

UMA CONTRIBUIÇÃO À USINAGEM DA LIGA Ti-15Mo

Juan Camilo Cardenas Rubio

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense 400, 13566-590, São Carlos/SP
camilo.rubio.97@hotmail.com

Leonildo Bernardo Pivotto

Armando Ítalo Sette Antonialli

Carlos Eiji Hirata Ventura

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos/SP

leonildopivotto@ufscar.br, ventura@ufscar.br

Resumo: Devido à sua alta resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade, elevada resistência à corrosão e ausência de elementos químicos potencialmente prejudiciais ao organismo, como o vanádio e o alumínio, ligas de titânio da classe beta têm sido cada vez mais utilizadas na indústria biomédica. Suas características, porém, levam a uma baixa usinabilidade, com adesão significativa do material da peça sobre a ferramenta e desgaste acelerado de flanco e cratera. Considerando-se as dificuldades existentes e a escassa quantidade de estudos relacionados especificamente à usinagem da liga Ti-15Mo, este trabalho tem como objetivo apresentar características associadas ao desgaste da ferramenta e rugosidade da peça após o torneamento deste material com a aplicação de diferentes avanços e velocidades de corte. Para isso, foram realizados testes de torneamento com insertos de metal duro sem revestimento em corpos de prova da liga mencionada. Ambos foram analisados por microscopia óptica para análise qualitativa e medição de parâmetros de rugosidade e desgaste. Resultados preliminares indicaram desgaste devido à adesão e à aresta postiça de corte em uma ampla faixa de parâmetros, que levaram a alterações da qualidade superficial.

Palavras-chave: Torneamento; Desgaste da ferramenta; Liga de titânio.

1. INTRODUÇÃO

As excelentes propriedades das ligas de titânio, tais como alta dureza, elevada resistência à corrosão, baixo coeficiente de expansão térmica e biocompatibilidade, possibilitam sua frequente aplicação nos campos aeroespacial, militar, petroquímico e biomédico (Peters *et al.*, 2003; Sha e Malinov, 2009). O titânio apresenta uma baixa densidade (60% menor quando comparada à de aços e superligas) e, através da adição de elementos intersticiais e processos de deformação, sua resistência mecânica pode ainda ser significativamente melhorada (Davim, 2014).

Desde a década de 1950, a liga mais amplamente empregada na fabricação de implantes para o corpo humano corresponde à liga Ti-6Al-4V (estrutura $\alpha+\beta$), em virtude de sua elevada resistência à tração (entre 900 e 1200 MPa), excelente resistência à corrosão e biocompatibilidade (Donachie, 2000; Peters *et al.*, 2003; Sha e Malinov, 2009). No entanto, diferentes pesquisas têm demonstrado que a liberação de íons de Al e V no sangue pode suscitar doenças, como Alzheimer, neuropatia e osteomalácia (Eisenbarth *et al.*, 2004; Gepreel e Niinomi, 2013). Em vista disto, esforços têm sido direcionados em encontrar diferentes materiais para aplicações biomédicas, situação que deu destaque às ligas de titânio tipo β , que, além de suas excelentes propriedades mecânicas, apresentam módulo de elasticidade mais próximo ao do osso e respostas apropriadas em relação à osseointegração e biofuncionalidade (Peters *et al.*, 2003; Kaur e Singh, 2019). Ligas de fase β , como os sistemas binários Ti-Mo, oferecem um bom comportamento em aplicações biomédicas. Ho (2008) realizou um estudo das propriedades mecânicas e resistência à corrosão do titânio comercialmente puro e das ligas Ti-7.5Mo, Ti-15Mo e Ti-6Al-4V. O autor observou que a liga Ti-15Mo proporcionava maior resistência à corrosão quando comparada com as outras ligas, apresentando, além disso, baixo módulo de elasticidade, o qual foi menor apenas na liga Ti-7.5Mo. Desse modo, a liga Ti-15Mo permite substituir satisfatoriamente o Ti-6Al-4V na produção de próteses ortopédicas.

