

AVALIAÇÃO DA PROGRESSÃO DE DESGASTE TRIDIMENSIONAL EM FERRAMENTAS DE CERÂMICA MISTA NO TORNEAMENTO DURO DO AÇO AISI 52100

Caroline Francisco Dorneles

Vitória Luise Silva

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão. Caixa Postal 476, EMC – CEP 88010-970, Florianópolis/SC – Brasil.
carol.fdorneles@gmail.com; vvitorialuise@gmail.com

Denis Boing

AB Sandvik Coromant R&D, Lerkrogsvägen 19, SE-126 80, Stockholm, Sweden
denis.boing@gmail.com

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão. Caixa Postal 476, EMC – CEP 88010-970, Florianópolis/SC – Brasil.
rolf.schroeter@ufsc.br

Resumo: O torneamento de materiais endurecidos, empregado na fabricação de componentes como eixos e rolamentos, é tipicamente realizado com ferramentas de PcBN e de cerâmica, devido às propriedades adequadas para suportar as condições tribológicas do processo de usinagem. Os métodos para previsão de vida e desempenho de ferramentas de usinagem geralmente são baseados em parâmetros bidimensionais, não fornecendo informações abrangentes acerca da superfície desgastada. Neste contexto, o presente trabalho visou analisar a progressão do desgaste e o comportamento de uma ferramenta cerâmica mista ($Al_2O_3 + TiC$) no torneamento do aço AISI 52100 com dureza de 60 HRC, utilizando métodos de medição tridimensionais. A velocidade de corte (v_c), a profundidade de corte (a_p) e o avanço (f) foram fixados em 187,5 m/min, 0,2 mm e 0,08 mm, respectivamente. Todos os ensaios foram realizados a seco. A metodologia adotada nos ensaios consistiu em testes de faceamento no sentido radial, do maior para o menor diâmetro, sendo que cada ensaio foi composto por dois passes de usinagem, utilizando um gume novo a cada ensaio. Os experimentos foram realizados totalizando 10 passes de usinagem, com a finalidade de avaliar o desgaste ao longo do tempo de usinagem. Após cada ensaio, as ferramentas foram submetidas a análise do nível de desgaste por meio de microscopia de foco infinito e análise por microscopia eletrônica por varredura. Como resultado, a ferramenta cerâmica apresentou pronunciado desgaste de flanco ao longo do processo, sendo intensificado nos últimos passes de usinagem. Além disso, após 4,5 min de usinagem, a ferramenta apresentou microlascamento na região da quina, estando esse presente até o último passe, porém de forma mais tênue. Como consequência, foi observado um aumento na força passiva, de cerca de 20 %, assim como alteração nos valores da rugosidade (R_a e R_t), podendo esses fenômenos serem atribuídos a uma possível alteração da microgeometria da ferramenta, ocasionada pelo microlascamento.

Palavras-chave: torneamento de aços endurecidos; desgaste de ferramenta; ferramenta cerâmica.

1. INTRODUÇÃO

O torneamento de aços endurecidos tem sido amplamente estudado e aplicado industrialmente desde a década de 80, em operações de acabamento e semiacabamento, como uma alternativa ao processo de retificação (Klocke *et al.*, 2005). Quando comparado ao processo de retificação, o torneamento de aços endurecidos possui vantagens quanto à flexibilidade do processo, taxa de remoção de material, tempo de preparação e compatibilidade ambiental (Astakhov, 2011; Tönshoff, *et al.*, 2000).

O processo de torneamento de aços endurecidos é geralmente realizado com o uso de ferramentas de PcBN (Polycrystalline cubic boron nitride) ou cerâmicas, pelo fato de as mesmas resistirem às condições tribológicas impostas no processo (Tönshoff, *et al.*, 2000). As cerâmicas mistas, com a adição de TiC ($Al_2O_3 + TiC$), possuem propriedades que melhoram a tenacidade, resistência ao desgaste e condutividade térmica, proporcionando maior resistência ao desgaste (Grzesik, 2008; Smith, 2008).

