



RETIFICAÇÃO COM REBOLOS DE CBN COMO MEIO PARA A MELHORIA DA QUALIDADE E COMPETITIVIDADE

Eduardo Carlos Bianchi
Odilson Coimbra Fernandes
Ivan De Domenico Valarelli
Eraldo Jannone da Silva
Alexandre Pegoraro Xavier
José Eduardo Spinelli
Renato Cabrera Neves
Rodrigo Daun Monici
Adriano Rogério Cagnin

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. P. 473 - 17033-360 - Bauru, SP, Brasil

Galdino Ferreira de Souza

Diretor das Empresas Master Diamond Ferramentas Ltda. / Micro Abrasivos Brasil Ltda. e
Mestre em Engenharia Mecânica

Alex Sander Alves

Technical Support - General Electric Company, EUA

***Resumo.** Os rebolos superabrasivos são ferramentas modernas para a retificação de aços endurecidos e seu desempenho é substancialmente superior aos rebolos convencionais. Entretanto, os rebolos superabrasivos podem ser fabricados com diversos tipos de ligantes, dependendo da aplicação industrial a que se destinam. No últimos anos ocorreram avanços científicos significativos na fabricação dos rebolos e os ligantes resinóide e vitrificado são hoje utilizados em quantidades praticamente iguais (31 e 32%, respectivamente). Neste trabalho é apresentado um estudo experimental sobre o comportamento de rebolos de CBN fabricados com os ligantes resinóide e vitrificado, submetidos a diversas condições de usinagem. O material utilizado nos ensaios foi o aço VC 131, com 60 HRC, temperado e revenido e as variáveis de saída foram: força tangencial de corte, rugosidade superficial da peça e relação G. Através da análise dos resultados, somente para os valores de relação G foram verificadas diferenças significativas entre as duas ferramentas testadas, sendo que a com ligante vitrificado apresentou melhor desempenho. As demais variáveis apresentaram um comportamento estável, sendo que as diferenças detectadas não permitem afirmar que o tipo de ligante influencie no comportamento daquelas, devido a sub-utilização das ferramentas, em função da metodologia de ensaios adotada.*

***Palavras-chave:** Rebolo CBN, Ligante Resinóide, Ligante vitrificado, aço VC131*

1. INTRODUÇÃO

Com a globalização da economia, o Brasil sente a urgência de recuperar o tempo perdido devido ao isolamento econômico e tecnológico em que permaneceu durante muitos anos; o momento é de transição para um novo padrão de desenvolvimento, associado às forças de transformação originárias de duas condições básicas: a estabilização da moeda e a redefinição das estruturas financeiras nacional e internacional. A realidade brasileira está repleta de oportunidades e incertezas dependendo do grau de organização e da qualidade dos produtos fabricados. Para que as empresas nacionais sejam competitivas seus produtos devem ser fabricados com melhor qualidade, menor preço e mais rapidamente.

Um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de peças de precisão é o processo de retificação, mesmo sendo este um dos processos de usinagem ainda menos dominado tecnologicamente, se comparado aos processos convencionais de usinagem (torneamento, furação, fresamento etc.). Seu desempenho é muito dependente da habilidade e sensibilidade do operador e das condições de usinagem e dressagem do rebolo (afiação). As decisões durante a retificação são normalmente tomadas pelo operador da máquina que, embora possua a experiência de muitos anos de trabalho, nem sempre possui conhecimentos teóricos sobre o processo. Este fato é ainda mais agravado porque, no Brasil, ainda são muito utilizados os rebolos convencionais que possuem menor capacidade de remoção de material se comparados com os rebolos superabrasivos, principalmente quando se retifica materiais de elevada dureza (acima de 50 HRC). Isto torna-se mais crítico, no momento atual, pela concorrência estrangeira que está obrigando as indústrias nacionais a atender aos padrões internacionais de qualidade e desempenho de um produto.

