23	Imagens externa e interna da retificadora CNC	48
Figura 24	Exemplo de medição dos parâmetros de rugosidade	48
Figura 25	Exemplo de medição dos parâmetros de irregularidade na aresta	49
Figura 26	Método de caracterização da topografia do rebolo	50
Figura 27	Croqui do corpo de prova de Ti-15Mo (medidas em mm)	51
Figura 28	Detalhe de medição de desgaste de flanco	52
Figura 29	Detalhe da medição do comprimento de contato entre cavaco e ferramenta	53
Figura 30	Exemplo de imagem utilizada para medição de volume de adesão de material na ferramenta	53
Figura 31	Exemplo de gráfico da corrente do motor com indicação do trecho com os valores medidos (intervalo de 5 a 12 segundos)	54
Figura 32	Valores médios de R_z para os insertos retificados com rebolos de diferentes tamanhos de grão	55
Figura 33	Valores médios de S_{pk} para rebolos com diferentes tamanhos de grão	56
Figura 34	Forças atuantes durante a retificação com rebolos de diferentes tamanhos de grão	57
Figura 35	Valores médios de R_{sk} para os insertos retificados com rebolos de diferentes tamanhos de grão	58
Figura 36	Valores médios de R_{ku} para os insertos retificados com rebolos de diferentes tamanhos de grão	59
Figura 37	Valores médios de Δr e $W\Delta r$ para os insertos retificados com rebolos de diferentes tamanhos de grão	59
Figura 38	Indicação dos mecanismos de desgaste no inserto retificado com rebolo D15	61

Figura 39	Imagens das ferramentas após o fim dos ensaios (remoção de um volume total aproximado de 16.500 mm ³)	62
Figura 40	Comprimento médio de contato do cavaco com a superfície de saída de insertos com diferentes acabamentos	64
Figura 41	Volume médio de material aderido aos insertos com diferentes acabamentos	65
Figura 42	Evolução da curva de desgaste de flanco de insertos com diferentes acabamentos	67
Figura 43	Potência de corte em função do volume de material removido na aplicação do inserto preparado com rebolo D15	69
Figura 44	Potência de corte em função do volume de material removido na aplicação do inserto preparado com rebolo D46	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio	23
Tabela 2	Comparação de propriedades mecânicas de alguns biomateriais metálicos com o osso	25
Tabela 3	Critérios de fim de vida de ferramenta de acordo com a norma ISO 3685	27

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Al	alumínio
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
a _p	profundidade de usinagem (mm)
APC	Aresta Postiça de Corte
°C	graus Célsius
C	carbono
CBN	nitreto cúbico de boro
CCC	estrutura cúbica de corpo centrado
Co	cobalto
c.p.	comercialmente puro
f	avanço (mm/rot)
GPa	giga pascal
HC	estrutura hexagonal compacta
KT	profundidade de cratera
lc	comprimento de corte
MPa	mega pascal
Mo	molibdênio
Nb	nióbio
PCD	diamante sintético policristalino
Rku	achatamento do perfil de rugosidade
Rsk	inclinação do perfil de rugosidade
Rz	rugosidade média (μm)

Sn	estanho
Spk	altura média dos picos (μm)
Ta	tântalo
Ti	titânio
t_c	tempo de corte (min)
TiN	nitreto de titânio
V	vanádio
VB_B	desgaste de flanco médio
$VB_{B\text{máx}}$	desgaste de flanco máximo
VB_N	desgaste de entalhe
v_c	velocidade de corte (m/min)
v_{cd}	velocidade tangencial do dressador (m/s)
v_{fa}	velocidade de avanço do rebolo (mm/min)
v_{fd}	velocidade de avanço do dressador (m/s)
W	tungstênio
WC-Co	carboneto de tungstênio ao cobalto
Zr	zircônio
α	liga fase α
$\alpha + \beta$	liga alfa-beta
β	liga fase β
Δr	distância entre o ponto de intersecção das superfícies de folga e saída e a aresta real de corte (μm)
$w\Delta r$	largura da aresta real (μm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Ligas de titânio	18
2.2	Usinabilidade do titânio	25
2.3	Efeitos do acabamento da ferramenta sobre a usinagem	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	Retificação dos insertos de corte e sua caracterização	47
3.2	Ensaio de torneamento	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Caracterização dos insertos de corte	55
4.2	Torneamento da liga Ti-15Mo	60
5	CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O avanço das indústrias aeronáutica e de equipamentos médicos ao longo do século XX ajudou a impulsionar o crescimento de diferentes campos da engenharia. Diante das necessidades impostas por questões de segurança e de desempenho, inúmeros campos da ciência e da pesquisa se dedicaram à criação de novos materiais e processos produtivos e ao aperfeiçoamento dos já existentes (ASKELAND e PHULÉ, 2008; GROOVER, 2013). Duas áreas da engenharia que sofreram forte impacto desse processo foram a ciência dos materiais e os processos de fabricação mecânica.

A necessidade de melhorias no desempenho das aeronaves contribuiu para o surgimento de novos materiais, que fossem ao mesmo tempo leves e resistentes o suficiente para suportar diversos esforços mecânicos. Com o advento dos motores movidos à turbina a gás (mais conhecidos como motores a reação), as aeronaves passaram a fazer uso de ligas metálicas capazes de suportar as elevadas temperaturas de trabalho e que ao mesmo tempo possuíssem uma relação resistência/peso vantajosa suficiente com relação a outros aços resistentes, como as ligas de aços inoxidáveis (CAMPBELL, 2006). Dois grupos de ligas metálicas que se destacaram nessas aplicações são as ligas de níquel e as ligas de titânio.

O titânio oferece alta resistência mecânica e boas propriedades em elevadas temperaturas, suprimindo parte importante das exigências da indústria aeroespacial (BOYER, 1996), podendo ser aplicado em componentes estruturais (nervuras do trem de pouso) e peças de motores a jato (rotor, impulsor, bases de fixação dos motores nas asas). Já características como elevada resistência à corrosão e biocompatibilidade possibilitam a aplicação dessas ligas na produção de próteses ortopédicas, implantes dentários e dispositivos cardiovasculares, apresentando desempenho superior a outros materiais metálicos, como aços inoxidáveis e ligas à base de cobalto (NIINOMI, 2008; KAUR e SINGH, 2019). Segundo estimativas, desde que foram introduzidas na indústria em 1947, mais de mil toneladas de componentes de titânio foram implantados anualmente em pacientes nas áreas de ortopedia, implantes dentários e cirurgias buco-maxilo-faciais em todo o planeta (AZEVEDO, 2003).

Além da necessidade de materiais resistentes, as indústrias aeronáutica e de equipamentos médicos demandam processos de fabricação que garantam precisão, acabamento e confiabilidade de seus componentes. Um conjunto de processos de fabricação muito útil para atender tais requisitos são os processos de usinagem, baseados na remoção de material com o uso de determinadas ferramentas e máquinas, possibilitando a obtenção de

perfis complexos com tolerâncias apertadas (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2013; FERRARESI, 1970; MACHADO et al, 2011). Entretanto, ao mesmo tempo em que as ligas de titânio possuem propriedades que permitem aplicações especiais na indústria, tais ligas apresentam características que tornam difícil sua usinabilidade. Fatores, como elevada reatividade química, afinidade com certos materiais de ferramentas, baixa condutividade térmica, elevado expoente de encruamento, elevada ductilidade e alta resistência mecânica, resultam em processos de usinagem com desgaste acelerado de ferramentas, elevados esforços de corte e baixa produtividade (ANTONIALLI, 2009; EZUGWU e WANG, 1997; EZUGWU et al, 2017; LIANG, LIU e WANG, 2019; SILVA, 2016).

Na tentativa de se melhorar a usinabilidade destas ligas, a aplicação de diferentes materiais de ferramenta tem sido investigada, mas estudos sobre a influência de seu acabamento, comumente realizado por processo de retificação, não foram encontrados. A preparação da ferramenta pode contribuir para a melhoria da usinabilidade quando analisada na perspectiva de sua integridade e durabilidade, pois possui o potencial de reduzir a adesão e o atrito na superfície de folga, evitar lascamentos na aresta e facilitar o fluxo de cavaco sobre a superfície de saída.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo a obtenção de uma correlação entre diferentes acabamentos de insertos de metal duro obtidos por processo de retificação em termos de superfícies e aresta e a vida da ferramenta no torneamento da liga de titânio beta Ti-15Mo. Pretende-se, com isso, contribuir para a melhoria dos processos de usinagem dessas ligas metálicas através da preservação da vida de ferramenta. Importante destacar a relevância na possibilidade de redução do preço e elevação da qualidade para o consumidor final, principalmente para produtos da área médica. Estima-se que até o ano de 2030 ocorram em torno de 3,48 milhões de procedimentos para a substituição e implantação de novas próteses de joelho, enquanto 572 mil procedimentos são esperados para próteses de quadril, apenas nos Estados Unidos (KAUR e SINGH, 2019).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Ligas de titânio

O processamento e obtenção de titânio ocorrem através do chamado processo *Kroll*. O dióxido de titânio é convertido em tetracloreto de titânio e, em seguida, reduzido a titânio metálico pela reação com sódio ou magnésio, resultando em um material com aparência porosa. São, então, introduzidos elementos de liga conforme a necessidade e ele é posteriormente fundido por fusão a arco sob vácuo (ASKELAND e PHULÉ, 2008). O titânio é um material com comportamento *alotrópico*, isto é, apresenta diferentes fases e estruturas cristalinas de acordo com sua composição e com a faixa de temperatura de transição, conforme apresenta a Figura 1. Em baixas temperaturas, o titânio se estabiliza na chamada fase alfa (α) e apresenta estrutura hexagonal compacta (HC), enquanto que acima de 882°C se estabiliza na chamada fase beta (β) e apresenta estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). A possibilidade de combinação com outros elementos químicos e a existência dessas duas fases, além de uma fase intermediária alfa-beta ($\alpha+\beta$), permitem que as ligas de titânio ofereçam uma ampla gama de propriedades mecânicas para diferentes aplicações (PETERS et al, 2003).

Figura 1 – Configuração das fases α e β do titânio

Fonte: Peters et al (2003).

As ligas de titânio alfa apresentam como estabilizadores de fase os elementos oxigênio, ferro, alumínio e estanho. Nessa categoria, encontramos o chamado titânio comercialmente puro (c.p.), com diferentes graus de classificação de acordo com as

composições das ligas, principalmente o teor de oxigênio. A Figura 2 apresenta a micrografia da liga comercialmente pura de grau 1.

Figura 2 – Micrografia da liga Ti c.p. grau 1

Fonte: Ho (2008).

O titânio comercialmente puro apresenta características como elevada resistência à corrosão e boa ductilidade, o que facilita o trabalho de deformação a frio, mas possui baixa resistência mecânica quando comparado com outras ligas desse metal. Seu limite de resistência à tração varia de 240 a 550 MPa (grau 1 a 4). Na área industrial, é utilizado principalmente em equipamentos para processos químicos, extração e refino de petróleo e gás, enquanto na área médica tem sido aplicado na fabricação de dispositivos cardiovasculares e componentes de fixação da coluna (PETERS et al, 2003; RACK e QAZI, 2006). Na configuração alfa, encontramos também ligas com diferentes teores de alumínio (Ti-5Al-2.5Sn, Ti-3Al-2.5V), que apresentam boas características de resistência à tração, fluência, tenacidade à fratura e ductilidade, mesmo em baixas temperaturas. São aplicadas em vasos de pressão, sistemas de armazenamento em condições criogênicas e em ambientes corrosivos (ANTONIALLI, 2009; EZUGWU e WANG, 1997).

O titânio na configuração alfa-beta é a liga mais utilizada desde a sua criação, na década de 1950. Ao unir as características das duas fases através de diferentes combinações dos elementos estabilizadores, ela apresenta de forma equilibrada propriedades importantes das duas estruturas cristalinas. Possui valores de resistência à tração entre 860 e 965 MPa,

superiores aos 550 MPa da liga c.p. grau 4 (alfa) e 874 MPa da liga Ti-15Mo (beta). Apresenta a mesma característica superior com relação ao limite de escoamento, com valores entre 795 e 875 MPa contra 485 MPa da liga alfa e 544 MPa da liga beta citadas (LUO, YANG e TIAN, 2008). A Figura 3 apresenta a micrografia da liga Ti-6Al-4V.

