

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NA RUGOSIDADE DA LIGA Ti-15Mo TORNEADA

Denny Paris

Armando Ítalo Sette Antonialli

Carlos Eiji Hirata Ventura

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos. Rodovia Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos / SP, Brazil
denny.paris@yahoo.com.br, antonialli@ufscar.br, ventura@ufscar.br

Resumo. As ligas de titânio são consideradas materiais de difícil usinabilidade, devido à sua afinidade química com diversos materiais de ferramenta, manutenção da resistência mecânica a elevadas temperaturas, baixo módulo de elasticidade e baixa condutividade térmica, fatores que levam ao desgaste acelerado e danos superficiais na peça usinada. Neste contexto, o presente trabalho tem como foco a investigação da influência de diferentes geometrias de ferramenta na qualidade superficial da liga Ti-15Mo. Para isso, insertos de metal duro sem revestimento foram preparados com diferentes ângulos de folga e raios de ponta e aplicados com condições constantes em processo de torneamento. A partir dos resultados obtidos, ficou nítida a contribuição geométrica do raio de ponta na rugosidade e a predominância de perfis homogêneos, com vales largos e picos estreitos, através das diferentes combinações de geometria de ferramenta.

Palavras chave: Ligas de titânio. Usinagem. Geometria da ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

As principais propriedades das ligas de titânio são a alta resistência à corrosão, a elevada resistência específica e a manutenção das propriedades mecânicas a elevadas temperaturas. Em comparação a outros materiais que compartilham de aplicações semelhantes, como as ligas à base de níquel, o titânio apresenta metade dos valores de peso específico, justificando assim sua empregabilidade na indústria aeroespacial. Entretanto, este segmento não é o único a empregar o titânio, que tem sido frequentemente utilizado nas indústrias naval, biomédica, química e petrolífera (Peters et al., 2003). Koizumi et al. (2019) afirmam que o titânio e suas ligas são materiais propícios à substituição de tecidos duros, como próteses dentárias, devido à incidência de altas cargas. Boyer e Briggs (2005) definem o titânio como material chave na fabricação de componentes aeronáuticos, devido à sua baixa densidade e alta resistência à corrosão.

Ligas de titânio são classificadas segundo seus elementos constituintes e em razão da estabilidade de fases que os mesmos promovem. As ligas são classificadas como α , β , $\alpha + \beta$, $\text{near-}\alpha$ e β -metaestável.

Martins et al. (2011) atentam ao fato de que ligas que contêm Al e V em sua composição causam problemas neurológicos e enzimáticos aos usuários de próteses, surgindo a necessidade de novas ligas para aplicação biomédica, com maior resistência à corrosão e maior vida em fadiga. Segundo Koizumi et al. (2019), o molibdênio, presente na liga aqui estudada, é um elemento promissor, sendo biocompatível e possuindo alta resistência à corrosão.

O módulo de elasticidade é outro fator importante na escolha de materiais para próteses, sendo as ligas β de titânio detentoras de valores próximos à metade daquelas usadas com grande frequência, como as Ligas Cr-Co e ligas de titânio $\alpha + \beta$ (Niinomi, 2008). Menores módulos de elasticidade se assemelham ao comportamento dos ossos do corpo humano, promovendo uma distribuição mais homogênea das tensões entre osso e prótese, evitando problemas como reabsorção óssea e degeneração (Niinomi et al. 1999; Niinomi, 2003). Para o sucesso da osseointegração em biomateriais, Bagno e Bello (2004a) destacam, entre outros fatores, as características superficiais das próteses. A adesão óssea da prótese está diretamente relacionada às características superficiais, como morfologia, rugosidade e microtopografia (Rich e Harris, 1981; Thomas e Cook, 1985). A adesão do osso pode ter maior sucesso em superfícies mais rugosas (Albrektsson et al. 1981), porém, os tecidos conectivos fibrosos se conectam melhor em superfícies mais bem-acabadas (Cochran et al. 1984). Sendo assim, a modificação superficial vem sendo investigada com o intuito de melhorar o contato entre a interface osso-implante, resultando em melhor integração entre os mesmos.

