

## USINAGEM DE AÇOS ENDURECIDOS COM MÍNIMA LUBRIFICAÇÃO

**João Roberto Ferreira**

**Júlio Navarro Santos**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá/EFEI; Depto de Produção/Instituto de Enga. Mecânica, Av. BPS 1303, C. P. 50, 37.500-903, Itajubá, MG, e-mail: jorofe@iem.efei.br

**Fernando Teixeira Filho**

Faculdade de Engenharia de Varginha /FENVA; Depto de Engenharia Mecânica, Av. Cel José Alves, 256, Centro. CEP 37.010-540, Varginha-MG, e-mail: fernando-fenva@fepesmig.br

**Anselmo Eduardo Diniz**

**Durval Uchôas Braga**

UNICAMP, Depto de Enga. de Fabricação/Faculdade de Engenharia Mecânica, CP 6122, CEP 13.083-970, Campinas- SP, e-mail: anselmo@fem.unicamp.br

### Resumo

A utilização da lubrificação com Mínimo Volume de Óleo (MVO) tem sido muito pesquisada nas operações de corte de materiais, devido às pressões de uma legislação cada vez mais severa com os descartes industriais e em função de uma crescente conscientização quanto aos problemas ambientais. Além disso, tem-se mostrado que em alguns processos de usinagem o uso do mínimo volume de óleo pulverizado na região de corte pode reduzir o desgaste da ferramenta e melhorar a rugosidade da peça, quando comparado com o processo a seco. Neste trabalho estudou-se a influência da utilização do mínimo volume de óleo no desgaste da ferramenta de PCBN na operação de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido. Para efeito de comparação foram ensaiados também duas outras condições de corte: a seco e com óleo solúvel abundante. Durante os ensaios foram medidos os desgastes da ferramenta de PCBN e a rugosidade da peça. Em função dos resultados obtidos, constatou-se que a usinagem com fluido de corte abundante apresenta o pior desempenho em termos de desgaste de ferramenta; a condição de mínima lubrificação apresentou um desempenho intermediário e a usinagem a seco apresentou a maior vida da ferramenta de PCBN.

**Palavras-chave:** Torneamento, Aço endurecido, Mínima lubrificação, Ferramenta de PCBN.

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais para ferramentas de corte de elevada dureza a quente e alta resistência ao desgaste, aliado ao desenvolvimento de máquinas-ferramentas mais rígidas e potentes têm permitido a usinagem de materiais endurecidos (dureza > 45 HRC). Assim, tem-se tornado possível a substituição com algumas vantagens da operação de retificação pelo torneamento destes materiais. Dentre estas vantagens pode-se citar: maior produtividade, menor custo das ferramentas de corte, baixo consumo de energia por volume de material usinado, redução dos tempos de preparação e troca de ferramentas, máquinas-ferramentas mais simples e de menor custo, etc. (Tönshoff et al., 1995; Klocke et al., 1995, apud. Matsumoto, 1998). Dentre os materiais de ferramentas desenvolvidos, apresenta-se o Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) que possui interessantes propriedades como: elevada dureza a quente (cerca de 1800HV a 1000° C), baixa solubilidade no ferro e boa tenacidade à

fratura ( $6,3 \text{ MPa/m}^{1/2}$ ). Estas propriedades permitem o uso eficaz do PCBN na usinagem de ligas ferrosas temperadas com dureza na faixa de 50 a 65 HRC (Abrão et al., 1996).

A maior parte da usinagem de aços endurecidos é citada na literatura como sendo corte a seco, uma vez que a elevação da temperatura de corte facilita a deformação e o cisalhamento do material endurecido na formação do cavaco (Nakayama et al., 1988). Porém, a alta temperatura tem seus inconvenientes, como a dilatação da peça, afetando sua precisão dimensional e geométrica e a integridade superficial (Tönshoff et al., 1995). Além disso, a ausência de lubrificação prejudica o transporte de cavaco e causa um aumento no atrito devido à camada de separação entre a ferramenta e o material, favorecendo o aumento do desgaste abrasivo e de aderência (Novaski & Dörr (a), 1999). Na usinagem a seco do aço ABNT 52100 temperado (dureza 60 HRC), Costa (1993) verificou que à medida que a velocidade de corte aumenta, também cresce a taxa de desgaste de flanco dos insertos de PCBN. Para as velocidades de corte ensaiadas ( $V_c = 100, 120$  e  $140 \text{ m/min}$ ), a taxa de desgaste de flanco ( $V_B/t_c$ ) aumentou, embora não tenha sido observado nenhum desgaste de cratera. Na usinagem de aço ABNT 52100 temperado com dureza média de 60 HRC, Matsumoto (1998) verificou que a vida da ferramenta de PCBN cresceu com o aumento da velocidade de corte, dentro do intervalo de velocidades testadas ( $V_c = 108$  e  $130 \text{ m/min}$ ). Portanto, há uma certa contradição entre os resultados obtidos pelos autores acima sobre a influência da velocidade de corte na vida da ferramenta de PCBN.