Figura 3 – Micrografia da liga Ti-6Al-4V

Fonte: Ho (2008).

Dentre as ligas disponíveis, a mais produzida e aplicada é a Ti-6Al-4V, principalmente para componentes aeroespaciais (CAMPBELL, 2006). Apresenta boa relação resistência/peso, elevada resistência mecânica, com limite de resistência à tração entre 900 e 1200 MPa após tratamento térmico, preservação das propriedades mecânicas mesmo em altas temperaturas (na faixa de 315°C a 400°C) e elevada dureza. Por apresentar boa resistência à corrosão, biocompatibilidade e alongamento superior ao titânio alfa, também é utilizada na fabricação de componentes para próteses ortopédicas (BOYER, 1996; EZUGWU, BONNEY e YAMANE, 2003; RACK e QAZI, 2006). A Figura 4 apresenta algumas aplicações dessa liga nas áreas médica e aeroespacial.

Figura 4 – Exemplos de aplicações da liga Ti-6Al-4V

Fonte: Adaptado de Liang, Liu e Wang (2019).

Já as ligas de titânio beta possuem como elementos estabilizadores nióbio, tântalo, molibdênio e vanádio, que ajudam a reduzir a temperatura de transição para a obtenção da estrutura CCC. Embora seja mais denso e com um custo de produção maior, o titânio beta apresenta propriedades mecânicas superiores quando comparado às outras configurações deste metal (TERLINDE e FISHCER, 2003). A Figura 5 apresenta a micrografia da liga Ti-15Mo.

Figura 5 – Micrografia da liga Ti-15Mo

Fonte: Ho (2008).

Conforme a Figura 6, o sistema binário Ti-Mo apresenta uma importante faixa de composição onde estão presentes as fases alfa e beta. Na faixa de 3 a 5% de molibdênio encontra-se a chamada fase α' (martensita), com estrutura cristalina hexagonal. Na composição 6% de molibdênio, forma-se a fase chamada α'/α'' (martensita), com configuração hexagonal e ortorrômbica. Com 7,5% de molibdênio, a liga apresenta α'' e configuração ortorrômbica. Com composição de 9% de molibdênio, o material possui a fase α''/β e estrutura ortorrômbica e cúbica de corpo centrado. Já as ligas que possuem de 10 a 20% de molibdênio possuem fase β em estrutura cúbica de corpo centrado (FREITAS, 2005).

Figura 6 – Diagrama de fases Ti-Mo

Fonte: Freitas (2005 adaptado, apud ASM 1971)

Como características principais das ligas beta, podem-se destacar elevada resistência mecânica (é possível atingir um limite de resistência à tração de 1150 MPa com tratamento térmico), elevada resistência à corrosão (principalmente com ligas à base de molibdênio), preservação de propriedades mecânicas em altas temperaturas, biocompatibilidade, resistência ao desgaste, tenacidade e boa conformabilidade, tanto a quente quanto a frio. Essas são algumas das características que fizeram as ligas betas ganharem mais espaço na indústria nas últimas décadas. Em aplicações aeroespaciais, são encontradas em componentes de fuselagem

de aviões, peças de motores a reação, componentes de trem de pouso e rotores de helicópteros. Devido à elevada resistência à corrosão, também são aplicadas em equipamentos para extração de gás e petróleo (BOYER, 1996; RACK e QAZI, 2006; TERLINDE e FISHCER, 2003). A Tabela 1 permite uma comparação de algumas propriedades, com exemplos dos três tipos de liga (alfa, alfa-beta e beta).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio

Liga de Titânio	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Fase
c.p. grau 1	240	170	102,7	24	α
c.p. grau 2	345	275	102,7	20	α
c.p. grau 3	450	380	103,4	18	α
c.p. grau 4	550	485	104,1	15	α
Ti-6Al-4V	860-965	795-875	101-110	10-15	$\alpha+\beta$
Ti-6Al-7Nb	900-1050	880-950	114	8,1-15	$\alpha+\beta$
Ti-15Mo	874	544	78	21	β
Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr	911	864	80	13,2	β

Fonte: Adaptado de Luo, Yang e Tian (2008).

Nas últimas décadas, as ligas de titânio beta têm conquistado mais espaço em aplicações médicas, apesar do custo mais elevado de fabricação. A biocompatibilidade presente no titânio é uma propriedade que poucos materiais metálicos possuem, sendo de extrema importância para a produção de próteses ortopédicas, implantes odontológicos e dispositivos cardiovasculares. Tal característica pode ser definida como a capacidade de um

material de desempenhar a função desejada no corpo humano sem provocar reações adversas ou indesejadas, gerando o máximo de resposta celular ou tecidual benéfica (LUO, YANG e TIAN, 2013; KAUR e SINGH, 2019).

O titânio em seu estado puro é considerado inerte e seguro para aplicações médicas, mas precisa estar combinado com outros elementos químicos para garantir as propriedades mecânicas desejadas para essas aplicações, como baixo módulo de elasticidade, resistência à corrosão, tenacidade, alongamento e resistência à tração. Contudo, estudos apontam que a presença de alumínio e vanádio, presentes na popular liga alfa-beta Ti-6Al-4V, pode trazer uma série de impactos negativos para o corpo humano. Atualmente, sabe-se que a presença de vanádio está relacionada a problemas intestinais, perda de peso e possibilidade de desenvolvimento de câncer devido ao seu caráter tóxico. Já a presença de alumínio está relacionada ao desenvolvimento de problemas motores e neurológicos, inclusive Alzheimer (KAUR e SINGH, 2019; NIINOMI, NAKAI e HIEDA, 2012).

Outra característica bastante desejada para a fabricação de próteses é um baixo valor do módulo de elasticidade do biomaterial, idealmente o mais próximo possível do módulo de elasticidade do osso. Tal propriedade é necessária para se evitar o fenômeno conhecido como *stress shielding* (KAUR e SINGH, 2019; NIINOMI, 2008, NIINOMI, NAKAI e HIEDA, 2012). Quando o osso e o material da prótese possuem módulos de elasticidade muito incompatíveis, existe uma distribuição não homogênea das cargas mecânicas no conjunto conforme o uso pelo paciente, podendo levar a um afrouxamento do implante ou novas fraturas no osso. Como as ligas betas possuem os menores módulos de elasticidade entre as possíveis configurações do titânio, a aplicação deste material seria uma possibilidade de diminuir tal problema. A Tabela 2 compara os valores de algumas propriedades mecânicas do osso com outros metais biocompatíveis.

Tabela 2 – Comparação de propriedades mecânicas de alguns biomateriais metálicos e do osso

Material	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Osso (cortical)	70-150	30-70	15-30
Aço inoxidável	490-1350	190-690	200-210
Ligas a base de cobalto	655-1793	310-1586	210-253
Ligas de titânio	690-1100	585-1060	55-110

Fonte: Adaptado de Kaur e Singh (2019).

Diante do exposto, a liga Ti-15Mo tem se mostrado como alternativa para aplicações médicas, tanto por questões de desempenho mecânico quanto por evitar problemas de efeitos colaterais pela ausência de elementos químicos tóxicos. Contudo, essas mesmas propriedades mecânicas desejadas na aplicação do material podem se mostrar como obstáculos no momento de executar sua usinagem.

2.2 Usinabilidade de ligas de titânio

A usinabilidade pode ser definida pelo grau de dificuldade em se usar um determinado material através da avaliação de elementos envolvidos durante esse processo de fabricação, tais como acabamento superficial da peça, esforços e temperatura de corte, desgaste da ferramenta, forma do cavaco gerado e produtividade do processo. O desempenho desses parâmetros depende de fatores como características mecânicas, metalúrgicas e químicas do material usinado, material da ferramenta de corte e seu tipo de operação (corte contínuo ou intermitente, desbaste ou acabamento), parâmetros de usinagem utilizados (velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, etc.), rigidez da máquina e dos sistemas de fixação da peça e ferramenta, corte a seco ou com lubrificação/refrigeração (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2013). As ligas de titânio possuem características que tornam difícil sua usinabilidade, principalmente com relação a propriedades que afetam o desgaste e a vida da ferramenta.

O monitoramento e controle do desgaste e avarias das ferramentas de corte durante o processo de usinagem é um aspecto de grande importância para a qualidade final do componente fabricado. De acordo com a norma ISO 3685, desgaste pode ser definido pela alteração do formato original da ferramenta durante o corte como consequência da perda gradual e progressiva de material em proporções pequenas. Essa perda de material resulta em alterações de geometria e diminuição da massa da ferramenta. Os desgastes podem ocorrer tanto na superfície de folga (desgaste de flanco) quanto na superfície de saída (desgaste de cratera) da ferramenta. Já a avaria pode ser definida como um fenômeno repentino e inesperado causado por lascamento, quebra ou trinca da aresta de corte, podendo levar à perda parcial ou total de material na região da aresta. Um terceiro fenômeno que traz consequências para a vida da ferramenta é a alteração da geometria de corte por deformação plástica. Ocorre um deslocamento do material da ferramenta como resultado de elevadas tensões mecânicas e temperaturas atuantes nas superfícies da ferramenta (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2013; MACHADO et al, 2011). Além de definir os tipos de desgaste, a norma ISO 3685 define também os parâmetros utilizados para realizar suas medições e os critérios de fim de vida das ferramentas. As Figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, os tipos de desgaste e seus critérios de medição.

Figura 7 – Principais tipos de desgaste de uma ferramenta de corte

Fonte: Machado et al (2011).

Figura 8 – Parâmetros para medição de desgaste de ferramentas de corte

Fonte: Machado et al (2011).

Já a Tabela 3 apresenta os critérios de determinação de fim de vida da ferramenta, de acordo com a mesma norma ISO 3685.

Tabela 3 – Critérios de fim de vida de ferramenta de acordo com a norma ISO 3685

Parâmetro de desgaste	Critério
Profundidade de cratera (KT)	$0,06 + 0,3f$ (f é o avanço de corte em mm/volta)
Desgaste de flanco médio (VB_B)	0,3 mm
Desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$)	0,6 mm
Desgaste de entalhe (VB_N e VC_N)	1 mm

Fonte: Machado et al (2011).

Com o levantamento dos sucessivos valores de desgaste ao longo de um processo de usinagem, é possível construir um gráfico da evolução de desgaste em função do tempo ou do volume de material usinado e ter uma visualização do comportamento da vida da ferramenta

até atingir uma falha catastrófica. A Figura 9 apresenta o que a literatura chama de uma curva clássica de evolução de desgaste.

Figura 9 – Curva clássica de desgaste de ferramenta

Fonte: Groover (2013).

Segundo Groover (2013), uma curva de evolução de desgaste possui três trechos bem identificados. O período inicial, nos primeiros minutos de corte, apresenta um desgaste rápido e uniforme. Em seguida, tem-se a região de desgaste à taxa constante, onde a inclinação da curva é influenciada pelos parâmetros de corte e pelas propriedades do material usinado. Usinar um material mais duro ou aumentar a velocidade de corte, por exemplo, faz a inclinação da curva nesse trecho subir. E, por fim, tem-se a região da falha, que é o trecho em que a taxa de desgaste volta a acelerar e a eficiência do processo é reduzida.

Os desgastes das ferramentas de corte ocorrem em função de fenômenos físico-químicos definidos como mecanismos de desgaste, que se manifestam durante o processo de corte de acordo com a natureza do material usinado e das condições de usinagem. De forma geral, os mecanismos de desgaste sofrem influência principalmente da temperatura na região de corte, que por sua vez é influenciada pelos parâmetros de usinagem, principalmente a velocidade de corte. É possível verificar a existência de seis tipos de mecanismos de desgaste na literatura (FERRARESI, 1970; MACHADO et al, 2011; DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2013):

- **Abrasão:** É definida como o movimento relativo entre uma superfície dura e áspera e uma superfície mais macia, resultando em perda de material (desgaste) e formação de ranhuras devido às partículas duras ou protuberâncias rígidas que são forçadas e se movem ao longo da superfície sólida (AFFATATO e TRAINA, 2010; KLOCKE, 2011). Na usinagem, pode ocorrer devido à precipitação de partículas duras (óxidos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos) da peça ou do cavaco que entram em choque com a superfície de folga ou de saída da ferramenta. Caso o material da ferramenta possua a capacidade manter sua dureza mesmo com a elevação da temperatura, o impacto desse mecanismo de desgaste acaba sendo menos preponderante.