Lincks et al. (1998) notaram o papel da rugosidade quanto à resposta celular. Os autores observaram que a distância entre picos não deve exceder a capacidade da célula em aderir à superfície. Bagno e Bello (2004b) estudaram a obtenção de novas superfícies com formas e tolerâncias geométricas adequadas à utilização em próteses, através do processo de torneamento, e perceberam que os valores mais comuns de rugosidade R_a estavam entre 0,3 μm e 0,6 μm . Os autores afirmam ainda que, para a obtenção de menores valores de rugosidade, é prática comum o uso de pasta de diamante e alumina, entretanto, em razão da alta afinidade química do titânio e suas ligas, essa prática não é

recomendada, já que a difusão de elementos, os quais atuam como contaminantes, pode ser prejudicial ao portador da prótese.

Nesse contexto, Zlatin e Field (1973) afirmam que o titânio é um material caro, devido às dificuldades de extração, beneficiamento e usinagem e Astakhov (2010) defende uma seleção adequada de parâmetros e ferramentas para se alcançar uma integridade superficial adequada. Assim, o presente trabalho tem como objetivo determinar uma geometria de ferramenta apropriada para a obtenção de superfícies com elevada qualidade no torneamento da liga Ti-15Mo. Para isso, é investigada a influência do ângulo de folga e raio de ponta sobre os parâmetros de rugosidade R_z , R_{sk} e R_{ku} .

2. MATERIAS E MÉTODOS

Para a realização dos testes, foram utilizados insertos de metal duro sem revestimento, com composição de WC-5%Co e geometria $S(\alpha_o)MN1204(r_e)$, que tiveram suas superfícies de saída e de folga preparadas através do processo de retificação plana transversal de mergulho em uma retificadora CNC de quatro eixos Agathon DOM Plus, equipada com um rebolo de diamante do tipo copo, com ligante resinoide, granulometria D46 e concentração C100. O processo contou com aplicação de óleo mineral integral abundante e condições de corte constantes ($v_{fa} = 2$ mm/min, $v_c = 20$ m/s, $v_R = 35^\circ/\text{min}$). Com a intenção de se evitar os efeitos relativos ao desgaste da ferramenta abrasiva, anteriormente à retificação de cada inserto, o rebolo foi dressado por um rolo dressador de óxido de alumínio do tipo copo com tamanho de grão 180#. Para isso, utilizou-se uma velocidade de avanço axial de dressagem $v_{fad} = 5$ $\mu\text{m/s}$, uma velocidade tangencial do rolo dressador $v_{cd} = 10$ m/s e um percurso total de dressagem $l_d = 15$ μm .

Como forma de evidenciar a influência da geometria da ferramenta sobre a rugosidade da liga estudada, os insertos foram preparados com diferentes ângulos de folga e raios de ponta, levando em consideração um planejamento fatorial completo com duas variáveis e três níveis: $\alpha_o = 5^\circ, 7^\circ, 11^\circ$ e $r_e = 0,4$ mm, 0,8 mm e 1,2 mm.

Os testes de torneamento foram realizados em corpos de prova da liga Ti-15Mo, com comprimento de 100 mm e diâmetro de 30 mm, aplicação de fluido de corte em abundância (emulsão com 10% de concentração) e condições de acabamento constantes ($v_c = 100$ m/min, $f = 0,2$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm) em um torno CNC Romi Centur 30D, com potência máxima de 9 kW e rotação máxima de 4000 rpm. O porta-ferramenta utilizado tem código CSDBN2020K12, fornecendo ângulo de saída neutro, assento com ângulo de folga de 5° e ângulo de posição de 45° . A fim de se evitar o efeito do desgaste da ferramenta, arestas novas, com cada combinação de geometria, foram aplicadas no torneamento de dois trechos do corpo de prova, com comprimento de 15 mm cada.

As superfícies torneadas foram avaliadas pelo microscópio para análise de imagens tridimensionais Alicona InfiniteFocus SL, tendo sido medidos os seguintes parâmetros de rugosidade: R_z (rugosidade máxima), R_{ku} (curtose) e R_{sk} (assimetria). Em cada trecho usinado foram medidos 200 perfis paralelos à direção de avanço em duas regiões, sendo analisadas 800 medições para cada condição. Em função da amplitude de R_a , foram utilizados valores de *cut-off* para filtragem dos dados brutos de 0,8mm ($0,1$ $\mu\text{m} < R_a \leq 2$ μm) e 2,5 mm (2 $\mu\text{m} < R_a \leq 10$ μm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da avaliação dos parâmetros de rugosidade, faz-se necessária uma análise das superfícies geradas pelo processo de torneamento (Fig. 1).