A usinagem de ligas de titânio apresenta dificuldades devido às características próprias do material, como baixa condutividade térmica e alta resistência à deformação, propriedades que provocam a geração de grandes concentrações de tensão e de calor na aresta de corte, além da forte reatividade química com diferentes materiais de ferramenta, que leva ao enfraquecimento do inserto através do desgaste por adesão e difusão, especialmente em condições de alta temperatura (An, 2011). Agrawal *et al.* (2021) estudaram o desgaste de uma ferramenta de metal duro revestida no torneamento da liga Ti-6Al-4V (Ti64) com aplicação de fluido convencional e diferentes velocidades de corte ($v_c = 70, 80, 90, 100$ e 110 m/min), profundidade de corte $a_p = 0,5$ mm e avanço $f = 0,3$ mm/rev. As ferramentas apresentaram

mecanismos de desgaste por abrasão, adesão e aresta postiça de corte (APC), levando à formação de desgaste de flanco e cratera nos insertos. Os autores também observaram que o desgaste de flanco aumentava rapidamente com o crescimento da velocidade de corte, como consequência do maior calor gerado na região de corte.

Vários autores identificaram a cratera como o principal tipo de desgaste em ferramentas de metal duro na usinagem de ligas de titânio β metaestáveis de alta resistência, a qual ocorre em temperaturas entre 900 e 1050 °C. Graves *et al.* (2021) estudaram o mecanismo que gerou este tipo de desgaste em insertos de metal duro sem revestimento no torneamento da liga Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti-5553) a uma velocidade de corte de 70 m/min, avanço de 0,1 mm/rev, profundidade de usinagem de 1 mm e aplicação de emulsão a uma taxa de 5,4 l/min. Os autores verificaram que o processo de desgaste de cratera começa com a rápida difusão do cobalto para dentro do Ti-5553 aderido na superfície da ferramenta, o qual desliza sobre a região onde a cratera será formada, removendo pequenas partículas de WC do inserto. Quando o Ti-5553 permanece aderido por mais de 10 segundos na superfície de saída, a descarbonetação do WC é iniciada, formando carbonetos metálicos na interface e agravando a evolução da cratera. Com o avanço deste processo de degradação, pode ocorrer deformação plástica e, eventualmente, fratura da ponta da ferramenta. Em contrapartida, Pivotto *et al.* (2022) não observaram desgaste de cratera em ferramentas de metal duro sem revestimento no torneamento da liga Ti-15Mo, mas unicamente desgaste de flanco, gerados pelos mecanismos de adesão e difusão, altamente influenciados pela forte afinidade química entre os materiais da ferramenta e da peça e as elevadas temperaturas atingidas durante o processo de corte. Os autores encontraram uma alta concentração de titânio e molibdênio na região próxima à aresta de corte, seguida por uma zona com aspecto liso e elevada concentração de tungstênio, situação que está associada à transferência de átomos de cobalto e carbono ao cavaco.

Neste contexto e tendo em vista a pequena quantidade de estudos relacionada à usinagem da liga de titânio β Ti-15Mo, o que limita o conhecimento sobre o comportamento do processo em diferentes condições e, com isso, dificulta seu planejamento para a produção de peças, o presente trabalho tem como objetivo a apresentação de resultados de desgaste de ferramentas de metal duro após a usinagem do material mencionado com a aplicação de diferentes parâmetros de corte, não fazendo parte do escopo o levantamento de curvas de desgaste da ferramenta, mas uma análise dos mecanismos em diferentes situações.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Blanks de metal duro (WC-5%Co) com dimensões 12,7 mm × 12,7 mm × 4,9 mm foram transformados em insertos com geometria SBGN120408 (quadrado, com ângulo de folga de 5°, raio de ponta de 0,8 mm e sem preparação específica de aresta) em uma retificadora para afiação de ferramentas Agathon DOM Plus (potência máxima de 16 kW e rotação máxima de 3400 rpm) equipada com rebolo diamantado do tipo copo, com tamanho de grão D46, ligante resinoide e concentração C100. Para isso, foi aplicado óleo mineral integral de forma abundante e condições de corte constantes: velocidade de corte $v_c = 20$ m/s, velocidade de avanço axial $v_{fa} = 6$ mm/min e velocidade de rotação do inserto para preparação do raio de ponta $v_R = 35$ °/s. Antes da retificação de cada *blank*, o rebolo foi dressado por um rolo dressador, também do tipo copo, de óxido de alumínio e granulometria 180#, com velocidade de corte do dressador $v_{cd} = 10$ m/s, velocidade de avanço axial do dressador $v_{fad} = 3$ µm/s e percurso de dressagem $l_d = 15$ µm. Em seguida, os insertos foram caracterizados em um microscópio confocal Alicona InfiniteFocus SL (aumento máximo de 500x com as lentes disponíveis), tendo sido obtida na região do raio de ponta uma rugosidade máxima $R_z = 2,50 \pm 0,28$ µm e um lascamento na aresta $\Delta r = 2,75 \pm 0,21$ µm.

