

ANÁLISE DO DESGASTE DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE INSERTOS DE METAL DURO

Aristóteles Guido Rodrigues

SENAI Santos Dumont, Rua Pedro Rachid 304, 12211-180, São José dos Campos/SP, Brasil
Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos/SP, Brasil
aristotelesguido@gmail.com

Carlos Eiji Hirata Ventura

Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos/SP, Brasil
ventura@ufscar.br

Resumo. Os insertos de metal duro possuem o seu destaque pela vasta utilização na indústria, devido ao excelente custo-benefício oferecido na usinagem dos mais diversos tipos de metais. Desse modo, faz-se necessário o domínio cada vez maior das variáveis de seu processo de fabricação e seus efeitos, sendo a retificação etapa fundamental na busca pela alta eficiência de insertos de corte, pois é responsável por conferir dimensões finais e uma integridade superficial adequada. Este artigo analisa o desgaste do rebolo de diamante no processo de retificação de insertos de metal duro conforme o volume total de material removido aumenta. Para isso, foi utilizado um rebolo com grãos de diamante D46 e ligante resinoide para retificar insertos de metal duro da classe ISO K10. Durante os experimentos, a topografia da camada abrasiva do rebolo foi avaliada, percebendo-se uma redução na protrusão de grão com o aumento do volume de material removido.

Palavras chave: Retificação. Rebolo de diamante. Desgaste. Metal duro.

1. INTRODUÇÃO

Considerado o mais importante material para ferramentas de corte, o metal duro é conhecido por exibir excelentes propriedades mecânicas a temperatura ambiente e a altas temperaturas, podendo ser utilizado para cortar inúmeras ligas metálicas conhecidas, nas mais diversas operações de usinagem (Bonny, *et al.*, 2010; Ferraresi, 1977). Composto em sua maioria por carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co), o metal duro apresenta uma combinação de elevada dureza, resistência ao desgaste, tenacidade, resistência a quente e resistência à corrosão, não comum a outros materiais e muito exigida em ferramentas de usinagem (Diniz, *et al.*, 2013; Wirtz, *et al.*, 2018).

Os insertos de metal duro são produzidos principalmente através da metalurgia do pó, em que passam por processo de sinterização. Aqui, é conferida a resistência mecânica necessária para que o inserto suporte os esforços de corte durante sua aplicação (Chiaverini, 1986; Machado, *et al.*, 2011). A contração do material durante a sinterização pode provocar defeitos, como empenamento, e dificulta a obtenção de tolerâncias mais estreitas. Para garantir a intercambialidade e tolerância do processo de usinagem, é necessário que o inserto passe por um processo de acabamento. Sendo o metal duro extremamente resistente ao desgaste, utiliza-se para isso o processo de retificação com grãos abrasivos de diamante. A retificação pode conferir também ângulos e raios aos insertos, necessários para o corte de diferentes materiais e reforço das arestas (Ferraresi, 1977; Machado, *et al.*, 2011).

A retificação como processo de acabamento é responsável pela qualidade superficial e dimensional dos insertos, que tem influência direta nas tolerâncias do processo de usinagem nos quais serão utilizados. Denkena, *et al.* (2013) afirmam que a estratégia de retificação do inserto possui influência no comportamento e consequente tempo de vida do mesmo em trabalho. Além da estratégia de retificação, outro fator com forte influência na qualidade do inserto é o desgaste do rebolo durante o processo, cuja evolução, gerada pelo achatamento, quebra ou perda dos grãos abrasivos, pode causar aumento de carga mecânica e térmica (Luo, *et al.*, 2001; Zhan, *et al.*, 2009). Essas características podem gerar danos térmicos e de outras naturezas, como aumento da rugosidade e crateras na superfície do inserto (Yu, *et al.*, 2016).

No caso do processo abrasivo, a ferramenta sofre tipos distintos de desgaste, os quais estão diretamente associados às cargas termomecânicas durante o processo. Quanto maior o valor dessas cargas, maior será o desgaste do rebolo (Klocke, 2009; Zhan, *et al.*, 2009). Os grãos abrasivos do rebolo estão sujeitos a três principais fenômenos de desgaste: achatamento, ruptura e remoção do grão, que influenciam diretamente sua protrusão, que, por sua vez, pode ser tomada como indicativo da agressividade (afiação) do rebolo. No corte de materiais superduros, Mamalis, *et al.* (2000) demonstraram que o principal mecanismo de desgaste corresponde ao achatamento dos grãos.

