

ANÁLISE DOS ESFORÇOS DURANTE A RETIFICAÇÃO PLANA TRANSVERSAL DE MERGULHO DE INSERTOS DE CORTE DE METAL DURO

Dennis Coelho Cruz

Bruna Oliveira da Silva

Vitor Luiz Sordi

Carlos Eiji Hirata Ventura

Universidade Federal de São Carlos. Rod. Washington Luis km 235, São Carlos, SP 13565-905, Brasil

denniscoelhocruz@gmail.com; bruna.oliveira@estudante.ufscar.br; sordi@ufscar.br; ventura@ufscar.br

Resumo. A pesquisa investiga o comportamento dos esforços no processo de retificação da superfície de folga de insertos de metal duro (WC-5%Co), com variação da velocidade de corte e tamanho dos grãos de diamante em rebolos com ligante resinoide. Durante a retificação dos insertos, foram obtidas as componentes de força normal e tangencial e, a partir delas, foi calculada sua relação, que fornece um indicativo da eficiência do processo. A partir dos resultados obtidos, pôde-se concluir que maiores grãos abrasivos levam a um processo mais eficiente, com maiores valores da relação de forças, mas prejudicam a qualidade superficial dos insertos, gerando maiores valores de rugosidade.

Palavras chave: Retificação. Força. Inseto de corte. Metal duro.

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes avanços tecnológicos para a indústria de manufatura correspondeu à inserção do metal duro (liga de WC e Co), que, combinando dureza e tenacidade tanto em baixas quanto em altas temperaturas, supriu a necessidade de uma ferramenta para aplicação com elevadas taxas de remoção de material e menor tempo de trabalho (Ortner *et al.*, 2014; van den Berg, 2007; Zhan e Xu, 2012). Após o processo de compactação e sinterização, insertos de corte de metal duro devem ter suas superfícies retificadas, sendo que este tipo de processo garante tolerâncias dimensionais e geométricas apertadas, bom acabamento superficial e de aresta e produtividade adequada. O processo de acabamento gera influência significativa sobre o desempenho do inserto, pois elevadas rugosidades afetam o atrito entre peça, cavaco e ferramenta e geram pontos de concentração de tensão, que podem reduzir sua vida útil. Além disso, grandes lascamentos na aresta demandam maiores raios de aresta ou chanfros para eliminação dos defeitos, formas geométricas que, além de necessitarem de processo adicional para serem produzidas, tornam a ferramenta mais negativa, aumentando a deformação do material e provocando maiores esforços e temperaturas quando da aplicação do inserto.

A retificação pode ser compreendida como a atuação sucessiva de endentadores (grãos abrasivos) que riscam (penetração + deslocamento) a superfície da peça de acordo com a cinemática do processo. No caso da retificação plana transversal de mergulho, utilizada para o acabamento das superfícies de folga de insertos de corte, o grão abrasivo descreve aproximadamente uma rampa, iniciando sua trajetória em atrito com a superfície. Em seguida, o material a ser removido começa a ser deformado elásticamente e plasticamente e, por fim, há cisalhamento ou formação efetiva do cavaco. As duas primeiras etapas não contribuem efetivamente para o corte, elevando o gasto energético, deformando a superfície e prejudicando sua rugosidade. Já na terceira etapa, o consumo de energia se relaciona principalmente com o corte e a remoção de material, contribuindo para a geração de uma superfície nova (Masoumi *et al.*, 2014).

A otimização consciente do processo de retificação exige que o mecanismo de remoção de material desses insertos seja adequadamente compreendido, de modo a possibilitar a determinação correta de parâmetros de operação. Um processo de retificação eficiente deve converter a maior parte da energia consumida em remoção de material e fornecer um inserto de corte com baixas rugosidades superficial e de aresta.