Estes foram então aplicados no torneamento de eixos da liga Ti-15Mo, com diâmetro inicial de 34 mm e comprimento de 150 mm. Após a usinagem de trechos de 30 mm de comprimento axial com as diferentes condições de corte (conforme Tab. 1), o processo era interrompido e a ponta do inserto utilizada era analisada no referido microscópio, assim como a superfície produzida no respectivo trecho, a qual foi quantitativamente avaliada a partir dos valores médios e desvios-padrões das rugosidades média R_a e máxima R_z medidas em uma única região, mas com a aplicação de 100 perfis e *cut-offs* de 0,8 mm e 2,5 mm, de acordo com a norma EN ISO 4288, que define estes valores com base no espaçamento médio das irregularidades do perfil (periódico) de rugosidade (R_{sm}). Por fim, uma das condições ($v_c = 180$ m/min, $f = 0,2$ mm/rev e $a_p = 0,5$ mm) foi escolhida para avaliação do efeito do tempo de corte sobre a evolução do desgaste.

Tabela 1. Condições de corte utilizadas nos ensaios

Velocidade de corte v_c [m/min]	Avanço f [mm/rev]	Profundidade de usinagem a_p [mm]
60	0,2	0,5
100		
150		
180		
200		
180	0,2	0,5
	0,5	
	0,8	
	1,0	

Condições mais amenas de corte foram escolhidas a partir da experiência dos autores na usinagem de diferentes ligas de titânio e recomendações obtidas em catálogos de fabricantes. Já os maiores valores foram selecionados e testados com o objetivo de se verificar a reposta da ferramenta em condições mais agressivas, principalmente no que tange à adesão do material da peça sobre a aresta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Fig. 1 e 2 apresentam, respectivamente, as imagens dos inserts utilizados e das superfícies torneadas com diferentes velocidades de corte e avanço após o torneamento de um comprimento axial de 30 mm. A baixas velocidades, é possível observar forte adesão do material da peça na aresta de corte, o que impede uma visão clara de algum tipo de desgaste, com exceção do inserto aplicado a uma velocidade de corte de 200 m/min, no qual se verifica menor adesão de material, mas ocorrência de abrasão e arrancamento, que levaram a desgastes de flanco ($VB_{Bmax} = 564,65 \mu m$) e cratera ($KT_{max} = 69,19 \mu m$). O aumento da velocidade de corte pode ter reduzido a tendência do material ao encruamento e consequente formação de aresta postiça, fenômeno corroborado pela menor quantidade de partículas aderidas nas superfícies torneadas nas últimas condições (Fig. 2). Apesar disso, não se nota tendência de variação da rugosidade com a mudança da velocidade de corte, conforme mostrado na Fig. 3a.