O ligante corresponde à outra parte do rebolo suscetível ao desgaste e, assim, a redução da protrusão de grão pode, na verdade, ter quatro causas principais: achatamento; ruptura; remoção do grão abrasivo; e desgaste do ligante, que, no limite, também acaba por causar perda do grão.

O achatamento é a forma inicial de desgaste dos grãos em rebolos diamantados. Zhan, *et al.* (2009) afirmam que as principais causas de desgaste são a forma irregular dos grãos de diamante, protrusões em excesso e a tensão de impactos alternados. Mecanismos de desgaste, como adesão, microfratura, abrasão e reações químicas foram apontados em outros trabalhos (Klocke, 2009; Wirtz, *et al.*, 2018).

O desgaste da camada abrasiva é um importante parâmetro a ser analisado para que se possa determinar o fim de vida do rebolo. Altos valores de desgaste podem causar danos permanentes às superfícies retificadas (Jiang, *et al.*, 2013), devido à elevação de cargas térmicas e mecânicas produzidas por possível aumento do atrito e da deformação do material antes do cisalhamento. Para evitar fenômenos decorrentes do desgaste do rebolo, a sua topografia pode ser corrigida por meio da operação de dressagem (perfilamento combinado à afiação), que tem por objetivo uniformizar a superfície abrasiva através da remoção/afiação de grãos abrasivos desgastados, do ligante e de partículas aderidas durante a retificação (Doman, *et al.*, 2006; Machado, *et al.*, 2011). Além do material do dressador, seu formato e tamanho de grão são escolhidos em consonância com as características do rebolo.

De acordo com Denkena, *et al.* (2014a), a dressagem é realizada comumente antes da retificação ou, quando o material a ser retificado leva a um desgaste acelerado da ferramenta abrasiva, simultaneamente ao processo. Os mesmos autores esclarecem que, na retificação plana transversal de mergulho de materiais de ferramenta, a dressagem do rebolo diamantado, do tipo copo, é feita por um rolo dressador de óxido de alumínio, também do tipo copo, o qual tem a função de remover o ligante, liberando grãos desgastados e limpando os poros do rebolo.

Com base nas informações apresentadas, verifica-se a importância que tem sido dada à análise da topografia do rebolo para caracterização do processo e obtenção de explicações para os fenômenos envolvidos. Os métodos utilizados não são foco direto das pesquisas, mas nota-se que técnicas mais flexíveis e de menor custo tem sido procuradas para aplicação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes foram realizados em um centro de retificação CNC com 4 eixos para preparação de insertos de corte Agathon DOM Plus, com rotação e potência máximas de 3400 rpm e 16 kW. O rebolo utilizado possui abrasivos de diamante com tamanho de grão D46, ligante resinóide e concentração C100 (0,88 g/cm³), tem formato copo, com diâmetro externo de 350 mm e corpo fabricado em alumínio. Para normalização do rebolo, foi realizada a dressagem antes do início dos testes. O rolo dressador também possui formato copo, composto por óxido de alumínio com tamanho médio de grão de 180#.

Foram retificados insertos de metal duro da classe ISO K10, compostos por 95% de WC e 5% de Co, com geometria quadrada sem raio de ponta (SNMN 1204-). Devido às tolerâncias de sinterização, o comprimento das arestas variou entre 12,563 mm e 12,611 mm, enquanto a espessura ficou na faixa de 4,534 mm a 4,813 mm. Os testes de retificação foram realizados nas quatro superfícies de folga de cada inserto.

Para a avaliação da topografia do rebolo, foi utilizado o microscópio para análise de imagens tridimensionais Alicona Infinite Focus SL, conectado a um computador pessoal com software Alicona Metrology Measurement, capaz de gerar as imagens utilizadas neste trabalho e calcular os parâmetros de rugosidade.

