

O DESEMPENHO DE FERRAMENTAS CERÂMICAS COM ARESTA MODIFICADA NO TORNEAMENTO DE AÇO ENDURECIDO

Alexandre Mares Weikert de Oliveira

Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, 31270-901.

alexandremares@yahoo.com.br

Augusto Moura Martins

Alexandre Mendes Abrão

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, 31270-901.

augusto.mmartins2@gmail.com; abrao@ufmg.br

Carlos Eiji Hirata Ventura

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís km 235, São Carlos SP, 13565-905.

ventura@ufscar.br

Resumo: A necessidade de componentes mecânicos mais resistentes e com características específicas para o uso em equipamentos robustos exige materiais que tenham resistência mecânica e ao desgaste satisfatórias sob cargas elevadas. Os aços endurecidos apresentam propriedades adequadas a estas aplicações e, por isso, os processos de fabricação devem ser capazes de lidar com tais características de forma a produzir componentes com alta qualidade. O objetivo deste trabalho é investigar a influência das condições de corte (velocidade de corte e avanço) e da preparação da aresta de corte (largura e ângulo do chanfro) sobre o comportamento de ferramentas cerâmicas ($Al_2O_3 + TiC$) durante o torneamento do aço rolamento ABNT 52100 endurecido (62 HRC), com ênfase nas componentes da força de usinagem, acabamento da peça e vida da ferramenta. Os resultados indicaram que o avanço influenciou estatisticamente todas as grandezas avaliadas (aumento das forças de corte, de avanço e passiva e da rugosidade com a elevação do avanço), ao passo que a preparação da aresta afetou apenas a força de avanço e a rugosidade da superfície torneada (força de avanço e rugosidade mais baixas proporcionadas pela ferramenta com chanfro com largura de 80 μm e ângulo de 30°). Com relação à vida da ferramenta, a ferramenta chanfrada com largura de 80 μm e ângulo de 30° e a ferramenta com preparação comercial apresentaram desempenho superior às demais.

Palavras-chave: Torneamento; Aço endurecido; Ferramenta cerâmica; Aresta modificada

1. INTRODUÇÃO

O torneamento é uma das operações de usinagem mais executadas na indústria manufatureira e é aplicado comumente na produção de peças de revolução com dimensões variadas e em diferentes materiais e níveis de dureza. Além de operações de desbaste, o torneamento pode ser utilizado para o acabamento de peças como alternativa aos processos abrasivos, o que diminui o tempo e o custo da operação. Quando o torneamento é realizado em material com dureza entre 58 e 68 HRC, considera-se torneamento duro e é comumente aplicado a aços endurecidos (Davim, 2011). Estes aços são amplamente utilizados pela diversidade em sua aplicação e pela qualidade em suas características mecânicas. O torneamento duro requer a utilização de máquinas operatrizes com elevada rigidez, estabilidade e precisão para se obter uma menor variação entre os picos e os vales de rugosidade da superfície usinada, além da necessidade de ferramentas de corte com elevada dureza e resistência ao desgaste. A maioria das operações de torneamento de aços endurecidos ocorre sem fluido de corte, pois a temperatura na ferramenta causa a ebulição instantânea do mesmo, condição indicativa da maior severidade das condições de usinagem observadas neste tipo de processo (Bartarya e Choudhury, 2012).

Durante a usinagem de aços endurecidos é comumente utilizada a preparação de arestas com chanfros. As arestas arredondadas não são utilizadas, pois limitam a vida da ferramenta e produzem corte instável. O número de chanfros pode variar, assim como sua largura e ângulo. As superfícies de saída e de folga também podem apresentar inclinação, dependendo das características do material a ser usinado. Os valores comumente encontrados para largura do chanfro em ferramentas para o uso em torneamento estão entre 100 e 200 μm e os valores para ângulo do chanfro variam entre 10° e 35°. Além de arestas chanfradas, que são normalmente utilizadas em ferramentas cerâmicas e de nitreto cúbico de boro (PcBN), podem-se utilizar também arestas arredondadas, normalmente empregadas em ferramentas de diamante policristalino (PCD) e metal duro (Ventura *et al.*, 2014). Modificações da aresta de corte alteram a geometria da cunha cortante, proporcionando maior deformação e consumo de energia e ampliando as forças de usinagem (Pivotto *et al.*,

2019). A avaliação da severidade da operação, portanto, pode ser feita com base na análise das componentes da força de usinagem, de forma que a redução da severidade seja um dos objetivos da modificação das arestas.

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, elas sempre sofrerão um processo de desgaste que exigirá a sua substituição (Machado *et al.*, 2009). As diferentes geometrias de aresta também afetam o desgaste das ferramentas. Zhou *et al.* (2002) apresentaram um estudo sobre a influência do ângulo do chanfro sobre o desgaste de ferramentas de PcBN e observam que as ferramentas com chanfro proporcionaram menor desgaste (redução de até 53 %) do que aquelas que não possuíam chanfros.

A utilização de ferramentas com diferentes arestas pode afetar significativamente os resultados obtidos durante o torneamento de materiais endurecidos. Desta forma, o presente trabalho pretende avaliar a influência da geometria da aresta e dos parâmetros do torneamento (velocidade de corte e avanço) sobre as componentes da força de usinagem, rugosidade da superfície usinada e desgaste da ferramenta após o torneamento do aço rolamento ABNT 52100 endurecido.

