

Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado

(The evaluation of the bond resin and vitrified and abrasive grain CBN and alumina influence in the grinding wheel topography characteristics, by the study of the grinding wheel sharpness)

E. C. Bianchi¹, R. D. Monici¹, L. D. Neto¹, A. R. de Aguiar², L. G. Guermandi¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, C. P. 473 Bauru, SP, 17033-360

² Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, C. P. 473 Bauru, SP, 17033-360

Resumo

Este artigo apresenta um estudo da agressividade do rebolo (habilidade de corte). A retificação é um processo de usinagem preciso, o qual é amplamente usado na manufatura de componentes que requerem tolerâncias estreitas e superfícies bem acabadas. Na retificação, a ferramenta abrasiva é o rebolo, que é basicamente composto por núcleo, ligante e grãos abrasivos. As ferramentas testadas nessa pesquisa foram rebolos convencional (Al_2O_3) e superabrasivo (CBN). Entre os superabrasivos, três tipos específicos de ligantes foram testados: resinóide, vitrificado e resinóide de alto desempenho. Conseqüentemente, foi possível avaliar a habilidade de corte entre os diferentes tipos de rebolos testados. Assim, o rebolo convencional de óxido de alumínio apresentou a maior agressividade.

Palavras-chave: rebolo convencional, ligantes, superabrasivos.

Abstract

This paper presents a study of the grinding wheel sharpness (cutting ability). Grinding is a precision machining process which is widely used in the manufacture of components requiring fine tolerances and smooth surfaces. In grinding, the abrasive tool is the grinding wheel, which is basically compounded by the core, the bond and the abrasive grains. The tools tested in this research were conventional (Al_2O_3) and superabrasive (CBN) grinding wheels. Among the superabrasive ones, three specific bond types were tested: resin, vitrified and high performance resin bond. Consequently, it was possible to evaluate the comparative cutting ability among the different types of grinding wheels tested. So the conventional wheel (Al_2O_3) presented the highest sharpness.

Keywords: grinding wheel, bond, superabrasive.

INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a operação de retificação é utilizada em processos de acabamento superficial, visando o aumento da qualidade superficial do componente usinado, redução dos erros dimensionais e de forma, os quais são fatores de extrema importância quanto ao desempenho gerado pelo processo. Trata-se de um processo de usinagem, com elevado número de arestas de corte (sem geometria definida) agindo simultaneamente. O desgaste destas arestas e da superfície de corte do rebolo é causada por fatores mecânicos e físico-químicos. Esse desgaste está diretamente relacionado à usinabilidade do material, propriedade ligada à vida útil do rebolo. A escolha adequada das condições de usinagem e das especificações do rebolo podem otimizar a vida útil da ferramenta, proporcionando

maior capacidade de remoção de material. A quantificação da capacidade de remoção de material, gerado pelo rebolo, é denominada agressividade superficial de corte.

Este trabalho tem como objetivo o estudo da agressividade da superfície de corte de rebolos convencional (óxido de alumínio) e superabrasivo de CBN (nitreto cúbico de boro), fabricados com ligantes resinóide, resinóide de alto desempenho e vitrificado, em função dos parâmetros de entrada: forma própria de afiação do rebolo (dressagem para o rebolo convencional e perfilamento/avivamento para o rebolo superabrasivo de CBN) e tipo de ligante utilizado nas ferramentas superabrasivas (resinóide, resinóide de alto desempenho e vitrificado). Assim, através de tais parâmetros procurou-se estabelecer a correlação existente entre as ferramentas testadas e os parâmetros analisados.