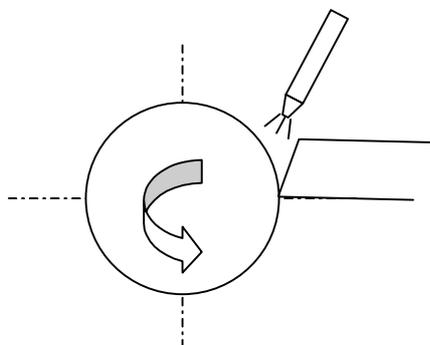
A usinagem com mínimo volume de óleo (MVO) consiste na aplicação de uma quantidade mínima de fluido de corte (normalmente  $< 100 \text{ ml/h}$ ) na região de corte, na maioria dos casos através de um jato de ar. Estas quantidades mínimas são suficientes para reduzir substancialmente o atrito cavaco-ferramenta-peça e evitar a aderência dos materiais em contato (Novaski & Dörr (b), 1999). A usinagem com MVO tem sido pesquisada objetivando a redução do volume de óleo de corte favorecendo as questões ecológicas, as exigências legais quanto à preservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano (Heisel & Lutz, 1998). A utilização de óleo de corte abundante (condição úmida) tem as vantagens de facilitar a remoção de cavacos, reduzir o atrito e refrigerar a peça. Por exemplo, na usinagem de alumínio e aços dúcteis, a não aplicação da refrigeração provoca um desgaste adesivo inaceitável (Novaski & Dörr (b), 1999). No entanto, a utilização da condição úmida representa custos adicionais nos processos de corte que podem chegar a 17% dos custos de produção, que são relativos à aquisição, armazenamento, manutenção e descarte. Enquanto que, os gastos relacionados com a ferramenta representam somente 2 a 4% dos custos de produção (Novaski & Dörr (a), 1999). Na operação de furação de liga de Alumínio-Silício (AS 323), Braga et al. (1999) verificou que o desgaste da ferramenta com MVO (vazão de  $10 \text{ ml/h}$ ) foi similar à operação com condição úmida e que, em termos de esforços de corte a operação com MVO mostrou-se melhor do que a condição úmida.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é verificar a influência da utilização do mínimo volume de óleo na operação de torneamento do aço ABNT 52100 temperado (dureza 60 HRC), comparativamente às condições de corte úmida e a seco. Onde será avaliado a influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta de PCBN nas três condições de corte.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados em um torno CNC Cosmos 30 – Romi, potência de 22 KW (30 HP), ano de fabricação 1985, projeto mecânico convencional com mancais de rolamento e guias de escorregamento. Os corpos de prova de aço ABNT 52100 foram usinados nas dimensões finais  $\phi 49 \times 50 \text{ mm}$  e tratados termicamente visando seu endurecimento. A dureza média medida situou-se na faixa de  $60 \pm 2 \text{ HRC}$ .

O equipamento de mínimo volume de óleo utilizado foi o *Magic-Cut “Mist coolant equipment”* da Fuso Seiki Co. Ltd., modelo OS-21-AT-40. Este equipamento permite uma fina regulagem do volume de óleo, por meio de um registro tipo agulha, atomizando-o em um fluxo de ar comprimido à pressão constante de 4,5 bar. O bico injetor de ar foi colocado a cerca de 10 mm da peça, na parte superior, conforme mostra a Figura 1.



**Figura 1.** Esquema do bico injetor nos ensaios com ar comprimido e MVO.

Algumas medidas de rugosidade  $R_a$  foram realizadas em um rugosímetro *Surftest 211*, Mitutoyo, aferido e calibrado antes do início das medições. O parâmetro de cut-off foi ajustado para 0,8 mm em todas as medidas. As medições das larguras máximas dos desgastes de flanco na superfície de folga das pastilhas ( $VB_{max}$ ) e também as fotos da progressão destes desgastes foram obtidos em um analisador de imagem (Global Image Analyser) acompanhado do respectivo software (*Global Lab*). Este equipamento é constituído de um microscópio ótico com ampliação de 25 a 50 vezes acoplado a uma câmara de vídeo e ao computador.