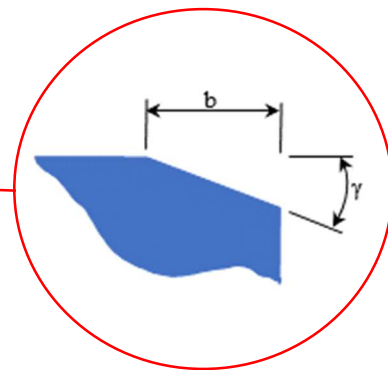
2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material selecionado para este trabalho foi o aço rolamento ABNT 52100 (0,98 – 1,10 % C; 0,15 – 0,35 % Si; 0,25 – 0,45 % Mn e 1,30 – 1,60 % Cr). Foram utilizados tubos com diâmetros externos de 58 ou 65 mm, diâmetro interno de 38 mm e comprimento entre 70 e 300 mm. O material foi normalizado e posteriormente temperado e revenido, apresentando após o tratamento térmico uma dureza média de $62,5 \pm 1$ HRC. O material foi torneado em um torno CNC Romi modelo Centur 30S (potência de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm) utilizando ferramentas de cerâmica mista da classe Sandvik Coromant CC650, com geometria ISO SNGN 120408 T01020 650, com diferentes preparações de aresta [ângulo (γ) e largura (b) do chanfro], além das ferramentas comercial e com aresta afiada. Foram utilizados também diferentes valores de velocidade de corte e de avanço, enquanto a profundidade de usinagem foi mantida constante em 1,0 mm. Os valores utilizados para cada parâmetro estão indicados na Tabela 1 e os testes foram executados aleatoriamente, seguindo um planejamento fatorial completo. Nota-se que a ferramenta C possui preparação de aresta idêntica à ferramenta comercial, porém produzida em uma retificadora Agathon DOM Plus (potência máxima de 16 kW e rotação máxima de 3400 rpm) do próprio laboratório. Além disso, a ferramenta denominada afiada não possui chanfro ($\gamma = 0^\circ$ e $b = 0 \mu\text{m}$), porém, a cinemática do processo de afiação resulta em um chanfro com raio de cunha de $10,34 \mu\text{m}$.

A Figura 1a mostra a montagem experimental no torno CNC e a Fig. 1b apresenta os atributos da aresta de corte (largura de chanfro b e ângulo de chanfro γ). O suporte de torner foi montado sobre o dinamômetro Kistler modelo 9272 para possibilitar a medição das forças durante o torneamento (forças de corte, avanço e passiva). Além da medição de força, foram realizadas medições de rugosidade da superfície torneada utilizando o rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic 25. Os dados de força e rugosidade foram analisados estatisticamente por meio do Software Minitab.

Tabela 1. Parâmetros de entrada

Parâmetros de entrada	Valores				
Preparação da aresta	A $\gamma = 10^\circ$ $b = 80 \mu\text{m}$	B $\gamma = 30^\circ$ $b = 80 \mu\text{m}$	C $\gamma = 20^\circ$ $b = 80 \mu\text{m}$	Comercial $\gamma = 20^\circ$ $b = 80 \mu\text{m}$	Afiada $\gamma = 0^\circ$ $b = 0 \mu\text{m}$
Velocidade de corte v_c [m/min]	60 - 90 - 120				
Avanço f [mm/rev]	0,08 - 0,16				



b) Largura e ângulo do chanfro

a) Montagem do dinamômetro no torno CNC

Figura 1. a) Montagem do dinamômetro no torno CNC e b) largura e ângulo do chanfro

Os testes realizados para o estudo de vida e desgaste da ferramenta utilizaram a velocidade de corte de 60 m/min e avanço de 0,08 mm/rev e os valores de desgaste de flanco foram obtidos com a utilização do microscópio óptico Olympus CX31. Além das medições de desgaste, foram obtidas também imagens de topografia das superfícies de folga e de saída das ferramentas antes e após o torneamento por meio do método de medição ótica tridimensional utilizando o equipamento Alicona InfiniteFocus SL.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a realização dos ensaios, foram obtidos os valores de força e posteriormente foi medida a rugosidade para os diferentes parâmetros de corte e condição de desgaste das arestas com diferentes preparações. Inicialmente, serão abordados os resultados de força, posteriormente, de rugosidade e, por último, o desgaste das ferramentas.

3.1 Forças de usinagem

A influência dos parâmetros de corte e preparação da aresta sobre a força de corte pode ser observada na Fig. 2. Nota-se que o aumento do avanço promoveu uma ampliação na força de corte em todos os casos. A força de corte mais elevada foi registrada pela ferramenta afiada utilizada com a velocidade de corte mais baixa e avanço mais elevado. A ferramenta afiada também apresentou elevação da força de corte com o aumento da velocidade de corte. Por outro lado, a ferramenta com geometria C promoveu forças de corte mais baixas, com o menor valor registrado para o torneamento com a velocidade de corte mais alta e avanço mais baixo. Tais resultados são consistentes, visto que o aumento da velocidade de corte causa a elevação da temperatura e a consequente redução da resistência ao cisalhamento do material da peça.