Nailor (1989) já afirmava que a usinagem com rebolos superabrasivos deve proporcionar um custo de produção inferior, por peça, em média 30 à 50% em relação a usinagem com rebolos convencionais, utilizando-se condições de usinagem que promovam o menor desgaste possível da sua superfície de corte (superfície do rebolo responsável pela remoção de metal da peça retificada). Entretanto, a redução de custo somente será viável se o rebolo, utilizado sob determinadas condições de usinagem e afiação, proporcionar peças com qualidade aceitável, ou seja, com erros de forma e geométricos aceitáveis, rugosidade superficial adequada da peça e sem danos metalúrgicos significativos (modificações na microestrutura do material como encruamento, tensões residuais etc.).

Segundo Krar e Ratterman (1990), como consequência dos esforços contínuos para melhorar a qualidade dos produtos e os métodos de fabricação, têm sido desenvolvidas novas máquinas-ferramenta e materiais para as ferramentas de corte. Alguns tipos de materiais compostos, comprovadamente, provocam grandes dificuldades de usinagem, ou até mesmo impossibilidade, quando se torna necessário que sejam submetidos ao processo de retificação com rebolos convencionais.

Mesmo sendo a capacidade de corte dos rebolos superabrasivos superior, se comparada aos rebolos convencionais, eles não podem ser aplicados a todas as operações de retificação; todavia, têm provado serem excepcionais para a retificação de metais ferrosos endurecidos, ferro fundido e superligas de níquel e cobalto. É sabido, também, que os rebolos superabrasivos apresentam alta eficiência de corte e podem produzir maiores quantidades de peças, com elevada precisão e com o mesmo esforço físico despendido com os rebolos convencionais, proporcionando menores custos, e conseqüentemente, um aumento da produtividade.

Em operações típicas de fabricação, o rebolo é a interface entre a máquina e a peça. Para que o rebolo possa transferir a energia disponível na máquina para a operação de retificação, o mesmo deve apresentar, dentre outras características, maior dureza do que a peça e, conseqüentemente, ser mais resistente ao desgaste abrasivo. Os cristais dos grãos abrasivos de

CBN (nitreto de boro cúbico) se adequam e até superam este requisito, e por isso são usados na fabricação de rebolos para a retificação de alta eficiência de materiais difíceis de serem retificados (“Difficult To Grind” - DTG).

Na retificação de materiais DTG, os rebolos convencionais perdem a capacidade de corte mais rapidamente, por serem menos resistentes ao desgaste, resultando em valores elevados de forças de corte, temperatura (gerada por atrito e riscamento do cavaco arrancado) e taxas de remoção de material reduzidas, afetando a rugosidade superficial e a precisão geométrica e dimensional das peças retificadas. De forma oposta, os rebolos de CBN tem prolongada a sua capacidade de corte, pois os grãos de CBN são mais resistentes ao desgaste e a sua alta condutividade térmica colabora no sentido de reduzir a elevação descontrolada de calor. Desta forma, fica reduzida a possibilidade de se causar danos metalúrgicos na peça.

Segundo Klocke e König (1995) a melhoria do processo de retificação somente pode ser conseguida com a utilização de grãos superabrasivos como o CBN. O potencial de alto desempenho deste material abrasivo resulta da sua extrema dureza e resistência ao desgaste, aliadas às suas altas resistências 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 e possui uma boa estabilidade térmica. Uma outra vantagem significativa da utilização de ligante vitrificado em rebolos de CBN, resulta no fato do mesmo proporcionar boa porosidade e boas propriedades de auto afiação dos rebolos, o que, usualmente, simplifica o método de condicionamento destes. Já os rebolos de CBN com ligante resinóide, além de serem submetidos a operação de dressagem (comumente realizada para os dois tipos de ligante citados), devem ser submetidos a uma operação de avivamento, para a exposição dos grãos de CBN na região de corte e para o aumento da porosidade do ligante, através de um processo de erosão do mesmo utilizando-se, comumente, uma barra de óxido de alumínio.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise comparativa do desempenho de rebolos superabrasivos de CBN fabricados com dois tipos distintos de ligantes: resinóide e vitrificado, bem como uma análise qualitativa do acabamento superficial da peça retificada. As condições de usinagem (penetração do rebolo na peça a [μm], velocidade da peça v_w [m/s] e velocidade de corte v_s [m/s]) foram variadas a fim de se avaliar o comportamento da força tangencial de corte F_{tc} [N], relação G [-] (Relação entre o volume de material usinado Z_w e o volume de ferramenta gasta Z_s) e rugosidade superficial da peça R_a [μm].