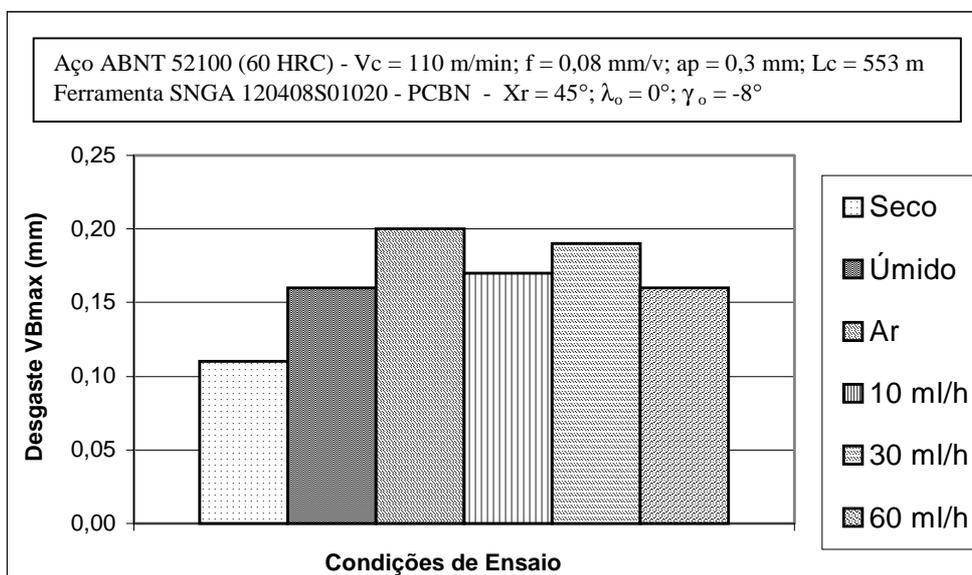
Utilizou-se insertos intercambiáveis de PCBN brasados em metal duro, geometria quadrada, código ISO SNGA 120408 S01020, recobertos com uma camada de nitreto de titânio (TiN), raio de ponta 0,8 mm, (Sandvik CB7020). O porta ferramentas usado tinha código ISO MSSNR 2525M12 com a seguinte geometria: ângulo de saída  $\gamma_n = -8^\circ$ ; ângulo de inclinação  $\lambda_s = 0^\circ$  e ângulo de posição  $\chi_r = 45^\circ$ .

Inicialmente, foram realizados alguns ensaios preliminares para determinar a melhor vazão de mínima lubrificação. Estes ensaios foram executados nas seguintes condições de corte: a seco, úmido, ar comprimido e mínima lubrificação com vazões de 10, 30 e 60 ml/h. Os parâmetros de corte usados foram:  $V_c = 110$  m/min,  $f = 0,08$  mm/v,  $a_p = 0,3$  mm. As medidas de rugosidade e desgaste foram efetuadas após a ferramenta ter usinado um comprimento de corte  $L_c = 553$  m.

Nos ensaios definitivos, os critérios de fim de vida da ferramenta foram baseados no desgaste de flanco máximo  $VB_{máx} = 0,3$  mm ou rugosidade  $R_a = 0,75$   $\mu\text{m}$ . Quando um destes dois parâmetros fossem atingidos o teste era encerrado. Durante os ensaios as medidas de rugosidade e desgaste foram efetuadas após a ferramenta ter usinado um comprimento de corte aproximado de 252 m (três passes). As condições de corte foram: a seco, com óleo solúvel abundante (úmida) e com mínima lubrificação na vazão de 10 ml/h. Os parâmetros de corte foram: Velocidade de corte  $V_c = 110, 130, 150$  e  $175$  m/min; avanço  $f = 0,08$  mm/volta e profundidade de usinagem  $a_p = 0,3$  mm constantes.