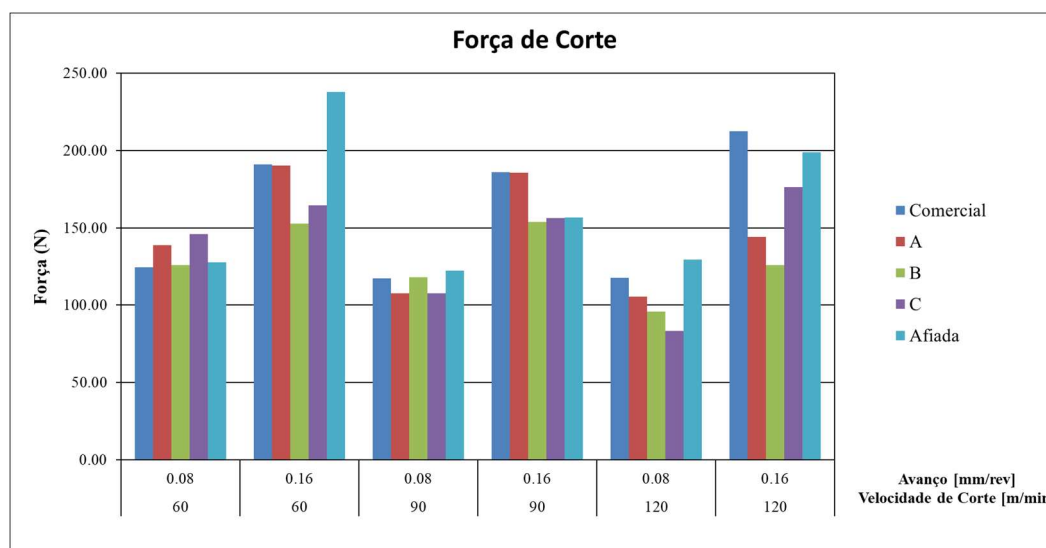


Figura 2. Comportamento da força de corte em função das condições de usinagem

Por sua vez, o aumento da área da seção de corte devido à elevação do avanço tende a aumentar a força de corte. As forças de corte mais elevadas com o uso da aresta afiada se devem, possivelmente, ao desgaste acelerado desta aresta de corte. Os valores obtidos foram utilizados na análise estatística, que, conforme gráfico de Pareto apresentado na Fig. 3, indica que o avanço (f) é o único parâmetro que possui influência significativa. Após a análise de resíduos, que indicou comportamento adequado para a validação dos dados, foi obtido o gráfico de efeitos principais para a força de corte (Fig. 4). Nota-se que o comportamento da força de corte com a variação de avanço comprova a observação realizada para a Fig. 2, que indicava valores de força de corte mais elevados sob avanço mais alto.

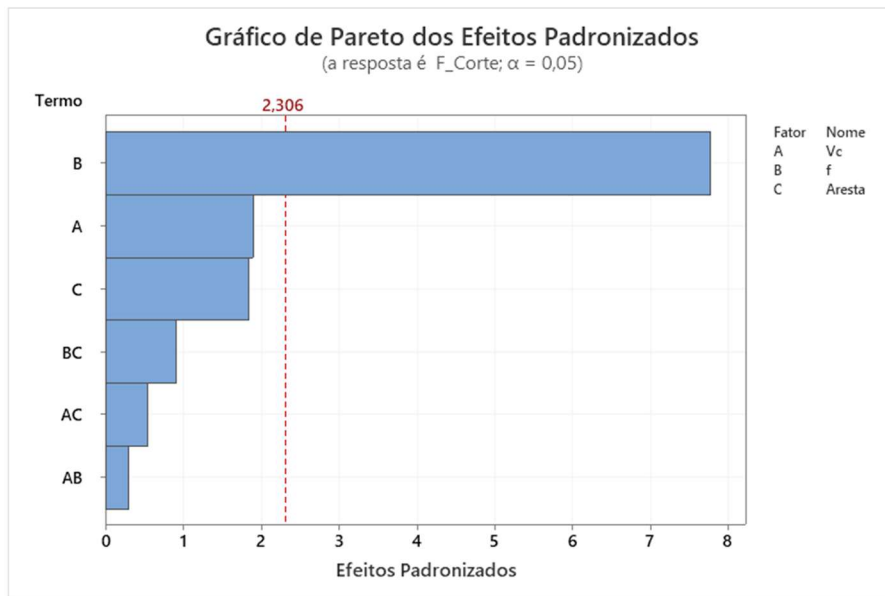


Figura 3. Gráfico de Pareto para a força de corte

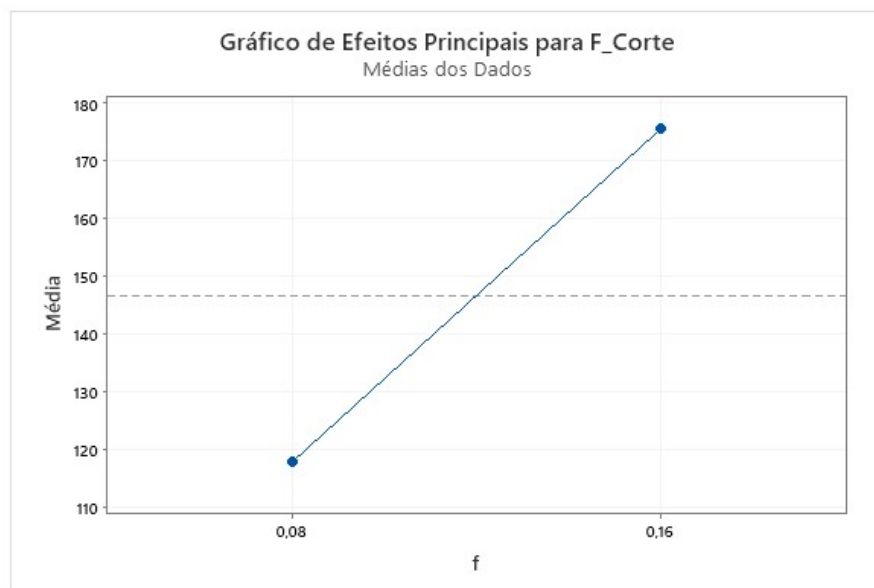


Figura 4. Gráfico de efeito principal (avanço) para a força de corte

Considerando a força de avanço, obteve-se o gráfico apresentado na Fig. 5. Novamente, podem ser observados valores mais elevados de força para o avanço mais alto ($f = 0,16$ mm/rev). Além disso, são observadas forças mais baixas para as arestas Comercial e B. As arestas Afiada e A produziram forças de avanço mais altas e de maior intensidade quando combinadas com o avanço mais alto.