Com foco na observação dos fenômenos envolvidos durante o desgaste do rebolo, considerando a quantidade de material removida pelo mesmo, a retificação foi interrompida para análise da camada abrasiva após a remoção de diferentes volumes de material, que se iniciou em 0 mm³ (rebolo recém-dressado) e atingiu o valor aproximado de 1050 mm³, como pode ser visto na Tab. 1. Devido à variação das dimensões iniciais e finais do inserto, estas da ordem de décimos de micrometro, os valores reais de volume obtidos foram aproximados e calculados com maior exatidão após o término da retificação, sendo as medidas dos insertos tomadas por um micrômetro externo digital milesimal de dois contatos.

Tabela 1. Volume de material removido para medição dos parâmetros de análise do rebolo e do inserto

Volume de remoção planejado (mm ³)	Volume de material removido real (mm ³)	
	Mínima espessura de corte (h _{min})	Máxima espessura de corte (h _{max})
0	-	-
15	14,92	23,12
30	30,41	41,57
60	73,98	78,26
120	115,75	117,15
150	156,77	158,72
300	307,88	306,23
450	466,27	463,98
600	628,27	621,74
750	795,45	781,93
900	959,57	942,53
1050	1122,19	1102,35

A fim de se analisar o comportamento do desgaste em situações extremas, os testes com variação do volume de material retificado foram realizados em duas condições: espessura mínima e máxima de cavaco por grão h_{cu} . Assim, os parâmetros de corte foram escolhidos para a obtenção dessas duas espessuras, tendo como base os limites de velocidade permitidos pela máquina, sendo que o tipo de rebolo não foi alterado. A espessura do cavaco por grão foi calculada com base no modelo desenvolvido por Friemuth (1999) e leva em conta, além das velocidades de corte v_c e avanço v_{fa} , o tamanho do grão abrasivo e sua concentração. Os valores de velocidade e as respectivas espessuras de cavaco são mostrados na Tab. 2.

Tabela 2. Valores de espessura do cavaco por grão, velocidade de corte e de avanço para cada teste

Espessura de corte	h_{cu} (μm)	v_c (m/s)	v_{fa} (mm/min)
Mínima (h _{min})	0,18	40	2
Máxima (h _{max})	0,55	12	10

No começo de cada teste (volume removido de 0 mm³), o rebolo foi dressado com parâmetros constantes, de modo a se garantir uma camada abrasiva uniforme antes do início do desgaste. Foram aplicados os seguintes valores: velocidade tangencial do rebolo durante a dressagem $v_c = 20$ m/s, velocidade tangencial do dressador $v_{cd} = 10$ m/s, velocidade de avanço axial do dressador $v_{fad} = 3$ μm/s e tempo de dressagem $t_d = 15$ s.

Para avaliação da camada abrasiva, foi utilizado o parâmetros Spk e Smr1, ambos obtidos a partir da curva de Abbott-Firestone. O primeiro corresponde à altura reduzida de pico e o segundo à porcentagem de material relacionada aos picos na superfície analisada. Tais parâmetros fornecem indicativos, respectivamente, da protrusão de grão e da quantidade de arestas ativas na camada abrasiva.

De modo a se evitar a retirada do rebolo da máquina, a topografia de sua camada abrasiva foi avaliada a partir de um molde feito por meio de uma resina polimerizável Kulzer Technovit 2220, conforme o método proposto por Denkena, *et al.* (2014b). Nesse método, visto na Fig. 1(a), com o auxílio de um filme plástico transparente, a resina em estado líquido é colocada na superfície do rebolo e uma luz ultravioleta é aplicada sobre ela por aproximadamente 1 minuto, até que ela se solidifique. O molde de resina é, então, levado ao microscópio confocal, sua imagem é filtrada de modo a torná-la plana, invertida e os parâmetros Spk e Smr1 são medidos.

Para cada volume de remoção de material foram tirados moldes de duas regiões, da superfície do rebolo, espaçadas aproximadamente em 180° na circunferência do rebolo e, para cada molde de resina foram analisadas duas áreas de 4 mm² cada. Assim, para cada volume de material removido, foram realizadas quatro medições de Spk e Smr1, cujas médias e desvios-padrão foram utilizados para análise.