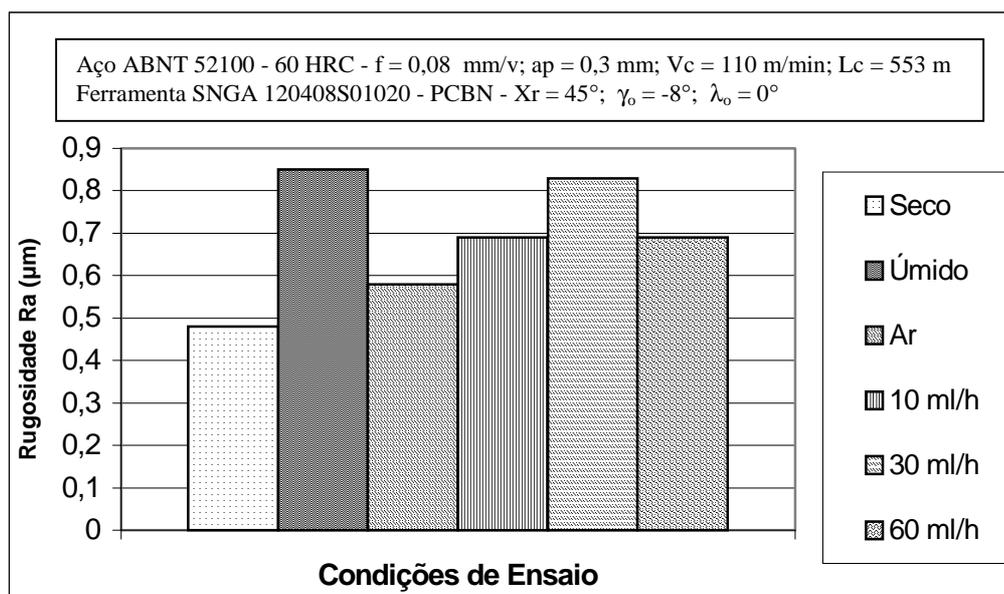
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, nos ensaios preliminares realizou-se uma comparação entre as condições de corte a seco, úmida, com ar comprimido e MVO com vazões de 10, 30 e 60 ml/h. A Figura 2 mostra os resultados do desgaste de flanco  $VB_{max}$  da ferramenta de PCBN, onde observa-se que a condição a seco apresentou o melhor desempenho em termos de desgaste. Ao contrário, a condição usando ar comprimido apresentou o maior desgaste da ferramenta de PCBN. As três condições de MVO apresentaram desempenhos similares, sendo assim, a vazão de 10 ml/h foi escolhida para a realização dos ensaios definitivos, pois é a condição de menor consumo de óleo e poder de poluição. A Figura 3 mostra os resultados da rugosidade obtidos para os ensaios preliminares. A condição a seco apresentou o melhor resultado em termos de acabamento e a condição úmida apresentou a maior rugosidade. Justifica-se este fato devido ao efeito da temperatura na zona de cisalhamento do cavaco, quando da usinagem a seco, que facilita o corte, diminui as forças de usinagem, as vibrações e consequentemente melhora o acabamento da peça.