Conceitos gerais sobre rebolos

A retificação é um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de peças de precisão, as quais necessitam de excelente grau de acabamento superficial. Tal processo é considerado de baixo domínio tecnológico, quando comparado aos processos convencionais (torneamento, furação, fresamento etc.). A retificação compreende basicamente o fenômeno da usinagem de materiais por meio de uma ferramenta abrasiva denominada rebolo, cuja forma é semelhante à de um disco constituído de núcleo, ligante e grãos abrasivos. Os grãos abrasivos podem ter como elemento de composição o Óxido de Alumínio Al_2O_3 (rebolo convencional) ou grãos de CBN - Nitreto de Boro Cúbico presente nos rebolos superabrasivos, entre outros, unidos por meio de um ligante. Os ligantes mais encontrados no mercado são o resinóide, vitrificado, convencional e resinóide de alto desempenho.

A usinagem por meio de rebolos superabrasivos proporciona um custo de produção unitária inferior a faixa de 30 a 50%, em relação à usinagem com rebolos convencionais, utilizando-se condições que promovam o menor desgaste possível da sua superfície de corte (superfície do rebolo responsável pela remoção de metal da peça retificada) [1]. Entretanto, a redução de custo somente é viável em situações cujo rebolo seja utilizado em condições ideais de usinagem e afiação, proporcionando peças com elevada qualidade. As variáveis de saída como os erros de forma, geométricos, rugosidade superficial e danos metalúrgicos (modificações na microestrutura do material como encruamento, tensões residuais etc.), devem ser controlados de forma a se obter máxima eficiência do processo.

Como consequência dos esforços contínuos, visando melhoria da qualidade dos produtos e métodos de fabricação, novas máquinas-ferramenta e materiais para as ferramentas de corte foram desenvolvidos [2]. Alguns tipos de materiais compostos, comprovadamente, geram grandes dificuldades de usinagem, algumas vezes impossibilitando o processo. Nessas situações torna-se necessário a utilização de rebolos convencionais, de grande utilização no meio industrial. Os rebolos superabrasivos, comparados aos rebolos convencionais, mostram-se superiores em vários aspectos, cabendo ressaltar que os mesmos possuem grande eficiência na retificação de metais ferrosos e endurecidos (superligas de cobalto e níquel) [3]. Uma vez que o grão superabrasivo de CBN é conhecido pela sua alta resistência ao desgaste, a retificação com o mesmo pode também providenciar menores temperaturas de operação, resultando em menor tendência de danos térmicos e redução nas indesejáveis tensões residuais. Devido também a grande condutividade térmica dos grãos de CBN, uma quantia menor de calor é transmitida à peça, na faixa de 20%, ao passo que esse percentual sobe para 60-70% com o uso de óxido de alumínio. Isso gera uma qualidade melhor da peça final [4].

A operação de retificação é caracterizada pela ação de uma ferramenta, a qual é responsável pela transferência da energia da máquina à peça. A ferramenta deve apresentar

grande resistência ao desgaste, característica fundamental dos rebolos superabrasivos [5]. Assim os rebolos superabrasivos apresentam grande resistência ao desgaste principalmente quando utilizados na retificação de aços de difícil usinagem, ou seja, aços "DTG" (Difficult To Grinding). Na retificação de aços "DTG", os rebolos convencionais perdem seus grãos abrasivos mais facilmente, gerando elevados esforços de corte, temperatura pelo desgaste excessivo e elevada rugosidade média. Na retificação com rebolos superabrasivos, os Grãos de CBN - Nitreto de Boro Cúbico apresentam grande resistência ao desgaste, ocasionando menores forças de corte, temperaturas e valores inferiores de rugosidade média.

A melhoria do processo de retificação somente pode ser obtida com a utilização de grãos superabrasivos [6]. O potencial de alto desempenho deste material abrasivo, resulta de sua extrema dureza e resistência ao desgaste, aliados à sua alta resistência à temperatura e condutibilidade térmica. No campo dos rebolos de CBN é observado um rápido crescimento do uso dos ligantes vitrificados na indústria. Este tipo de ligante é frágil e extremamente resistente ao desgaste, o qual possui boa estabilidade térmica. Outra vantagem significativa da utilização de ligante vitrificado em rebolos de CBN, é a elevada porosidade presente em seu ligante, como também, as boas propriedades de auto afiação que simplifica o método de condicionamento, onde se consegue acabamento superficial e manutenção de forma [7].