2. REBOLOS DE CBN: PRINCIPAIS CONSTITUINTES, IMPACTOS NO RENDIMENTO E UTILIZAÇÃO / TENDÊNCIAS NA UTILIZAÇÃO DOS LIGANTES

De acordo com a empresa General Electric Company, USA (1998a), líder mundial na fabricação de grãos de CBN, os rebolos superabrasivos devem ser utilizados quando se deseja qualidade superior e consistente do componente usinado, aumento da produtividade, vida longa da ferramenta de corte e quando o material utilizado seja “difícil de ser usinado” (DTG).

Um rebolo superabrasivo é fabricado para uma aplicação específica; ou seja, os seus constituintes devem ser trabalhados de forma a se obter uma ferramenta de corte que atenda às necessidades do usuário. Na Tabela 1 é apresentado um esquema básico mostrando alguns dos principais constituintes de um rebolo superabrasivo de CBN e na Tabela 2 são apresentados os impactos que ocorrem no rendimento de um rebolo superabrasivo de CBN devido à alteração dos grãos e ligante.

Tabela 1: Principais constituintes de um rebolo superabrasivo de CBN (General Electric Company, USA, 1998b)

Rebolo Superabrasivo	Material do núcleo	Alumínio, aço, resina, composto
	Dureza/estrutura da ligante	“G”, “N”,
	Tipos de ligante	Resinóide, vitrificado, metálico e galvânico
	Tamanho do abrasivo	80/100 (D181), 200/230 (D6), ...
	Concentração do abrasivo	75, 100,
	Tipo do abrasivo	RVG W, RVG 880, ...

Tabela 2: Impactos que ocorrem no rendimento de um rebolo superabrasivo de CBN devido à alteração dos grãos e ligante (General Electric Company, USA, 1998b)

Impacto \ Alteração	Friabilidade		Granulometria		Concentração		Dureza (ligante)	
	- Friável ↓	+ Friável ↑	Fina ↓	Grossa ↑	Baixa ↓	Alta ↑	Baixa ↓	Alta ↑
Taxa de remoção de material	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Relação G (aplicação específica)	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Acabamento superficial	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↑
Consumo de energia da máquina	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Legenda:			↓ piora		↑ melhora			

Da análise conjunta destas tabelas, pode-se notar que o ligante influencia a compatibilidade/retenção do abrasivo, a capacidade na obtenção de formas geométricas especiais do rebolo, a vida útil do rebolo e as características de desgaste deste. A alteração da dureza do ligante influencia diretamente nas variáveis de saída do processo. De forma geral tem-se que, se o ligante possuir baixa capacidade de retenção dos grãos abrasivos na superfície de corte do rebolo (rebolo mole), haverá o desprendimento dos grãos e, conseqüentemente, a renovação da superfície de corte.

O grão abrasivo influencia diretamente a vida útil do rebolo, a eficiência da operação de retificação e a qualidade superficial da peça retificada. A escolha da granulometria dos grãos que irão ser utilizados na fabricação de um rebolo está associada ao que se pretende do processo. Se, por exemplo, numa determinada operação são desejáveis valores reduzidos de rugosidade superficial da peça deve-se utilizar um rebolo fabricado com granulometria fina. O grau de friabilidade (facilidade para fraturar o grão em pedaços, sob uma determinada força de retificação ou impacto entre o grão e a peça, formando novas arestas) de um grão abrasivo também pode comprometer o processo de usinagem. Se, por exemplo, for utilizado um rebolo com maior grau de friabilidade, haverá uma renovação mais acentuada e constante das arestas de corte fazendo com que o rebolo permaneça afiado. Conseqüentemente, a energia consumida é menor e a rugosidade superficial da peça melhora.