O gráfico de Pareto da Fig. 6 indica que o avanço e a preparação da aresta foram estatisticamente significativos para a força de avanço e o comportamento da força de avanço em função de ambos pode ser observado na Fig. 7. Novamente, observa-se o aumento da força com a elevação do avanço (maior área da seção de corte). Com relação à preparação da aresta, a aresta B ($\gamma = 30^\circ$ $b = 80 \mu\text{m}$) proporcionou valores mais baixos de força de avanço. Embora esta preparação represente o ângulo de chanfro mais acentuado (negativo), esta característica não refletiu na força de avanço, provavelmente porque a largura do chanfro é igual ao avanço mais baixo utilizado. Desta forma, a extensão do contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta se prolongará muito além da largura do chanfro, fazendo com que a influência do ângulo seja minimizada. Além disso, como será visto mais adiante, a aresta B foi a que apresentou menor desgaste, o que pode ter contribuído para a força de avanço mais baixa. De forma análoga, a aresta Afiada sofreu desgaste mais acentuado, o que afetou a força de avanço registrada para esta preparação. A preparação da aresta tem influência decisiva sobre a força de avanço, pois esta age diretamente nesta região (ao contrário da força de corte, que age sobre a superfície de saída).

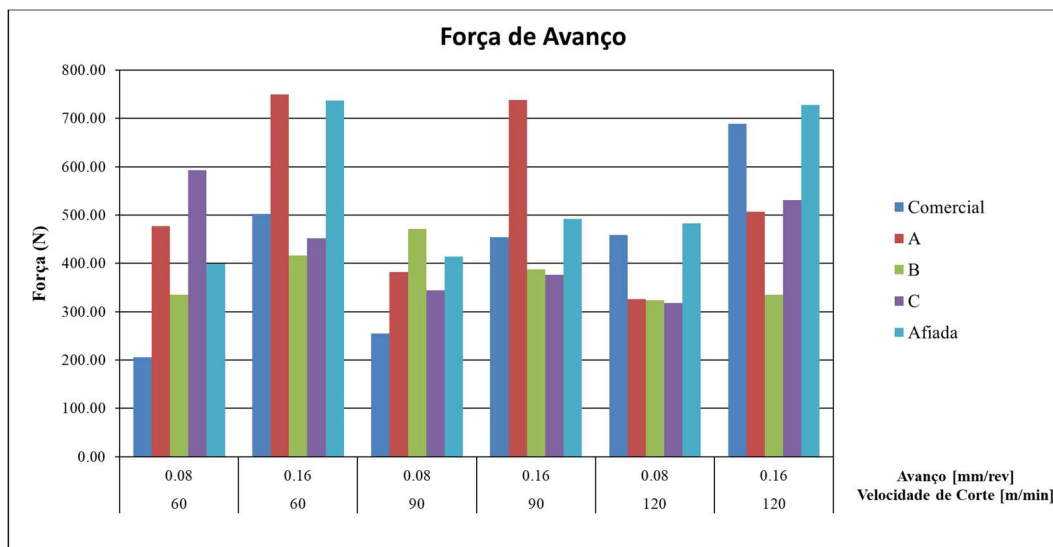


Figura 5. Comportamento da força de avanço em função das condições de usinagem

Além disso, as ferramentas Comercial e com geometria C apresentaram diferenças nos resultados de força de avanço, resultado inesperado uma vez que ambas possuem geometria idêntica. Uma possível explicação para tal comportamento pode ser atribuída aos rebolos e condições de afiação utilizados na preparação das duas geometrias, possivelmente distintos. Tais diferenças podem resultar em topografias e rugosidades distintas no chanfro, o que afetaria as condições de aderência e de escorregamento do cavaco durante o torneamento. Embora as condições de preparação da ferramenta Comercial não estejam disponíveis por razões óbvias, todas as ferramentas preparadas para este trabalho foram retificadas por um rebolo diamantado com tamanho de grão D15 e ligante vitrificado com concentração C100, velocidade de avanço axial $v_{fa} = 1$ mm/min, velocidade de corte $v_c = 30$ m/s e velocidade de rotação da pastilha de $v_R = 5,75$ °/s. Antes da retificação de cada pastilha, o rebolo foi dressado com rolo dressador de Al_2O_3 220#, com velocidade de avanço axial do dressador $v_{fad} = 0,3$ mm/min, velocidade de corte do dressador $v_{cd} = 10$ m/s e percurso de dressagem $l_d = 30$ µm.