Também foram realizadas medições diretamente na superfície do rebolo em momentos específicos. Para tal, fora confeccionado um suporte posicionador do rebolo no microscópio, visto na Fig. 1(b), a fim de analisar a mesma região da superfície entre as paradas de medição. Devido à complexidade de desmontagem do equipamento para remoção do rebolo, foram realizadas réplicas de apenas 10 pontos dos volumes descritos na Tab. 1, considerados críticos devido aos resultados preliminares de Spk observados durante o desenvolvimento do trabalho.

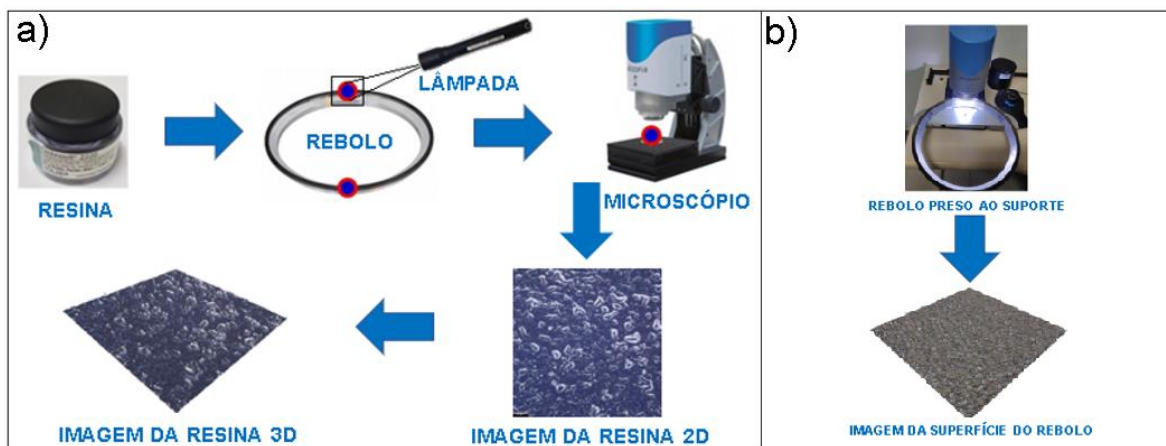


Figura 1. Medição do parâmetro Spk (a) através de resina polimerizável e (b) diretamente na superfície do rebolo

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A protrusão dos grãos abrasivos do rebolo, expressa pelo parâmetro Spk, na Fig. 2, pode ser tratada como o grau de afiação do rebolo. O aumento inicial de Spk em relação ao valor medido logo após a dressagem (entre 0 e 100 mm³) para os dois casos (espessura de cavaco por grão mínima e máxima) indica aumento da protrusão de grão e, portanto, desgaste do ligante, conforme visto na Fig. 3. O desgaste excessivo do ligante pode causar também queda dos grãos e, portanto, a diminuição da protrusão. Em função desse fenômeno, maiores dispersões são observadas nessas regiões do gráfico.