- **Aresta postiça de corte (APC):** Presente de forma mais frequente em baixas velocidades de corte, baseia-se na formação de uma camada de material removido da peça que adere à aresta de corte por meio de ligações atômicas e é endurecida a frio. Conforme esse processo se repete, forma-se uma aresta postiça na ferramenta que altera as forças de corte (o esforço de corte diminui, uma vez que a APC aumenta o ângulo efetivo de saída da ferramenta) e pode prejudicar o acabamento da superfície usinada (devido ao seu desprendimento da aresta). Ao atingir determinado tamanho, a tensão de cisalhamento é suficiente para mudar a zona primária de cisalhamento, levando ao rompimento da aresta postiça e arrancando partículas da superfície de folga da ferramenta. O mecanismo de formação de APC é fortemente afetado por condições de corte, de temperatura e de ductilidade do material.

- **Difusão:** É baseado na transferência de material em nível atômico entre a ferramenta e a peça e/ou o cavaco, ativado principalmente pela temperatura na zona de corte, duração do contato entre as partes e a afinidade química dos elementos dos materiais envolvidos. A zona de aderência (ou zona de fluxo) formada na interface ferramenta-cavaco garante tempo de contato e temperaturas elevadas o suficiente para ativar o processo difusivo. Esse processo de interação química é favorecido pela combinação de altas temperaturas com altas tensões de compressão. Conforme a zona de aderência é renovada devido à alta taxa de deformação durante a usinagem, o fluxo difusivo acaba sendo constante. Como esse processo ocorre em nível atômico, as regiões desgastadas produzidas possuem aparência lisa. Esse mecanismo de desgaste é frequentemente presente na usinagem de titânio, uma vez que durante sua usinagem ocorre elevada concentração de calor na ponta da ferramenta devido à baixa condutividade térmica desse metal.

- Adesão e arrancamento (*attrition*): Formação de um extrato metálico decorrente do contato entre duas superfícies que, ao ser rompido, arranca fragmentos microscópicos da superfície da ferramenta, os quais são arrastados junto o fluxo de material adjacente à interface. Pode apresentar conjuntamente formação de APC que, ao se romper, também arrasta grãos da ferramenta. É um mecanismo de desgaste favorecido pelo fluxo irregular de material e característico de baixas velocidades de corte, embora possa ocorrer na usinagem em velocidades altas quando combinado a outros fatores. Por ocorrer no nível dos grãos da ferramenta, as regiões desgastadas possuem aparência áspera.

- Oxidação: Processo químico favorecido por elevadas temperaturas e pela presença de ar e água contidos nos fluidos de corte. Os óxidos formados na ferramenta durante a usinagem são facilmente removidos por atrito, o que facilita o desgaste. Devido ao acesso do ar, a formação de óxidos acaba sendo mais comum na extremidade do trecho de contato entre ferramenta e cavaco.

A deformação plástica é caracterizada pelo deslocamento do material da ferramenta, tanto por consequência de elevadas tensões de compressão quanto por altas temperaturas. As tensões compressivas são máximas na extremidade da aresta de corte e decrescem até zero no ponto em que o cavaco perde contato com a superfície de saída. Como a aresta de corte é o trecho em que a cunha cortante é menos resistente, a ferramenta tende a sofrer desgaste de flanco e entrar em colapso. Já em decorrência de elevadas temperaturas, a resistência ao escoamento do material da ferramenta próximo à interface de contato é reduzida, levando ao cisalhamento do material da ferramenta junto com o cavaco e gerando uma cratera na superfície de saída. Sendo assim, a deformação plástica é mais comum na usinagem de materiais de elevada dureza e de alto ponto de fusão. Embora alguns autores tratem a deformação plástica como um tipo de mecanismo de desgaste (TRENT e WRIGHT, 1999; MACHADO et al., 2011), já que se trata de uma mudança na geometria da ferramenta que pode resultar em perda total da aresta de corte, outros autores a classificam como avaria (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2013), pois se trata de um fenômeno que remete a quebra repentina da ferramenta e não em perda gradual de material da aresta e das superfícies conforme define o conceito de desgaste.

Para Malakizadi et al (2020), modelos tribológicos de desgaste de ferramenta tentam estimar a taxa de desgaste em termos dos mecanismos subjacentes, como efeitos combinados dos mecanismos de adesão, difusão e abrasão. Para isso, são considerados não apenas

elementos de liga, microestrutura e propriedades mecânicas e químicas dos materiais da peça e da ferramenta, mas também parâmetros tribológicos presentes durante a mecânica de corte, como a temperatura, velocidade de deslizamento, irregularidades das superfícies e esforço nas regiões de contato. Ao analisar os mecanismos de desgaste de insertos de metal duro na usinagem de ligas de titânio, Olander e Heinrichs (2019) apontam que a evolução dos testes de deslizamento de superfícies contribuiu significativamente para o entendimento de mecanismos de desgaste de ferramentas de corte. Testes de corte reais podem ser complicados para interpretar dados e normalmente consomem grande quantidade material. Um teste de deslizamento simula as relações de contato entre a peça e ferramenta e entre cavaco e ferramenta. Uma vantagem desse tipo de teste é que ele pode ser interrompido para realizar análises das superfícies desgastadas e, em seguida, reiniciado com um posicionamento muito preciso, contribuindo para evitar dispersões.

De forma resumida, a Figura 10 apresenta o diagrama clássico que relaciona os tipos de mecanismos de desgaste mais recorrentes na aplicação de determinadas condições de usinagem. Segundo o diagrama, é possível verificar que a variação da temperatura de corte, ou os parâmetros que podem afetá-la diretamente, tem papel determinante no tipo de mecanismo de desgaste atuante na vida da ferramenta. Os mecanismos de adesão e abrasão são mais presentes em baixas temperaturas, enquanto que oxidação e difusão são presentes em elevadas temperaturas, sendo que a difusão cresce de forma acentuada com o aumento da temperatura. O diagrama também deixa evidente a elevação do desgaste total da ferramenta com a elevação da temperatura.

Figura 10 – Diagrama clássico de mecanismos de desgaste das ferramentas de corte

Fonte: Klocke (2011 adaptado).

O titânio é um elemento com elevada reatividade química, possuindo afinidade e forte tendência de reagir com os materiais mais usualmente utilizados na composição de ferramentas de corte, acarretando no fenômeno de difusão, a qual é potencializada pelas elevadas temperaturas na zona de corte no momento da usinagem. Como o titânio possui baixo valor de condutividade térmica (por volta de 1/7 da condutividade térmica do aço), a maior parte do calor fica concentrada na ponta da ferramenta e na região de interface ferramenta-cavaco, o que gera elevação do desgaste e adesão de partículas do material da peça na aresta de corte (EZUGWU e WANG, 1997; SILVA, 2016). A Figura 11 apresenta um gráfico comparativo da distribuição de temperatura entre cavaco e ferramenta na usinagem do aço 1045 e da liga Ti-6Al-4V.

Figura 11 – Distribuição de temperatura na interface ferramenta-cavaco

Fonte: Ezugwu e Wang (1997 adaptado, apud König 1979).

Ainda com relação à baixa condutividade térmica do titânio, o calor gerado na zona primária de cisalhamento e concentrado na ponta da ferramenta se propaga de forma irregular. Ao não se propagar para outras regiões do cavaco removido, a elevada temperatura reduz a resistência ao cisalhamento e eleva sua deformação, sendo que nas regiões do cavaco para as quais o calor não se propagou, a deformação é menos acentuada. Como consequência, a usinagem de titânio produz regiões do cavaco com diferentes intensidades de deformação, resultando em um cavaco segmentado e de espessura variada. Essa variação de esforços na deformação do material é conhecida como instabilidade termoplástica. Com relação à dinâmica da usinagem, ocorrem flutuações nos esforços de corte, carregamento cíclico na ferramenta e possibilidade de vibrações. No caso de ocorrência de vibrações, além da possibilidade de desgaste da ferramenta, pode haver deterioração no acabamento superficial da peça usinada. A combinação da instabilidade termoplástica com o baixo módulo de elasticidade e o elevado coeficiente de atrito na interface ferramenta-cavaco acentuam o carregamento cíclico na ferramenta e a variação da espessura do cavaco, resultando em uma usinagem com tensões concentradas e elevadas, principalmente na superfície de saída da ferramenta. Por fim, a capacidade do titânio em manter suas propriedades mecânicas mesmo em altas temperaturas e sua resistência à deformação plástica também contribuem para que

esse metal seja de difícil usinabilidade (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013; EZUGWU et al, 2017; RAHMAN, WANG e WONG, 2006). A Figura 12 apresenta o perfil do cavaco produzido na usinagem do Ti-6Al-4V com as indicações das regiões de baixa e alta deformação.

Figura 12 – Formação de cavaco segmentado na usinagem do Ti-6Al-4V

Fonte: Antonialli (2009 adaptado, apud Calamaz, Coupard e Girot, 2008).

A fim de proporcionar um desempenho satisfatório durante a usinagem, a ferramenta de corte deve possuir determinadas propriedades para garantir tanto as características desejadas da peça usinada quanto sua integridade física. De forma geral, é importante que a ferramenta utilizada suporte remover material em elevadas temperaturas (principalmente mantendo sua dureza), seja resistente ao atrito e ao desgaste, tenha tenacidade para resistir às oscilações dos esforços de corte, tenha boa condutividade térmica para dissipar o calor e seja quimicamente inerte. A escolha adequada dos parâmetros de corte, da geometria e do material da ferramenta são elementos que podem contribuir fortemente para a manutenção dessas propriedades (WYEN e WEGENER, 2010; EZUGWU et al, 2017; WANG e LIU, 2018). Além desses aspectos, é de grande importância para garantir a produtividade relacionar tais elementos com os custos de produção, principalmente no que se refere ao desgaste e descarte de ferramentas, tempo de fabricação e qualidade dos componentes produzidos.

Normalmente, a usinagem de titânio é realizada por ferramentas de metal duro (liga de carboneto de tungstênio e cobalto, WC-Co) sem revestimento, uma vez que a reatividade química do titânio e as elevadas temperaturas de usinagem potencializam o fenômeno da

difusão, fazendo com que o titânio da peça reaja com o titânio normalmente presente nas ferramentas revestidas (TiN e TiAlN). Embora o revestimento dessas ferramentas consiga criar uma barreira térmica na região de corte e diminuir o atrito na interface ferramenta-cavaco inicialmente, quando o desgaste da ferramenta atinge um ponto em que partes do revestimento são eliminadas, o desempenho da ferramenta diminui de tal forma que seu uso se torna inviável. A utilização de aço rápido não é recomendada devido à sua baixa resistência ao desgaste com relação ao titânio. Ferramentas cerâmicas apresentam elevado desgaste na usinagem de ligas de titânio devido tanto à reatividade química quanto à baixa tenacidade. Já as ferramentas de CBN e PCD, embora apresentem bom acabamento de usinagem, principalmente com altas velocidades de corte, apresentam taxas de desgaste que tornam seu uso inviável pelo critério de custos de produção (EZUGWU, BONNEY e YAMANE, 2003; EZUGWU et al, 2017).

Para tentar diminuir os impactos negativos causados pela elevada concentração de tensão e calor na região de corte na usinagem das ligas de titânio, além do uso de refrigeração, utiliza-se a estratégia de diminuir a velocidade de corte durante o processo de fabricação. Dessa forma, os valores mais recorrentes de velocidade de corte para ferramentas de metal duro na usinagem de titânio são significativamente mais baixos quando comparados àqueles utilizados na usinagem de aços comuns e aços inoxidáveis. Grande parte dos trabalhos e artigos disponíveis analisa de forma experimental a usinabilidade das ligas alfa-beta, comparando principalmente faixas de velocidade de corte com taxas de desgaste de ferramenta e qualidade no acabamento das peças. Ribeiro et al (2003) avaliaram a usinagem da liga Ti-6Al-4V com inserto de metal duro sem revestimento, valores de velocidade de corte (v_c) de 55, 70, 90 e 110 m/min, avanço (f) de 0,1 mm/rot e profundidade de usinagem (a_p) de 0,5 mm. Conforme apresentado na Figura 13, ao analisar a rugosidade da superfície usinada, eles concluem que as velocidades de 70 e 90 m/min levam aos valores mais baixos de rugosidade e aos maiores comprimentos de corte (por volta de 300 m), apontando que o baixo desempenho a 110 m/min ocorre possivelmente devido à difusão causada pela elevada temperatura e reatividade química do material, enquanto que o baixo desempenho a 55 m/min ocorre provavelmente devido à adesão de material na ponta da ferramenta.