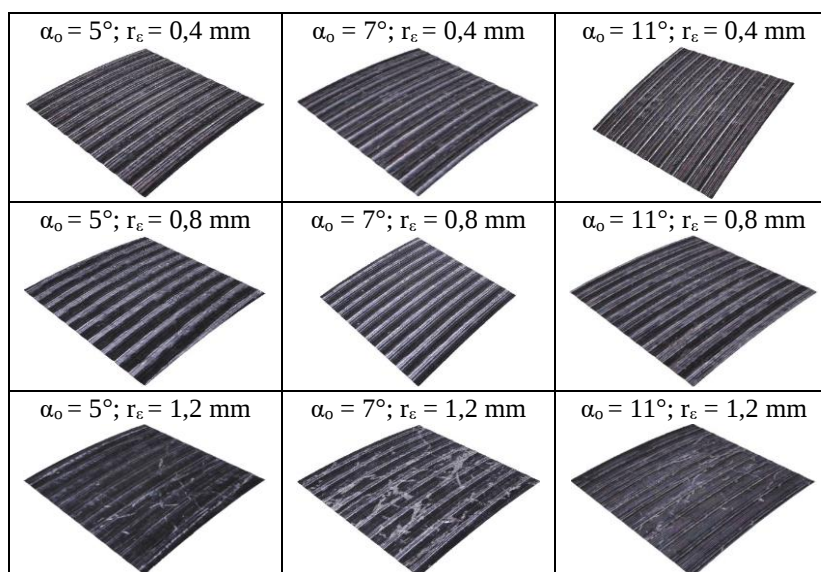


Figura 1. Superfícies geradas pelo processo de torneamento com insertos de diferentes geometrias

As marcas de avanço são predominantes em todas as condições, assim como a ausência de arrancamento de material e de material aderido, o que caracterizaria a ocorrência de fluxo lateral de cavaco. A ausência de desgaste da ferramenta durante os testes e a utilização de geometria neutra, assim como a presença de arestas afiadas, contribuiu para os resultados alcançados, sem que a variação dos ângulos de folga e raios de ponta tenha levado a alterações nas características observadas. A incidência de riscos na ferramenta com $r_e = 1,2$ mm é atribuída ao emaranhamento de cavaco na peça, que teve sua ruptura dificultada devido à maior dimensão do raio de ponta, que favoreceu o esmagamento do material. Entretanto, os riscos observados não prejudicaram significativamente a rugosidade da peça. Adicionalmente, verificou-se a ausência de partículas aderidas na superfície provenientes de aresta postiça de corte (APC), embora tenha sido notado um grande volume de material aderido na superfície de saída dos insertos (Fig. 2), o que não caracteriza necessariamente a ocorrência de desgaste durante o corte realizado por cada aresta.