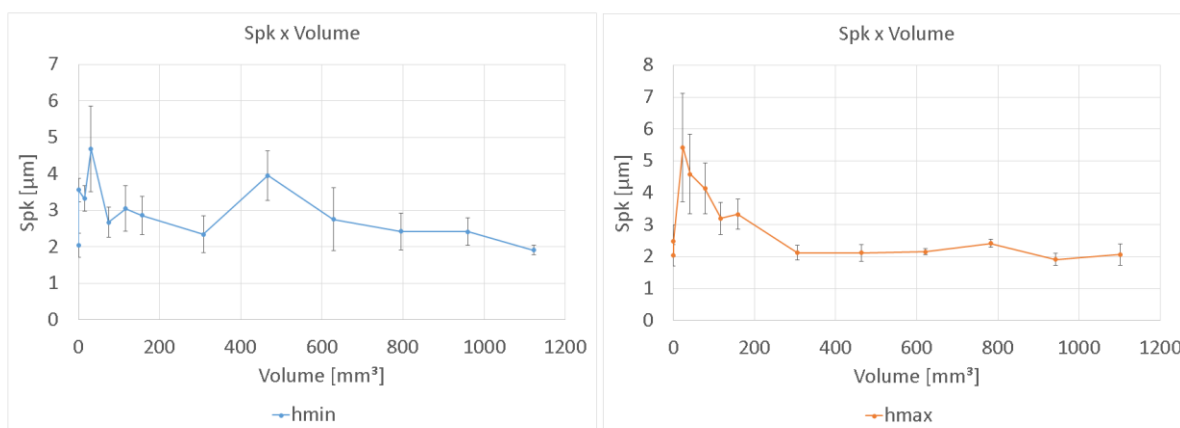


Figura 2. Variação do valor de Spk com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão

Já a queda subsequente da curva para valores próximos aos obtidos na dressagem pode ser compreendida como resultado do desgaste dos grãos de diamante (Fig. 4).

Após certa estabilização de Spk, picos de maior e menor intensidade ocorrem, respectivamente, para o volume de 450 mm³, no caso da espessura mínima de cavaco, e para o volume de 750 mm³, no caso da espessura máxima. A continuação do desgaste do grão abrasivo faz com que sua extremidade se aproxime do ligante (redução da protrusão), o qual passa a ser novamente desgastado pelo contato com o inserto de metal duro, gerando o aparecimento de novos grãos e consequente aumento no valor de Spk.

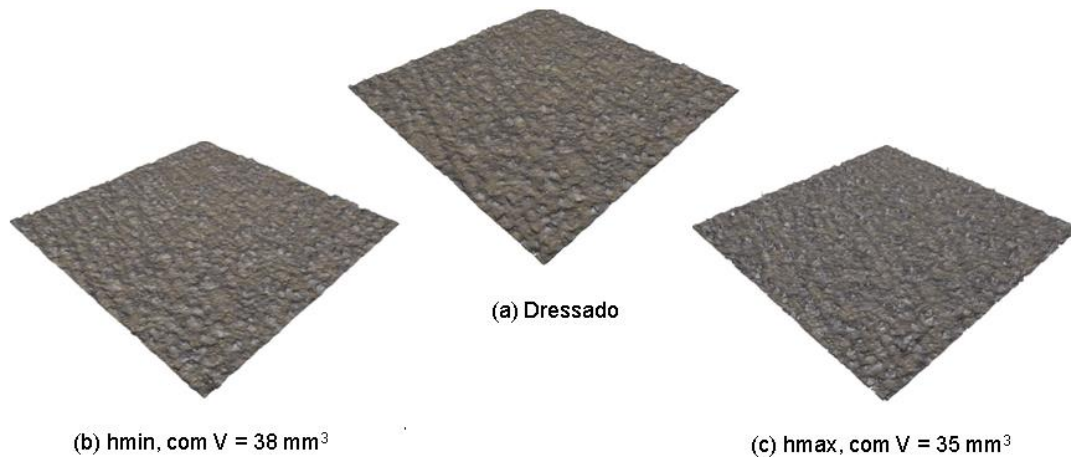


Figura 3. Camada abrasiva do rebolo após (a) dressagem e retificação de um volume aproximado de 30 mm^3 , com espessura (b) mínima e (c) máxima de cavaco por grão

A confirmação de que este pode se tratar de um fenômeno cíclico de autoafiação, no entanto, depende da realização de mais testes, com a retificação de maiores volumes de material.

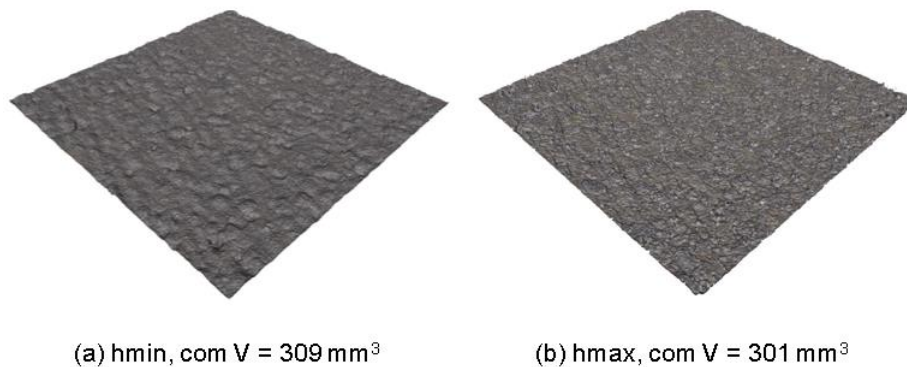


Figura 4. Camada abrasiva do rebolo após retificação de um volume aproximado de 300 mm^3 , com espessura (a) mínima e (b) máxima de cavaco por grão

