

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE CHANFRO SOBRE A RUGOSIDADE GERADA NO TORNEAMENTO DE UMA LIGA DE TITÂNIO

Leonildo Bernardo Pivotto

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense 400, 13566-590 São Carlos/SP
leonildopivotto@usp.br

Marcos Tan Endo

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís km 235, 13565-905 São Carlos/SP
marcos.endo@ufscar.br

Carlos E. H. Ventura

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís km 235, 13565-905 São Carlos/SP
ventura@ufscar.br

Resumo. As ligas de titânio possuem propriedades que permitem aplicações específicas nas áreas médica e aeroespacial. Em contrapartida, tais características fazem do titânio um material de difícil usinabilidade, refletindo em um processo de fabricação de alto custo e baixa produtividade. Neste contexto, pesquisas recentes têm buscado parâmetros de corte e preparações de aresta que levem à melhoria da integridade superficial e a uma maior vida da ferramenta. Com a intenção de se atingir baixos valores de rugosidade sem prejudicar a resistência da aresta de corte, neste trabalho inicial, insertos de metal duro preparados com chanfros de diferentes ângulos foram aplicados no torneamento da liga de titânio Ti-15Mo e sua rugosidade, avaliada. O aumento do ângulo de chanfro causou maiores valores de rugosidade na peça usinada e seu efeito foi predominante em comparação à influência da rugosidade de aresta.

Palavras chave: Torneamento. Preparação de aresta. Rugosidade. Liga de titânio.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de titânio possuem aplicações específicas na indústria devido às características que oferecem melhor desempenho quando comparadas a outras classes de ligas metálicas. Para Liang et al. (2019), características como elevada relação resistência/peso, resistência à fluência, alta tenacidade e capacidade de manter características mecânicas em elevadas temperaturas permitem a aplicação de ligas de titânio em equipamentos que exigem materiais de elevado desempenho e confiabilidade, como componentes de motores a jato, peças de turbinas a gás, equipamentos de usinas nucleares e estruturas de aeronaves. Além dessas aplicações, características como resistência à corrosão e biocompatibilidade possibilitam aplicações médicas e odontológicas, como órteses ósseas e próteses dentárias.

Em contrapartida, tais características, que contribuem para a aplicação dessas ligas, acabam resultando em dificuldades durante seu processo de usinagem. Conforme destacam Ullutan e Ozel (2011), as ligas de titânio apresentam certas limitações, como a baixa condutividade térmica, que provoca concentração de elevadas temperaturas na ponta da ferramenta, adesão do material usinado sobre a ferramenta, redução da estabilidade química e desgaste excessivo da aresta de corte, o que acaba por prejudicar a integridade superficial da peça usinada. Tais fatores resultam em processos de usinagem demorados e de custos consideráveis, trazendo a necessidade do estudo e desenvolvimento de métodos e ferramentas que contribuam para a elevação da produtividade e melhorias na qualidade final do produto fabricado.

Pesquisas publicadas tentam relacionar, de forma experimental, a força de corte durante a usinagem com a variação dos parâmetros de processo. Wyen e Wegener (2010) avaliaram a influência do raio de aresta na força de corte durante o torneamento de uma barra de Ti6Al4V e chegaram à conclusão de que o aumento do raio de aresta resulta em maiores forças de corte, uma vez que maiores raios de aresta causam maior deformação do material, exigindo mais energia durante o processo. Seguindo a mesma linha, o trabalho de Balaji et al. (2013) avalia os efeitos da velocidade de corte, do avanço e do ângulo de saída na força de corte durante a usinagem de uma barra de Ti grau 2. Para os autores, ângulos de saída positivos (entre 5° e 8°) contribuem para reduzir a força de corte, uma vez que alteram o plano de cisalhamento de forma a reduzir o contato entre ferramenta e peça. Já o aumento do avanço contribui para uma elevação da força de corte, pois aumenta o volume de material removido e eleva o contato da peça com a ferramenta. Neste estudo, a velocidade de corte é o fator menos impactante quando comparada ao ângulo de saída e ao avanço.