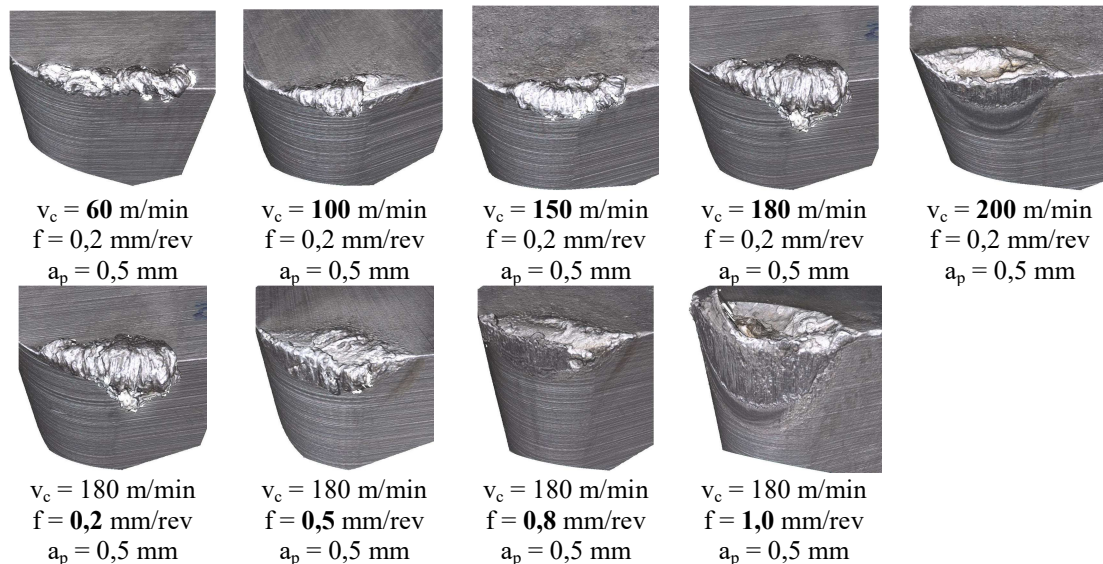


Figura 1. Imagens dos inserts utilizados com diferentes parâmetros de corte após a usinagem de um trecho com 30 mm de comprimento (aumento de 100x)

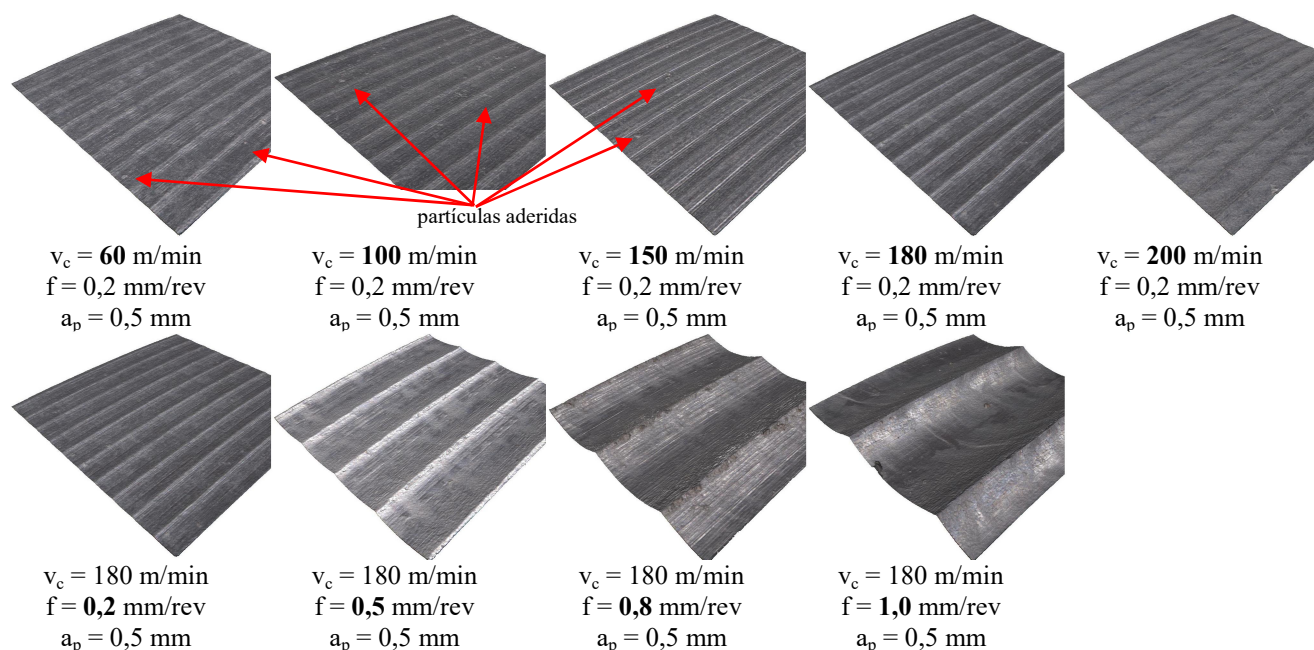


Figura 2. Imagens das superfícies torneadas com diferentes parâmetros de corte após a usinagem de um trecho com 30 mm de comprimento (aumento de 100x)