Figura 13 – Rugosidade da superfície em função do comprimento e da velocidade de corte na usinagem da liga Ti-6Al-4V ($f = 0,1$ mm/rot, $a_p = 0,5$ mm)

Fonte: Ribeiro et al (2003).

Arazola et al (2009) compararam a usinabilidade da liga Ti-6Al-4V com a da liga Ti555.3 (contendo 5% de molibdênio), utilizando uma ferramenta de metal duro sem revestimento com ângulo de saída positivo (7°). Mantendo constante o avanço de 0,1 mm/rot e a profundidade de usinagem de 2 mm, os autores analisaram a vida da ferramenta através do controle do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmax} = 0,3$ mm) e do tempo de corte máximo ($t_c = 15$ min). Com base nos resultados obtidos, a velocidade de corte que permite maior durabilidade da ferramenta para o Ti-6Al-4V é de 80 m/min, enquanto que para a usinagem do Ti555.3 é de 45 m/min, indicando que a liga mais próxima da fase beta possui uma usinabilidade inferior. Para os autores, tal fato está possivelmente associado às características mecânicas e químicas do material, em especial à presença de molibdênio, sendo esta liga mais resistente que a liga alfa-beta (1200 MPa de limite de resistência à tração do Ti555.3 contra 1000 MPa da liga Ti-6Al-4V).

Boa parte dos trabalhos experimentais sobre a usinagem de ligas de titânio possui como objetivo avaliar os tipos e mecanismos de desgaste decorrentes. Wang e Liu (2018) avaliaram a influência da geometria, do desgaste e do material da ferramenta de corte na usinagem de ligas de titânio e de níquel em diferentes condições de corte. Embora, em termos gerais, as elevadas temperaturas e tensões mecânicas concentradas na ponta da ferramenta

sejam elementos presentes no corte dessas ligas, os autores apontam que, no torneamento em particular, devido ao corte contínuo, a concentração de calor na ponta da ferramenta é o elemento preponderante na ativação dos mecanismos de desgaste de difusão e adesão, causando desgaste de flanco, de cratera e lascamento na aresta de corte. Uma das estratégias indicadas para minimizar o desgaste na usinagem dessas ligas seria o uso de ferramentas com arestas chanfradas, já que estas possibilitam a diminuição da fragilidade e aumento da resistência mecânica dos insertos.

Limin (2018) investigou o desgaste da ferramenta de metal duro de grão ultrafino revestida com TiAlN no torneamento da liga Ti-6Al4V com diferentes parâmetros de corte ($v_c = 40, 80$ e 120 m/min, $f = 0,1, 0,15$ e $0,2$ mm/rot, $a_p = 2$ mm e $t_c = 15$ minutos) e condições de lubrificação (a seco, abundante e mínima quantidade de lubrificante – MQL). Na análise e comparação dos resultados, constatou-se, conforme a Figura 14, que, embora o uso de refrigeração contribua para a diminuição da temperatura no corte, o desgaste evolui com o aumento da velocidade de corte, apresentando desgaste de flanco e de cratera decorrentes de mecanismos de adesão e difusão, provavelmente estimulados por elevadas temperaturas e reatividade química. A Figura 15 apresenta a ferramenta utilizada na pior condição de usinagem (a seco e com maior velocidade de corte), destacando a presença de material aderido na deterioração da integridade do inserto.

Figura 14 – Desgaste da superfície de saída na usinagem da liga Ti-6Al-4V com diferentes velocidades de corte e lubrificação abundante ($f = 0,15$ mm/rot e $a_p = 0,5$ mm)

Fonte: Adaptado de Limin (2018).

Figura 15 – Detalhe do desgaste da superfície de saída após usinagem a seco da liga Ti-6Al-4V com $v_c = 120$ m/min, $f = 0,15$ mm/rot e $a_p = 0,5$ mm

Fonte: Adaptado de Limin (2018).

No trabalho realizado por Che-Haron (2001), analisou-se a usinagem a seco da liga Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (liga que possui módulo de elasticidade de 11,3 GPa e limite de resistência à tração de 1170 MPa) com ferramenta de metal duro sem revestimento, com quebra cavaco, ângulo de saída de -6° e ângulo de folga de 6° . As condições de corte foram v_c nas faixas de 45, 60, 75 e 100 m/min, a_p fixo de 2 mm e valores de f de 0,25 e 0,35 mm/rot. Os resultados indicaram a presença de desgaste de flanco, de cratera e lascamento, decorrentes de mecanismos de abrasão, adesão e difusão. O desgaste evoluiu com o aumento da velocidade de corte, indicando a influência da elevação da temperatura. Com relação ao acabamento da superfície usinada, a rugosidade se elevou com o aumento da velocidade de corte, provavelmente devido à alteração da geometria da aresta de corte como consequência dos desgastes ocorridos. Tais resultados estão indicados na Figura 16.

Figura 16 – Gráficos de desgaste de flanco e rugosidade após usinagem da liga Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo a seco e com diferentes parâmetros

Fonte: Adaptado de Che-Haron (2011).

Analisando também o desgaste da ferramenta gerado no torneamento de liga Ti-6Al-4V, o trabalho de Odelros et al (2017) apresentou resultados obtidos com a utilização de ferramenta de metal duro sem revestimento e ângulo de saída de -6° , com refrigeração abundante, velocidade de corte de 70 m/min, avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de usinagem de 2 mm. Os resultados com relação aos tipos e mecanismos de desgaste são próximos aos trabalhos já citados. Os autores destacam a atuação da temperatura durante o processo de usinagem no acionamento dos mecanismos de desgaste. Baseados em trabalhos anteriores e em uma simulação computacional, a temperatura na interface ferramenta-cavaco foi estimada em 1000°C . A Figura 17, obtida por microscopia eletrônica de varredura, indica a presença de processo difusivo nos resultados obtidos. O trecho mais escuro corresponde ao material da ferramenta e o trecho mais claro, ao material da peça aderido, sendo possível ver em certos pontos da fronteira entre os dois materiais regiões de aglomeração que podem indicar processo difusivo.

Figura 17 – Imagem indicando presença de processo de difusão no torneamento de Ti-6Al-4V

Fonte: Odelros et al (2017).

Na pesquisa de Hatt, Crawford e Jackson (2017), comparou-se o desgaste de uma ferramenta de metal duro sem revestimento, com ângulos de folga e saída positivos de 6° , na usinagem das ligas Ti-54M (estrutura α - β) e Ti-6246 (estrutura β). A usinagem foi realizada com lubrificação abundante, velocidade de corte de 120 m/min, avanço de 0,1 mm/rot, profundidade de usinagem de 1 mm e tempo de corte de 180 s. Acompanhando a tendência de trabalhos já mencionados, observa-se o impacto das elevadas temperaturas de corte na ocorrência de mecanismos de adesão, difusão e deformação plástica, causando desgastes de flanco e cratera. As imagens tridimensionais apresentadas na Figura 18 mostram as diferenças dos desgastes produzidos por cada liga de titânio. Segundo os autores, na liga α - β tem-se a presença de mecanismo abrasivo com desgastes de flanco e de cratera, enquanto que na liga β existe uma combinação de diferentes mecanismos, com possível presença de deformação plástica e falha da ferramenta causada por desgaste acelerado das superfícies de folga e de saída.

Figura 18 – Desgastes obtidos no torneamento de duas ligas de titânio

Fonte: Adaptado de Hatt, Crawforth e Jackson (2017).

Em linhas gerais, as referências citadas apresentam um panorama das dificuldades de usinagem, dos mecanismos e tipos de desgaste mais comuns das ferramentas de corte na usinagem de ligas de titânio. Com base nos resultados descritos, é possível afirmar que a grande dificuldade na usinagem é proveniente de propriedades do titânio que resultam em concentração de esforços e calor na zona de corte, além de sua elevada reatividade química. Embora a maior parte da divulgação científica na área tenha como foco a liga Ti-6Al-4V, alguns resultados apresentados com a comparação da usinagem dessa liga com outras mais próximas à fase β (Ti6246 e Ti555.3, ambas com molibdênio em suas composições) podem abrir hipóteses para o entendimento da usinabilidade da liga Ti-15Mo e as possíveis características nos desgastes produzidos em sua usinagem.

2.3 Efeitos do acabamento da ferramenta sobre a usinagem

Determinadas características da ferramenta de corte, como dimensões e irregularidades da aresta e rugosidade das superfícies de folga e de saída, contribuem de forma importante tanto para a qualidade da peça obtida quanto para a maximização da vida da ferramenta. Um grande desafio para os profissionais que atuam no projeto dessas ferramentas está em conseguir avaliar as inter-relações destas propriedades com os impactos mecânicos e térmicos produzidos em processos de usinagem. Pode-se dizer que as características obtidas durante a preparação de insertos, comumente realizada por retificação, produzem efeitos no fluxo do

escoamento de cavaco, na resistência ao desgaste da ferramenta e na integridade da superfície usinada (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Um aspecto importante que pode contribuir para a durabilidade da vida da ferramenta é a relação entre o sentido da retificação da superfície de saída do inserto e o fluxo de cavaco durante o corte. Segundo pesquisas apresentadas por Weinert et al (1996, apud DENKENA, KÖHLER e VENTURA, 2013), quando o fluxo de cavaco é paralelo ao sentido da retificação, o atrito na interface ferramenta-peça é menor do que quando é perpendicular, resultando em uma tensão compressiva menor na ferramenta. Essa condição também pode ser melhorada com o controle da rugosidade da superfície retificada. A Figura 19 exemplifica essas duas situações, apresentando a superfície de saída de insertos retificados.

Figura 19 – Representação do fluxo de cavaco com relação ao sentido da retificação do inserto

Fonte: Elaboração própria.

Existem ainda outras características de integridade superficial que afetam a vida da ferramenta no processo de corte, influenciando o atrito na interface ferramenta-peça ou ferramenta-cavaco, contribuindo para a concentração/distribuição de tensões em determinadas regiões da ferramenta, afetando a resistência mecânica da aresta de corte ou causando alterações na distribuição da temperatura.

O controle da rugosidade das superfícies de folga e saída da ferramenta contribui para a diminuição do atrito entre ferramenta e peça e ferramenta e cavaco, ajudando a evitar tanto desgastes abrasivos quanto mecanismos de desgaste influenciados por altas temperaturas. A rugosidade também possui relação com processos de lascamento da aresta de corte, uma vez que irregularidades podem provocar pontos de concentração de tensão. Entende-se que o parâmetro de rugosidade R_z seja o mais indicado para a caracterização dos insertos por apresentar um valor médio das distâncias máximas de pico a vale em cinco trechos do perfil, sendo o que melhor detecta a influência de irregularidades na superfície (MACHADO et al, 2011). Segundo Barth e Klocke (2017), no caso da retificação, essa distância de pico a vale se relaciona com a distribuição dos grãos no rebolo. Na condição de elevada protrusão de grão e menor quantidade de arestas ativas, a espessura do cavaco por grão se eleva, fazendo aumentar a rugosidade superficial.

Outros dois parâmetros úteis para a caracterização dos insertos são o R_{sk} e o R_{ku} , que ajudam a compreender a simetria e distribuição das irregularidades. Conforme apresentado na Figura 20, o parâmetro R_{sk} (*skewness*) indica a assimetria na distribuição do perfil entre picos e vales. Se o valor medido for positivo, isso indica a presença de picos estreitos e vales largos, enquanto um valor negativo apresenta um perfil com vales mais estreitos e picos largos (HORVÁTH, DRÉGELYI-KISS e MÁTYÁSI, 2015).

Figura 20 – Especificação do parâmetro R_{sk}

Fonte: Adaptado de Horváth, Drégelyi-Kiss e Mátyási (2015).