A concentração do rebolo representa a quantidade de abrasivos, por unidade de volume do rebolo. Como exemplo, um rebolo com concentração 100 significa que este possui 25% do seu volume em grãos abrasivos. Portanto, a concentração de um rebolo está diretamente relacionada ao seu custo de aquisição e às capacidades do rendimento (capabilidade da vida do rebolo, remoção de material, taxa de capacidade, requisitos de potência, acabamento superficial da peça e agressividade). Quando se utilizam valores menores de concentração, os

parâmetros de saída (taxa de remoção de material, relação G, acabamento superficial e consumo de energia da máquina) diminuam.

Os rebolos fabricados com ligante resinóide, geralmente, têm a ação de retificação mais macia e fácil com relação aos outros ligantes. Estes rebolos removem material rapidamente mas têm características de agregamento e forma limitadas. As características principais dos rebolos com ligante resinóide são: podem ser utilizados em um grande número de aplicações, estão disponíveis em um grande número de formas e tamanhos, podem ser utilizados tanto em retificação refrigerada como a seco e possuem boas qualidades de corte.

Por outro lado, segundo Ishikawa e Kumar (1990), os rebolos de CBN com ligante vitrificado estão sendo largamente usados nos processos de retificação por apresentarem maior eficiência, propiciarem melhor acabamento superficial e maior vida do que os rebolos convencionais e outros tipos de rebolos de CBN. Estas vantagens são, entretanto, fortemente afetadas pelo modo como a superfície do rebolo é condicionada, verificada e afiada. Um condicionamento pobre da superfície causa, freqüentemente, desempenho inconsistente na retificação com estes rebolos.

Nos últimos anos, sob circunstâncias altamente competitivas em indústrias, rebolos de CBN tem sido largamente usados em várias aplicações de produção maciça em retificação, e nesta aceitação do rebolo de CBN nas indústrias, o emprego dos rebolos de CBN com ligante vitrificado tem crescido rapidamente comparado a outros rebolos com outros tipos de ligantes, como resinóide ou metálico. As razões principais desta larga aceitação do rebolo de CBN com ligante vitrificado estão na sua maior durabilidade, melhor acabamento obtido, maior eficiência de retificação, maior resistência ao desgaste e uma maior força de retenção do cristal, além de um condicionamento mais fácil da superfície devido à porosidade induzida.

A superioridade dos rebolos de CBN vitrificados também é mostrada pelo desenvolvimento de métodos de condicionamento, para alcançar uma livre ação de corte dos abrasivos de CBN resultando em baixa potência de retificação, baixa taxa de desgaste do rebolo e acabamento superficial aceitável. O condicionamento da superfície do rebolo pode ser dividido em duas categorias: **dressagem**, onde ocorre a restauração da geometria de corte do rebolo, com desgaste dos grãos abrasivos e o **avivamento** para abrir a superfície do rebolo aliviando o material ligante em torno dos cristais de CBN e proporcionar fluxo mais adequado de cavacos. Ambos os tratamentos para os condicionamentos de rebolos são normalmente usados para sistemas com ligante de resina e metal. Por outro lado, para sistemas com ligante vitrificado, o avivamento é pouco empregado devido à porosidade original do ligante e pela maior resistência à abrasão; porém tem influência sutil no desempenho de retificação quando aplicado.

Recentemente a empresa GE Company USA (1998a), divulgou os resultados de levantamento sobre a utilização dos principais tipos de ligantes, utilizados para a fabricação de rebolos superabrasivos nos anos de 1980 e 1997. De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, pode-se notar um grande queda na utilização do ligante resinóide (de 76% para 31%) e um crescimento abrupto (de 4% para 32%) na utilização do ligante vitrificado. Assim, estes dois tipos de rebolos são, atualmente, os mais utilizados e em quantidades praticamente iguais.