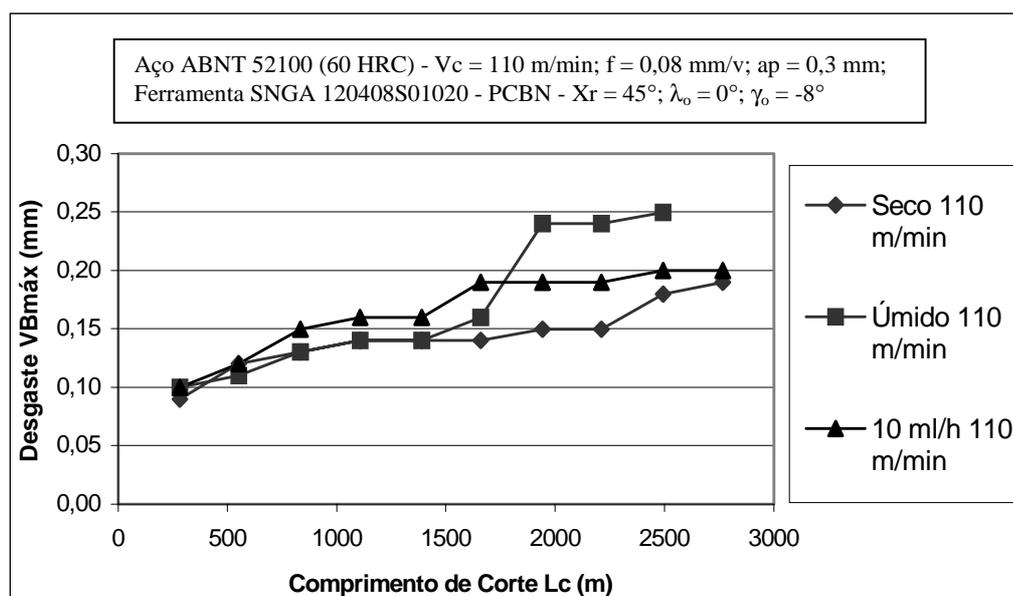


**Figura 2.** Resultados dos ensaios preliminares relativos ao desgaste de flanco da ferramenta.

Após determinada a melhor vazão de MVO, foram realizados os ensaios definitivos nas seguintes condições: a seco, úmida e com MVO vazão de 10 ml/h. A Figura 4 mostra a evolução do desgaste de flanco para as três condições ensaiadas com a velocidade de corte de 110 m/min. A condição a seco apresentou o melhor desempenho, devido ao efeito da maior temperatura de corte, que provoca a perda de dureza do material da peça, facilitando a formação do cavaco e reduzindo os esforços de corte. O desgaste de flanco  $VB_{max}$  na condição a seco mostra uma evolução mais lenta que nas demais condições de corte, favorecido pelo efeito da temperatura desenvolvida no corte, aliada à alta resistência do PCBN em elevadas temperaturas. À medida que o comprimento de corte aumenta, a evolução do desgaste para a condição úmida é mais rápida, devido ao intenso resfriamento da peça e do cavaco fazendo com que a ferramenta de PCBN esteja sujeita a esforços de corte maiores. A condição de MVO com vazão de 10 ml/h apresenta um desempenho intermediário entre as outras duas condições, para comprimentos de corte acima de 1800 m.