Já o parâmetro Rku (*kurtosis*) indica o achatamento do perfil, conforme indicado na Figura 21. Se o valor obtido for maior que três, o perfil tem picos e vales estreitos, com aspecto serrilhado, enquanto que um valor menor que três indica um perfil menos pontiagudo, com picos e vales mais largos (HORVÁTH, DRÉGELYI-KISS e MÁTYÁSI, 2015).

Figura 21 – Especificação do parâmetro Rku

Fonte: Adaptado de Horváth, Drégelyi-Kiss e Mátyási (2015).

Valores negativos de Rsk associados a valores de Rku menores que 3, embora aumentem a área real de contato, reduzam a capacidade de retenção de fluidos e possam influenciar o atrito negativamente, contribuem com a redução da concentração de tensão quando o inserto é submetido a cargas mecânicas elevadas.

Com relação à irregularidade da aresta de corte, existem dois parâmetros que merecem atenção na caracterização dos insertos de aresta afiada. Conforme o esquema da Figura 22, uma ferramenta seria considerada perfeitamente afiada se o perfil da aresta coincidissem com o ponto de intersecção entre a superfície de folga e a superfície de saída. Entretanto, por questões relativas à remoção do material do inserto durante o processo de retificação, não é possível produzir tal perfil. Na prática, existe certo desvio entre o ponto de intersecção das superfícies e a aresta real de corte, que pode ser caracterizado pela distância mínima entre os perfis ideal e real, denominada Δr (VENTURA, KÖHLER e DENKENA, 2013), e pela largura da aresta real, denominada $W\Delta r$.

Figura 22 – Representação dos parâmetros Δr e $W\Delta r$

Fonte: Elaboração própria.

Com base em alguns estudos na área de tribologia, é possível dizer que os parâmetros de preparação dos insertos analisados nesse projeto tenham impacto no corte no que se refere às reais condições de contato entre as superfícies da ferramenta, da peça e do cavaco, com efeitos sobre a vida da ferramenta. O estudo tribológico das superfícies durante o processo de usinagem tem se apresentado de grande importância para o estudo de desempenho e projetos de ferramentas de corte. Para Astakhov (2012), o sistema tribológico de ferramentas de corte pode ser dividido em três principais abordagens:

- Interfaces mecânicas: distribuição das tensões, velocidade relativa e rigidez dos corpos.
- Geometria das interfaces: perfil, área de contato (aparente e real) e microgeometrias.
- Física das interfaces: energia, temperatura e propriedades físicas dos materiais envolvidos.

Estudos desse tipo são de grande complexidade, pois exigem a análise de relações sistemáticas de todos esses fatores. Por exemplo, ao se modificar a geometria da superfície de saída da ferramenta ou a geometria da aresta, haverá como consequência a alteração das condições de contato entre peça e ferramenta e entre cavaco e ferramenta, modificando a distribuição tanto dos esforços quanto da temperatura. Como resultado, a natureza dos processos tribológicos que ocorrem nessas interfaces podem alterar significativamente os mecanismos de desgaste das ferramentas de usinagem. Tais estudos contribuem para a elevação da vida da ferramenta e consequente melhoria na produtividade e redução de custos e energia.

Em outro estudo sobre tribologia na usinagem, Astakhov (2006) se baseia em diferentes trabalhos experimentais na tentativa de hierarquizar quais elementos e fatores podem contribuir de forma mais significativa para a evolução do desgaste de ferramentas durante o corte. Ao analisar mecanismos de desgaste que envolvem adesão de material da peça sobre a ferramenta, o autor aponta alguns critérios que podem contribuir para essa dinâmica. A velocidade de deslizamento na interface peça-ferramenta é significativamente maior do que na interface cavaco-ferramenta, sendo que quanto mais dúctil e elástico for o material usinado, maior é a tendência ao aumento dessa velocidade, o que ajuda a explicar o desgaste de flanco mais acentuado quando comparado ao desgaste de cratera para materiais com esse perfil. Outros critérios importantes nessa avaliação são características do material usinado que podem acarretar em aumento dos esforços, concentração de calor e elevadas temperaturas durante o corte, como a baixa condutividade térmica e elevada capacidade do material de se recuperar elasticamente durante a usinagem. Conforme já discutido na revisão da literatura, ligas de titânio em geral possuem todas essas propriedades mecânicas colocadas por esse autor.

Tendo em vista as informações descritas, serão apresentados no próximo tópico os parâmetros de preparação dos insertos e de usinagem das amostras da liga Ti-15Mo, além dos devidos critérios para medição das variáveis apresentadas como relevantes para análise de desempenho da ferramenta nesta investigação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Retificação dos insertos de corte e sua caracterização

Para a realização dos testes de torneamento, foram retificadas as superfícies de folga de quatro insertos de metal duro quadrados (especificação SBGN 120408), classe S10 sem revestimento (95%p WC e 5%p Co), de granulação fina, com raio de ponta de 0,8 mm, ângulo de folga de 5° e aresta afiada (sem chanfro ou raio de aresta).

Para a preparação dos insertos, utilizou-se uma retificadora CNC de quatro eixos, modelo Agathon DOM Plus (potência máxima de 16 kW e rotação máxima de 3400 rpm). Os parâmetros de retificação foram mantidos constantes, com velocidade de corte do rebolo (v_c) em 20 m/s, velocidade de avanço axial (v_{fa}) em 6 mm/min, velocidade de rotação do inserto para retificação do raio de ponta (v_R) em 2075°/min e aplicação abundante de óleo integral mineral. Foram utilizados dois diferentes rebolos de diamante do tipo copo, com ligante resinoide e concentração C100: um com tamanho de grão de 15 μ m (D15) e outro com tamanho de grão de 46 μ m (D46). Foram retificados dois insertos com cada tipo de rebolo.

Antes da retificação de cada inserto, os rebolos foram condicionados com dressador de Al_2O_3 do tipo copo, sendo utilizado o dressador com o tamanho de grão de 220# para o rebolo D15 e 180# para o rebolo D46. Foram escolhidos dois dressadores, uma vez que rebolos mais finos exigem dressadores com grãos menores para remoção do ligante e rebolos mais grosseiros são dressados por grãos maiores. Os parâmetros da dressagem também foram mantidos constantes com velocidade tangencial do dressador (v_{cd}) em 10 m/s e velocidade de avanço (v_{fd}) em 3 μ m/s, durante 5 segundos. A Figura 23 apresenta uma imagem completa do equipamento e uma imagem da câmara onde ocorre o processo de retificação.

Figura 23 – Imagens externa e interna da retificadora CNC

Fonte: Elaboração própria.

Todo o processo de caracterização dos insertos foi realizado com o auxílio do microscópio para geração de imagens tridimensionais, modelo Alicona InfiniteFocus SL, o qual permite ampliação de até 500x com as lentes disponíveis. Após aquisição das imagens dos raios de ponta, com aumento de 100x, para obtenção dos parâmetros de rugosidade R_z , R_{sk} e R_{ku} , foram medidos 100 perfis com *cut-off* de 800 μm na direção perpendicular à de retificação. Para análise dos dados, foram utilizados valores médios e desvios-padrões das medições realizadas nos quatro raios de ponta de cada inserto. A Figura 24 mostra um exemplo da interface do software.

Figura 24 – Exemplo de medição dos parâmetros de rugosidade

Fonte: Elaboração própria

Já a Figura 25 apresenta a imagem do software para caracterização dos parâmetros de irregularidade na aresta Δr e $W\Delta r$, tendo sido utilizados 250 perfis perpendiculares ao raio de ponta nas diferentes regiões do inserto. Valores médios e desvios-padrões correspondentes às quatro pontas de cada inserto foram utilizados na análise.

Figura 25 – Exemplo de medição dos parâmetros de irregularidade na aresta

Fonte: Elaboração própria.

A fim de se complementar a caracterização e análise dos insertos e justificar os resultados obtidos no processo de retificação, realizou-se também a caracterização da ferramenta abrasiva utilizada. Para a caracterização da topografia do rebolo, realizou-se a medição do parâmetro Spk após a dressagem e após a retificação dos insertos. Tal variável faz parte dos parâmetros de rugosidade de superfície da curva de *Abbot-Firestone* e mede a altura reduzida dos picos de uma superfície, fornecendo um indicativo da protrusão do grão. Para que não fosse necessário remover o rebolo da máquina CNC, utilizou-se a resina fotopolimerizável Technovit 2220 para modelagem de dois pontos da camada abrasiva. Após as resinas serem endurecidas com luz ultravioleta com comprimento de onda de 470 nm (Technovit Blue Led), elas foram removidas e levadas ao microscópio mencionado para geração de imagens tridimensionais, onde duas regiões de cada resina foram analisadas. Devido ao fato das resinas fornecerem informações do negativo da superfície abrasiva,

tornou-se necessária a inversão das imagens adquiridas. Os gráficos gerados nos resultados mostram os valores médios e os respectivos desvios-padrões do parâmetro Spk obtidos em quatro avaliações. A Figura 26 apresenta o método de verificação da topografia da camada abrasiva.

Figura 26 – Método de caracterização da topografia do rebolo

Fonte: Elaboração própria.

As forças geradas durante a retificação também contribuem de forma significativa para a explicação dos resultados obtidos no processo. Para sua medição, foi utilizado um sistema baseado em sensores de medição de corrente dos motores com uma taxa de aquisição de 50 Hz. Como parte integrante da máquina, o sistema de medição e aquisição de sinais foi desenvolvido por seu fabricante e, portanto, detalhes adicionais não podem ser fornecidos. Para análise, foram utilizados os valores médios e respectivos desvios-padrões das forças máximas medidas durante a retificação de cada lado do inserto.

3.2 Ensaios de torneamento

Após a retificação e caracterização dos insertos, foi realizada a usinagem dos corpos de prova da liga Ti-15Mo, os quais foram preparados de acordo com o croqui apresentado na Figura 27, nos quais há quatro colos de 30 mm de comprimento para torneamento.

Figura 27 – Croqui do corpo de prova de Ti-15Mo (medidas em mm)

Fonte: Elaboração própria.

Os testes foram realizados em um torno CNC Romi Centur 30D, com rotação máxima de 4.000 rpm e potência máxima de 9 kW. O suporte utilizado nos testes de torneamento corresponde ao CSDBN 2020 K12, com ângulo de posição de 45°, ângulos de saída e inclinação de 0° e fixação por grampo. A escolha de uma ferramenta neutra é uma tentativa de diminuir as elevadas tensões e temperaturas na zona de corte, muito comuns durante a usinagem de ligas de titânio. O ângulo de folga foi obtido na retificação do inserto, sendo de 5°, conforme descrito no tópico anterior.

Os parâmetros de usinagem utilizados nos experimentos foram determinados tendo como referência os trabalhos apresentados na revisão da literatura e testes preliminares com insertos retificados com as mesmas características que as ferramentas utilizadas nessa pesquisa, sendo $v_c = 100$ m/min, $f = 0,2$ mm/rot e com aplicação de emulsão com concentração de 10% de forma abundante. Com o intuito de se trabalhar em uma faixa de acabamento, adotou-se a profundidade de usinagem $a_p = 0,5$ mm, a qual tem sido também frequentemente observada na literatura. Os parâmetros foram mantidos constantes de modo a se comparar exclusivamente o desempenho dos diferentes insertos de corte produzidos.

Ensaio e réplica de experimentos de desgaste foram realizados com insertos com quatro diferentes combinações de acabamento: retificado com rebolo D15 e com marcas de retificação na superfície de saída paralelas ao escoamento do cavaco; retificado com rebolo D15 e com marcas de retificação na superfície de saída perpendiculares ao escoamento do cavaco; retificado com rebolo D46 e com marcas de retificação na superfície de saída paralelas ao escoamento do cavaco; retificado com rebolo D46 e com marcas de retificação na

superfície de saída perpendiculares ao escoamento do cavaco. Importante destacar que as superfícies de saída dos insertos foram retificadas na ocasião da instalação e teste inicial do equipamento no laboratório, sendo aproveitadas posteriormente para esse e outros projetos, tendo todas o mesmo valor aproximado de rugosidade ($R_z = 2,4 \pm 0,1 \mu\text{m}$). As direções das marcas de retificação foram definidas com base no posicionamento do inserto no porta-ferramenta.

