

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE REBOLOS COM GRÃOS SUPERABRASIVOS E CONVENCIONAIS

Eduardo Carlos Bianchi

Eraldo Jannone da Silva

Rodrigo Daun Monici

Renato Cabrera Neves

Paulo Roberto de Aguiar

Ivan De Domenico Valarelli

Universidade Estadual Paulista

Departamento de Engenharia Mecânica

Cx. P. 473 - 17033-360

Bauru, SP, Brasil

Resumo

Um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de peças de precisão, é a retificação. Existem diversos parâmetros de entrada (condições de corte, tipo de rebolo e fluido de corte utilizado, condições de dressagem) que afetam e levam a diferentes comportamentos nas variáveis de saída (força tangencial de corte, força normal, rugosidade superficial, temperaturas de retificação, relação G, etc.), implicando em diferenças na rugosidade superficial obtida, na integridade superficial e na resistência mecânica do componente usinado. Desta forma os parâmetros de entrada devem ser controlados a fim de se garantir a qualidade final da peça. Este artigo apresenta um estudo comparativo do desempenho entre dois tipos de rebolos, sendo um convencional (Al_2O_3) e outro superabrasivo (CBN), através da análise de variáveis de saída específicas, quando estes são submetidos a diferentes condições de usinagem, na retificação o aço VC 131. Como resultado, o rebolo de CBN apresentou a maior capacidade de corte, além de levar aos melhores resultados de relação G e rugosidade superficial. Isto confirma a tendência mundial de substituição dos rebolos convencionais pelos de CBN, quando da retificação de aços DTG (*“Difficult To Grind”*).

Palavras-chave: CBN, Óxido de alumínio, Ligante resinóide, Aço VC131

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente a operação de retificação é utilizada em processos de acabamento onde a qualidade superficial do material retificado e os seus erros dimensionais e de forma são importantes e, conseqüentemente, devem ser controlados. Trata-se de um processo de usinagem onde há um grande número de arestas de corte com geometria indefinida, agindo simultaneamente. O desgaste destas arestas, e da superfície de corte do rebolo, é causado por fatores mecânicos e físico-químico.

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 torna-se necessário que sejam submetidos ao processo de retificação com rebolos convencionais. 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.

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, aliada à sua alta resistência à temperatura e elevada condutibilidade térmica.

Na retificação de materiais DTG, os rebolos convencionais perdem a capacidade de corte mais rapidamente, o que resulta 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 capacidade de corte 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. 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.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise comparativa entre o desempenho de um reboło superabrasivos de CBN fabricado com ligante resinóide e um reboło convencional de Al_2O_3 , bem como uma análise qualitativa do acabamento superficial da peça retificada. As condições de usinagem (penetração do reboło na peça a , velocidade da peça v_w e velocidade de corte v_s) foram variadas a fim de se avaliar o comportamento da força tangencial de corte F_{tc} , 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 .

2. REBOLOS CONVENCIONAIS E SUPERABRASIVOS: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Para que os rebolos executem um operação adequadamente, estes devem ser duros e resistentes para suportar as pressões que são geradas durante a operação de retificação, e o grão abrasivo deve ser capaz de se quebrar gradualmente para expor novas arestas de corte afiadas para que o material possa ser retificado. Os principais componentes de um reboło são o grão abrasivo e o ligante, que os mantém juntos.

• Grão abrasivo

Segundo Malkin (1989), os abrasivos convencionais utilizados na confecção de rebolos são o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carbetto de silício (SiC). Virtualmente, todos os abrasivos convencionais utilizados hoje na fabricação de rebolos são materiais sintéticos tendo como elementos fundamentais tanto o Al_2O_3 quanto o SiC. Como exemplo, os óxidos de alumínio

sintéticos contém, em adição ao Al_2O_3 , várias quantidades de óxidos metálicos adicionados propositadamente ou na forma de impurezas.

Classicamente, o requerimento básico de um abrasivo é deste ser mais duro que o material a sofrer a abrasão. A dureza de um abrasivo é definida pelo teste de dureza Knoop, em kg/mm^2 . Uma outra importante propriedade do abrasivo é a sua resistência dinâmica ou tenacidade. Alta tenacidade implica em grãos abrasivos menos propícios à fragmentação quando de seu impacto com a peça a ser retificada. De forma contrária, menos tenacidade (maior friabilidade) implica em grãos abrasivos com maior capacidade de gerar novas arestas de corte a medida que os grãos vão se tronando “cegos” devido ao atrito durante o uso. A friabilidade comparativa dos grãos abrasivos é determinada pelo “índice de friabilidade”, sendo que quanto maior o índice mais friável é o grão

Segundo GE (1998a) e GE (1998b), existem 7 tipos diferentes de abrasivos CBN fornecido pela empresa GE, cada um designado para o melhor desempenho possível para tipos específicos de rebolo e variedades de ligantes. Estes tipos estão subdivididos em três categorias: média resistência, abrasivo monocristalino; alta resistência, abrasivo monocristalino; abrasivo microcristalino resistente.