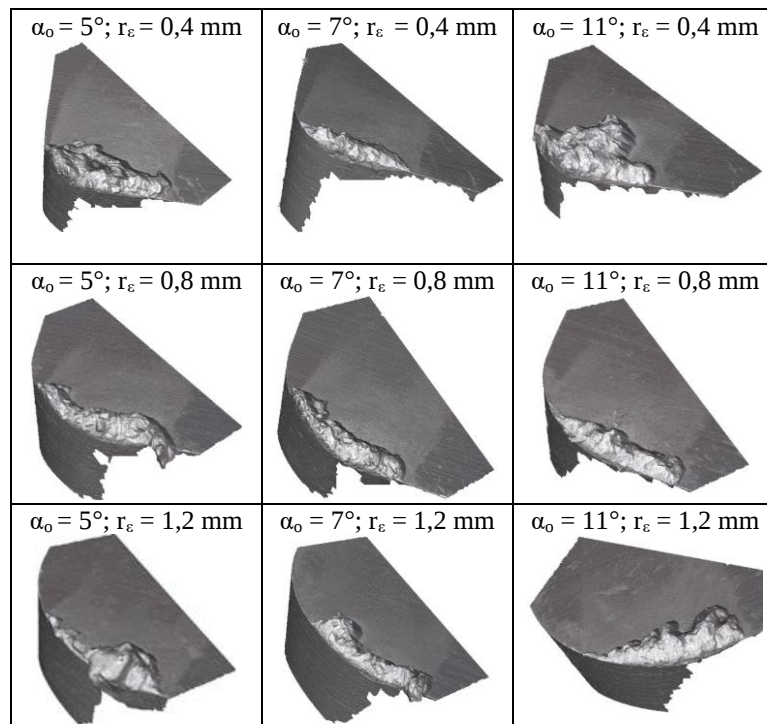


Figura 2. Imagens dos insertos com diferentes ângulos de folga e raios de ponta após o processo de torneamento

Com a intenção de se mensurar a qualidade superficial dos corpos de prova, diferentes parâmetros de rugosidade foram avaliados. Para R_z , é possível observar uma diminuição dos valores em função do aumento de r_e , como mostra a Fig. 3. Tal fenômeno está intrinsicamente relacionado à contribuição geométrica do raio de ponta, sugerindo que uma maior deformação do material na extremidade do inserto não é suficiente para causar a extrusão do cavaco. Já o efeito do ângulo de folga foi pouco significativo e certo aumento da rugosidade foi verificado apenas para o ângulo de 11° combinado aos raios de ponta de 0,4 mm e 1,2 mm.

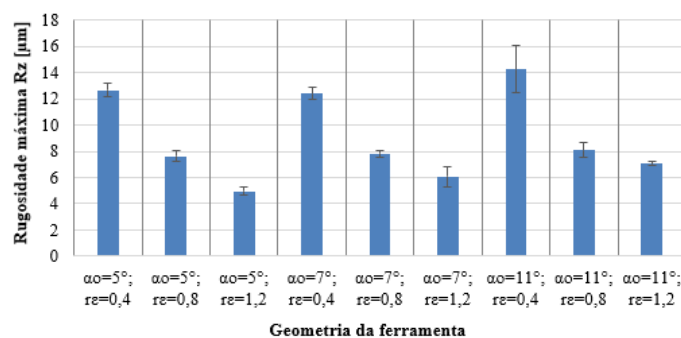


Figura 3. Rugosidade máxima Rz obtida após torneamento com insertos preparados com diferentes ângulos de folga e raios de ponta

Levando em consideração o ângulo de saída neutro, esperava-se que com o aumento do ângulo de folga e diminuição do ângulo de cunha, a ferramenta tivesse maior poder de corte no material com baixo módulo de elasticidade, porém, tal efeito pode ter sido contrabalanceado pela maior dificuldade do fluxo de cavaco sobre a aresta, demonstrado pelo volume de material aderido na ferramenta (Fig. 2).

Através dos dados apresentados, é possível notar a influência geométrica do perfil da ferramenta à superfície gerada. Entretanto, quando se compara a rugosidade máxima teórica R_{th} ($= f^2 / 8 \cdot r_e$) com a rugosidade máxima Rz, percebe-se que a contribuição geométrica, em média, decresce com o aumento do ângulo de folga (Tab. 1), primeiro com uma redução aproximada de 6% (entre 5° e 7°) e depois de 10% (entre 7° e 11°).

Tabela 1. Relação entre rugosidade máxima teórica R_{th} e rugosidade máxima Rz

α_o [°]	5			7			11		
r_e [mm]	0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2
R_{th} [μm]	0,0125	0,0063	0,0042	0,0125	0,0063	0,0042	0,0125	0,0063	0,0042
Rz [μm]	12,6570	7,6052	4,9415	12,4010	7,8410	6,0595	14,2647	8,1012	7,0730
R_{th} / R_z [%]	0,0987	0,0821	0,0843	0,1008	0,0797	0,0688	0,0876	0,0771	0,0589

Os resultados relativos à curtose Rku podem ser observados na Figura 4, onde se mostra a predominância de achatamento do perfil de rugosidade ($Rku < 3$) para todas as condições da ferramenta, não havendo tendência específica. Isso demonstra que, independentemente da geometria da ferramenta (dentro da faixa testada), a superfície apresenta picos e vales achatados, o que reduz sua tendência ao crescimento inicial acelerado do desgaste, quando os picos são removidos por meio do primeiro contato com um segundo corpo.