Após a usinagem de cada trecho do corpo de prova (30 mm), o inserto era removido do suporte e o desgaste máximo de flanco $VB_{B\max}$ avaliado no microscópio para análise de imagens tridimensionais. Definiu-se como critério de fim de ensaio o volume total de material removido ($\sim 16.500 \text{ mm}^3$). A Figura 28 apresenta detalhe do método que o software do microscópio utiliza para medição do desgaste de flanco, através da intersecção das linhas relativas às superfícies de folga e de saída.

Figura 28 – Detalhe de medição de desgaste de flanco

Fonte: Elaboração própria.

Conforme discutido na revisão da literatura, é comum na usinagem de ligas de titânio a presença de mecanismos de desgaste de ferramenta que são ativados por concentração de elevadas temperaturas na zona de corte, devido à baixa condutividade térmica e a elevada reatividade química desse material. Assim, outra medição realizada que pode contribuir para análise dessa dinâmica é o comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta. O escoamento do cavaco pela superfície de saída ao se cortar o material gera atrito na interface cavaco-ferramenta, com implicações na distribuição de esforços e calor nas zonas de contato. Dependendo de como isso ocorre, o cavaco pode escoar e quebrar com maior ou menor

facilidade e o comprimento de contato corresponde a um indicativo dessa situação. A Figura 29 apresenta a forma utilizada para medição desse comprimento através da imagem da ferramenta.

Figura 29 – Detalhe da medição do comprimento de contato entre cavaco e ferramenta

Fonte: Elaboração própria.

Outro fenômeno também apresentado pela literatura como presente na usinagem de certas ligas de titânio é a adesão de material da peça na aresta de corte e áreas subjacentes, com posterior rompimento e arrancamento de fragmentos de material da ferramenta (*attrition*), processo que pode envolver também a formação de aresta postiça de corte. Assim, um terceiro parâmetro verificado com a ajuda do microscópio é o volume de material aderido. Usando como referência uma aresta de corte nova, o software compara as imagens adquiridas e calcula a diferença de volume perdido ou adquirido após cada usinagem (Figura 30).

Figura 30 – Exemplo de imagem utilizada para medição de volume de adesão de material na ferramenta

Fonte: Elaboração própria.

Nestes dois últimos casos, a fim de se fornecer um indicativo da adesão de material sobre a ferramenta e não tendo sido verificada alteração significativa dessas variáveis com seu desgaste, para análise, foram utilizados os valores médios e desvios-padrões de todos os passes realizados para cada tipo de inserto.

Por fim, realizou-se a verificação da potência fornecida pelo eixo árvore da máquina durante a usinagem dos corpos de prova com os diferentes insertos, através da medição da corrente pelo sistema do próprio torno. Sendo o motor alimentado com uma tensão de 220 V e trifásico, os valores adquiridos foram multiplicados por $220 \times \sqrt{3}$ para a obtenção dos valores em Watt. Conforme as superfícies de contato entre peça e ferramenta e cavaco e ferramenta se alteram devido ao desgaste do inserto e à alteração da geometria da aresta em função do material aderido, supõe-se que haja implicações nos esforços de corte ao longo dos experimentos. Calculou-se o valor médio desses parâmetros para cada colo torneado, tomando-se o cuidado de garantir que os trechos das curvas verificadas não apresentassem oscilações que não correspondessem ao intervalo em que o corte do material acontecia, conforme demonstrado na Figura 31.

Figura 31 – Exemplo de gráfico da corrente do motor com indicação do trecho com os valores medidos (intervalo de 5 a 12 segundos)

Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos insertos de corte

Após a retificação dos insertos, foram verificados, com o auxílio do microscópio, os parâmetros discutidos na revisão da literatura apontados como importantes no desempenho de ferramentas de corte. A Figura 32 apresenta os valores de R_z obtidos na preparação dos insertos com rebolos D15 e D46.

Figura 32 – Valores médios de R_z para os insertos retificados com rebolos de diferentes tamanhos de grão

Fonte: Elaboração própria.

No processo de retificação, o tamanho das partículas abrasivas é um elemento fundamental para a determinação da taxa de remoção do material e do acabamento da superfície usinada. Rebolos com pequenas granulometrias produzem melhores acabamentos, uma vez que nessa condição existem mais grãos ativos atuando no processo de usinagem (GROOVER, 2013) e a espessura de cavaco por grão é menor. Entretanto, na medição da rugosidade dos insertos preparados, verificou-se que o rebolo de menor tamanho de grão (D15) proporcionou um valor de R_z apenas pouco menor ao obtido com o rebolo D46. Para se discutir possíveis hipóteses para esse fenômeno, analisou-se a topografia do rebolo e as forças de retificação durante o preparo dos insertos.

A Figura 33 apresenta os valores de Spk obtidos após a dressagem e após a retificação de cada inserto. Inicialmente, nota-se para os dois casos que houve desgaste do grão abrasivo

após a retificação, caracterizado pela redução da protrusão em comparação àquela obtida depois da dressagem. Verifica-se também que o rebolo D46 tem seus grãos ligeiramente mais expostos em relação ao D15. Aliado a essa característica, o rebolo D15 possui grãos de tamanho inferior ao D46, de forma que, para a mesma concentração (massa/volume), mais grãos ativos são esperados. Sendo assim, os inserts retificados com o rebolo D15 deveriam apresentar valores significativamente menores do parâmetro R_z , o que não ocorreu nos testes. Dessa forma, a protrusão dos grãos verificada na caracterização dos rebolos não contribui para a explicação dos resultados de rugosidade obtidos nos inserts.

Figura 33 – Valores médios de Spk para rebolos com diferentes tamanhos de grão

Fonte: Elaboração própria.

Outro parâmetro que pode contribuir para a discussão dos valores R_z obtidos é a medição dos esforços durante a preparação dos inserts. A Figura 34 apresenta os valores médios das componentes normal e tangencial da força de retificação.

Figura 34 – Forças atuantes durante a retificação com rebolos de diferentes tamanhos de grão

Fonte: Elaboração própria.

Verificou-se uma diferença significativa na componente normal da força para o rebolo D15, o que está relacionado ao fato deste rebolo possuir mais grãos abrasivos atuando simultaneamente do que um rebolo com maior granulometria. Como consequência, o processo pode ter sofrido a influência de vibrações, resultando nos valores não esperados de rugosidade obtidos nos insertos neste caso. Adicionalmente, a maior relação entre força normal e tangencial obtida para o rebolo D15 indica baixa eficiência no processo de remoção de cavaco, demonstrando uma possível predominância de atrito e esmagamento do material em relação ao cisalhamento. A baixa eficiência na remoção e a presença de maiores forças normais durante o processo de retificação com o uso do rebolo D15 podem ter causado vibrações no processo e feito com que a diferença de rugosidade entre os insertos preparados pelos dois tipos de rebolo fosse reduzida.

Outros dois parâmetros úteis para a caracterização dos insertos são o R_{sk} e o R_{ku} , que ajudam a compreender a simetria e distribuição das irregularidades. A Figura 35 apresenta os valores obtidos para o parâmetro R_{sk} .

A obtenção de valores positivos de R_{sk} para ferramentas de corte pode ser um fator acelerador do desgaste, uma vez que apresenta um perfil que favorece a concentração de tensões. De outra forma, vales largos, também presentes neste tipo de perfil, podem contribuir com a retenção de fluido de corte. De acordo com as medições realizadas, embora com uma elevada dispersão, o parâmetro R_{sk} dos insertos retificados com o rebolo D15 apresentou valor maior do que o obtido para o inserto preparado com rebolo D46, o qual está próximo de

zero, indicando um perfil aproximadamente simétrico. Isso pode ter ocorrido devido à menor protrusão dos grãos D15 e maior afiação dos grãos D46, sendo que os primeiros levam a sulcos mais largos de rugosidade.

Figura 35 – Valores médios de Rsk para os insertos retificados com rebolos de diferentes tamanhos de grão

Fonte: Elaboração própria.

Dando continuidade à verificação da distribuição das irregularidades, a Figura 36 apresenta os valores obtidos do parâmetro Rku. Valores de Rku maiores que três também podem indicar um perfil nas ferramentas de corte que favorece a concentração de tensões. Os valores obtidos após a retificação dos insertos com os rebolos de diferentes granulometrias são levemente menores que três (perfil pouco pontiagudo) e se encontram na mesma faixa, de forma que não devem apresentar impactos negativos na vida da ferramenta.

Figura 36 – Valores médios de Rku para os insertos retificados com rebolos de diferentes tamanhos de grão

Fonte: Elaboração própria.

Com relação aos parâmetros de irregularidade de aresta discutidos na revisão da literatura, realizou-se a medição das variáveis Δr e $W\Delta r$. Ambos os parâmetros devem ser monitorados, pois remetem à resistência mecânica da aresta e possibilidades de lascamento durante a usinagem. Após a verificação no microscópio, foram obtidos os seguintes resultados, conforme a Figura 37.

Figura 37 – Valores médios de Δr e $W\Delta r$ para os insertos retificados com rebolos de diferentes tamanhos de grão

Fonte: Elaboração própria.

Na retificação dos insertos, menores valores desses dois parâmetros foram observados com o uso do rebolo D15. Tal resultado é coerente, uma vez que o uso de um rebolo que possibilita maior quantidade de grãos ativos e, conseqüentemente, menor espessura de cavaco por grão permite a obtenção de superfícies com menores irregularidades. Já com o rebolo D46, os valores obtidos foram mais elevados como consequência da presença de menos grãos ativos durante a retificação e de uma granulometria mais grosseira. Diferentemente do que ocorreu com Rz, porém, foram verificadas diferenças mais claras nos resultados de Δr e $W\Delta r$ obtidos com cada um dos rebolos. A baixa eficiência do processo no caso da aplicação do rebolo D15, verificada pela relação entre as forças tangencial e normal, e a predominância da deformação do material em relação ao cisalhamento na região da aresta pode ter reduzido o lascamento e aumentado o efeito da granulometria no acabamento.

4.2 Torneamento da liga Ti-15Mo

Após a realização dos testes de torneamento e das devidas avaliações dos insertos, foram sistematizados dados e imagens que possibilitaram a análise do desempenho das ferramentas no que diz respeito ao seu desgaste. Os resultados obtidos são discutidos com base nos parâmetros utilizados para caracterização dos insertos de corte. Foi dado destaque também ao sentido do escoamento do cavaco em relação ao sentido de retificação da superfície de saída do inserto (paralelo ou perpendicular).

Com o auxílio do microscópio para análise de imagens tridimensionais, foi possível fazer uma verificação visual do tipo de desgaste predominante nos insertos e seus possíveis mecanismos. Embora a literatura disponível especificamente sobre a usinabilidade da liga Ti-15Mo seja muito escassa, o que acaba limitando a possibilidade de realizar comparações, os mecanismos de desgaste apresentados nos experimentos são os típicos das ligas de titânio em geral, discutidos no tópico da revisão da literatura, tanto para o inserto preparado com rebolo D15 quanto para o D46. A Figura 38 apresenta uma imagem ampliada de um dos insertos, na qual é possível verificar e diferenciar os mecanismos presentes de forma predominante.

Figura 38 – Indicação dos mecanismos de desgaste no inserto retificado com rebolo D15

Fonte: Elaboração própria.

Pode-se constatar pela imagem a presença de adesão de material da peça na ferramenta, principalmente na região da aresta de corte. A superfície de folga em sua região imediatamente próxima à aresta apresenta um perfil aparentemente mais grosseiro (aspecto cinza escuro), indicando um mecanismo de arrancamento (*attrition*). Nesse tipo de mecanismo, a ferramenta sofre alterações da sua aresta devido ao acúmulo e adesão de parte do material removido da peça, podendo, em certas situações, contribuir para a formação de aresta postiça de corte (APC). Conforme essa camada de material aderido sofre constantes alterações geométricas durante a usinagem, podem ocorrer flutuações de esforços e variações de temperatura, mesmo em operações de corte contínuo como o torneamento. Ao se atingir determinado valor de tensão, a camada formada é rompida e acaba arrancando fragmentos do material da ferramenta, causando desgaste (TRENT e WRIGHT, 1999). Logo abaixo, é possível perceber uma região da superfície de folga, um pouco mais distante da aresta, com aspecto menos grosseiro (coloração cinza um pouco mais clara), indicando um mecanismo de desgaste por difusão. Esse tipo de mecanismo é ativado pela combinação de elevadas temperaturas e afinidade química entre os materiais das superfícies em contato. Trata-se de um processo em que uma troca de átomos ocorre por meio da interface de contato entre dois materiais. Conforme também discutido na revisão da literatura, a afinidade química do titânio com o carbono da composição do metal duro e a elevada temperatura produzida na usinagem desse tipo de material, faz com que a superfície da ferramenta fique empobrecida dos elementos que são responsáveis pela sua dureza (WC). À medida que esse processo continua, a ferramenta se torna mais suscetível a desgastes e rupturas (EZUGWU et al, 2017; GROOVER, 2013). Tanto o *attrition* quanto a difusão resultaram em desgaste de flanco e

nenhum dos insertos apresentou desgaste de cratera. Para efeitos comparativos, a Figura 39 apresenta a imagem de cada tipo de inserto utilizado após a remoção do volume total de material determinado ($\sim 16.500 \text{ mm}^3$).