Outras pesquisas procuram correlacionar a integridade superficial de ligas de titânio usinadas aos parâmetros de corte aplicados. Ramana e Aditya (2017) tornearam um componente de Ti grau 5 com insertos de metal duro e variação da velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem a fim de avaliar sua rugosidade superficial. Tanto para ferramentas com revestimento quanto para ferramentas sem revestimento, o parâmetro que mais causa impacto na rugosidade é o avanço (quanto mais baixo, melhor a rugosidade), sendo a velocidade de corte o parâmetro com impacto intermediário e a profundidade de usinagem com impacto mínimo. Por questões relativas à reatividade química, a melhor opção para a usinagem permanece sendo a ferramenta sem revestimento. O trabalho de Sun et al. (2018) segue a mesma metodologia e chega nas mesmas conclusões com relação à velocidade de avanço como parâmetro mais impactante na rugosidade superficial obtida.

Tendo em vista as dificuldades existentes na usinabilidade do titânio e a possibilidade de contribuir para as pesquisas na área, esse artigo traz os resultados preliminares de um estudo que visa encontrar diferentes formas de preparação de aresta que levem ao aumento da usinabilidade do referido material. Aqui serão tratados os resultados relacionados à influência de chanfros com diferentes ângulos sobre a rugosidade de uma liga de titânio Ti-15Mo torneada.

2. METODOLOGIA

Insertos de metal duro, classe ISO S10, sem revestimento e com geometria SNGN 120408 (formato quadrado, comprimento de aresta de 12,7 mm e raio de ponta de 0,8 mm) tiveram suas superfícies de folga e raios de ponta retificados e suas arestas preparadas por chanfros com largura de $130 \pm 10 \mu\text{m}$ e ângulos de 10° , 20° e 30° (variação de $\pm 1^\circ$). Para isso, foi utilizada uma retificadora de insertos CNC, com 4 eixos, Agathon DOM Plus, equipada com rebolo de diamante tipo copo, com tamanho de grão de $46 \mu\text{m}$, concentração C100 e ligante resinoide. Os parâmetros de retificação utilizados foram: $v_c = 20 \text{ m/s}$ (velocidade tangencial associada à rotação do rebolo, o qual possui diâmetro de 350 mm); $v_f = 4 \text{ mm/min}$ (velocidade de avanço do rebolo para retificação das partes retas do inserto); $v_{\text{rot}} = 45^\circ/\text{s}$ (rotação do inserto durante a retificação do raio de ponta); óleo de corte integral. O rebolo foi dressado antes da retificação de cada inserto por rebolo tipo copo de Al_2O_3 , com tamanho de grão de 180#. Foi aplicada uma velocidade tangencial $v_{\text{cd}} = 8 \text{ m/s}$ e velocidade de avanço $v_{\text{fd}} = 3 \mu\text{m/s}$ durante 5 s. A Fig. 1 abaixo apresenta uma imagem da câmara de retificação do equipamento utilizado e um esquema com seus parâmetros de trabalho.