Oliveira *et al.* (2009) compararam o desempenho de ferramentas com baixo teor de PcBN e cerâmica à base de óxido de alumínio reforçada com carboneto de silício no torneamento do aço AISI 4340 a 56 HRC. No corte interrompido, as ferramentas de cerâmica resistiram aos choques mecânicos tanto quanto as ferramentas de PcBN. Por outro lado, no corte contínuo, as ferramentas de PcBN apresentaram melhor desempenho. De acordo com os autores, esse resultado está

associado ao fato de que, em altas temperaturas na região de corte, as cerâmicas reforçadas com carboneto de silício reagem quimicamente com o ferro, contribuindo para acelerar o desgaste da ferramenta. Luo *et al.* (1999) investigaram o comportamento do desgaste e desempenho de ferramentas de cerâmica no torneamento do aço AISI 4340 endurecido, variando a velocidade de corte em 60, 100 e 200 m/min. O tempo de vida das ferramentas aumentou com a velocidade de corte até atingir um valor máximo ($v_c = 100$ m/min) e a partir deste ponto, a vida das ferramentas começou a diminuir. Os principais mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas cerâmicas foram abrasão e adesão. Sahin (2009) investigou o comportamento da vida da ferramenta de cerâmica no torneamento do aço AISI 52100 para diferentes velocidades de corte. Para velocidades de corte em torno de 100 m/min, o autor observou que as ferramentas de cerâmica mista se tornaram uma alternativa para o torneamento do aço AISI 52100 (100Cr6), podendo ser substituído o uso de ferramentas de PcBN.

A análise de desgaste em ferramentas é tipicamente realizada em conformidade com os parâmetros bidimensionais descritos na norma ISO 3685:1993. Com a finalidade de complementar a caracterização do desgaste de ferramentas, Boing *et al.* (2018) propuseram uma metodologia que adota parâmetros tridimensionais (volumétricos) para essa avaliação. Baseando-se no modelo de análise de desgaste supracitado, é possível acompanhar o desempenho da ferramenta de corte, podendo prever falhas e possibilitando uma escolha adequada por meio de análise de desgaste.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a progressão do desgaste e sua influência nas componentes da força de usinagem em ferramentas de cerâmica mista no torneamento do aço AISI 52100 com dureza de 60 HRC.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de faceamento foram realizados em um torno CNC do fabricante Heyligenstaedt®, modelo Heynumat 10 U, com potência nominal no eixo-árvore de 75 kW, rotação máxima de 4500 rpm, placa de três castanhas de fechamento hidráulico com pressão máxima de 45 bar, diâmetro da placa de 300 mm, comandado numericamente por comando SIEMENS – Sinumerik 802D. Os corpos de prova foram fabricados com aço AISI 52100, temperado e revenido, com dureza de 60 HRC e possuem forma de disco com furo passante no centro, apresentando diâmetro externo de 125 mm e diâmetro interno de 25 mm. A fim de evitar choques e avarias contra a ferramenta, foram realizados chanfros nos diâmetros interno e externo dos corpos de prova com dimensões de 1 x 45°.

Para os ensaios de torneamento, foram utilizadas ferramentas de cerâmica mista, fornecidas pela empresa Sandvik Coromant®. A ferramenta, de código SNGA 120408 S01525 – classe 6050 (ISO H05), é composta de $Al_2O_3 + TiC/TiN$, nas seguintes proporções: Al_2O_3 (70%) + Ti [22,5% C, 7,5% N], com revestimento de TiN. A ferramenta utilizada possui raio de quina (r_e) = 0,8 mm e ângulo de quina (ϵ) = 90°. A caracterização da microgeometria das ferramentas foi realizada utilizando o microscópio de foco infinito da fabricante Alicona®, modelo Infinite Focus G5. Os dados da microgeometria do gume estão descritos na Tab. 1.