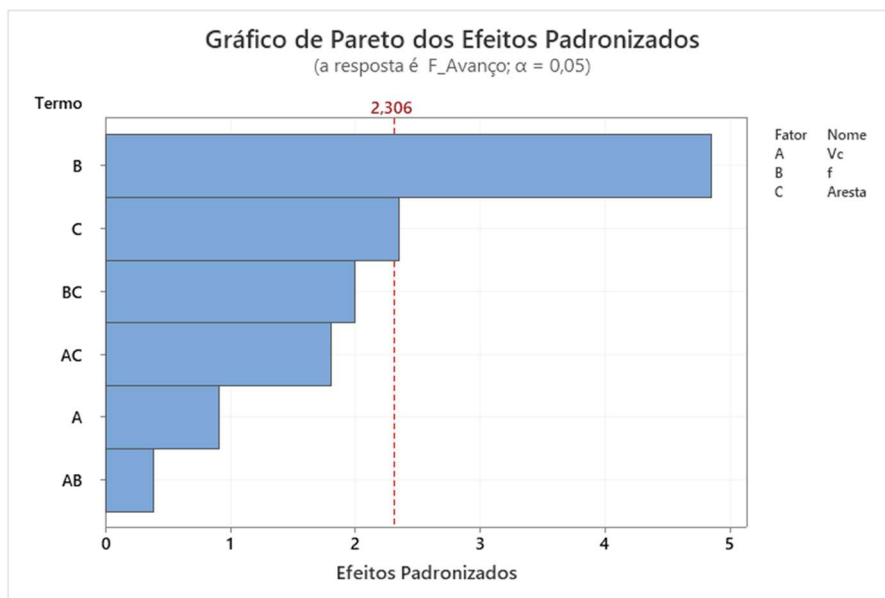


Figura 6. Gráfico de Pareto para a força de avanço

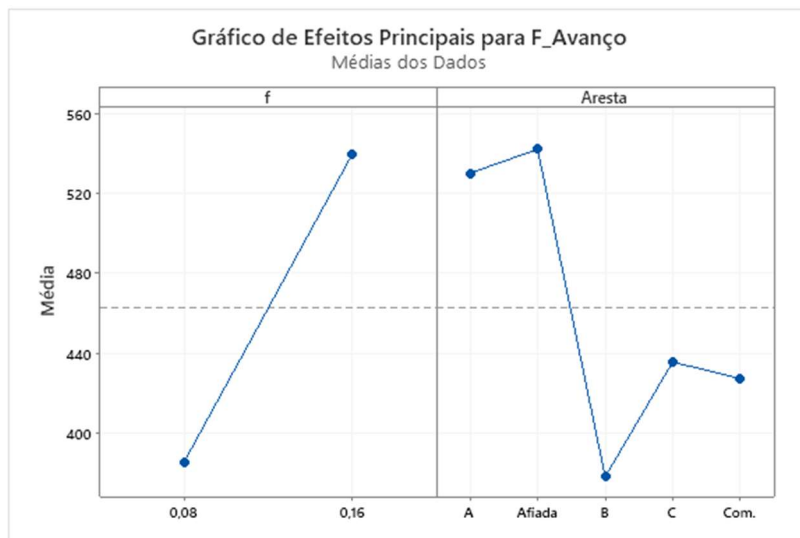


Figura 7. Gráfico de efeitos principais (avanço e preparação da aresta) para a força de avanço

O comportamento da força passiva em função das condições de corte e preparação da aresta está representado na Fig. 8. A elevação do avanço causou o aumento da força passiva. Além disso, observa-se uma força passiva mais alta com o uso da aresta Comercial, combinada com avanço e velocidade de corte mais elevados. A análise estatística neste caso não foi capaz de validar o comportamento observado, já que a análise de resíduos não apresentou as características necessárias.

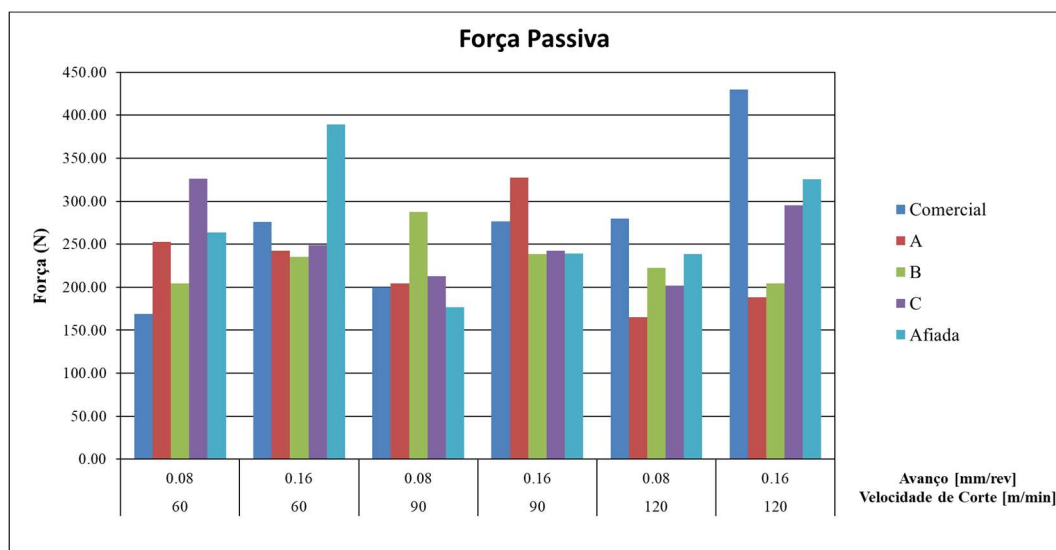


Figura 8. Comportamento da força passiva em função das condições de usinagem

3.2 Rugosidade

Os valores de desvio aritmético médio (R_a) das superfícies avaliadas são mostrados na Fig. 9. Observa-se uma tendência das arestas com preparação B e C de gerar amplitudes de rugosidade mais baixas. Em alguns casos, a ferramenta Comercial também apresenta rugosidade baixa, porém com maiores variações em função dos parâmetros de corte. Conforme esperado, podem ser observados valores mais baixos de rugosidade quando é utilizado o menor avanço, o que pode ser explicado pela relação quadrática entre rugosidade e avanço.