Tabela 3: Panorama da evolução na utilização dos principais tipos de ligantes para a fabricação de rebolos superabrasivos (General Electric Company, USA, 1998a)

Ligante	% 1980	% 1997	Tendência futura
Resinóide	76	31	Crescimento lento
Metálico	10	11	Crescimento lento
Vitrificado	4	32	Crescimento forte
Camada simples	10	26	Crescimento forte

Portanto, a predominância do ligante resinóide já não existe mais devido às novas necessidades do mercado. De forma geral, todos os tipos de ligantes apresentam tendência futura de crescimento; porém, o vitrificado deverá ter um crescimento forte. Considerando que indústrias nacionais ainda utilizam muito pouco os rebolos superabrasivos, este trabalho apresenta um estudo experimental entre os ligantes resinóides e vitrificados a fim de esclarecer o setor industrial, principalmente o nacional, em quais casos a utilização de cada um dos ligantes em estudo pode ser mais vantajosa.

3. METODOLOGIA DE ENSAIOS

Visando a realização deste trabalho, foram realizados 12 ensaios laboratoriais variando-se as condições de usinagem (v_s , v_w e a) e os parâmetros de saída medidos (força tangencial de corte, rugosidade superficial da peça e relação G). As condições de usinagem são apresentadas na Tabela 4.

Para a medição da força tangencial de corte optou-se, pela determinação, em tempo real, da mesma através da rotação n da ferramenta e da potência elétrica P_c consumida pelo motor de acionamento da ferramenta abrasiva, durante o corte. Para tanto, utilizou-se um circuito condicionador de sinais, o qual permite a aquisição e transformação dos valores de corrente elétrica, tensão elétrica e rotação do motor em sinais de tensão elétrica compatíveis, para serem enviados à uma placa de aquisição de dados A/D. Utilizando-se o software de aquisição de dados LabView 4.1, equações de calibração previamente determinadas e os valores de tensão lidos pela placa de aquisição de dados pode-se então calcular a força tangencial de corte F_{t_c} pela Eq. (1), sendo que d_s é o diâmetro do rebolo:

$$F_{t_c} = P_c / 2v_s = 60 \cdot P_c / (2 \cdot \pi \cdot n_i \cdot d_s) \quad (1)$$

O material utilizado para a realização dos ensaios foi o aço VC 131, temperado e revenido, com dureza média de 60 HRC. As dimensões dos corpos-de-prova foram: 263,5 mm de comprimento, 65 mm de altura e 5 mm de espessura.

Inicialmente o corpo de prova era fixado sobre a mesa da máquina retificadora e posteriormente eram acertadas todas as condições de usinagem (velocidade de corte, velocidade da mesa e penetração do rebolo na peça). Posteriormente dava-se início aos ensaios medindo-se a força tangencial de corte, em tempo real, rugosidade superficial da peça e o desgaste diametral do rebolo no final de cada ensaio.

Cada ensaio era finalizado quando o volume específico de material removido atingia 6000 mm³/mm, o que aconteceu, em média, após 9 horas ininterruptas de ensaio.

A rugosidade superficial (R_a) (cut-off de 0,8 mm e filtro 2CR (ISO)) dos corpos de prova era medida periodicamente (a cada número pré-determinado de passadas do rebolo sobre a peça, dependendo da condição de usinagem), utilizando-se um rugosímetro marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+, em três posições distintas do corpo de prova (laterais e centro)

e quatro vezes consecutivas em cada posição. Posteriormente era feita a média dos valores obtidos e anotadas para posterior utilização.

Os ensaios foram realizados utilizando-se a metade da largura (altura) do rebolo. Desta forma, a metade não utilizada no ensaio servia como referência para a medição da perda diametral do rebolo. No final de cada ensaio o perfil geométrico do rebolo era marcado sobre uma chapa metálica (aço com baixo teor de carbono) para posterior medição do desgaste do rebolo. Como o volume de material removido era constante para cada ensaio, a determinação da relação G era direta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma melhor análise do comportamento dos valores de força tangencial de corte e de rugosidade R_a e relação G , na Tabela 4, os resultados obtidos para cada ensaio são apresentados em forma de tabela. Nesta também estão contidos os valores de relação G obtidos para os ensaios realizados