Tabela 1. Microgeometria da ferramenta cerâmica.

	r [μm]	α [°]	β [°]	γ [°]	$S\alpha$ [μm]	$S\gamma$ [μm]	K
Média	58,91	-0,22	114,52	-24,29	38,82	37,45	0,97
s	1,42	0,05	0,17	0,14	1,35	2,08	0,08
min	55,72	-0,35	113,95	-24,49	35,33	33,32	0,8
máx	62,61	-0,10	114,81	-23,78	42,55	43,06	1,22

Para a fixação da ferramenta foi utilizado um porta-ferramenta específico para torneamento (DSBNL 2020K 12) e fixação por grampo. O porta-ferramentas utilizado possibilita o ângulo de direção do gume (χ) = 75°, ângulo de saída (γ) = -6° e ângulo de inclinação (λ) = -6°.

Os ensaios foram realizados utilizando parâmetros de corte constantes, com velocidade de corte (v_c) de 187,5 m/min, profundidade de corte (a_p) de 0,2 mm e o avanço (f) de 0,08 mm, considerando uma réplica. Todos os ensaios foram realizados sem o uso de meios lubrificarrefrigerantes.

2.1. Procedimento experimental

Cada ensaio de usinagem foi composto por dois passes de usinagem no sentido radial, do diâmetro maior para o diâmetro menor do corpo de prova, utilizando um gume novo da ferramenta. Os experimentos foram realizados totalizando 10 passes de usinagem, com a finalidade de avaliar o desgaste ao longo do tempo de usinagem para cada ferramenta. Após cada passe de usinagem, as ferramentas foram submetidas a análise do nível de desgaste (FVM) e análise por microscopia eletrônica (MEV). Para cada ensaio foram adquiridos dados das componentes da força de usinagem. As componentes da força de usinagem foram medidas empregando uma plataforma piezelétrica do fabricante Kistler Instrument®, modelo 9257A integrado na máquina-ferramenta.

Antes de iniciar os ensaios de torneamento, os gumes das ferramentas foram caracterizados no microscópio de foco infinito. Após cada ensaio, os procedimentos de medição e caracterização de níveis de desgaste foram repetidos para todos os gumes, conforme metodologia descrita por Boing *et al.* (2018). Desta forma, o resultado da sobreposição da geometria de referência e da geometria do gume após os ensaios é capaz de fornecer a informação do nível de desgaste das ferramentas através dos parâmetros volumétricos de desgaste, descritos por Boing (2016).

Para o presente trabalho foram empregados os parâmetros W_{RM} (volume de material removido da ferramenta) e W_{MD} (máxima profundidade de defeito), que caracterizam o desgaste abaixo da superfície de referência. Além dos parâmetros tridimensionais, foi determinado o parâmetro bidimensional VB_B (desgaste médio do flanco), definido pela norma ISO 3685: 1993. O procedimento foi realizado em todos os ensaios para todos os gumes das ferramentas. Ademais, para a análise da morfologia do desgaste das ferramentas utilizou-se a avaliação em microscopia eletrônica de varredura (MEV) modelo TM3030, da fabricante HITACHI, equipado com sonda EDS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando a morfologia do desgaste por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) através da Fig. 1, percebe-se a atuação do mecanismo de abrasão no flanco da ferramenta, assim como o início do desgaste de cratera na face da ferramenta, identificados pelo mapa de cores na imagem obtida pelo microscópio de variação de foco (FVM). Segundo a metodologia descrita por Boing *et al.* (2018) o desgaste de cratera pode ser quantificado por meio do parâmetro tridimensional W_{MD} .