Os rebolos utilizados na operação de retificação podem apresentar dois tipos de efeitos, ocasionados pelo processo de dressagem, constituindo o macroefeito e o microefeito. O microefeito é ocasionado pela fragmentação do ligante através dos esforços mecânicos de retificação aplicados ao mesmo e ao estado de afiação de cada grão abrasivo. O macroefeito corresponde à rosca gerada na superfície de corte do rebolo pela ação do dressador. Quando um rebolo é dressado com grau de recobrimento de dressagem próximo ao valor unitário, os fenômenos do macro e micro efeito de dressagem são máximos. Assim o microefeito é principalmente ocasionado pelo desprendimento do grão abrasivo do ligante, pelos esforços mecânicos gerados com o aumento contínuo da área de corte do topo do grão abrasivo, ocasionando no decorrer do processo o desprendimento do ligante [8].

A agressividade de um determinado rebolo está diretamente relacionada ao tipo de ligante que constitui a ferramenta, compreendendo os principais ligantes disponíveis no mercado o resinóide convencional, vitrificado, convencional e resinóide de alto desempenho. Tais ligantes apresentam características próprias que influem nos resultados de agressividade (Fig. 1).

A empresa GE Company USA (1998), recentemente divulgou resultados de um levantamento, sobre a utilização dos principais tipos de ligantes, utilizados na fabricação de rebolos superabrasivos compreendido entre os anos de 1980 a 1997. De acordo com a pesquisa realizada pela empresa, pôde-se notar uma grande queda na utilização do ligante resinóide (de 76% para 31%) e um acentuado crescimento (de 4% para 32%) na utilização do ligante vitrificado. Com base nesses números, pode-se verificar que tais ferramentas

são atualmente as mais utilizadas e em quantidades praticamente iguais.

A agressividade dos rebolos está diretamente ligada à porosidade apresentada pela ferramenta, a qual expressa a quantidade de núcleos vazios (poros) [9]. A porosidade relaciona-se também à granulometria, que expressa a quantidade de grãos abrasivos encontrados numa determinada área de superfície do rebolo, cabendo ressaltar, que maiores granulometrias ocasionam menores porosidades e conseqüentemente apresentam agressividade menor.

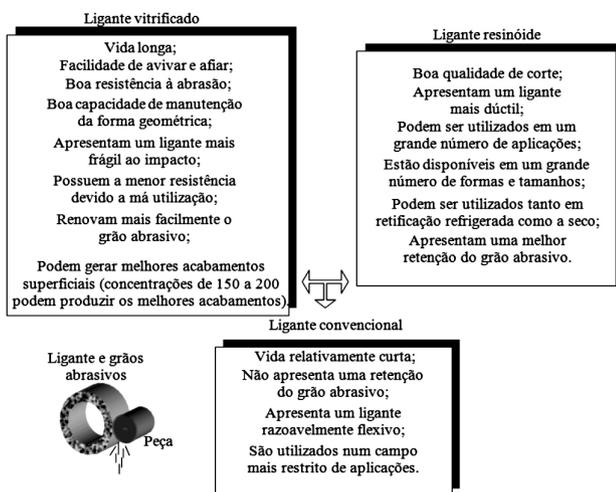


Figura 1: Principais características de rebolos fabricados com diferentes ligantes.

[Figure 1: Main features of grinding wheels manufactured with different bonds.]

METODOLOGIA

Equacionamento matemático

Com o auxílio de um modelamento matemático [10], é possível realizar a regressão de uma curva, cujos pontos são de deslocamento em função do tempo elevado a $2/3$. Tal aplicação matemática resulta em boa aproximação da curva gerada pelos mesmos, considerando que a curva de desempenho será uma reta. Realizada a regressão, após o referido modelamento matemático em função do tempo, obtém-se o valor da agressividade expressa pela equação abaixo em função dos parâmetros presentes:

$$k = \frac{2b \sqrt{8r}}{3F_n} (a_1)^{2/3} \quad (A)$$

na qual k é a agressividade da ferramenta [$\text{mm}^3/\text{N.s}$], b é a largura do disco [mm], r é o raio do disco [mm], F_n é a força normal aplicada [N] e a_1 é o coeficiente angular médio, obtido pelo deslocamento em função do tempo, ao qual se refere o modelamento matemático proposto por Coelho [10].