Tabela 4: Resultados obtidos com os rebolos de CBN utilizados

Ligante vitrificado - heq = 0,1 μm								
Ensaio	Ftc média (N)	Ra média (μm)	G	Desgaste radial (μm)	Qw' (mm ³ /mm.s)	a (μm)	V _s (m/s)	V _w (m/s)
1	46,58	0,91	159,7	34,2	3,3	100	33	0,033
5	44,12	0,89	154,6	35,3	3,3	60	33	0,055
6	39,72	0,79	150,2	36,3	3,3	30	33	0,11

Ligante vitrificado - heq = 0,05 μm								
Ensaio	Ftc média (N)	Ra média (μm)	G	Desgaste radial (μm)	Qw' (mm ³ /mm.s)	a (μm)	V _s (m/s)	V _w (m/s)
3	42,02	0,59	233,2	23,4	1,65	50	33	0,033
2	39,92	0,60	226,6	24,1	1,65	30	33	0,055
4	37,68	0,54	220,1	24,8	1,65	15	33	0,11

Ligante resinóide - heq = 0,1 μm								
Ensaio	Ftc média (N)	Ra média (μm)	G	Desgaste radial (μm)	Qw' (mm ³ /mm.s)	a (μm)	V _s (m/s)	V _w (m/s)
11	45,72	0,73	137,5	39,7	3,3	100	33	0,033
10	41,41	0,71	128,3	42,5	3,3	60	33	0,055
12	39,52	0,70	117,6	46,4	3,3	30	33	0,11

Ligante resinóide - heq = 0,05 μm								
Ensaio	Ftc média (N)	Ra média (μm)	G	Desgaste radial (μm)	Qw' (mm ³ /mm.s)	a (μm)	V _s (m/s)	V _w (m/s)
7	43,46	0,61	170,6	32,0	1,65	50	33	0,033
9	41,02	0,67	157,6	34,6	1,65	30	33	0,055
8	40,45	0,59	144,9	37,6	1,65	15	33	0,11

Da análise global dos resultados obtidos para as variáveis de saída monitoradas, pôde-se verificar que os dois tipos de ferramentas ensaiadas apresentaram um desempenho final bem semelhante, para os ensaios realizados.

Comparativamente, não houve diferenças entre as duas ferramentas, quando da análise dos resultados obtidos para força tangencial de corte e rugosidade superficial. A tendência de estabilização e manutenção, dentro de uma faixa de pequena amplitude, dos valores de força tangencial de corte e rugosidade (mesmo sob as severas condições de usinagem impostas, que podem ser caracterizadas pelo desbaste com semi-acabamento), atestam que, para as condições de usinagem ensaiadas, as ferramentas utilizadas apresentaram uma excelente manutenção da capacidade de corte durante o volume de material removido (30.000 mm^3 de material removido por ensaio, o que equivale aos $6.000 \text{ mm}^3/\text{mm}$), além de possibilitar a obtenção de valores de rugosidade R_a inferiores à $1 \mu\text{m}$. Este comportamento estável destas variáveis de saída indicam que a ferramenta abrasiva ainda apresentava capacidade de corte para a remoção de um volume de material maior de que o proposto para a realização deste trabalho, sem que houvesse a necessidade de uma nova dressagem e afiação da ferramenta. Além disso, apesar do material retificado (Aço VC 131) ser de elevada dureza (60 HRC) e classificado como aço de difícil retificação (DTG), os resultados observados permitem concluir que as ferramentas abrasivas testadas apresentaram excelente desempenho, tomando-se como base os pequenos valores quantificados de desgaste radial da ferramenta e o acabamento superficial obtido.