Durante a retificação de metal duro, Klocke *et al.* (2016) apontaram que a passagem de um grão abrasivo gera deformações e cisalhamento do carbeto de tungstênio (WC) e do cobalto (Co), com formação de trincas laterais e radiais, inerentes ao comportamento frágil do material. Ademais, eles concluíram que o surgimento de WC na superfície é indício de uma deformação plástica severa, relacionada à transição da remoção de material dúctil para a frágil. Dependendo das condições de retificação, diferentes situações podem prevalecer, por exemplo, baixas espessuras de cavaco podem levar a menores valores de rugosidade e remoção dúctil, mas reduções exageradas tendem a causar apenas deformação do material. Diferentemente, maiores espessuras geram remoção de material (cisalhamento) de forma mais eficiente, mas podem provocar a formação de trincas.

A predominância dos mecanismos de atrito, sulcamento ou cisalhamento depende do planejamento do processo e, de acordo com Lavrinenko (2016) e Choudhary e Babu (2020), pode ser compreendida e monitorada a partir da relação

entre a força tangencial (F_t) e a força normal (F_n). O primeiro autor afirma que, para o aumento da relação e , como resultado, da eficiência na retificação de metais duros, devem ser escolhidos rebolos com maiores grãos abrasivos e ser utilizados elevados valores de velocidade de corte e de avanço. Já Biermann e Würz (2009) verificaram que o efeito da concentração de grãos abrasivos sobre a força específica não é significativo na retificação do metal duro, e, calculando a relação F_t/F_n , notaram uma redução de 0,6 para 0,42 quando do aumento da velocidade de corte de 15 m/s para 33 m/s, com uso de um rebolo D46 com ligante resinoide. Além disso, eles observaram que, em comparação com rebolos de ligante resinoide, rebolos com ligante vitrificado levam a uma redução significativa da força específica, devido à sua alta porosidade. Habrat (2016) observou que o aumento da velocidade de corte de 24 m/s para 32 m/s na retificação de WC-10%Co com rebolo D91 de ligante resinoide reduz a força tangencial, mas mantém uma razão média entre as forças de 0,30. Luo *et al.* (1997) aplicaram um rebolo com mesmo ligante e tamanho dos grãos de diamante 100-120# associado a uma menor velocidade de corte (16,5 m/s) e obtiveram uma relação F_t/F_n igual a 0,5.

Choudhary e Babu (2020), em experimentos de retificação em um aço EN8 com rebolo de óxido de alumínio, mostraram que, quando a relação de forças é maior ou igual a 1, há ação predominante de corte; com uma relação entre 0,8 e 1, ocorre sulcamento, pois a penetração do abrasivo na peça não é suficiente para cortar o material deformado; já valores abaixo de 0,8 podem ser associados ao atrito, que inclui a ação de deslizamento nas interfaces cavaco-ligante, ligante-peça e cavaco-peça.

Masoumi *et al.* (2014) relataram que a força de retificação na preparação de peças de aço de baixo carbono revestidas com WC-10Co-4Cr com rebolo resinoide de diamante (D75 e concentração C75) é mais influenciada pela profundidade de corte do que a velocidade de corte e avanço, sendo que há maior deformação plástica com remoção dominante por fratura frágil. Ainda segundo os autores, a energia gasta na geração da nova superfície em regime dúctil é maior do que na remoção no modo frágil, quando a profundidade de corte aumenta, o consumo energético é reduzido e, de acordo com os resultados experimentais, o valor médio da razão entre as forças tangencial e normal foi de 0,35, como esperado para materiais frágeis (Marinescu *et al.*, 2007).