Através do coeficiente angular obtido “ a_1 ”, por meio de

regressão linear, é possível obter a agressividade superficial para cada tipo de ferramenta ensaiada.

Desenvolvimento da balança

A obtenção dos dados relativos aos valores de deslocamento, ocasionado pelo desgaste do corpo de prova, ocorreu através da confecção de uma balança (Fig. 2). A balança foi confeccionada considerando a posição horizontal do corpo de prova (disco fixo), podendo-se assim ajustar o apalpador eletrônico de maneira fácil e sem variações. No braço da balança foi aplicada uma carga, com valor de massa igual a 620 g, gerando uma força de 6,08 N no corpo de prova.

Os ensaios foram elaborados com o corpo de prova fixo, realizando-se uma rotação de 90° para cada ensaio efetuado, gerando um total de 4 ensaios por corpo de prova confeccionado.

Os testes foram elaborados visando obter dados com elevado grau de confiança e precisão possíveis. Dessa forma para cada rebolo ensaiado, o processo foi repetido individualmente 6 vezes, gerando um conjunto de dados que permitiram a construção dos gráficos, elaborados e analisados separadamente em mesmo intervalo de tempo para cada ferramenta testada.

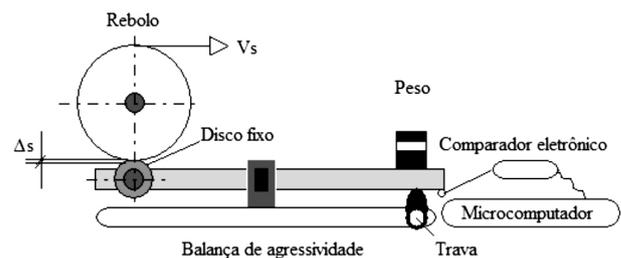


Figura 2: Apresentação esquemática da balança desenvolvida para análise do desgaste.

[Figure 2: Schematic presentation of the balance developed to wear analysis.]

Confecção dos corpos de prova

A construção dos corpos de prova foi elaborada baseada na técnica desenvolvida por Coelho [10], os quais apresentavam diâmetro de 24 mm e largura de 1,4 mm. Os mesmos foram confeccionados com aço VC131, dureza de 60 HRC e tratamento térmico de têmpera. A Fig. 3 mostra, de forma geral, o mecanismo de desgaste durante a realização dos ensaios, por meio da balança desenvolvida. A velocidade periférica do rebolo utilizada foi igual a 33 m/s e estabelecida constante para todos os ensaios. O avanço da ferramenta sobre a peça, através da perda diametral do componente usinado (aproximadamente 3 mm no diâmetro), gerado pela carga aplicada (constante para todos os rebolos e igual a 6,08 N) foi característica de cada ferramenta testada, pelas diferentes capacidades de remoção de tais rebolos expressos por suas correspondentes agressividades.

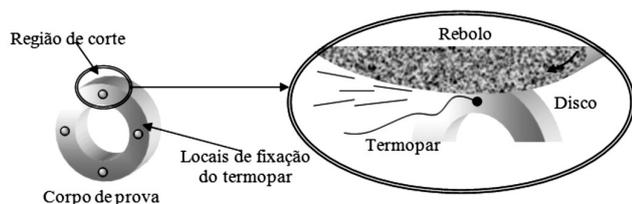


Figura 3: Constituição do corpo de prova e mecanismo de remoção de material.

[Figure 3: Constitution of the workpiece and material removal mechanism.]