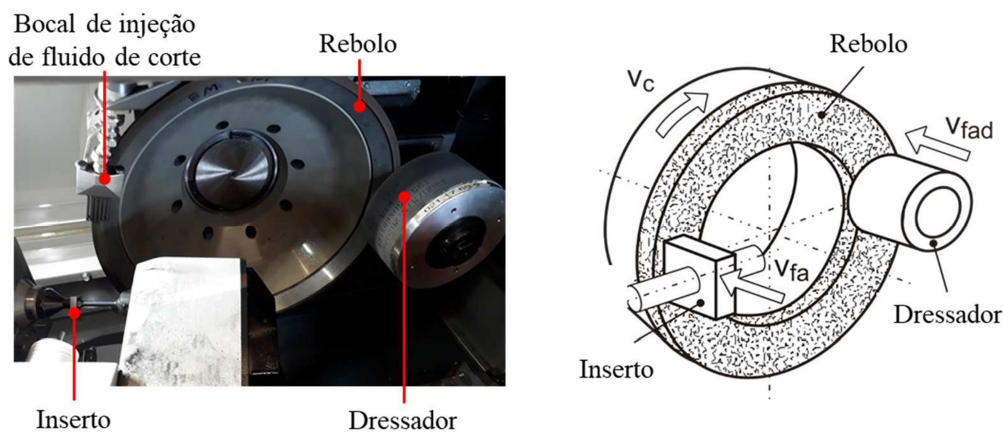


Figura 1. Componentes do processo de retificação e parâmetros de corte

Os testes de torneamento foram realizados a seco em um torno CNC Nardini Fast Trace (rotação máxima de 3000 rpm), tendo sido os insertos montados em porta-ferramenta DSSNL 2020K 12, o que resultou em ângulos de saída e inclinação de -8° e ângulo de folga de $+8^\circ$. Para efeito de comparação, além dos insertos chanfrados também foi aplicado um inserto com aresta afiada.

Os corpos de prova possuem diâmetro de 6 mm e, a fim de se evitar os efeitos do desgaste, um comprimento de 15 mm foi torneado com cada tipo de inserto. Os parâmetros de torneamento, mantidos constantes, foram: $v_c = 35 \text{ m/min}$; $f = 0,1 \text{ mm}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$.

Para a caracterização tanto dos insertos quanto dos corpos de prova, utilizou-se um microscópio para análise de imagens tridimensionais Alicona Infinite Focus SL. Uma vez que arestas de corte irregulares podem prejudicar a integridade superficial da peça usinada, valores de rugosidade R_z (média da distância de pico-a-vale medida em diferentes trechos) foram obtidos para as arestas em regiões próximas ao raio de ponta e para as superfícies torneadas (medição na direção longitudinal), aplicando-se um *cut off* de 0,8 mm. Para se garantir a confiabilidade dos resultados, os testes foram realizados três vezes e cinco perfis de rugosidade em cada aresta e 50 perfis em cada superfície usinada foram adquiridos. Os valores médios e respectivos desvios padrão foram utilizados para análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Rugosidade de aresta nos insertos de corte

Eventuais lascamentos/irregularidades na aresta de corte são transmitidos à superfície da peça usinada e contribuem para o aumento de sua rugosidade. Dessa forma, sua caracterização se torna importante para a avaliação de possíveis efeitos da ferramenta sobre a integridade da peça. Neste contexto, a média dos valores de rugosidade pico-a-vale em diferentes trechos do perfil foi analisada em regiões próximas ao raio de ponta do inserto (Fig. 2a) e sua variação em relação aos diferentes ângulos de chanfro pode ser observada na Fig. 2b.

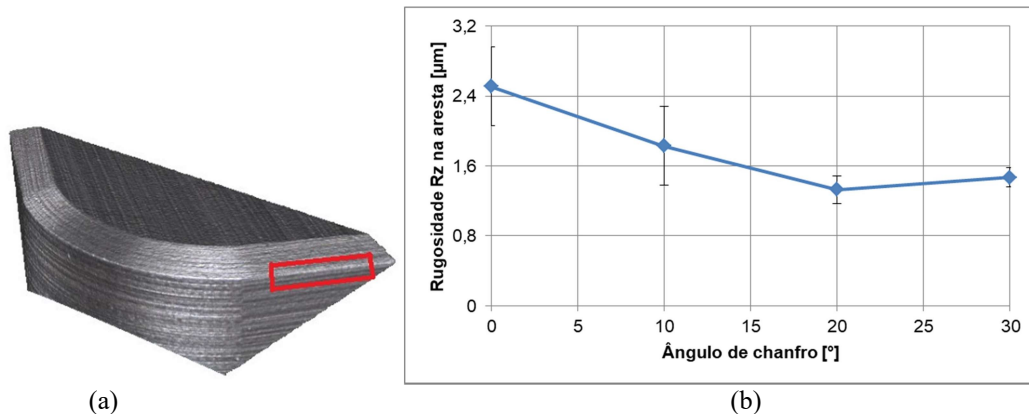


Figura 2. (a) Exemplo de trecho avaliado e (b) valores de rugosidade na aresta do inserto de corte em função do ângulo de chanfro