No processo de fabricação de ferramentas de corte é necessário estar atento a todas as variáveis que podem influenciar seu desempenho. Nesse sentido, há pesquisas que descrevem faixas de parâmetros de retificação adequadas para a obtenção do produto final, porém, pouco foi encontrado em relação à melhora da eficiência do processo levando em conta uma avaliação da qualidade superficial da peça. A fim de se melhor compreender e explicar os fenômenos que ocorrem durante o processo de retificação do metal duro e que estão associados à eficiência da operação em termos de consumo de energia, a relação entre as forças tangencial e normal será analisada na retificação de insertos WC-5%Co em diferentes condições.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, insertos de corte com composição WC-5%Co e dimensões de 12,7 mm x 12,7 mm x 4,7 mm tiveram suas superfícies de folga retificadas em uma retificadora CNC com quatro eixos Agathon DOM Plus (potência máxima 16 kW e rotação máxima de 3400 rpm) (Fig. 1), empregando o óleo mineral como fluido de corte. Uma camada de 0,1 mm foi retificada em cada superfície (12,7 mm x 4,7 mm), totalizando um volume removido de aproximadamente 23 mm³. Considerando que o desgaste do rebolo não foi significativo durante a retificação dos quatro lados (inserto quadrado), cada um deles foi considerado como uma réplica.

De maneira a se compreender o efeito da velocidade de corte (v_c) e do tamanho de grão do abrasivo (d_g) no comportamento dos esforços durante a retificação das superfícies de folga dos insertos, estes parâmetros foram variados em dois níveis: $v_c = 12$ e 40 m/s, $d_g = 15$ (D15) e 46 μ m (D46). A velocidade de avanço axial v_{fa} foi mantida constante em 2 mm/min, assim como o ligante (resinoide) e a concentração de abrasivos no rebolo ($C_{100} = 0,88$ g/cm³). A fim de se evitar variações da topografia da camada abrasiva entre a preparação de diferentes insertos, o rebolo foi dressado antes da retificação de cada um deles por um dressador de óxido de alumínio do tipo copo, com velocidade de avanço $v_{fd} = 5$ μ m/s, velocidade tangencial $v_{cd} = 10$ m/s e percurso total de dressagem $l_d = 15$ μ m. De modo a se garantir a penetração dos grãos do dressador no ligante do rebolo e tornar a dressagem mais eficiente, um dressador mais fino (220#) foi utilizado para o rebolo D15, enquanto um mais grosseiro (180#) foi aplicado no rebolo D46.

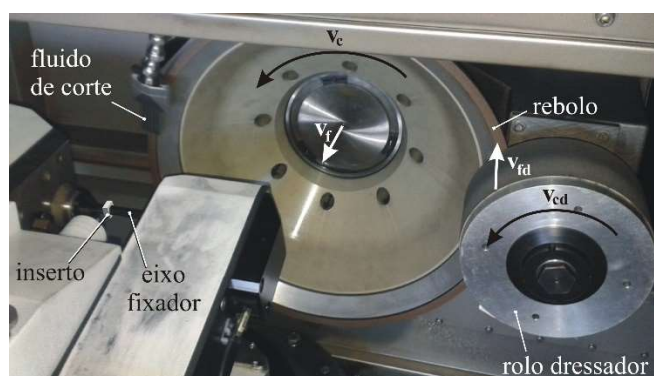


Figura 1. Retificadora CNC utilizada nos experimentos

As componentes da força normal (F_n) e tangencial (F_t) foram medidas (taxa de aquisição de 50 Hz) por um sistema composto por sensores de corrente montados na parte anterior do fuso e uma placa de aquisição. Tal sistema é embutido na máquina e controlado pelo comando numérico, tendo sido desenvolvido pelo fabricante, de maneira que maiores detalhes são confidenciais e não podem ser fornecidos. Para análise do processo, foi utilizada a razão entre a força tangencial e normal dentro de um intervalo estável de aproximadamente 3 s para cada superfície de folga dos insertos (lado). A partir das razões calculadas, foram gerados histogramas para avaliação da frequência de aparecimento (distribuição) das amplitudes durante a retificação.