Aquisição dos dados de deslocamento e temperatura

A aquisição dos dados foi realizada utilizando-se os equipamentos, identificados na Fig. 4. O comparador eletrônico possui um sensor, o qual foi posicionado no final do braço da balança, como indicado pela Fig. 2. A partir do sensor de deslocamento, o sinal segue para o “Display” do aparelho de medição eletrônico de deslocamento, o qual é alimentado por meio de um transformador. O sinal é então enviado a uma placa condicionadora de sinais, a qual transmite o sinal para a placa de aquisição de dados, que através de “software”, desenvolvido em linguagem “Labview” de aquisição de dados, gerou arquivos correspondentes de valores de deslocamento da balança. Inicialmente, antes da aquisição de dados propriamente dita, realizou-se a calibração do sistema, através de software desenvolvido para tal finalidade, o qual foi capaz de analisar os valores de deslocamento fornecidos pelo aparelho, com a respectiva tensão elétrica gerada. A partir desses dados obteve-se uma equação, capaz de relacionar o valor de tensão, com o

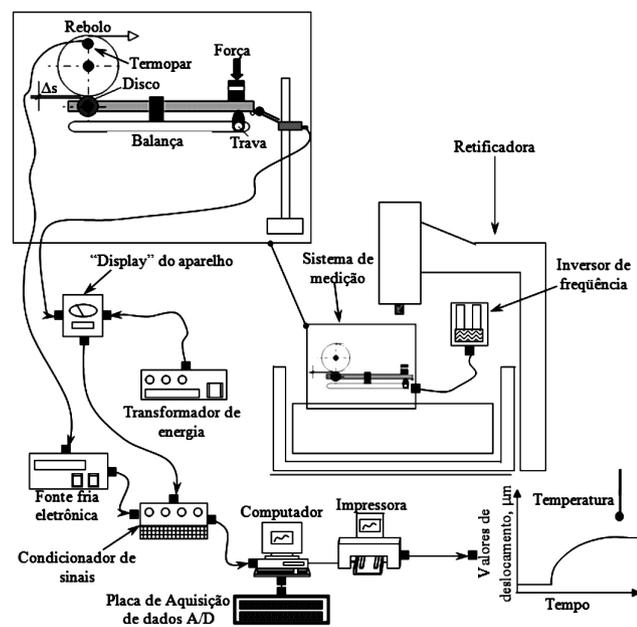


Figura 4: Esquema geral de aquisição de dados do deslocamento vertical da balança.

[Figure 4: General scheme of data acquisition of the vertical displacement of the balance.]

corresponde valor de deslocamento. Tal equação foi inserida no programa final de análise de deslocamento e cálculo do valor de agressividade, de acordo com a Equação (A).

O comparador eletrônico foi posicionado a cada ensaio realizado, assegurando a análise de desgaste efetuado pela ferramenta no corpo de prova. O comparador era posicionado de forma que seu indicador na tela de leitura gerasse um valor inferior a $50 \mu\text{m}$, verificando-se que a partir desse valor, o corpo de prova estaria sendo realmente desgastado, sem a interferência de possíveis diferenças entre a posição do apalpador e do corpo de prova. Através desse método, foi possível estabelecer uma faixa de análise dos resultados gerados durante os ensaios, não havendo, portanto diferenças nos intervalos de início e término de cada ensaio realizado. Os valores de temperatura foram lidos através de termopares previamente calibrados, cuja equação de calibração foi inserida no programa final de aquisição de dados. Pôde-se verificar que o grau de precisão fornecido pelo sistema de aquisição foi elevado, pois o mesmo foi calibrado em uma cuba eletrônica composta por um termômetro de aferição, envolvido em todo o processo de calibração final via “software”. A aquisição dos dados de temperatura pode ser visualizado através do esquema contido na Fig. 4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados durante o período proposto permitiram obter dados que geraram subsídios para uma discussão clara e objetiva, das principais diferenças apresentadas entre os rebolos de CBN com ligantes resinóide convencional, resinóide de alto desempenho, vitrificado e convencional de Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Assim os resultados obtidos quanto à agressividade média ($k_{\text{méd}}$) e os valores do coeficiente angular médio ($a_{1\text{méd}}$) para os quatro tipos de ferramentas testadas, segundo modelamento matemático apresentado.