A diferença mais significativa entre as duas ferramentas superabrasivas, quanto às variáveis de saída, foi verificada quando da análise da relação G e, por consequência, do desgaste radial das ferramentas, já que o volume de material retificado para ambas as ferramentas foi idêntico (30.000 mm^3). Neste caso, o rebolo com ligante vitrificado apresentou, para todos os ensaios realizados, um valor de relação G superior ao verificado para o rebolo com ligante resinóide. Conseqüentemente, o rebolo com ligante vitrificado apresentou os menores valores de desgaste radial (vide Tabela 4), ou seja este removeu a mesma quantidade de material que o rebolo com ligante resinóide, porém desgastando-se menos que este último. Este menor desgaste deve-se, neste caso, ao fato da ferramenta com ligante vitrificado não ser submetida a uma operação de avivamento, após o perfilamento, pois este apresenta porosidades induzidas, conforme mencionado anteriormente. Entretanto, a ordem de grandeza obtida para os valores de relação G são bem inferiores aos verificados na literatura, quando da usinagem de materiais semelhantes (Relação G próximo de 5.000). Todavia, o comportamento estável dos valores de força tangencial de corte, e rugosidade observados indicam que a ferramenta abrasiva ainda possui uma capacidade de corte elevada, permitindo retificar um volume muito maior de material, do que os $6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ propostos para a realização deste trabalho. Desta forma, a continuação dos ensaios, removendo-se uma quantidade maior de material poderá levar a um aumento significativo da relação G , pois a ordem de grandeza dos desgastes radiais observados é muito inferior ao observado para rebolos convencionais, pois o desgaste radial não apresenta um comportamento linear com a variação da quantidade de material retificado. Através dos valores de G observados, conjuntamente com as outras variáveis medidas, pode-se caracterizar uma sub-utilização desta ferramenta nos ensaios realizados.

Os rebolos utilizados nesta pesquisa foram fabricados de forma idêntica; ou seja, com mesmo tipo de grão abrasivo, granulometria, dimensões, dentre outras. Deve-se salientar que a concentração utilizada na fabricação dos rebolos tem influência direta nos resultados de força de corte, rugosidade superficial da peça, relação G , dentre outros. Para viabilizar a análise comparativa do desempenho destes rebolos (já que o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise comparativa somente entre os ligantes), estes foram fabricados com mesma concentração, de valor igual a 100, sendo esta recomendada, segundo os fabricantes

de rebolos superabrasivos e King e Hann (1992), para a fabricação de um rebolo resinóide de alto desempenho (a faixa de concentração recomendada é de 75 a 100). Porém, esta mesma concentração é baixa para o rebolos vitrificados, a qual deveria ser de 200 para também se fabricar um rebolo vitrificado de alto desempenho (a concentração recomendada é de 150 a 200). Desta forma, as forças tangenciais de corte seriam mais elevadas no rebolo vitrificado pelo fato de que mais grãos abrasivos removeriam cavacos com menor espessura teórica e, conseqüentemente, as parcelas dissipativas do processo (emissão acústica, atrito, riscamento, dentre outras) seriam maiores. Por isso as forças tangenciais de corte medidas para o rebolo vitrificado foram praticamente iguais, às obtidas para o rebolo resinóide.

Analogamente ao que foi observado com relação à análise das forças tangenciais de corte, se o rebolo vitrificado fosse fabricado com maior concentração, os valores de rugosidade superficial da peça seriam menores. Isso ocorreria pois os cavacos arrancados teriam menor espessura, fazendo com que a rugosidade superficial da peça fosse menor. De forma similar aos casos anteriores, a relação G , no rebolo vitrificado, também seria maior pela melhor distribuição dos esforços de corte sobre cada grão abrasivo.

5. CONCLUSÕES

Da realização desta pesquisa experimental sobre o desempenho de rebolos de CBN constituídos de dois diferentes tipos de ligantes, pode-se concluir:

A metodologia adotada para a verificação do desempenhos das ferramentas mostrou-se adequada para as finalidades do trabalho, sendo possível estabelecer correlações dos resultados obtidos com as demais pesquisas realizadas no estudo do comportamento de rebolos de CBN no processo de retificação de aços endurecidos, quando da utilização destes tipos de ferramentas.

De uma maneira geral, através das análise dos resultados para a maioria da variáveis de saída monitoradas, praticamente não foram verificadas diferenças significantes entre os dois tipos de rebolos testados (um rebolo de CBN com ligante resinóide e outro com ligante vitrificado). Para as observações referentes a força tangencial de corte e rugosidade realizadas, o tipo de ligante não influenciou, diretamente, as pequenas alterações verificadas (quando houveram) nestas variáveis.