A ferramenta apresentou um desgaste de flanco médio (VB_B) de $133,09 \pm 1,03 \mu\text{m}$. König e Klocke (2002) afirmam que o desgaste de flanco surge na zona de contato entre ferramenta/peça e pode ser identificado através da presença de marcas de caráter abrasivo. Desta forma, de acordo com a Fig. 1, é possível identificar marcas abrasivas no flanco e na face da ferramenta, evidenciando a atuação do mecanismo de desgaste de abrasão. O padrão apresentado pelas marcas abrasivas nas ferramentas pode ser relacionado com o deslizamento dos carbonetos de cromo (M7C3) do aço AISI 52100, que consistem em partículas de elevada dureza, sobre o flanco e a face da ferramenta (Poulachon *et al.*, 2003).

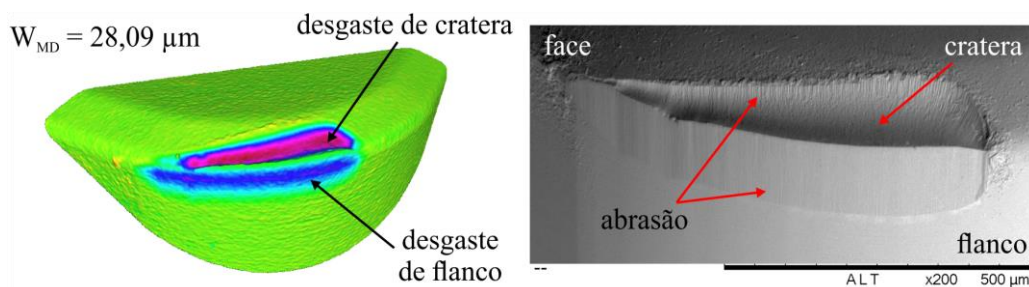


Figura 1. Desgaste volumétrico e morfologia do desgaste para a ferramenta cerâmica.

O desgaste das ferramentas foi analisado ao longo do tempo de usinagem, de acordo com a metodologia descrita por Boing *et al.* (2018). Os dados expostos na sequência são referentes ao ensaio principal da condição de corte, tendo em vista que a réplica se comportou seguindo a mesma tendência. A curva de desgaste para a ferramenta de cerâmica pode ser acompanhada pela evolução dos parâmetros volume de material removido W_{RM} e máxima profundidade de defeito W_{MD} , apresentados na Fig. 2.

A ferramenta de cerâmica apresentou pronunciado desgaste de flanco ao longo do processo (Figura 2), sendo o mesmo intensificado nos últimos passes de usinagem, juntamente com o desgaste de cratera. Do primeiro até o último passe, a ferramenta de cerâmica apresentou um aumento de aproximadamente 415% para o parâmetro W_{RM} e de 190% para W_{MD} . Após o primeiro ensaio, a ferramenta já apresentou marcas de desgaste, ocorrendo remoção de material. Desta forma, a microgeometria é alterada, comportamento esperado durante o tempo de usinagem. Essa alteração afeta a área de contato da ferramenta com a peça, fazendo com que ocorram maiores deformações na formação de cavacos e por consequência, maior calor gerado na face da ferramenta (Basset, 2014). Essa hipótese explica a intensificação do desgaste na face da ferramenta, podendo ser observado pelas imagens em FVM na Fig. 2 e pelo aumento no valor da máxima profundidade de defeito W_{MD} .