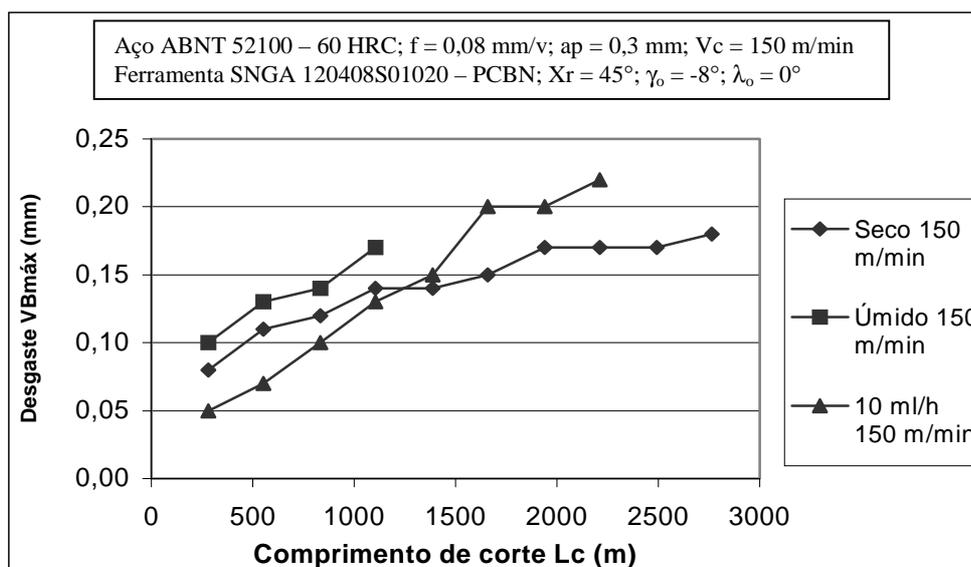


**Figura 3.** Resultados dos ensaios preliminares relativos ao acabamento superficial.



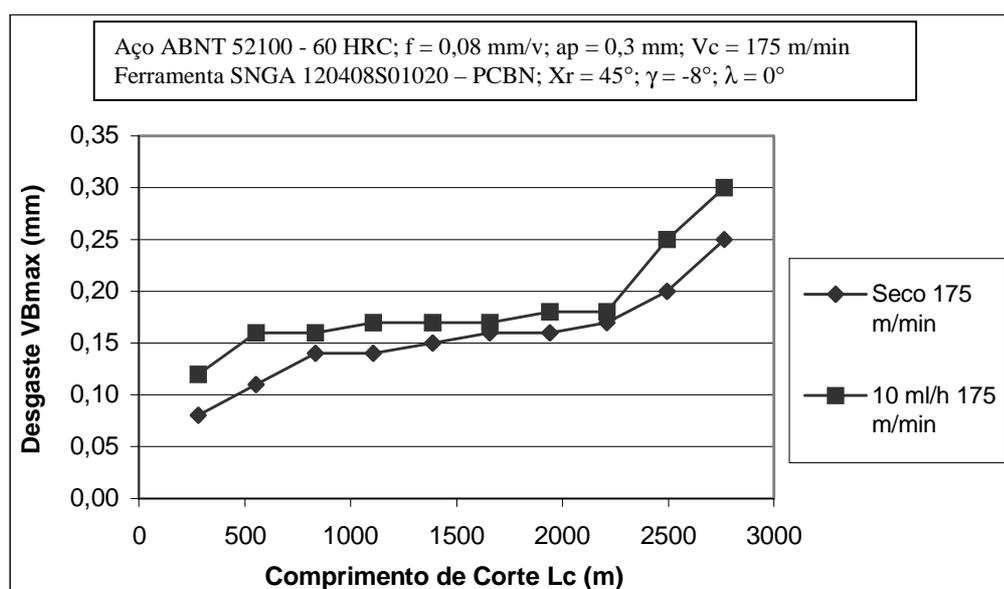
**Figura 4.** Evolução do desgaste de flanco para as condições ensaiadas com  $V_c = 110$  m/min.

A Figura 5 mostra a evolução do desgaste de flanco da ferramenta de PCBN, para as três condições ensaiadas com velocidade de corte de 150 m/min. Observa-se que o desgaste para a condição úmida apresenta uma evolução mais rápida, uma vez que a ação refrigerante da emulsão atua no sentido de evitar o aquecimento da peça e do cavaco, ficando a ferramenta sujeita a esforços de corte maiores, decorrentes da usinagem de aço endurecido. Apesar da condição MVO (10 ml/h) apresentar desgaste menor no início do corte ( $L_c < 1200$  m), a evolução deste desgaste é mais rápida comparada com a condição a seco para  $L_c > 1200$  m, devido ao efeito da refrigeração da peça/cavaco pelo ar comprimido contido na névoa.