A espessura mínima de cavaco por grão provoca o segundo pico de Spk após a retificação de um volume menor quando se compara ao processo com maior espessura de cavaco. Isso pode ter ocorrido devido ao fato da menor espessura causar maiores cargas térmicas (maior velocidade de corte e menor velocidade de avanço), acelerando o desgaste do ligante, produzido a partir de uma resina. A predominância das cargas mecânicas no segundo caso atrasa o aumento de Spk e provoca um pico menor, já que o processo de desgaste do grão continua ocorrendo de forma mais intensa.

Adicionalmente, analisou-se o parâmetro Smr1, que, de acordo com a curva de Abbott-Firestone, caracteriza o percentual de material associado aos picos e, no caso estudado, fornece um indicativo da quantidade de arestas na camada abrasiva. A Fig. 5 apresenta a evolução desse parâmetro com o aumento do volume de material retificado. Nota-se apenas uma pequena variação, que oscila entre 6% e 8% nos dois casos analisados (hmin e hmax), sendo possível verificar que pequenos picos isolados ocorrem logo após quedas mais bruscas de Spk. Isso indica que ambos os parâmetros estão correlacionados, como aponta a literatura.

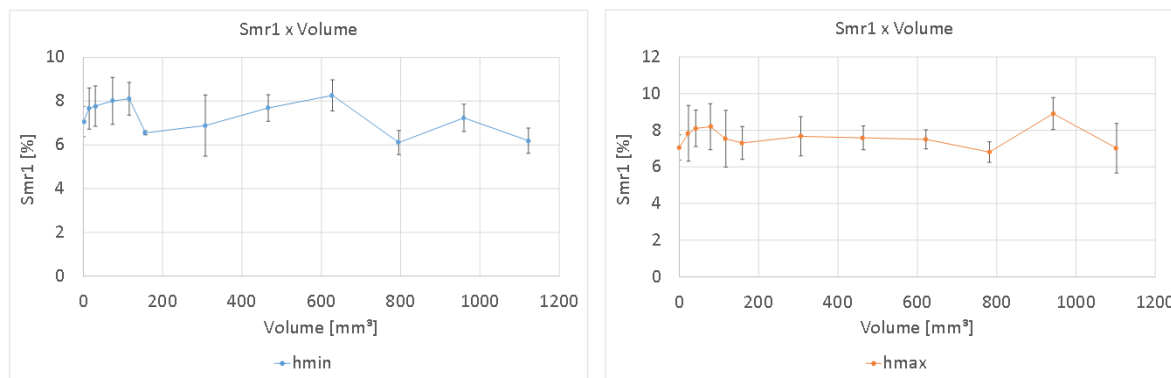


Figura 5. Variação do valor de Smr1 com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos através dos testes de retificação de insertos de metal duro com o acúmulo de volume total de material removido pelo rebolo, verifica-se que:

- Com o aumento do volume de remoção de material, a proeminência de grãos, de modo geral, diminui, indicando a evolução do desgaste do rebolo, o qual é provocado principalmente pelo desgaste do grão abrasivo e do ligante, havendo a possibilidade de ocorrência de um fenômeno cíclico de autoafiação e manutenção da topografia do rebolo.
- A utilização de mínima espessura de cavaco por grão leva a um desgaste por achatamento, devido às maiores cargas térmicas associadas ao processo. Diferentemente, a aplicação da maior espessura de cavaco provoca ruptura dos grãos, em função da maior carga mecânica.
- Quanto à relação entre a quantidade de arestas na camada abrasiva (medida por Smr1) e a proeminência de grão (avaliada por Spk), verificou-se que a redução de Spk está relacionada ao aumento de Smr1, podendo ser influenciada pelo desgaste do ligante.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSCar, e ao SENAI Santos Dumont de São José dos Campos, por permitir a utilização de seus equipamentos durante a realização dos testes. Adicionalmente, agradece-se o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processos nº 2015/15622-2, 2017/12309-7, e 2017/12304-5).