Após a preparação dos insertos, o parâmetro de rugosidade R_z foi medido perpendicularmente à direção de retificação em um microscópio para análise de imagens tridimensionais Alicona InfiniteFocus SL (aplicação de 100 perfis por lado retificado) e imagens das superfícies foram obtidas por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips XL-30 FEG.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 2 mostra as componentes da força de retificação obtidas com rebolos de diferentes granulometrias e aplicação de diferentes velocidades de corte, sendo cada pico correspondente à retificação de um dos lados do inserto. Diferenças entre os picos estão associadas a pequenas variações da espessura da camada de material removido em cada lado e à alteração da área de contato, já que, conforme os lados vão sendo retificados, os comprimentos dos lados posteriores são alterados. Maiores forças normais e tangenciais são observadas para o rebolo D15, devido à maior quantidade de arestas ativas, tendo em vista que ambos os rebolos possuem a mesma concentração de abrasivos, em massa por volume. Para o rebolo D46, embora a espessura de cavaco média por grão deva ser maior, menos grãos abrasivos atuam no processo, o que leva à redução das forças totais. Já o aumento da velocidade de corte levou a uma redução expressiva das componentes da força, o que pode ser explicado pela redução da espessura do cavaco por grão e eventual redução da resistência do material devido às maiores temperaturas causadas por maiores taxas de remoção por grão.

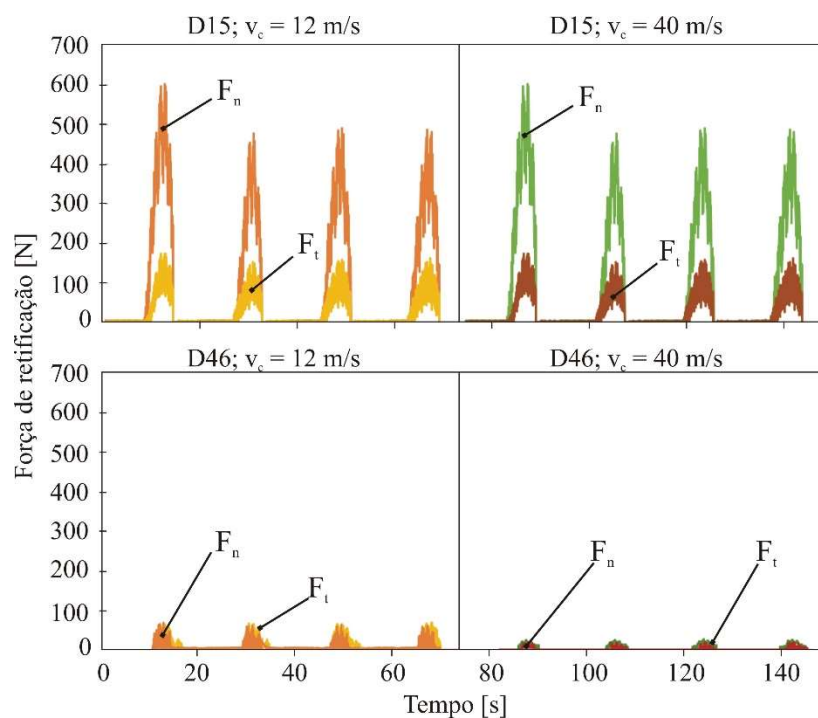


Figura 2. Componentes da força de retificação com aplicação de rebolo D15 (à esquerda) e D46 (à direita), com $v_c = 12$ m/s e $v_f = 2$ m/min

Na Fig. 3, observa-se a distribuição das razões entre as forças tangencial e normal em todas as situações testadas. Para o uso do rebolo D15 combinado à velocidade de corte de 12 m/s, a razão se distribuiu entre 0,11 e 0,4 (Fig. 3a), enquanto que para a velocidade de corte de 40 m/s (Fig. 3b), a dispersão foi pouco menor, ficando a razão entre 0,11 e 0,3. Nestes casos, nota-se um processo menos eficiente, com menor parcela da força atuando na remoção do material e maior dificuldade, proporcionalmente, de penetração do grão abrasivo. Já com o rebolo D46, a razão foi majoritariamente maior do que 1, com baixa dispersão, tanto para a menor (Fig. 3c) quanto para a maior velocidade (Fig. 3d), o que demonstra que, durante o corte, houve predominância de cisalhamento e maior eficiência na formação do cavaco.