A Tabela I contém os valores do coeficiente angular médio ($a_{1\text{méd}}$), desvio padrão apresentado pelos ensaios e a agressividade média ($k_{\text{méd}}$).

A Fig. 5 apresenta os valores da agressividade média ($K_{\text{média}}$), de todos os ensaios realizados e o desvio padrão apresentados por tais ensaios.

A análise dos resultados de agressividade obtidos foi realizada através do método “One-Way ANOVA” e o método “Student-Newman-Keuls”, visando as comparações entre os grupos de rebolos ensaiados.

Ao realizar-se o teste “One-way ANOVA”, com os valores originais da agressividade para cada rebolo, os mesmos não apresentavam uma distribuição normal, pré-requisito básico para a aplicação do teste, considerado paramétrico. Visando-se obter a normalidade do conjunto de dados, os valores individuais de agressividade, para cada rebolo, foram transformados matematicamente extraindo a raiz quadrada dos valores individuais. Utilizando-se os valores transformados de agressividade (raiz quadrada dos valores iniciais), executou-se novamente o teste “One-way ANOVA”, obtendo-se então a normalidade dos dados, o

Tabela I - Resultados globais do coeficiente angular médio, $a_{1\text{médio}}$, desvio padrão e agressividade média, $K_{\text{média}}$.
 [Table I - Global results of the average angular coefficient, $a_{1\text{médio}}$, standard deviation and average sharpness, $K_{\text{média}}$.]

Rebolo	Coeficiente angular médio, $a_{1\text{médio}}$	Desvio padrão (%)	Agressividade média, $K_{\text{média}}$ [$\text{mm}^3/\text{N.s}$]
Resinóide Convencional	0,117	9,61	0,30
Convencional	0,506	8,99	0,95
Rebolo Resinóide de Alto Desempenho	0,151	19,37	0,43
Vitrificado	0,125	19,42	0,38

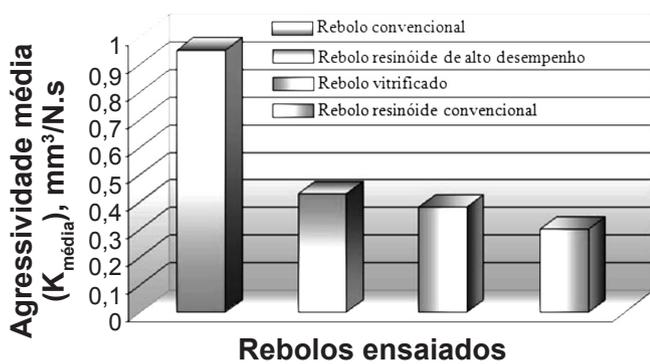


Figura 5: Agressividade média, $K_{\text{média}}$, fornecida pelos rebolos.
 [Figure 5: Average sharpness, $K_{\text{média}}$, provided by the wheels.]

qual mostrou a diferença estatística entre os grupos (fator $p < 0,0001$). Para as comparações múltiplas entre os grupos (tipos de rebolo), utilizou-se o método de “Student-Newman-Keuls”, com 5% de significância. O resultado obtido é apresentado na Tabela II.

Os valores de agressividade obtidos entre os rebolos superabrasivos, não apresentaram diferenças estatisticamente significantes ($p < 0,05$), conforme apresentado na Tabela

II. Tal fato deve-se a característica similar dos grãos superabrasivos testados, já que todas as ferramentas superabrasivas ensaiadas são compostas de grãos de mesma dureza e granulometria. Em virtude da própria metodologia de ensaio adotada, o ligante não foi solicitado de forma efetiva, sendo que a capacidade de retenção do grão pelo ligante não foi testada, pelos baixos esforços de corte. Da mesma forma a maior ou menor capacidade de alojamento de cavaco pelo ligante não foi verificada, pelo pequeno volume de material removido no corpo de prova. Basicamente a agressividade destes rebolos deve-se ao microefeito gerado na operação de perfilamento, similar para todos os rebolos.