O gráfico de Pareto da Fig. 10 indica que o avanço e a preparação da aresta são capazes de afetar significativamente os valores de rugosidade. Considerando então que o avanço e a condição da aresta são parâmetros significativos, a Fig. 11 mostra os gráficos de efeitos principais. Observa-se que a ampliação do avanço promove um aumento da rugosidade e que, analogamente à força de avanço, a utilização das ferramentas com aresta B promove rugosidade mais baixa, enquanto o uso da aresta afiação resulta em rugosidade mais elevada. Forças de avanço mais baixas representam menor trabalho de deformação plástica para produção do cavaco e, aliado à maior integridade da aresta, asseguram vida de ferramenta mais longa.

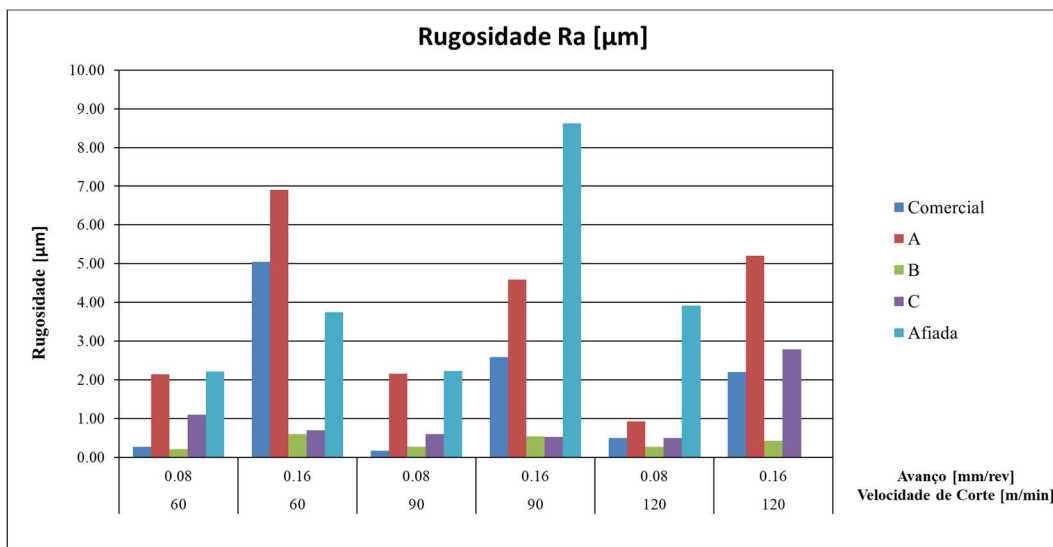


Figura 9. Comportamento do desvio aritmético médio (Ra) em função das condições de usinagem

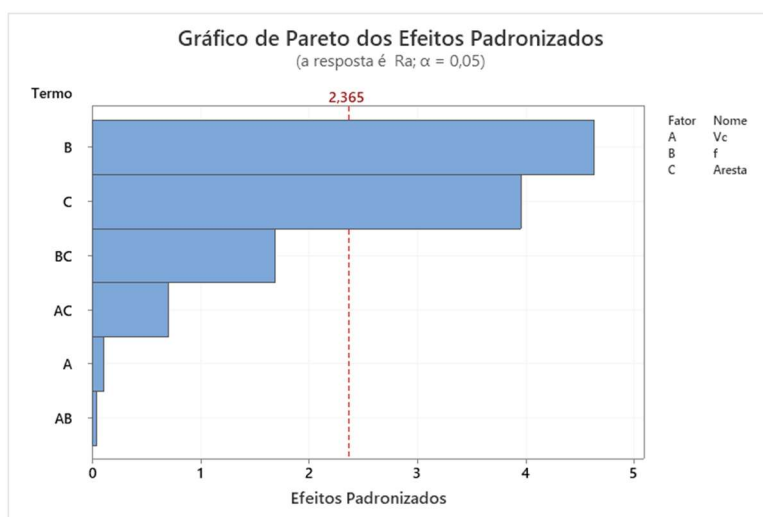


Figura 10. Gráfico de Pareto para Ra

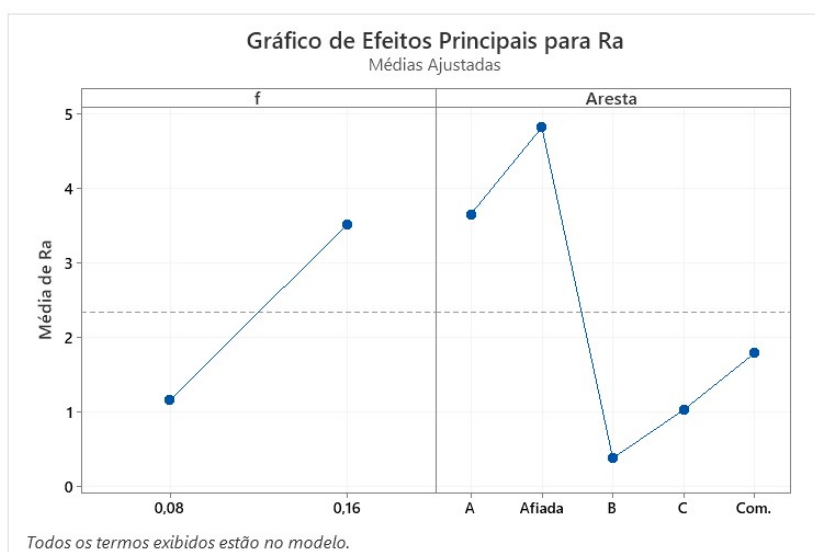


Figura 11. Gráfico de efeitos principais (avanço e preparação da aresta) para Ra

3.3 Desgaste

Conforme indicado anteriormente, os testes de desgaste foram conduzidos para todas as preparações de aresta utilizando uma velocidade de corte de 60 m/min e avanço de 0,08 mm/rev. Os valores de desgaste de flanco foram monitorados e os valores obtidos após o torneamento durante 10 minutos são apresentados na Fig. 12, com exceção da aresta Afiada, que não conseguiu atingir o período de usinagem previamente determinado. Observa-se que as arestas Comercial e B apresentaram desempenho similar e superior (menor desgaste) às demais preparações, a despeito da diferença no valor do ângulo de chanfro. Por outro lado, a preparação de aresta C, idêntica à Comercial, apresentou desgaste bem mais acentuado. Tal diferença pode ser atribuída aos diferentes equipamentos (afiadoras), materiais (granulometria, concentração e ligante dos rebolos) e parâmetros (velocidade de corte e de avanço axial do rebolo e velocidade de rotação do inserto) usados na preparação dos chanfros.