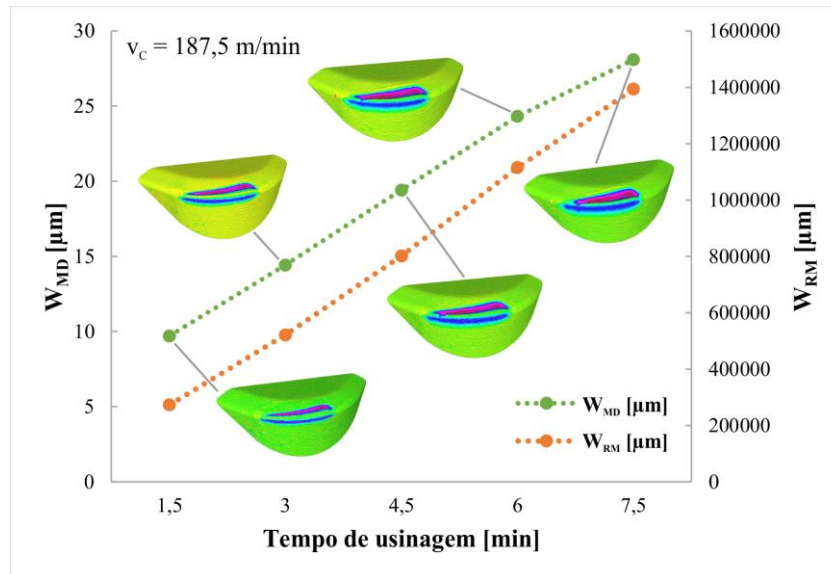


Figura 2 . Progressão do desgaste da ferramenta ao longo do tempo de usinagem.

Além do comportamento do desgaste evidenciado neste trabalho, outros fenômenos foram observados durante os ensaios. A ferramenta cerâmica apresentou, após 4,5 min de usinagem (passe 6), microlascamento na região da quina, conforme Fig. 3a. O mesmo microlascamento ainda estava presente no último passe, para um tempo de usinagem de 7,5 min, entretanto, de forma mais tênue (Figura 3b).

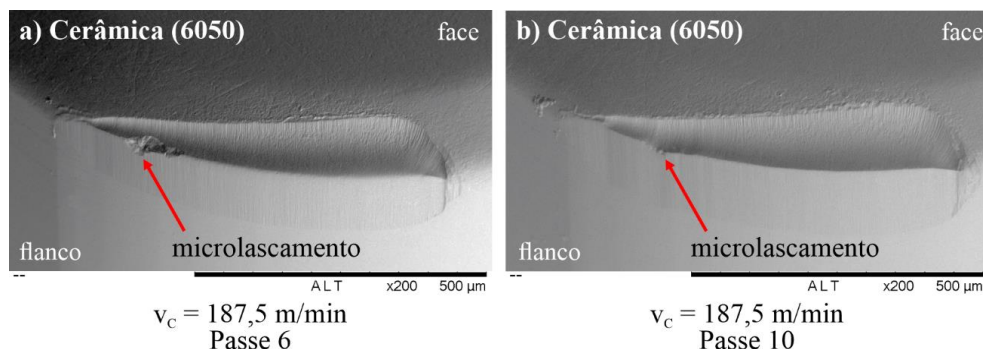


Figura 3. Microlascamento da ferramenta de cerâmica no (a) passe 6 ($t = 4,5$ min) e no (b) passe 10 ($t = 7,5$ min), ambas para $v_c = 187,5$ m/min.

Segundo Klocke (2011), as ferramentas que apresentam comportamento frágil, como a ferramenta de cerâmica, são mais suscetíveis a microlascamentos, principalmente em processos em que a seção de usinagem é pequena, caso do torneamento de materiais endurecidos. Além disso, outro fator que pode ter contribuído para esse tipo de desgaste refere-se à metodologia adotada nos ensaios, sobretudo as interrupções de corte realizadas para análise do desgaste. Durante o processo, a ferramenta sofre com as entradas da ferramenta na peça e, mesmo com o chanfro de proteção do corpo de prova, o gume é submetido a grandes esforços, podendo danificar-se.

Como consequência desses microlascamentos, as componentes da força de usinagem podem ser afetadas, sofrendo variações ao longo do tempo de usinagem. O gráfico da Fig. 4 mostra o comportamento das componentes da força de usinagem para a condição de corte ($v_c = 187,5$ m/min) em que ocorreu microlascamento na ferramenta de cerâmica. Consta-se que quando o ensaio atinge $t = 4,5$ min, referente ao passe 6, ocorre uma mudança no comportamento da força passiva. Pode-se atribuir o aumento da força passiva a uma possível alteração da microgeometria ocasionada pelo microlascamento. Após isto, a força passiva volta a diminuir devido ao desgaste da ferramenta (estabilização do gume).