O rebolo convencional apresentou maior agressividade, quando comparado aos rebolos superabrasivos ($p < 0,005$). Este fato deve-se as diferenças existentes nas operações de afiação entre as ferramentas convencionais e superabrasivas. A dressagem em rebolos convencionais gera, além do microefeito, uma rosca na superfície do rebolo conhecida como macroefeito, a qual está diretamente ligada ao grau de recobrimento (Ud). A maior agressividade é obtida quando o rebolo é dressado com $Ud=1$, parâmetro adotado para a dressagem do rebolo convencional utilizado nesta pesquisa. Apesar da menor dureza do grão abrasivo convencional de Óxido de Alumínio, os ensaios realizados mostraram a

Tabela II - Comparações múltiplas entre os grupos (* - teste significante $p < 0,05$; N.S.; - Não Significante $p < 0,05$).
 [Table II - Multiple comparisons between the groups (* - significant test $p < 0,05$; N.S.; - Not significant $p < 0,05$).]

	Rebolo Resinóide Convencional	Rebolo Convencional	Rebolo Resinóide de Alto Desempenho	Rebolo Vitrificado
Rebolo Resinóide Convencional		*	N.S.	N.S.
Rebolo Convencional	*		*	*
Rebolo Resinóide de Alto Desempenho	N.S.	*		N.S.
Rebolo Vitrificado	N.S.	*	N.S.	

predominância do macroefeito para esse tipo de ferramenta, resultando em sua maior agressividade. Outra consideração é a operação de perfilamento realizada nos rebolos superabrasivos, que tende a desgastar a superfície do topo do grão superabrasivo, reduzindo sua agressividade.

Apesar da menor agressividade apresentada pelos rebolos superabrasivos, tais ferramentas possuem a manutenção da afiação do grão abrasivo por um período de tempo muito superior ao rebolo convencional. Assim o efeito negativo da menor agressividade inicial, é compensado pela maior capacidade de manutenção da agressividade, trazendo benefícios como um comportamento mais estável da força de corte, menor rugosidade superficial e baixos valores de temperaturas geradas na região de corte.

Os valores de temperatura média obtidos nos ensaios podem ser verificados na Fig. 6. Analisando-se a Fig. 6, é possível verificar que a temperatura média para o rebolo convencional, foi significativamente inferior, com relação às ferramentas superabrasivas. Esse comportamento ocorreu pela existência do macroefeito presente na superfície do rebolo convencional, pois a quantidade de grãos abrasivos em contato com o material é menor que o número de grãos de CBN em contato com a peça.

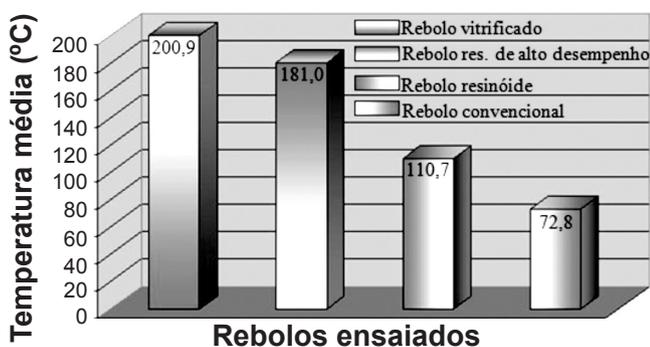


Figura 6: Valores de temperatura obtidos, em função das ferramentas ensaiadas.

[Figure 6: Temperature values obtained by the tools tested.]