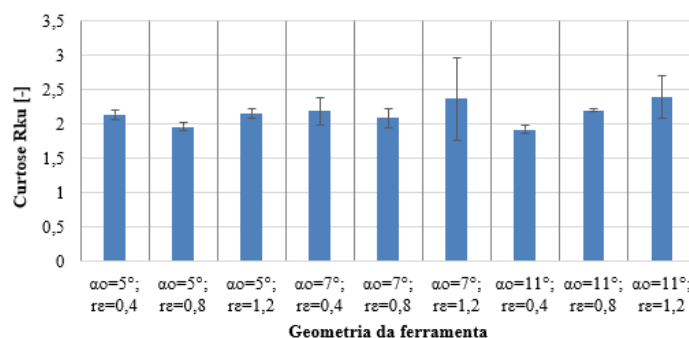


Figura 4. Valores de curtose Rku obtidos após torneamento com insertos preparados com diferentes ângulos de folga e raios de ponta

Na Fig. 5, relativa ao comportamento de Rsk, observa-se ausência de comportamento regular, sendo os valores médios positivos, variando aproximadamente entre 0,2 e 0,6. Assim, verifica-se uma menor importância do tipo de ferramenta aplicada para a obtenção da característica superficial discutida. Com isso, é possível inferir que o perfil de rugosidade, com Rsk perto de 0, possui, de modo geral, vales largos e picos estreitos, o que favorece o acúmulo de fluidos lubrificantes entre superfícies em contato. Apesar da elevada dispersão, no entanto, maiores valores médios de Rsk foram observados para os raios de ponta de 1,2 mm, mas apenas em ferramentas com ângulos de folga de 7° e 11°. Estes maiores ângulos reduzem o contato da superfície de folga com a peça e podem ter permitido uma maior influência do maior raio de ponta sobre este parâmetro.

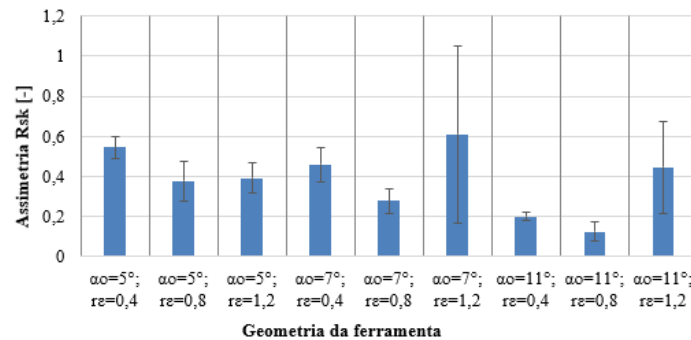


Figura 5. Valores de assimetria Rsk obtidos após torneamento com insertos preparados com diferentes ângulos de folga e raios de ponta

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou resultados da influência do ângulo de folga e do raio de ponta da ferramenta sobre as características superficiais da liga Ti-15Mo processada por torneamento. A partir deles, foram tiradas as seguintes conclusões:

- Para o parâmetro Rz, fica evidente a contribuição geométrica de r_e , cujo aumento leva a menores valores de rugosidade. Já o ângulo de folga gerou efeito pouco significativo.
- Em todas as combinações de geometria de ferramenta, evidenciou-se a predominância de achatamento do perfil de rugosidade, tendo como resultado, de modo geral, $Rku < 3$.
- Para Rsk, os valores obtidos são próximos de zero, não havendo tendência clara para os diferentes insertos. Isso indica um perfil de rugosidade homogêneo, formado por vales largos e picos mais estreitos em todos os casos.

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa de estudos, e à FAPESP, pelo apoio financeiro para disponibilização dos equipamentos e materiais necessários à pesquisa (Processos nº 2015/15622-2, 2017/12304-5 e 2017/12309-7).