Figura 39 – Imagens das ferramentas após o fim dos ensaios (remoção de um volume total aproximado de 16.500 mm^3)

Fonte: Elaboração própria.

As imagens finais dos insertos apresentam, de modo geral, as mesmas características quanto aos mecanismos de desgaste produzidos e a presença de desgaste de flanco. A existência de adesão de material da peça na aresta de corte da ferramenta, em menor ou maior grau, também se mostrou um elemento marcante. Nas quatro imagens é possível verificar regiões da superfície de folga de aspecto liso, apresentando indícios de mecanismo difusivo. Também, é possível verificar trechos de perfil mais grosseiro próximos à aresta de corte,

indicando a existência de desgaste por arrancamento conforme o material aderido é rompido durante a usinagem. Em nenhuma das imagens é possível constatar desgaste de cratera.

Ligas de titânio em geral possuem as características mecânicas e térmicas que levam, como aponta Astakhov (2006), à preponderância do desgaste de flanco. O baixo módulo de elasticidade das ligas de titânio permite que parte do material removido durante o corte se recupere elasticamente, aumentando a zona de contato entre a superfície usinada e a superfície de folga da ferramenta, resultando na elevação do atrito e da temperatura nessa interface. A baixa condutividade térmica reduz a dissipação do calor pelo cavaco e pela peça, concentrando a temperatura na região da aresta de corte. Tal situação também pode deteriorar a qualidade superficial e a precisão dimensional da peça usinada (TRENT e WRIGHT, 1999; HOSSEINI e KISHAWY, 2014). O progressivo desgaste de flanco diminui o ângulo da superfície de folga, aumentando a zona de contato e o atrito com a superfície usinada e alterando diretamente a distribuição de tensões e calor na interface, contribuindo para a ativação do mecanismo de difusão no desgaste e de adesão de material na região da aresta de corte (LIANG e LIU, 2018).

A presença de aresta postiça de corte foi algo presente após o torneamento da maioria dos trechos durante os experimentos. Embora a literatura considere o processo de formação de aresta postiça um fenômeno relacionado à usinagem em baixas velocidades de corte, as características relativas à baixa usinabilidade do titânio em geral e às propriedades químicas e mecânicas da liga Ti-15Mo, como, por exemplo, a presença de molibdênio (que eleva a resistência ao desgaste), o módulo de elasticidade (29% menor que o Ti-6Al-4V) e o limite de escoamento (35% menor que o Ti-6Al-4V), contribuem, do ponto de vista do material usinado, para a presença desse fenômeno. A formação e o desaparecimento da aresta postiça estão intimamente ligados à temperatura de corte, que, por sua vez, afeta as propriedades mecânicas do material (FERRARESI, 1970). Durante a usinagem, a aresta postiça, ao substituir a geometria original da ferramenta, mesmo tendo um perfil irregular, acaba sendo responsável pela remoção de cavaco e pela qualidade da superfície usinada (PARIS et al, 2020). Embora ela possa proteger a aresta original em determinadas situações, quando é removida bruscamente pode acabar arrancando fragmentos de material da peça e contribuir para a elevação do desgaste. Conforme ocorre a formação e substituição dessa aresta irregular ao longo da usinagem, é possível afirmar que o corte acaba sendo caracterizado por constantes alterações de esforços e temperatura, uma vez que, do ponto de vista tribológico, a zona de contato efetivo entre as superfícies nunca é a mesma.

Outro dado obtido que pode contribuir para o entendimento dos mecanismos de desgaste apresentados, principalmente com relação à adesão de material, é o comprimento de contato do cavaco com a ferramenta durante seu escoamento. Conforme a aresta corta o material e o cavaco escoar pela superfície de saída, analisar o tamanho do contato entre as superfícies pode ajudar a explicar a relação entre material aderido e o acabamento da ferramenta. A Figura 40 apresenta os valores médios de comprimento de contato do cavaco para cada inserto.

Figura 40 – Comprimento médio de contato do cavaco com a superfície de saída de insertos com diferentes acabamentos

Fonte: Elaboração própria.

As medidas de comprimento verificadas se localizam em diferentes faixas de valores para cada situação de usinagem. O inserto preparado com rebolo D15, que possui menor rugosidade R_z , maior valor de R_{sk} e aresta menos irregular (menores valores de Δr e $W\Delta r$), apresentou os maiores valores de comprimento de contato, sendo o valor obtido para o inserto com superfície de saída com marcas de retificação paralelas à direção de escoamento do cavaco superior ao valor obtido para o inserto com marcas perpendiculares. Já o inserto retificado com rebolo D46, que possui parâmetros R_z , Δr e $W\Delta r$ superiores e valor de R_{sk} menor, apresentou menor comprimento de contato e seguiu a tendência de valores maiores para a superfície de saída com marcas paralelas ao escoamento do cavaco.

Outra avaliação realizada que pode complementar o estudo do fenômeno da adesão corresponde à medição do volume médio de material aderido à ferramenta ao longo dos experimentos. A Figura 41 apresenta essa informação.

Figura 41 – Volume médio de material aderido aos insertos com diferentes acabamentos

Fonte: Elaboração própria.

A sequência de crescimento do volume segue, de modo geral, a mesma tendência observada para o comprimento médio de contato do cavaco com a ferramenta. Isso indica maior ocorrência de adesão nos insertos com menores valores de R_z , Δr e $W\Delta r$, maior valor de R_{sk} e com marcas de retificação paralelas em relação ao sentido de escoamento do cavaco.

Maiores comprimentos de contato do cavaco e volumes de material aderido no inserto retificado com rebolo D15 podem ser explicados por seu melhor acabamento, que contribui para a ocorrência de mais pontos de contato na interface peça-ferramenta durante a usinagem, intensificando o atrito e o calor gerado. Cabe destacar que, mesmo com uma diferença pequena em relação ao inserto retificado com o rebolo D46, pode-se dizer que o menor R_z obtido com o rebolo D15 tem efeito sobre a adesão do material na ferramenta. Além disso, uma combinação de menor R_z e maior R_{sk} gera vales mais largos com pequenas distâncias entre a ponta dos picos e a base dos vales, possibilitando o aumento do contato entre material e ferramenta e criando uma superfície mais propícia à adesão.

Com relação ao fato de o inserto preparado com rebolo D15 e com marcas na superfície de saída perpendiculares ao escoamento do cavaco apresentar menor comprimento de contato e volume de material aderido quando comparado ao inserto retificado com rebolo da mesma granulometria, mas com marcas paralelas, pode-se dizer que os sulcos de retificação paralelos facilitaram o fluxo de cavaco e aumentaram a área de contato. Isso pode ter levado a uma distribuição de esforços e temperatura que, ao invés de contribuir para a quebra do cavaco, terminam por alimentar a adesão de material e formação de aresta postiça.

A velocidade relativa maior na superfície de folga com relação à superfície usinada, combinada com a adesão de material na aresta de corte e com as características do titânio, ajuda a explicar a preponderância do desgaste de flanco e também os mecanismos de adesão e difusão verificados.

Algumas pesquisas podem ajudar a realizar um paralelo com os fenômenos de adesão de material e formação de aresta postiça de corte verificados nos testes e o papel do acabamento da ferramenta durante o corte. Em pesquisas relacionadas à tribologia em processos de usinagem, Jackson et al (2012) listaram alguns elementos que podem trazer impactos significativos sobre o desempenho e desgaste da ferramenta:

- A área de contato real entre as interfaces;
- O número de pontos de contatos instantâneos que formam a área de contato real;
- Disposição dos pontos de contato;
- Tempo necessário para se criar pontos de contato, o que tem relação com a velocidade relativa entre as superfícies;
- A distribuição de cargas mecânicas e térmicas nas regiões de contato.

Partindo de uma perspectiva de estudo em microescala, o trabalho recente de Quian, Duan e Zou (2020) avaliou o desempenho de ferramentas de metal duro na usinagem da liga titânio TC21, comparando superfícies de saída com diferentes texturas em escala micrométrica (paralelo, perpendicular e ondulado). Embora esses perfis tenham sido obtidos por processo a laser e não por retificação, os autores obtiveram resultados que podem contribuir para o entendimento da adesão de material na ferramenta. Após a realização do processo de torneamento, observou-se que a superfície de saída ondulada apresentou menor adesão de material, menor desgaste, menor esforço de corte e melhor acabamento da peça usinada. Para os autores, a microestrutura ondulada na superfície de saída pode reduzir a adesão do cavaco e tornar seu fluxo mais suave, o que eventualmente resulta em remoção

mais regular de material, menos rebarbas e melhor qualidade de superfície. Em contrapartida, os insertos com texturas na superfície de saída paralelas com relação ao escoamento do cavaco apresentaram mais adesão de material. O inserto com textura perpendicular apresentou desempenho intermediário. Seguindo a mesma perspectiva de análise em microescala no desempenho de ferramentas de corte, o trabalho de Kang et al (2018) apresentou testes de insertos de metal duro com superfícies de diferentes texturas obtidas a laser. No torneamento de ligas de alumínio, a ferramenta com superfície de saída com sulcos paralelos com relação ao escoamento do cavaco também apresentou maior adesão de material e maiores esforços de corte, resultando em uma elevada deformação plástica do material usinado.

Embora os mecanismos de desgaste observados sejam semelhantes, deve-se atentar ao fato de que as diferentes propensões à adesão de material da peça para cada tipo de inserto podem levar a vidas de ferramenta distintas. Assim, acompanhou-se a evolução do desgaste de flanco com o aumento do volume de material removido em cada caso, sendo as curvas de ensaio e réplica apresentadas na Figura 42.

Figura 42 – Evolução da curva de desgaste de flanco de insertos com diferentes acabamentos

Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, a menos da região de desgaste final acelerado, as curvas obtidas seguiram o formato clássico, apresentando uma maior taxa de crescimento inicial seguida de um aumento estável. Não houve diferença significativa nos valores finais do desgaste máximo de flanco do inserto retificado com rebolo D46, independente do sentido das marcas de retificação na superfície de saída em relação ao escoamento do cavaco. Os valores finais obtidos foram 269,43 μm (ensaio) e 289,88 μm (réplica) para o inserto com marcas na direção perpendicular e 284,58 μm (ensaio) e 291,49 μm (réplica) para o inserto com marcas na direção paralela. Já as curvas de desgaste dos insertos preparados com rebolo D15, além de apresentarem menor desgaste final em comparação aos insertos retificados com rebolo D46, demonstram valores finais menores para os insertos com marcas na superfície de saída perpendiculares ao escoamento do cavaco. Os valores finais obtidos foram 174,10 μm (ensaio) e 171,32 μm (réplica) para o inserto com marcas na direção perpendicular e 243,45 (ensaio) μm e 243,67 μm (réplica) para o inserto com marcas na direção paralela.

As menores irregularidades na aresta dos insertos preparados com rebolo D15 certamente contribuem para uma evolução de desgaste menor quando comparada à obtida para os insertos retificados com rebolo D46, já que pontos de concentração de tensão na aresta são reduzidos. No entanto, quando se verifica que o inserto retificado com rebolo D15 e com marcas na superfície de saída paralelas ao escoamento do cavaco gera maior valor de desgaste do que o inserto com marcas perpendiculares, torna-se necessário levar em conta o efeito da adesão, conforme discutido, no fim de vida da ferramenta. A ocorrência de até certo nível de adesão de material cria uma camada protetora na aresta de corte (inserto retificado com rebolo D15 e com marcas perpendiculares na superfície de saída), mas ultrapassando-se esse limite, o material aderido (ou aresta postiça) se torna instável e sua ruptura favorece o desgaste por *attrition* (inserto retificado com rebolo D15 e com marcas paralelas na superfície de saída).