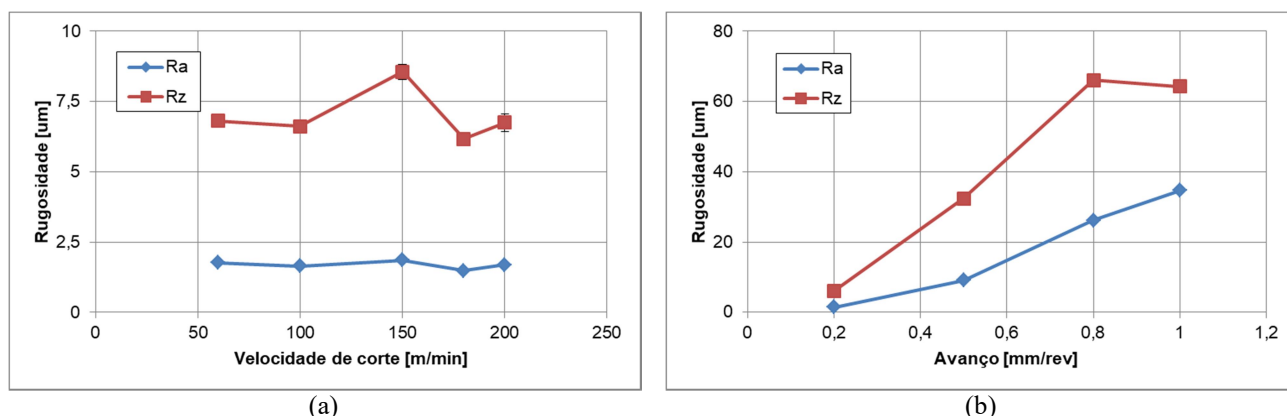


Figura 3. Variação da rugosidade média Ra e máxima Rz com o aumento (a) da velocidade de corte ($f = 0,2$ mm/ver, constante) e (b) do avanço ($v_c = 180$ m/min, constante)

Já o aumento do avanço inicia a formação de crateras na superfície de saída e aumenta o nível do desgaste de flanco (Tab. 2) ainda em um primeiro passe, devido à intensificação do mecanismo de adesão-arraçamento e abrasão (Fig. 1). Por outro lado, não se notam partículas aderidas às superfícies de forma aleatória, indicando a não formação de aresta postiça de uma maneira consistente. Irregularidades nos picos de rugosidade após o torneamento com os avanços de 0,5 mm/rev e 0,8 mm/rev (Fig. 2) podem ter sido ocasionadas pela intensa deformação do material com o avanço da seção do cavaco nessa região, mas o aumento significativo da rugosidade com o crescimento do avanço, mostrado na Fig. 3b, está principalmente associado à cinemática do processo. Para o avanço de 1 mm/rev, a formação de uma cratera mais profunda pode ter compensado tal fenômeno, favorecendo o escoamento do cavaco e facilitando o corte. Com isso, não houve crescimento da rugosidade.

Tabela 2. Desgastes de flanco e cratera para diferentes avanços ($v_c = 180$ m/min, constante)

Avanço f [mm]	Desgaste máximo de flanco VB_{Bmax} [μm]*	Profundidade máxima de cratera KT_{max} [μm]*
0,2	-	-
0,5	-	23,09
0,8	277,61	27,89
1,0	776,43	138,14

*Os traços indicam que não foi possível a medição do desgaste em função do material aderido

Fornecendo um indicativo da tendência à adesão de material na ferramenta nas diferentes condições, a medição dos volumes de material aderido sobre a ferramenta ao final de cada passe, ou seja, após a usinagem de um trecho com 30

mm de comprimento (Fig. 4), apoia as explicações apresentadas, demonstrando a redução do volume com fraca correlação para o aumento da velocidade de corte, mas elevada para o aumento do avanço.