O comportamento dos parâmetros de rugosidade R_a (rugosidade média) e R_t (rugosidade total) segue a mesma tendência do comportamento das componentes da força de usinagem. No mesmo instante em que ocorre o microlascamento da ferramenta, os valores de rugosidade R_a e R_t aumentam em cerca de 13% e 30%, respectivamente, contribuindo para a hipótese de alteração da microgeometria da ferramenta.

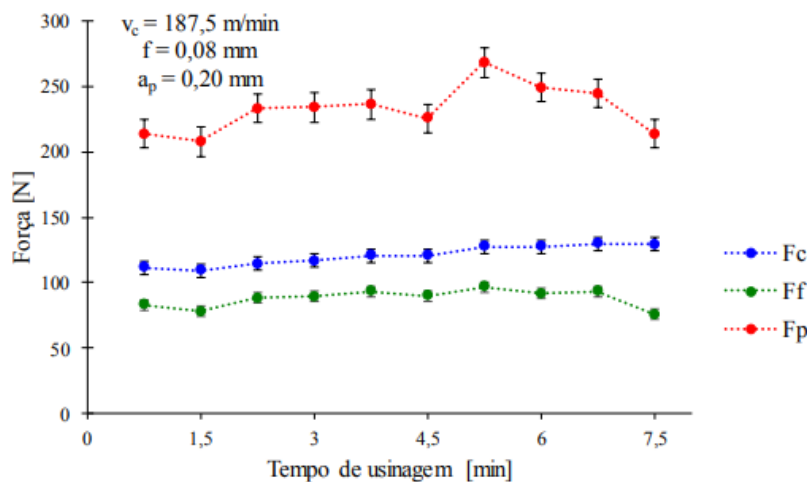


Figura 4. Comportamento das componentes da força de usinagem para a condição de corte em que ocorre o microlascamento na ferramenta de cerâmica.

4. CONCLUSÕES

Analizando o desgaste ao longo do tempo de usinagem, para o torneamento do aço AISI 52100 com velocidade de corte de 187,5 m/min, identificou-se início do desgaste de cratera nos primeiros passes de usinagem para a ferramenta de cerâmica mista. Com a progressão do tempo de usinagem, ocorreu a intensificação do desgaste de cratera e do desgaste de flanco, sendo esses evidenciados por imagens em MEV e FVM. A ferramenta cerâmica apresentou, após o passe 6, microlascamento na região da quina, para $v_c = 187,5$ m/min. Nesse instante, observou-se uma mudança no comportamento da força passiva. Além disso, foram observadas alterações nos valores da rugosidade (R_a e R_t), podendo esses fenômenos serem atribuídos a uma possível alteração da microgeometria da ferramenta, ocasionada pelo microlascamento. Com os resultados obtidos, pode-se concluir que a ferramenta de cerâmica possui propriedades capazes de suportar o processo de torneamento com aços endurecidos, sendo uma opção viável às ferramentas de PcBN.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em especial ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC); ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), da UFSC; ao Centro Universitário de Brusque UNIFEBE e ao Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação (CTIF); ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. REFERÊNCIAS