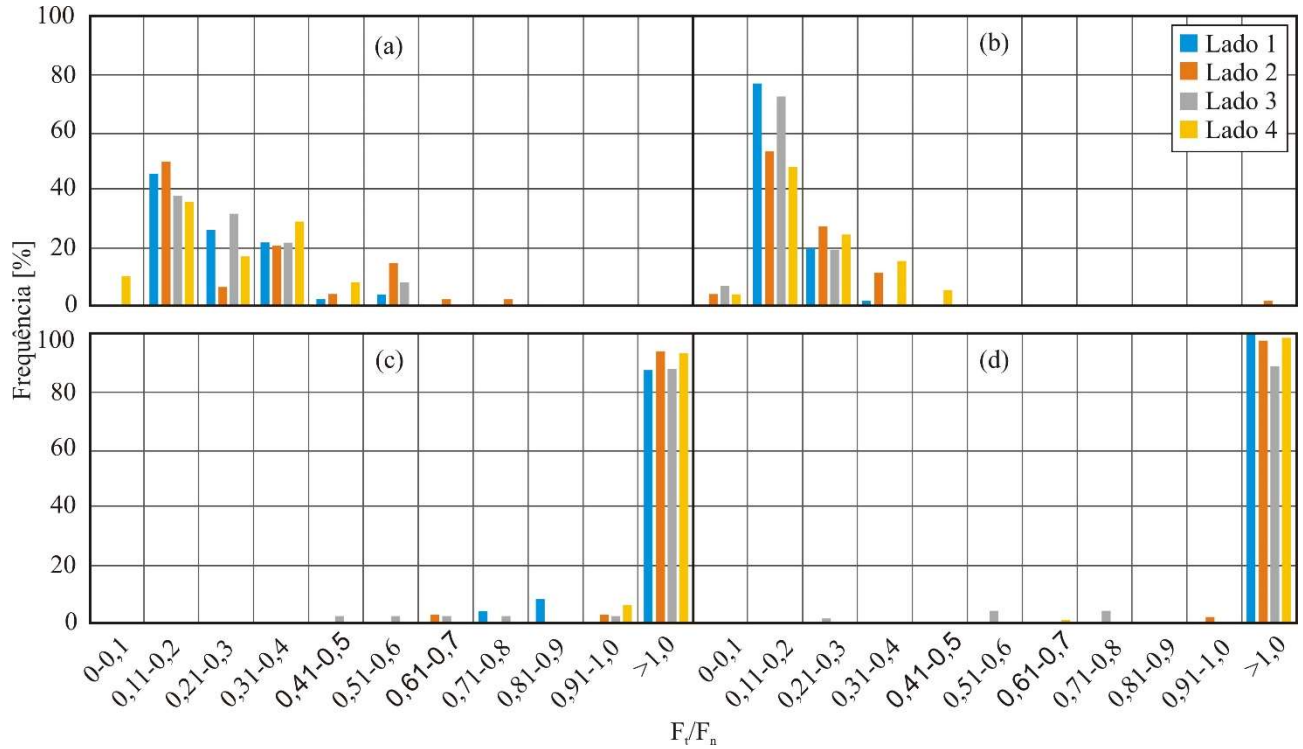


Figura 3. Distribuição de amplitudes na relação F_t/F_n : (a) D15, $v_c = 12$ m/s; (b) D15, $v_c = 40$ m/s; (c) D46, $v_c = 12$ m/s; (d) D46, $v_c = 40$ m/s

De forma a se mensurar a qualidade superficial dos insertos retificados, a Tab. 1 apresenta os resultados do parâmetro de rugosidade R_z nos diferentes experimentos e mostra que não houve variação significativa entre os insertos retificados com diferentes velocidades de corte, havendo aumento de R_z , porém, após a retificação com o rebolo de maior tamanho de grão, devido à maior espessura de cavaco e consequente formação de sulcos mais profundos, o que pode ser confirmado pela Fig. 4.