6. REFERÊNCIAS

- Albrektsson, T. *et al.*, 1981. "Osseointegrated Titanium Implants: requirements for ensuring a long-lasting, direct bone-to-implant anchorage in man". *Acta Orthopaedica Scandinavica*, v. 52, n. 2, p. 155-170. <http://dx.doi.org/10.3109/17453678108991776>.
- Astakhov, V. P., 2010. "Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance". In: DAVIM, J. P. (Ed.). *Surface Integrity in Machining*. London: Springer-Verlag, p. 1-32.
- Bagno, A.; Bello, C. D.J., 2004. "Surface treatments and roughness properties of Ti-based biomaterials". *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, v. 15, n. 9, p. 935-949. <http://dx.doi.org/10.1023/b:jmsm.0000042679.28493.7f>.
- Boyer, R. R.; Briggs, R. D., 2005. "The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry". *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 14, n. 6, p. 681-685. <http://dx.doi.org/10.1361/105994905x75448>.
- Conchra, D; et al., 1994. "Attachment and Growth of Periodontal Cells on Smooth and Rough Titanium". *International Journal Oral Maxillofac Implants*. p. 289-297.
- Koizumi, H. et al., 2019. "Application of titanium and titanium alloys to fixed dental prostheses". *Journal of Prosthodontic Research*, v. 63, n. 3, p.266-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpor.2019.04.011>.
- Lincks, J. *et al.*, 1998. "Response of MG63 osteoblast-like cells to titanium and titanium alloy is dependent on surface roughness and composition". *The Biomaterials: Silver Jubilee Compendium*, p. 147-160. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-008045154-1.50019-8>.
- Martins, J. R. S. et al., 2011. "Preparation and characterization of Ti-15Mo alloy used as biomaterial". *Materials Research*, [s.l.], v. 14, n. 1, p.107-112. <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392011005000013>.
- Niinomi, M. et al., 1999. "Corrosion wear fracture of new - type biomedical titanium alloys". *Materials Science and Engineering A*, v. 263, n. 2, p.193-199. [http://dx.doi.org/10.1016/s0921-5093\(98\)01167-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0921-5093(98)01167-8).
- Niinomi, M., 2003. "Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods". *Science and Technology of Advanced Materials*, v. 4, n. 5, p. 445-454. <http://dx.doi.org/10.1016/j.stam.2003.09.002>.
- Niinomi, M., 2008. "Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 1, n. 1, p. 30-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2007.07.001>.

- Peters, M. et al. (Ed.). "Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys". In: Leyens, C.; Peters., 2003. M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. Weinheim: Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KGaA. p. 1-35.
- Rich, A.; Harris, A. K., 1981. "Anomalous preferences of cultured macrophages for hydrophobic and roughened substrata". Journal of Cell Science, v. 50, p. 1-7.
- Thomas, K. A.; Cook, S. D., 1985. "An evaluation of variables influencing implant fixation by direct bone apposition". Journal of Biomedical Materials Research, v. 19, n. 8, p. 875-901. <http://dx.doi.org/10.1002/jbm.820190802>.
- Zlatin, N.; Field, M., 1973. "Procedures and Precautions in Machining Titanium Alloys". Titanium Science and Technology, p. 489-504. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-1346-6_37.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF TOOL GEOMETRY ON THE SURFACE ROUGHNESS OF TURNED Ti-15Mo ALLOY

Denny Paris

Armando Ítalo Sette Antonialli

Carlos Eiji Hirata Ventura

Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Carlos. Rodovia Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos / SP, Brazil

denny.paris@yahoo.com.br, antonialli@ufscar.br, ventura@ufscar.br

Abstract. Titanium alloys are considered difficult-to-cut materials, due to their chemical affinity with various tool materials, maintenance of mechanical resistance at high temperatures, low elastic modulus and low thermal conductivity, properties that lead to accelerated tool wear and surface damages in the machined part. Within this context, the present work focuses on investigating the influence of different tool geometries on the surface quality of the Ti-15Mo alloy. For this, uncoated cemented tungsten carbide inserts were prepared with different clearance angles and nose radii and applied in turning with constant cutting conditions. From the obtained results, the geometric contribution of the nose radius on surface roughness became evident as well as the predominance of homogeneous profiles, with wide valleys and narrow peaks, regardless of tool geometry.

Keywords: Titanium Alloys. Machining. Tool geometry.

RESPONSIBILITY NOTICE

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