A operação de perfilamento, responsável pela renovação das arestas de corte nos rebolos superabrasivos de CBN, gera uma superfície de corte capaz de realizar o contato simultâneo de um número elevado de grãos abrasivos em contato com a peça. Assim pela fenomenologia específica de corte do rebolo superabrasivo, tal ferramenta realizou maior aquecimento na região de corte, pela baixa inércia térmica do corpo de prova, não permitindo que o ligante do mesmo dissipasse o calor de maneira efetiva. Os rebolos superabrasivos de CBN possuem elevada capacidade de autoafiação, conseqüentemente, poderia ser realizada a remoção de maiores volumes de material sem a necessidade de tal operação. Entre os rebolos superabrasivos, pode-se verificar que o rebolo com ligante vitrificado obteve temperatura relativamente superior, pois tal ligante apresentou a propriedade de reter o grão abrasivo por mais tempo durante o processo, gerando o desgaste das arestas de corte e aumento da área de contato entre grão abrasivo e superfície do material. O mesmo comportamento

foi observado com relação ao ligante resinóide de alto desempenho, comparado ao ligante resinóide convencional.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos, através dos equipamentos e métodos propostos, forneceram grande precisão e subsídios para se atingir o objetivo da pesquisa. Os resultados de agressividade mostraram-se estatisticamente iguais, entre os rebolos superabrasivos de CBN, verificando que somente o rebolo convencional apresentou diferenças significativas quanto ao valor de agressividade superficial. Essa diferença foi ocasionada pela presença de macroefeito, gerada pela dressagem do rebolo convencional, não existente nas ferramentas superabrasivas.

Em operações de retificação com reduzido espaço de tempo, o rebolo convencional apresenta valores de agressividade elevados, porém o mesmo comportamento não seria verificado em operações de longos períodos, exigindo a capacidade de resistência ao desgaste do grão abrasivo.

Os rebolos superabrasivos apresentaram valores de agressividade estatisticamente iguais, fato ocasionado pela pequena solitação efetuada nos ligantes. Esse comportamento é apresentado de maneira mais expressiva em condições de usinagem severas, aplicando-se sobre o ligante esforços mecânicos elevados.

Ao contrário da agressividade, os rebolos superabrasivos mostraram-se superiores quanto a geração de elevadas temperaturas, pela pequena duração dos ensaios, não permitindo que os ligantes das ferramentas superabrasivas dissipassem o calor de maneira efetiva. Todavia tais ferramentas possuem excelentes propriedades dissipativas de calor, em situações de longos períodos de tempo. A temperatura inferior do rebolo convencional foi gerada pelo macroefeito da ferramenta associado às baixas solicitações mecânicas nos rebolos superabrasivos, permitindo que o baixo número de grãos abrasivos do rebolo convencional retornasse menor aquecimento na região de corte.

AGRADECIMENTOS

Manifestamos nossos agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio cedido na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Nailor, Int. Conf., Illinois: GE Superabrasives (1989) 20p.
- [2] S. F. Krar, E. Ratterman, *Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond*, Editora McGraw-Hill, EUA (1990), 196 p.
- [3] X. Z. Xie, G. Y. Chen, L. J. Li, *Optics & Laser Technology* **36** (2004) 409.
- [4] C. Guo, Z. Shi, H. Attia, D. McIntosh, *Ann. CIRP* **56**, 1 (2007).
- [5] X. Chen, W. B. Rowe, R. CAI, *Int. J. Machine Tools &*

Manufacture **42** (2002) 585.

[6] F. Klocke, W. König, Ann. CIRP **44**, 1 (1995) 305.

[7] A. Azizi, S. M. Rezaei, A. Rahimi, Int. J. Adv. Manufact. Technol. (2009).

[8] A. Hassui, A. E. Diniz, Int. J. Machine Tools &

Manufacture **43** (2003) 855.

[9] J. A. Webster, Cutting Tool Technol. **60**, 2 (2008) 586.

[10] R. T. Coelho, J. F. Oliveira, XI Cong. Bras. Eng. Mecânica, S. Paulo, SP (1991).

(*Rec. 26/08/2010, Ac. 12/08/2011*)