6. REFERÊNCIAS

- Bonny, K. et al. *Friction and wear characteristics of WC – Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact*. *Wear*, v. 268, n. 11–12, p. 1504–1517, 2010.
- Chiaverini, V. *Tecnologia Mecânica - Vol. 2. Processos de Fabricação e Tratamento* (McGraw-Hills Ltda & ABDR, Eds.) São Paulo, 1986.
- Denkena, B. et al. *Influence of the cutting edge preparation method on characteristics and performance of PVD coated carbide inserts in hard turning*. *Surface and Coatings Technology*, v. 254, p. 447–454, 2014a.
- Denkena, B.; Köhler, J.; Ventura, C. E. H. *Customized cutting edge preparation by means of grinding*. *Precision Engineering*, v. 37, n. 3, p. 590–598, 2013.
- Denkena, B.; Köhler, J.; Ventura, C. E. H. *Influence of grinding parameters on the quality of high content PCBN cutting inserts*. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 2, p. 276–284, 2014b.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- Doman, D. A.; Warkentin, A.; Bauer, R. *A survey of recent grinding wheel topography models*. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, p. 343–352, 2006.
- Ferraresi, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. v. 1
- Friemuth, F. *Schleifen hartstoffverstärkter keramischer Werkzeuge* Hannover Fachbereich Maschinenbau, 1999.
- Jiang, J. L. et al. *2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process*. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 74, p. 29–40, 2013.
- Klocke, F. *Manufacturing Processes 2 - Grinding, Honig, Lapping*. Berlin: Springer, 2009.

- Luo, S. Y. et al. *Performance of powder filled resin-bonded diamond wheels in the zvertical dry grinding of tungsten carbide*. Journal of Materials Processing Technology, v. 118, n. 1–3, p. 329–336, 2001.
- Machado, A. R. et al. *Teoria da usinagem dos materiais* (Blucher, Ed.) São Paulo, 2011.
- Mamalis, A. G.; Horvath, M.; Grabchenko, A. I. *Diamond grinding of super-hard materials*. Journal of Materials Processing Technology, v. 97, n. 1–3, p. 120–125, 2000.
- Wirtz, C. et al. *Analysis of the grinding wheel wear in dependency of the cemented carbide specification*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 99, n. 1–4, p. 747–754, 2018.
- Yu, H.; Lu, Y.; Wang, J. *Study on wear of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern*. Wear, v. 358–359, p. 89–96, 2016.
- Zhan, Y. et al. *Wear of brazed diamond wheel in grinding of cemented carbide*. Key Engineering Materials, v. 416, p. 198–204, 2009.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Analysis of the wheel wear during grinding of cemented tungsten carbide inserts

Aristóteles Guido Rodrigues

SENAI Santos Dumont, Rua Pedro Rachid 304, 12211-180, São José dos Campos/SP, Brazil
Federal University of São Carlos, Rod. Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos/SP, Brazil
aristotelesguido@gmail.com

Carlos Eiji Hirata Ventura

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

Abstract. *Cemented tungsten carbide cutting inserts stand out for their wide use in the industry, related to their excellent cost-benefit ratio in machining of different materials. Thus, an increasing knowledge of their manufacturing process variables and their effects is required, being grinding operation a fundamental step in the search for high efficiency of cutting inserts, as it is responsible for providing the final dimensions as well as appropriate surface quality. Within this context, this paper analyzes the wheel wear during grinding of cemented tungsten carbide inserts with the increase in total material removal volume. For this, a resin bonded wheel with diamond grains D46 was applied in grinding of ISO grade K10 cutting inserts. During the process, the grinding wheel abrasive layer was analyzed. The obtained results revealed a reduction in the grain protrusion with the increase in the volume of removed material.*

Keywords: *Grinding. Diamond grinding wheel. Wear. Cemented tungsten carbide.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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