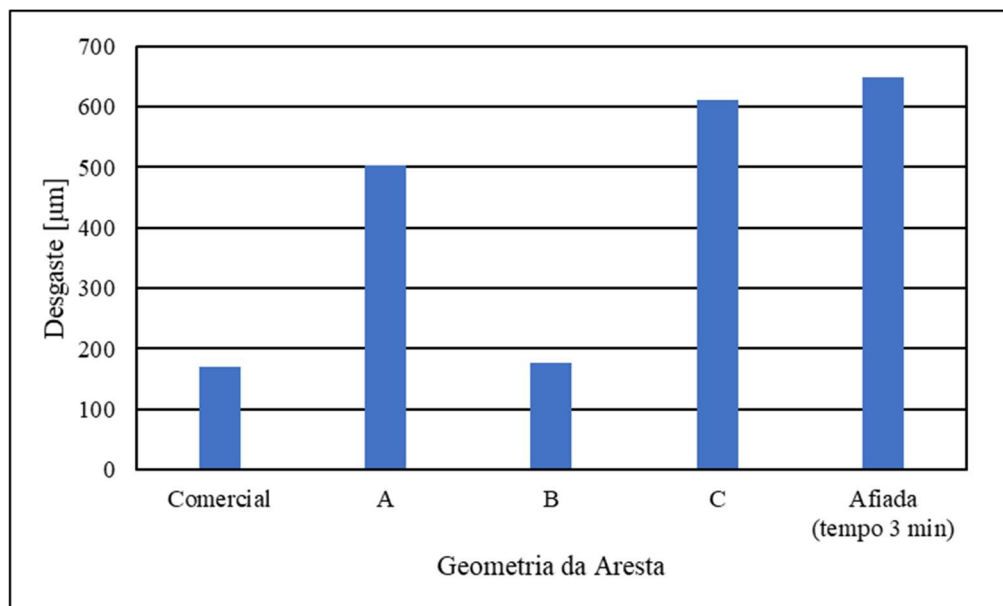
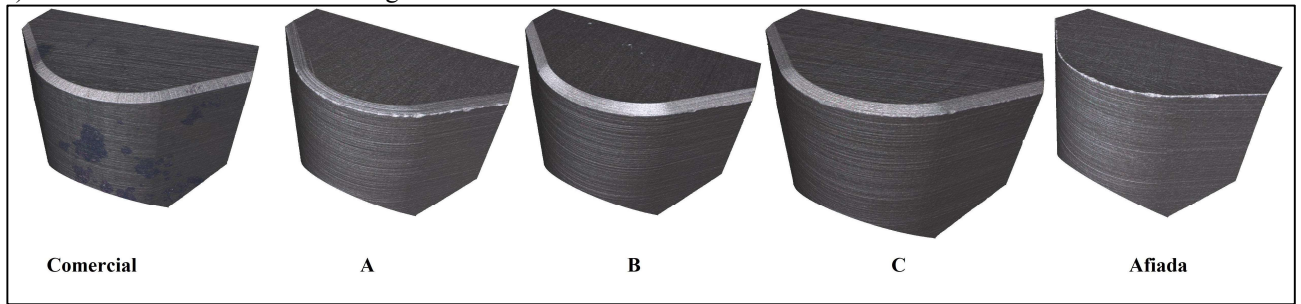


Figura 12. Valores de desgaste de flanco para as diferentes preparações de aresta após 10 minutos

A Fig. 13 apresenta as imagens das arestas antes e após os testes de desgaste. Pode-se observar a geometria dos chanfros, bem como sua ausência na aresta afiada. Como mencionado anteriormente, as arestas afiadas não são normalmente utilizadas para torneamento de materiais endurecidos por não apresentarem resistência suficientemente alta para suportar a severidade da operação. Observa-se que, assim como indicado pelos valores de desgaste de flanco, as arestas Comercial e B apresentaram menor desgaste. No caso das demais arestas utilizadas, além do desgaste na superfície de folga, também pode ser observado desgaste na superfície de saída da ferramenta, principalmente no caso da aresta afiada, cujo tempo de corte foi inferior ao das demais. Ao contrário das arestas Comercial e B, que apresentaram desgaste gradual, as demais apresentam indícios de lascamento e/ou fratura. Portanto, a preparação da aresta é capaz de prolongar a vida da ferramenta de corte cerâmica durante o torneamento de aços de elevada dureza.