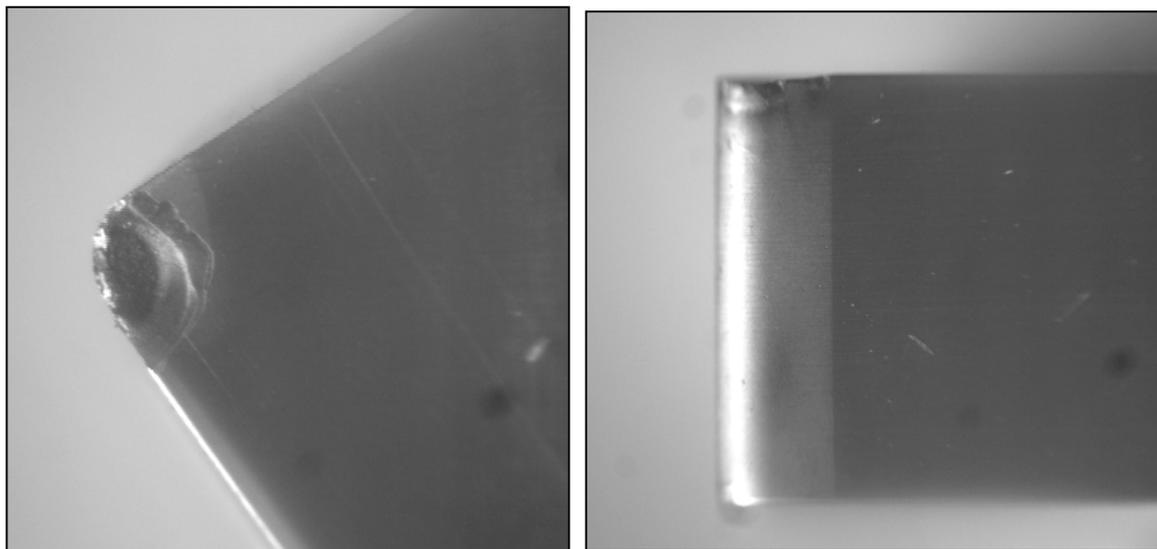


**Figura 5.** Evolução do desgaste de flanco para as condições ensaiadas com  $V_c = 150$  m/min.

A Figura 6 mostra a evolução do desgaste de flanco do PCBN nas condições de corte a seco e MVO para  $V_c = 175$  m/min. Pode-se observar que as duas condições apresentam comportamentos semelhantes. A condição de MVO vazão de 10 ml/h apresenta desgaste superior ao da condição a seco, possivelmente devido ao efeito de resfriamento do cavaco pelo ar comprimido, fazendo com que ele mantenha sua dureza elevada. É importante informar que em nenhuma das condições ensaiadas foi verificado o desgaste de cratera, com exceção da condição MVO com  $V_c = 175$  m/min, conforme pode ser visto na figura 7. Este desgaste foi verificado a partir de um comprimento de corte  $L_c = 2542$  m, em função da elevada velocidade de corte e provavelmente pelo baixo poder de lubrificação do MVO na interface cavaco/ferramenta.



**Figura 6.** Evolução do desgaste para as condições a seco e MVO, para  $V_c = 175$  m/min.



**Figura 7.** Desgaste de cratera observado com MVO (10 ml/h),  $V_c = 175$  m/min,  $L_c = 2542$  m.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos experimentos realizados pode-se concluir que:

- A condição de corte a seco apresentou o melhor desempenho no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, referente à maior vida da ferramenta de PCBN;
- A condição de refrigeração abundante determinou um maior desgaste da ferramenta de PCBN e uma elevada rugosidade da peça e, por isso, não deve ser recomendada para o torneamento do aço endurecido em questão;
- A condição com MVO vazão de 10 ml/h apresentou um desgaste intermediário entre as condições de corte a seco e úmida, em função do superior poder de refrigeração em relação à lubrificação da névoa ar/óleo;
- A ferramenta de PCBN apresentou um desgaste típico de flanco nas velocidades de corte de 110, 130 e 150 m/min e desgaste de cratera na velocidade de corte de 175 m/min na condição MVO.

#### Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia de Fabricação (FEM/UNICAMP) pelo suporte laboratorial e à FAPEMIG-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo financiamento da bolsa de Mestrado.

## 5. REFERÊNCIAS

- Abrão, A.M., Aspinwall, D.K., Wise, L.H., 1996, “A vida de ferramentas e a integridade das peças no torneamento de aços temperados”, *Máquinas e Metais*, pp. 200-217.
- Abrão, A.M. & Aspinwall, D.K., 1999, “Tool Wear of Polycrystalline Cubic Boron Nitride and Ceramic Materials when Hard Turning Bearing Steel”, *Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, vol. XXI, no. 1, pp. 1-9.
- Braga, D.U., Diniz, A.E., Miranda, G., Coppini, N.L., 1999, “Performance do processo de furação de liga de alumínio-silício utilizando a técnica de mínima lubrificação por névoa”, XV COBEM, Águas de Lindóia, São Paulo. Anais em CD-Rom, Código AAAEIA.
- Costa, D.D., 1993, “Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos”, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, 110 p.
- Heisel, U. & Lutz, M., 1998, “Pesquisa de fluido de refrigeração e de lubrificação”, *Máquinas e Metais*, pp. 40-49.
- Heisel, U., Lutz, M., Spath, D., Wassmer R., Walter, U., 1999, “A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte”, *Máquinas e Metais*, pp. 22-38.
- Klocke, F., König, W., Koch, K.F., Schroeter, R.B., 1995, “Torneamento de precisão: uma opção para o acabamento de peças de aço temperado”, *Máquinas e Metais*, pp.56-67.
- Matsumoto, H., 1998, “Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Torneamento de Aços Endurecidos”, Tese de Doutorado, UNICAMP, Faculdade de engenharia Mecânica, 148 p.
- Nakayama, K; Arai, M.; Kanda, T., 1988, “Machining characteristics of hard materials”, *Annals of the CIRP*, Vol. 37/1, pp. 89-92.
- Novaski, O. & Dörr, J. (a), 1999, “Usinagem sem refrigeração”, *Máquinas e Metais*, pp. 18-27.
- Novaski, O. & Dörr, J. (b), 1999, “Usinagem quase a seco”, *Máquinas e Metais*, pp. 34-41.
- Tönshoff, H.K., Wbker,H.G., Brandt, D., 1995, “Hard turning – influences on the workpiece properties”, *Transations of NAMRI SME*, V.XXIII, pp.251-220.