Com relação aos maiores desgastes de flanco dos insertos retificados com rebolo D46, seus valores superiores de Δr e $W\Delta r$ levaram a uma maior fragilização da aresta, tornando-a suscetível a lascamentos, e, juntamente ao maior R_z e menor R_{sk} , reduziram o efeito da adesão sobre o desgaste, o que é comprovado pelos resultados similares de desgaste obtidos independentemente da direção das marcas de retificação na superfície de saída.

De modo ainda a se investigar o efeito do acabamento dos insertos sobre os esforços no torneamento, a potência do motor foi medida. Tal variável pode ajudar a indicar a energia consumida e as variações dos esforços durante o corte, de acordo com a alteração da

geometria da aresta e o desgaste da ferramenta. As Figuras 43 e 44 apresentam a variação da potência de corte em função do volume de material removido na usinagem para os quatro tipos de inserto.

Figura 43 – Potência de corte em função do volume de material removido na aplicação do inserto preparado com rebolo D15

Fonte: Elaboração própria.

Figura 44 – Potência de corte em função do volume de material removido na aplicação do inserto preparado com rebolo D46

Fonte: Elaboração própria.

Tanto para o inserto retificado com rebolo D46 quanto para o retificado com rebolo D15, não é possível observar correlação significativa entre as variações de energia durante o corte e a evolução do desgaste da ferramenta ou as alterações da aresta devido à adesão de material. De modo geral, em ambos os insertos, os valores de potência se situam entre 2 e 2,5 kW. Possivelmente, as variações causadas pelos fenômenos descritos ficam dentro da

oscilação da potência medida pelo equipamento e não permitem diferenciar o processo. Caso essa pesquisa abra caminho para estudos de eficiência energética e sustentabilidade em usinagem, deve-se buscar outros parâmetros que contribuam para a otimização da usinagem de titânio dentro desta perspectiva.

5 CONCLUSÕES

Embora as ligas de titânio tenham importantes e específicas aplicações, a usinagem desse tipo de material ainda é um desafio quando se analisa pelo viés da produtividade e da qualidade do produto final. Neste contexto, o presente trabalho propôs uma investigação da usinagem da liga Ti-15Mo com a aplicação de insertos de metal duro sem revestimento com diferentes acabamentos em termos de superfície e aresta. Com base nos resultados obtidos, puderam ser tiradas as seguintes conclusões:

- Em comparação ao uso de um rebolo com maior granulometria (D46), a utilização de um rebolo com menor tamanho de grão (D15) para a retificação da superfície de folga dos insertos levou a menores valores de rugosidade R_z e de irregularidades na aresta Δr e $W\Delta r$. Além disso, gerou maior valor de R_{sk} , indicando a presença de vales largos.
- Maiores forças normais durante o processo de retificação com o uso do rebolo mais fino podem ter causado vibrações no processo e feito com que a diferença de rugosidade entre os insertos preparados pelos dois tipos de rebolo (D15 e D46) fosse reduzida.
- As imagens das ferramentas obtidas após os testes de torneamento apresentaram mecanismos de desgaste fortemente ativados por condições de altas temperaturas e aspectos tribológicos, como difusão e adesão seguida de arrancamento (*attrition*), resultando principalmente em desgaste de flanco.
- Maiores valores do comprimento de contato entre cavaco e ferramenta e de volume de material aderido foram verificados para o inserto retificado com rebolo D15 e com marcas de retificação na superfície de saída paralelas à direção de escoamento do cavaco, o que ocorreu devido ao melhor acabamento do inserto e consequente maior área de contato.
- Entretanto, o inserto retificado com rebolo D15 e com marcas de retificação perpendiculares ao escoamento do cavaco obteve menor desgaste máximo de flanco, seguido do inserto retificado pelo mesmo rebolo, mas com marcas paralelas.
- Principalmente devido ao maior lascamento na aresta e com menor influência da adesão, os insertos retificados com rebolo D46 obtiveram maior valor de desgaste de flanco ao final dos ensaios.

Com relação ao desenvolvimento de trabalhos futuros, é possível aprofundar o estudo da vida da ferramenta e os aspectos tribológicos do desgaste com a incorporação de outros processos de acabamento, como o polimento e a variação dos tipos e métodos de lubrificação durante o processo de corte.

REFERÊNCIAS

AFFATATO, S.; TRAINA, F. Bio and medical tribology. In: DAVIM, J. P. (org.). **Tribology for Engineers**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. cap. 6.

ANTONIALLI, A. Í. S. **Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2009. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas.

ARRAZOLA, P. et al. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 209, n. 5, p. 2223 – 2230, março 2009.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594 p.

ASM – AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook**. v. 2. Properties and selection: nonferrous alloys and pure metals. ASM International, 8th Ed., Metals Park-Ohio, 1971.

ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal Cutting**. 1. ed. Elsevier, 2006.

ASTAKHOV, V. P. Tribology of Cutting Tools. In: DAVIM, J. P. (org.). **Tribology in Manufacturing Technology**. Springer, 2012. cap. 1.

AZEVEDO, C. R. F. Microestrutura do titânio e suas ligas para implantes cirúrgicos. **Metalurgia & Metais**, p. 445 – 447, julho 2003.

BARTH, S.; KLOCKE, F. Influence of the grinding wheel topography on the thermomechanical stress collective in grinding. **Inventions**, v. 34, n. 2, p. 1 – 16, dezembro 2017.

BOYER, R. R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. **Materials Science and Engineering**, Elsevier, A213, n. 1-2, p. 103 – 114, 1996.

CAMPBELL, F. C. **Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials**. 1. ed. Elsevier, 2006. 616 p.

CHE-HARON, C. H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 118, p. 231 – 237, dezembro 2001.

DENKANA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Customized cutting edge preparation by means of grinding. **Precision Engineering**, Elsevier, v. 37, p. 590 – 598, janeiro 2013.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 134, p. 233 – 253, 2003.

EZUGWU, E. O. et al. Overview of the Machining of Titanium Alloys. **Encyclopedia of Sustainable Technologies**, Elsevier, v. 2, p. 487 – 506, julho 2017.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M. Titanium alloys and their machinability - a review. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 68, n. 3, p. 262 – 274, agosto 1997.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1^a. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. v. 1. 751 p.

FREITAS, M. C. R. S. **Caracterização da liga Ti-15Mo após tratamento termomecânico**. 2005. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, processes and systems**. 5^a. ed. Wiley, 2013. 1101 p.

HATT, O.; CRAWFORTH, P.; JACKSON, M. On the mechanism of tool crater wear during titanium alloy machining. **Wear**, Elsevier, v. 374-375, p. 15 – 20, março 2017.

HO, W. F. A comparison of tensile properties and corrosion behavior of cast Ti-7.5Mo with c.p., Ti, Ti-15Mo and Ti-6Al-4V alloys. **Journal off Alloys and Compounds**, Elsevier, n. 464, p. 580-583. 2008.

HORVÁTH, R.; DRÉGELYI-KISS, A.; MÁTYÁSI, G. The examination of surface roughness parameters in the fine turning of hypereutectic aluminum alloys. **UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering**, Universitatea Politehnica Bucuresti, v. 77, n. 2, p. 205 – 216, 2015.

HOSSEINI, A.; KISHAWY, H. A. Cutting Tool Materials and Tool Wear. In: DAVIM, J. P. (org.). **Machining of Titanium Alloys**. Springer, 2014. cap. 2.

JACKSON, M. J. et al. Tribology of Machining. In: DAVIM, J. P. (org.). **Tribology in Manufacturing Technology**. Springer, 2012. cap. 2.

KANG, Z. et al. From macro to micro, evolution of surface structures on cutting tools: a review. **JMST Advances**, Springer, p. 1 – 18, março 2019.

KAUR, M.; SINGH, K. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. **Materials Science and Engineering: C**, Elsevier, v. 102, p. 844 – 862, setembro 2019.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 504p.

KONIG, W. Applied research of the machinability of titanium and its alloys. **Proceedings of 47th Meeting of AGARD Structures and Materials Panel**. London: AGARD, 1979.

LIANG, X.; LIU, Z. Tool wear behaviors and corresponding machined surface topography during high-speed machining of Ti-6Al-4V with fine grain tools. **Tribology International**, Elsevier, v. 121, p. 321 – 332, 2018.

LIANG, X.; LIU, Z.; WANG, B. State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review. **Measurement**, Elsevier, v. 132, p. 150 – 181, janeiro 2019.

LIMIN, S. Investigation of tool wear and surface roughness when turning titanium alloy (Ti6Al4V) under different cooling and lubrication conditions. **Ferroelectrics**, Taylor & Francis Group, v. 526, p. 199 – 205, maio 2018.

LUO, Y.; YANG, L.; TIAN, M. Application of biomedical-grade titanium alloys in trabecular bone and artificial joints. In: DAVIM, J. P. (Ed.). **Biomaterials and Medical Tribology: Research and development**. Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 2013. cap. 3, p. 181 – 216.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2^a. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 397 p.

MALAKIZADI, A. et al. Physics-based approach for predicting dissolution–diffusion tool wear in machining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Elsevier, p. 1 – 4, 2020.

NIINOMI, M. Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. **Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials**, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 30 – 42, janeiro 2008.

NIINOMI, M.; NAKAI, M.; HIEDA, J. Development of new metallic alloys for biomedical applications. **Acta Biomaterialia**, Elsevier, v. 8, n. 11, p. 3888 – 3903, julho 2012.

ODELROS, S. et al. Experimental and theoretical study of the microscopic crater wear mechanism in titanium machining. **Wear**, Elsevier, v. 376-377, p. 115 – 124, janeiro 2017.

OLANDER, P.; HEINRICHS, J. Initiation and propagation of tool wear in turning of titanium alloys – Evaluated in successive sliding wear test. **Wear**, Elsevier, v. 426-427, p. 1658 – 1666, 2019.

PARIS, D. et al. Influence of built up edge on the surface topography of Ti-15Mo. In: **5th CIRP CSI**. Elsevier, 2020. v. 87, p. 137 – 141.

PETERS, M. et al. Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys. In: LEYENS, C.; PETERS, M. (org.). **Titanium and Titanium Alloys**. 1. ed. WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA, 2003. cap. 1, p. 1 – 36.

QIAN, X.; DUAN, X.; ZOU, J. Effects of different tool microstructures on the precision turning of titanium alloy TC21. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, p. 1 – 8, janeiro 2020.

RACK, H.; QAZI, J. Titanium alloys for biomedical applications. **Materials Science and Engineering: C**, Elsevier, v. 26, n. 8, p. 1269 – 1277, setembro 2006.

RAHMAN, M.; WANG, Z. G.; WONG, Y.S. A review on high-speed machining of titanium alloys. **JSME International Journal Series C**, The Japan Society of Mechanical Engineers, v. 49, n. 1, p. 11 – 20, 2006.

RIBEIRO, M.; MOREIRA, M.; FERREIRA, J. Optimization of titanium alloy (6Al–4V) machining. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 143-144, p. 458 – 463, dezembro 2003.

SILVA, O. S. da. **Avaliação da usinabilidade da liga Ti-6Al-4V no torneamento com alta velocidade de corte com diferentes métodos de lubri-refrigeração**. 2016. 142 p.
Dissertação (Programa de pós graduação em engenharia de materiais) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

TERLINDE, G; FISHCER, G. Beta Titanium Alloys. In: LEYENS, C.; PETERS, M. (org.). **Titanium and Titanium Alloys**. 1. ed. WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA, 2003. cap. 2, p. 37 – 57.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Elsevier, 1999. 446 p.

VENTURA, C.; KÖHLER, j.; DENKENA, B. Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Elsevier, v. 6, p. 246 – 253, agosto 2013.

WANG, B.; LIU, Z. Influences of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer London, v. 98, p. 1925 – 1975, junho 2018.

WYEN, C.; WEGENER, K. Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, Elsevier, v. 59, n. 1, p. 93 – 96, 2010.