Tabela 1. Rugosidade R_z após a retificação do metal duro com diferentes rebolos e velocidades de corte

Tamanho de grão d_G [μm]	Velocidade de corte v_c [m/s]	
	12	40
15	$0,22 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,02$
46	$0,43 \pm 0,05$	$0,44 \pm 0,02$

Visualmente, com o uso do rebolo D15, notou-se nas superfícies retificadas um corte mais uniforme, com sulcos rasos, devido à menor espessura de cavaco por grão. Entretanto, não foram observadas diferenças relacionadas à variação da velocidade de corte (Fig. 4a e 4b), conforme já apontado. O aumento da velocidade de corte também leva à redução da espessura do cavaco por grão, mas possui influência menor sobre a rugosidade em comparação ao tamanho de grão. Já o uso do rebolo D46 levou a uma maior espessura de cavaco por grão, o que contribuiu com a remoção do material, mas também com a formação de sulcos mais profundos e de trincas laterais (Fig. 4c e 4d), causando danos visíveis à superfície.

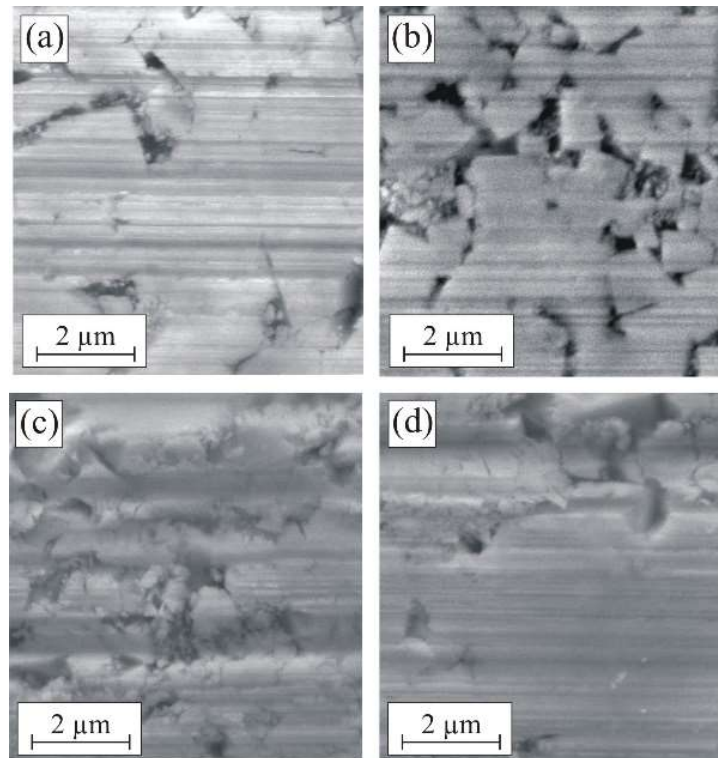


Figura 4. Imagens das superfícies dos inserts retificadas por rebolo com ligante resinoide: (a) D15, $v_c = 12$ m/s; (b) D15, $v_c = 40$ m/s; (c) D46, $v_c = 12$ m/s; (d) D46, $v_c = 40$ m/s

A partir dos resultados obtidos para a retificação do metal duro, nota-se uma relação inversa entre eficiência do processo e acabamento superficial, corroborando o que foi encontrado em diferentes estudos, para materiais distintos. Verifica-se que o tamanho de grão é o fator mais relevante neste aspecto e que a variação da velocidade de corte dentro da faixa testada não provocou alteração significativa da razão de forças ou da qualidade superficial, embora tenha causado redução da forças totais durante o processo.

Adicionalmente, cabe ressaltar que, na retificação do metal duro, o uso de um rebolo D15 ainda promove remoção de material, não tendo sido observada deformação ou sulcamento, possibilitando melhor acabamento superficial, embora com menor eficiência.

4. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permitiu apresentar as seguintes conclusões:

- A relação de forças apresentou valores menores (entre 0,11 e 0,4) na retificação com o rebolo D15 em comparação ao D46 ($> 1,0$), devido à menor espessura de cavaco e maior parcela da força atuando para a penetração do grão. A velocidade de corte não apresentou efeito significativo.
- Entretanto, o rebolo D15 levou a menores valores de rugosidade e superfícies mais regulares, mostrando que o menor tamanho de grão utilizado ainda promove remoção de material, mesmo que de forma menos eficiente. Diferentemente, embora com a maior parte da energia sendo gasta na formação do cavaco, o rebolo D46, promoveu sulcos profundos e trincas laterais na superfície do inserto.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) e à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Programas de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e em Engenharia Mecânica, pelo apoio à realização da pesquisa. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Agradece-se também 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

- Biermann, D. e Würz, E., 2009. A study of grinding silicon nitride and cemented carbide materials with diamond grinding wheels. *Production Engineering Research and Development*, Vol. 3, p. 411-416.
- Choudhary, A. e Babu, N. R., 2020. Influence of 3D topography on tribological behavior of grinding wheel. *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, p. 533-540.
- Klocke, F., Wirtz, C., Mueller, S. e Mattfeld, P., 2016. Analysis of the material behavior of cemented carbides (WC-Co) in grinding by single grain cutting tests. *Procedia CIRP*, Vol. 46, p. 209-213.
- Lavrinenko, V.I., 2016. Abrasive Cutting Factor as a Characteristic Reflecting the Performance Parameters of Superabrasive Grinding. *Journal of Superhard Materials*, Vol. 38, p. 40-46.
- Luo, S.Y., Liao, Y.S., Chou, C.C. e Chen, J.P., 1997. Analysis of the wear of a resin-bonded diamond wheel in the grinding of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 69, p. 289-296.
- Masoumi, H., Safavi, S. M., e Salehi, M., 2014. Grinding Force, Specific Energy and Material Removal Mechanism in Grinding of HVOF-Sprayed WC-Co-Cr Coating. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 29, p. 321-330.
- Marinescu, I.D., Hitchiner, M.; Uhlmann, E.; Rowe, W.B.; Inasaki, I., 2007. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Boca Raton, CRC Press, 1ª edição.
- Ortner, H.M., Ettmayer, P., Kolaska, H. e Smid, I., 2014. The history of the technological progress of hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* Vol. 44, 148-159.
- van den Berg, H., 2007. Hardmetals: Trends in development and application. *Powder Metallurgy* Vol. 50, p. 7-10.
- Zhan, Y. J. e Xu, X. P. 2012. An experimental investigation of temperatures and energy partition in grinding of cemented carbide with a brazed diamond wheel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, p. 117-125.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF GRINDING FORCES DURING PLUNGE-FACE GRINDING OF CEMENTED TUNGSTEN CARBIDE CUTTING INSERTS

Dennis Coelho Cruz

Bruna Oliveira da Silva

Vitor Luiz Sordi

Carlos Eiji Hirata Ventura

Federal University of São Carlos. Rod. Washington Luis km 235, São Carlos, SP 13565-905, Brazil
denniscoelhoacruz@gmail.com; bruna.oliveira@estudante.ufscar.br; sordi@ufscar.br; ventura@ufscar.br

Abstract. The research investigates the behavior of the process forces during grinding of the flank faces of cemented tungsten carbide cutting inserts (WC-5% Co), with variation of the cutting speed and the diamond abrasive grain size of resin bonded grinding wheels. During insert grinding, normal and tangential force components were obtained and their relationship, which provides a measure of process efficiency, was calculated. From the obtained results, it was concluded that larger abrasive grains lead to a more efficient process, with higher values of force ratio, but impair the insert surface quality, generating higher roughness values.

Keywords: grinding, force, cutting insert, hard metal, surface integrity

RESPONSIBILITY NOTICE

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