Ao considerar todas as grandezas avaliadas, pode-se afirmar que a ferramenta com preparação B ($\gamma = 30^\circ$ b = 80 μm) é a que propicia melhor desempenho, já que é capaz de proporcionar rugosidade e forças mais baixas, além de apresentar menor desgaste de flanco.

a) Arestas antes dos testes de desgaste



b) Arestas após os testes de desgaste

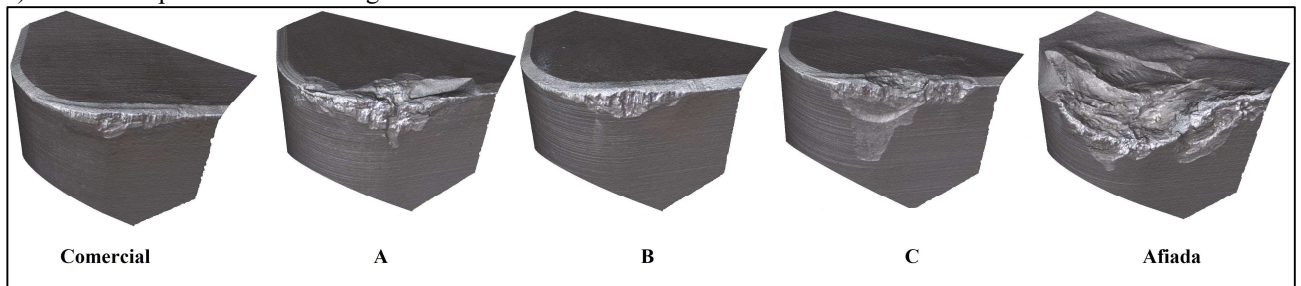


Figura 13. Ferramentas com diferentes preparações de aresta (a) antes e (b) após os testes de desgaste

4. CONCLUSÃO

As seguintes conclusões podem ser extraídas deste trabalho:

- Com relação às componentes da força de torneamento, tanto a força de corte quanto a força de avanço foram estatisticamente influenciadas pelo avanço, porém a força de avanço também foi afetada pela preparação de aresta, isto é, foi registrada força de avanço mais baixa para a preparação B ($\gamma = 30^\circ$ $b = 80 \mu\text{m}$) e mais alta para a aresta Afiada. A velocidade de corte não influenciou (dentro de um nível de significância de 5 %) nenhuma das componentes da força de torneamento e a força passiva não foi afetada pelos parâmetros de corte nem pela preparação da aresta.
- De forma análoga, a aresta com preparação B também produziu rugosidade mais baixa (R_a máximo de $0,54 \mu\text{m}$), superando amplamente a preparação comercial sob avanço mais alto, ao passo que a aresta Afiada promoveu valores mais elevados de rugosidade da superfície torneada. Dentro da faixa testada, a rugosidade foi afetada pelo avanço, mas não pela velocidade de corte.
- Com relação ao desgaste, as ferramentas com preparação de aresta Comercial ($\gamma = 20^\circ$ $b = 80 \mu\text{m}$) e B ($\gamma = 30^\circ$ $b = 80 \mu\text{m}$) apresentaram desempenhos semelhantes com vida mais longa e desgaste gradual, enquanto as demais preparações apresentaram evidências de lascamento e fratura, notadamente a ferramenta com aresta afiada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Processos nº 2015/15622-2, 2017/12304-5, 2017/12309-7) e também à empresa Combustol Minas Tratamento Térmico Ltda. (Contagem, MG) pela realização do tratamento térmico das amostras.

6. REFERÊNCIAS

- Bartarya, G. e Choudhury, S.K., 2012. State of the art in hard turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 53, p. 1-14.
- Davim, J.P., 2011. *Machining of Hard Materials*. Springer London 1ª Ed.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. E Silva, M.B., 2009 *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1 ed. Editora Blucher, São Paulo.
- Pivotto, L., Ventura, C.E.H. e Endo, M., 2019. Influência do ângulo de chanfro sobre a rugosidade gerada no torneamento de uma liga de titânio. *Anais do, 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF 2019*. São Carlos. Brasil.

- Ventura, C.E.H., Köhler, J. e Denkena, B., 2014. Strategies for grinding of chamfers in cutting inserts. *Precision Engineering*, Vol. 38, issue 4, p. 749-758.
- Zhou, J.M., Walter, H., Andersson, M., Stahl, J.E., 2002 Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, issue 3, p. 301-305.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

THE INFLUENCE OF EDGE PREPARATION WHEN TURNING HARDENED STEEL WITH CERAMIC INSERTS

Alexandre Mares Weikert de Oliveira

Undergraduate Program in Mechanical Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, 31270-901.
alexandremares@yahoo.com.br

Augusto Moura Martins

Alexandre Mendes Abrão

Graduate Program in Mechanical Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, 31270-901.
augusto.mmartins2@gmail.com; abrao@ufmg.br

Carlos Eiji Hirata Ventura

Graduate Program in Mechanical Engineering, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís km 235, São Carlos SP, 13565-905.
ventura@ufscar.br

Abstract. *The need for mechanical components with superior strength and specific characteristics for use under severe conditions requires materials with mechanical strength and wear resistance under elevated loads. Hardened steels present suitable properties for these applications, thus, manufacturing processes must be capable of dealing with these characteristics to produce high quality components. The aim of this work is to investigate the influence of the cutting conditions (cutting speed and feed) and cutting edge preparation (chamfer width and angle) of ceramic tools ($Al_2O_3 + TiC$) in turning of hardened AISI 52100 bearing steel (62 HRC), with emphasis on the turning force components, machined surface finish and tool life. The results indicated that feed statistically affected all the evaluated parameters (increasing cutting, feed and passive forces and roughness), whereas cutting edge preparation affected only the feed force and surface roughness (lower feed force and roughness obtained using the tool with chamfer of 80 μm wide and 30°). Regarding tool life, the commercial tool and tool prepared with chamfer width of 80 μm and angle of 30° presented superior performance.*

Keywords: *Turning; Hardened steel; Ceramic tool; Edge preparation*

RESPONSIBILITY NOTICE

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