As diferenças mais pronunciadas foram verificadas quando da análise dos valores de relação G , onde o rebolo com ligante vitrificado apresentou um melhor desempenho que o ligante resinóide. Diferenças mais significativas, em favor do rebolo com ligante vitrificado, quanto a melhores valores de relação G e de rugosidade superficial, seriam obtidas, se o rebolo fosse fabricado com concentração entre 150 e 200. Desta forma esta ferramenta seria então a mais adequada para a retificação deste tipo de aço (VC 131).

A sub-utilização da ferramentas abrasivas testadas foi caracterizada pelo comportamento estável dos valores de força tangencial de corte e rugosidade, os quais indicaram que a ferramenta abrasiva possuía ainda uma capacidade de corte elevada, podendo retificar um volume muito maior de material, do que os $6.000\text{mm}^3/\text{mm}$ propostos (30.000mm^3) para a realização deste trabalho, sem a necessidade de uma nova operação de afiação. A continuação dos ensaios, removendo-se uma quantidade maior de material poderia levar a um aumento significativo da relação G , pois a ordem de grandeza dos desgaste radiais observados são muito inferiores aqueles para rebolos convencionais. Além disso, o desgaste radial não apresenta um comportamento linear com a variação da quantidade de material retificado. Sendo assim, para este tipo de aço retificado, os rebolos de CBN testados, principalmente aquele com ligante vitrificado, levam grande vantagem em relação aos rebolos convencionais de óxido de alumínio, em relação as variáveis monitoradas para este trabalho.

Agradecimentos

Manifestamos nossos agradecimentos à **FAPESP** (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro concedido para a realização deste trabalho e pela bolsa de iniciação científica que foi concedida e as empresas **Master Diamond Ferramentas Ltda., Micro Abrasivos Brasil Ltda. e General Electric Company, USA - Superabrasivos** pelo subsídio na aquisição dos rebolos e pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

- Borazon CBN, 1998b, - General Electric Company, USA - Superabrasives. Produtos para Retifica. Publicação feita pela empresa GE Company USA, 14p.
- Diamante RVG, 1998b, - General Electric Company, USA – Superabrasives. Produtos para Retifica. Publicação feita pela empresa GE Company USA, 41p.
- Ishikawa, T, Kumar, K,V, 1990, Conditioning of Vitrified Bond Superabrasive Wheels, GE Superabrasives, p. 91 - 110.
- King, R. I.; Hann, R. S., 1992, “Handbook of Modern Grinding Technology.” 3 ed. cap.6, p.119-167.
- Krar, S. F., Ratterman, E., 1990, Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond. McGraw-Hill, Inc., USA, 196 p.
- Klocke, F., König, W., 1995, Appropriate conditioning strategies increase the performance capabilities of vitrified-bond CBN grinding wheels. Annals of the CIRP, vol. 44/1, pp. 305-310.
- Nailor, B.,1989, Truling parameters for conditioning vitrified bond wheels. INTERNATIONAL CONFERENCE, 27. Illinois: GE Superabrasives, 20p.

GRINDING OPERATION CAN BE IMPROVED BY THE USE OF CBN WHEELS

Abstract. *The superabrasive grinding wheels, preferential used when grinding DTG materials, are tools which have a high cut effectiveness, comparing to conventional ones. The superabrasive grinding wheels can be manufactured with different types of bonds, depending on the application.. In the latest years, technological progress in the tool manufacturing process were reached, and, nowadays, the grinding wheels with resin and vitrified bonds are used at the same rate (31 and 32%, respectively). This paper shows a research about the comparative behavior between two types of superabrasive grinding wheels, manufactured with vitrified and resin bonds, analyzed in different cutting conditions. The material ground was the VC 131 steel, quenched. The outlet parameters analyzed were: tangential cutting force, superficial roughness and G ratio. Significant differences between the two types of tools were observed only in the results of G ratio, and the vitrified bond's tool presented the highest values. The others outlet parameters presented a stable behavior during the tests. The differences detected on them, changing the superabrasive tool, were not significant, because, at the end of each trial, the cutting tool still had cutting ability to remove much more material. It decreased the differences that would be observed between the tools.*

Key words: *CBN grinding wheel, Resin bond, Vitrified bond, VC131 steel.*