Nota-se que o aumento do ângulo de chanfro causa uma redução da rugosidade na aresta, fenômeno que está relacionado ao maior ancoramento dos grãos de carboneto de tungstênio (WC) na matriz de cobalto (Co). A partir de 20°, a variação passa a não ser significativa. Um ângulo de chanfro entre 20° e 30° leva a um ângulo entre a superfície do chanfro e a superfície de folga de 110° a 120°, o que aumenta a sustentação do grão na matriz e reduz o arrancamento de grupos de WC, contribuindo com sua usinagem durante o processo de retificação. A remoção de material tanto da matriz quanto dos grãos torna a superfície mais regular, diminuindo as distâncias de pico-a-vale do perfil de rugosidade.

Já a aresta afiada gera um ângulo de cunha (entre a superfície de saída e a superfície de folga) de 90°, o que acaba prejudicando a sustentação dos grãos e fragilizando a aresta. Além da transmissão dessas irregularidades para a superfície da peça a ser usinada, tal problema pode levar à falha prematura da ferramenta a partir da concentração de tensões nos picos de rugosidade do perfil.

3.2. Rugosidade dos corpos de prova torneados

Após sua caracterização, os insertos de metal duro foram aplicados no torneamento da liga Ti-15Mo, cuja rugosidade também foi medida. A Fig. 3 mostra o comportamento dos valores de rugosidade Rz para os diferentes ângulos de chanfro.

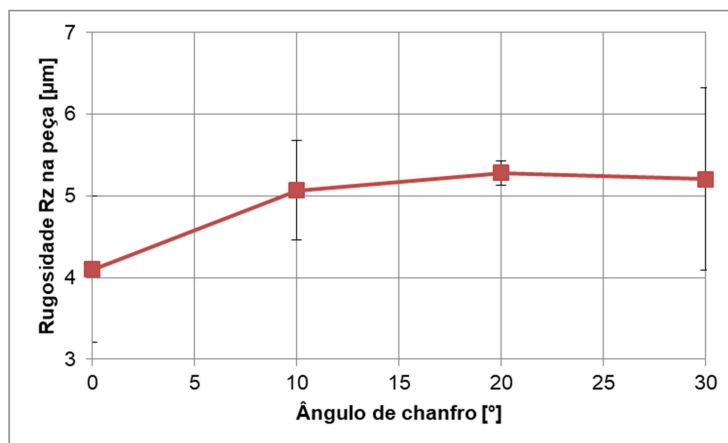


Figura 3. Valores de rugosidade na peça torneada em função do ângulo de chanfro

Embora possuam arestas mais regulares, percebe-se que inserts preparados com chanfros com maiores ângulos geram maiores valores de rugosidade na superfície da peça torneada. O aumento do ângulo de chanfro torna o inserto de corte mais negativo, causando maior deformação do cavaco e dificultando seu cisalhamento. Isso intensifica a remoção irregular de material, a qual é comum na usinagem deste tipo de liga devido ao seu baixo módulo de elasticidade e elevada zona elástica. Tais resultados podem ser comprovados por meio das imagens das superfícies usinadas, conforme a Fig. 4, na qual se observa também certo espalhamento do material na usinagem com inserts chanfrados com maiores ângulos.