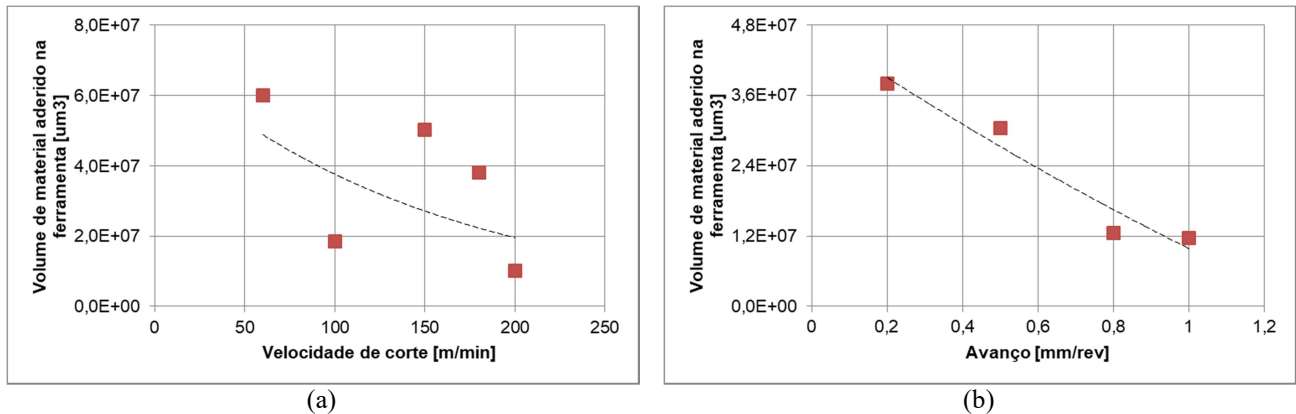


Figura 4. Volume de material aderido na aresta de corte com o aumento (a) da velocidade de corte ($f = 0,2$ mm/ver, constante) e (b) do avanço ($v_c = 180$ m/min, constante) após a usinagem de um trecho com 30 mm de comprimento

Por fim, diferentes pontas foram utilizadas em diferentes tempos de corte (Fig. 5) para uma investigação da evolução do desgaste, que pode ser observada na Tab. 3. Tendo em vista os parâmetros utilizados, percebe-se o aumento do desgaste de cratera e de flanco com maiores tempos de corte. Além de uma superfície irregular, típica do mecanismo de adesão, em uma região mais distante da aresta, também na superfície de folga, verifica-se uma superfície mais regular, que pode indicar a ocorrência de difusão.

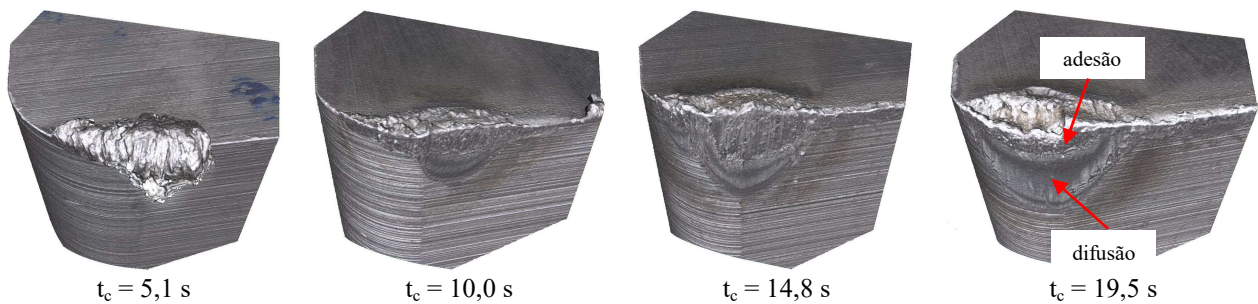


Figura 5. Imagens dos insertos utilizados em diferentes tempos de corte ($v_c = 180$ m/min, $f = 0,2$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm, aumento de 100x)

Tabela 3. Desgastes de flanco e cratera para diferentes tempos de corte

Tempo de corte t_c [s]	Desgaste máximo de flanco VB_{Bmax} [μm]*	Profundidade máxima de cratera KT_{max} [μm]*
5,1	-	-
10,0	339,35	3,73
14,8	582,09	-
19,5	658,79	70,40

*Os traços indicam que não foi possível a medição do desgaste em função do material aderido

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos após o torneamento da liga Ti-15Mo, pode-se concluir que:

- Há grande tendência de adesão do material da peça sobre a ferramenta, que favorece a formação de aresta postiça, principalmente a velocidades de corte abaixo de 200 m/min. Nesta velocidade, em particular, passa-se a verificar a ocorrência de desgaste de flanco e cratera.
- Embora se tenha observado a adesão de partículas na superfície da peça após o torneamento com menores velocidades de corte, não houve alteração significativa dos valores de rugosidade com a mudança deste parâmetro.
- O aumento do avanço dentro da faixa estudada provocou intensificação do mecanismo de adesão-arrancamento e abrasão e, conseqüentemente, dos desgastes de flanco e cratera. Além disso, gerou aumento da rugosidade e redução do volume de material aderido.
- Com o crescimento do tempo de aplicação da ferramenta, percebeu-se aumento dos desgastes de flanco e cratera e, além da ocorrência do mecanismo de adesão, notou-se difusão em regiões mais afastadas da aresta.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Processos nº 2015/15622-2, 2017/12304-5, 2017/12309-7 e 2018/24614-1), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Processo nº 305730/2022-3) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de financiamento 001) pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Agrawal, C., Wadhwa, J., Pitroda, A., Pruncu, C.I., Sarikaya, M. e Khanna, N., 2021. Comprehensive analysis of tool wear, tool life, surface roughness, costing and carbon emissions in turning Ti-6Al-4V titanium alloy: Cryogenic versus wet machining. *Tribology International*, Vol. 153, p. 106597.
- An, Q.L., Fu, Y.C. e Xu, J.H., 2011. Experimental study on turning of TC9 titanium alloy with cold water mist jet cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, p. 549-555.
- Davim, J.P., 2014. *Machining of titanium alloys: Materials forming, machining and tribology*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1st ed.
- Donachie, M., 2000. *Titanium: A technical guide*. ASM International, Kinsman Road, 2 ed.
- Eisenbarth, E., Velten, D., Müller, M., Thull, R. e Breme, J., 2004. Biocompatibility of β -stabilizing elements of titanium alloys. *Biomaterials*, Vol. 25, p. 5705-5713.
- Gepreel, M. e Niinomi, M., 2013. Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 20, p. 407-415.
- Graves, A., Norgren, S., Wan, W., Singh, S., Kritikos, M., Xiao, C., Crawforth, P. e Jackson, M., 2021. On the mechanism of crater wear in a high strength metastable β titanium alloy. *Wear*, Vol. 484-485, p. 203998.
- Ho, W.F., 2008. 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 of Alloys and Compounds*, Vol. 464, p. 580-583.
- Kaur, M. e Singh, K., 2019. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 102, p. 844-862.
- Peters, M. et al., 2003. Structure and properties of titanium and titanium alloys. In: Leyens, C.; Peters, M. (Org.). *Titanium and titanium alloys*. Wiley-VCH, 1st ed.
- Pivotto, L.B., Antonialli, A.Í.S. e Ventura, C.E.H., 2022. Tribological aspects of tool wear during turning Ti-15Mo alloy with cemented tungsten carbide cutting inserts prepared with different surface finishes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 1-9, p. 135065012210928.
- Sha, W. e Malinov, S., 2009. *Titanium alloys: Modelling of microstructure, properties and applications*. TJ International Limited, 1st ed.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

A CONTRIBUTION TO THE MACHINING OF Ti-15Mo ALLOY

Juan Camilo Cardenas Rubio

São Carlos School of Engineering at the University of São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense 400, 13566-590, São Carlos/SP, Brazil
camilo.rubio.97@hotmail.com

Leonildo Bernardo Pivotto

Armando Ítalo Sette Antonialli

Carlos Eiji Hirata Ventura

Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Carlos, Rod. Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos/SP, Brazil
leonildopivotto@ufscar.br, ventura@ufscar.br

Abstract. *Due to its high mechanical strength, low elastic modulus, high corrosion resistance and absence of potentially harmful chemical elements, such as vanadium and aluminum, titanium alloys of the beta class have been increasingly used in the biomedical industry. Their characteristics, however, lead to low machinability, with significant adhesion of the workpiece material on the tool and accelerated flank and crater wear. Considering the existing difficulties and the scarce amount of studies related specifically to the machining of Ti-15Mo alloy, this work aims to present characteristics associated with tool wear and surface roughness after turning this material with the application of different feeds and cutting speeds. For this, turning tests were carried out with uncoated cemented tungsten carbide cutting inserts in workpieces of the aforementioned alloy. Both were analyzed by optical microscopy for qualitative analysis and measurement of roughness and wear parameters. Preliminary results indicated wear due to adhesion and built-up edge formation over a wide range of parameters, which led to changes in surface quality.*

Keywords: *Turning; Tool wear; Titanium alloy.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.