- Astakhov, V.P., 2011. "Machining of Hard Materials – Definitions and Industrial Applications". In Davim J. D., *Machining of Hard Materials*, London: Springer-Verlag.
- Basset, E., 2014. "Belastung Spezifische Auslegung und Herstellung von Schneidkanten Für Drehwerkzeuge", Leibniz Universität Hannover.
- Boing, D., 2016. *Transição da aplicação do metal-duro revestido e do PCBN no torneamento de aços endurecidos em função da dureza e do teor de carbonetos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Boing, D., Schroeter, R.B. e de Oliveira, A.J., 2018. "Three-dimensional wear parameters and wear mechanisms in turning hardened steels with PCBN tools". *Wear*, Vol 398-399, p. 69-78.
- Grzesik, W., 2008. "Machining – Fundamentals and Recent Advances". In Davim J. D., *Machining of Hard Materials*, London: Springer-Verlag.
- Klocke F., Brinksmeier E. e Weinert K., 2005. "Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes". *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 54, p. 22–45.
- König, W. e Klocke, F., 2002, "Tecnologia da Usinagem com Ferramenta de Corte de Geometria Definida - Parte I". Traduzido por Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner e Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, do livro "Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen". Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Luo, S.Y., Liao, Y.S. e Tsai, Y.Y., 1999. "Wear characteristics on turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools". *Journal of Material Processing Technology*, Vol 88, p. 114 – 121.
- Oliveira, A.J., Diniz, A.E. e Ursolino, D.J., 2009. "Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools". *Journal of Material Processing Technology*, Vol 209, p. 5262-5270.

- Poulachon, G., Bandyopadhyay, B., Jawahir, I., Pheulpin, S., Seguin, E., 2003. "The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 43, p. 139-144.
- Smith, G. T., 2008. "Cutting Tool Technology: Industrial Handbook". Springer-Verlag London.
- Tönshoff H.K., Arendt C. e Ben Amor R., 2000. "Cutting of hardened steel". *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 49, p. 547-566.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EVALUATION OF THREE-DIMENSIONAL WEAR PROGRESSION IN MIXED CERAMIC TOOLS ON THE HARD TURNING AISI 52100 STEEL

Caroline Francisco Dorneles

Vitória Luise Silva

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão. Caixa Postal 476, EMC – CEP 88010-970, Florianópolis/SC – Brasil.
carol.fdorneles@gmail.com ; vvitorialuise@gmail.com

Denis Boing

AB Sandvik Coromant R&D, Lerkrogsvägen 19, SE-126 80, Stockholm, Sweden
denis.boing@gmail.com

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão. Caixa Postal 476, EMC – CEP 88010-970, Florianópolis/SC – Brasil.
rolf.schroeter@ufsc.br

Abstract. Turning of hardened materials, used in the manufacturing of components such as shafts and bearings, is typically performed with PcBN and ceramic tools, due to their properties suitable to withstand the tribological conditions of the machining process. Methods for predicting the life and performance of cutting tools are usually based on two-dimensional parameters, not providing comprehensive information about the tool worn surface. In this context, the present study aimed to analyze the wear progression and the behavior of a mixed ceramic tool ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) in the turning of AISI 52100 steel with a hardness of 60 HRC, using three-dimensional measurement methods. Cutting speed (v_c), cutting depth (a_p) and feed (f) were set at 187.5 m/min, 0.2 mm and 0.08 mm, respectively. All tests were carried out dry. The methodology adopted in the tests consisted of facing tests in the radial direction, from the largest to the smallest diameter, and each test was composed of two machining passes, using a new cutting edge for each test. The experiments were carried out in a total of 10 machining passes, in order to evaluate the wear along the machining time. After each test, the tool wear was analyzed by infinite focus microscopy and scanning electron microscopy. As a result, the ceramic tool showed pronounced flank wear throughout the machining process, which was intensified in the last machining passes. In addition, after 4.5 min of machining, the tool exhibited a microchipping, which was present until the last machining pass, but in a slighter way. As a consequence, an increase in the passive force of about 20% was observed, as well as a change in the surface roughness values (R_a and R_t), and these phenomena can be attributed to a possible change in the microgeometry of the tool, caused by microchipping.

Keywords: Hard turning; Tool wear; Ceramic tool.

RESPONSIBILITY NOTICE

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