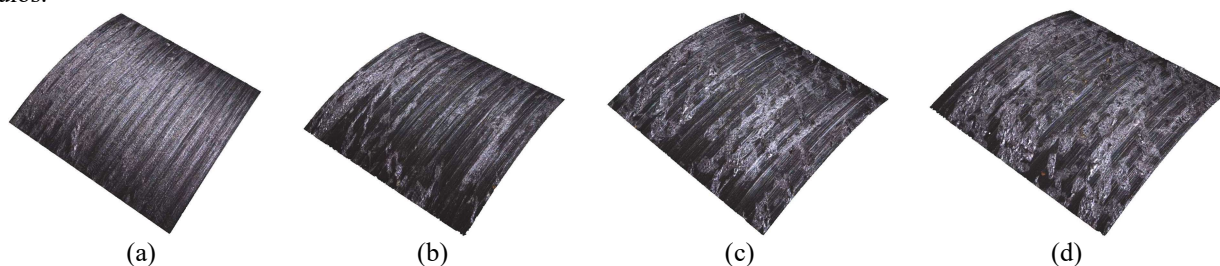


Figura 4. Trechos dos corpos de prova torneados com inserts preparados com diferentes ângulos de chanfro: (a) 0°, (b) 10°, (c) 20° e (d) 30°

Ângulos efetivos de saída mais negativos promovem um aumento da área de contato entre cavaco e ferramenta e alterações do plano de cisalhamento, causando maior deformação do material e exigindo maiores esforços para a realização do corte. Esse comportamento pode ser comparado aos resultados obtidos por trabalhos citados inicialmente, que apontam dificuldades na usinagem de ligas de titânio devido ao aumento da deformação do cavaco, seja pelo aumento do raio de aresta, como apontado por Wyen e Wegener (2010), seja pela variação do ângulo de saída, como analisado por Balaji et al (2013).

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que maiores ângulos de chanfro tendem a reduzir a rugosidade na aresta devido à maior sustentação dos grãos de carboneto de tungstênio na matriz de cobalto. Entretanto, a redução das irregularidades na aresta não contribui para a melhora da qualidade superficial da peça usinada quando da aplicação destes inserts de corte. O efeito da rugosidade na aresta é menos significativo em relação à remoção irregular de material, provocada pelo aumento da deformação do cavaco devido ao ângulo de saída efetivo mais negativo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro para realização da pesquisa (processos nº 2015/15622-2, nº 2017/12304-5 e nº 2017/12309-7).

6. REFERÊNCIAS

Balaji, J.H., Krishnaraj, V., Yogeswaraj, S., 2013. "Investigation on hard speed turning of titanium alloys". *Procedia Engineering*, Vol. 64, p. 926-935.

- Liang, X., Liu, Z., Wang, B., 2019. "State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: a review". *Measurement*, Vol. 132, p. 150-181.
- Ramana, M.V., Aditya, Y.S., 2017. "Optimization and influence of process parameters on surface roughness in turning of titanium alloy". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, p. 1843-1851.
- Sun, J., Huang, S., Wang, T., Chen, W., 2018. "Research on surface integrity of titanium alloy TB6". *Procedia CIRP*, Vol. 71, p. 484-489.
- Ulutun, D., Ozel, T., 2011. "Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, p. 250-280.
- Wyen, C.-F., Wegener, K., 2010. "Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 59, p. 93-96.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Influence of the edge chamfer angle on surface roughness in turning of a titanium alloy

Leonildo Bernardo Pivotto

São Carlos School of Engineering – University of São Paulo, 400 Trabalhador São Carlense Av., 13566-590 São Carlos/SP
leonildopivotto@usp.br

Marcos Tan Endo

Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Carlos, km 235 Washington Luís Road, 13565-905 São Carlos/SP
marcos.endo@ufscar.br

Carlos E. H. Ventura

Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Carlos, km 235 Washington Luís Road, 13565-905 São Carlos/SP
ventura@ufscar.br

Abstract. Titanium alloys have properties that allow them to be applied in medical and aerospace industry. Such characteristics, however, decrease their machinability, what leads to higher process costs and reduced productivity. In this context, current research has looked for specific cutting conditions and edge geometries that improve surface integrity and lead to longer tool life. Aiming to achieve low roughness values without damaging the cutting edge strength, cemented carbide inserts prepared with chamfers with different angles were applied in turning of Ti-15Mo alloy, whose roughness was evaluated. The increase of the chamfer angle caused higher roughness values in the machined workpiece and its effect was predominant in comparison to the influence of edge roughness.

Keywords: Turning, Edge preparation, Roughness, Titanium alloy

RESPONSIBILITY NOTICE

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