- **Tipos de ligantes**

Utilizados para fixar os grãos abrasivos na superfície de corte do rebolo, os tipos de ligantes utilizados na produção de rebolos convencionais, segundo Malkin (1989) são: resinóide, resinóide reforçado, ligantes à base de borracha, silicato, vitrificados, dentre outros. Cada tipo de ligante apresenta características próprias quanto a capacidade de retenção do grão, resistência ao impacto, resistência térmica e à erosão do cavaco. Em geral, o ligante deve ser forte o bastante para resistir às forças de corte, a temperatura e a força centrífuga sem desintegrar, além de resistir ao ataque químico do fluido de corte.

O termo “dureza de rebolos” está relacionado com a capacidade de retenção dos grãos abrasivos pelo ligante, quando submetido aos esforços para a operação de retificação. A dureza de um rebolo pode variar em função da quantidade de ligante utilizado para a fabricação do rebolo (diagrama ternário), ou ainda em função da qualidade e do tipo de ligante utilizado.

Para que se possa proceder a retificação de um grande número de peças, uma variedade de sistemas ligantes são usados para fixar os grãos abrasivos na superfície de corte do rebolo. Os quatro tipos de ligantes mais comuns, atualmente utilizados pelos fabricantes de rebolo superabrasivo, são os resinóides, vitrificados, metálicos e eletrodepositados. O tipo de ligante utilizado determina os procedimentos de avivamento e afiação, os quais são fatores que determinam o desempenho e a vida útil da ferramenta.

Rebolos com ligante resinóide são fabricados pela mistura de quantidades medidas de resina fenólica ou poliamida e agentes de preenchimento com o peso e tamanho apropriado do abrasivo CBN com camada metálica. Dependendo da aplicação da retificação, um rebolo com ligante resinóide pode conter uma concentração pequena como a de 50 de grãos abrasivos de CBN até 125. A maioria dos rebolos com ligante resinóide contém uma concentração de abrasivo de 75 a 100. Rebolos com ligante resinóide geralmente têm a ação de retificação mais macia e fácil com relação aos outros quatro tipos de ligantes. Uma concentração de abrasivo de 100 a 125 é tudo que o relativamente fraco ligante resinóide pode suportar.

Rebolos de CBN eletrodepositados tem uma camada única de grãos abrasivos que são ligados a um núcleo metálico, por num banho de níquel eletrodepositado. A matriz de níquel eletrodepositada promove uma excelente retenção para o abrasivo.

Rebolos com ligante vitrificado, também conhecidos como rebolos com ligante de vitrificado, têm maior força de retenção dos grãos que os resinóides e também permitem ao fabricante variar a saída do cavaco, pela alteração da porosidade e da estrutura do rebolo.

Ligantes vitrificados apresentam boa capacidade de retenção para concentração de 50 a 200 (12,5% a 50% em vol. de abrasivo CBN). A flexibilidade do ligante vitrificado torna possível o condicionamento da superfície de corte do rebolo para se conseguir uma variedade maior de taxas de remoção de material e características de acabamento superficial. Estas são as razões que explicam porque os ligantes vitrificados estão se tornando mais importantes para os abrasivos CBN na retificação.

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 e os valores de espessura equivalente de corte h_{eq} ($= a \cdot v_w / v_s$) serão apresentadas, futuramente, na Tabela 1.

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_{tc} .

Utilizou-se uma retificadora plana, marca Sulmecânica, e 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 largura 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 $6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$, 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 , os resultados obtidos para cada ensaio são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados obtidos com os rebolos de CBN com ligante resinóide (NB126R100BK) e com rebolo convencional de Al_2O_3 (38A46KVS)

Rebolo de CBN - heq = 0,1 μ m							
Ensaio	Ftc média (N)	Ra média (μ m)	G	Qw' ($mm^3/mm.s$)	a (μ m)	Vs (m/s)	Vw (m/s)
1	63,83	0,46	363,80	3,3	100	33	0,033
5	59,35	0,50	109,20	3,3	60	33	0,055
6	60,78	0,52	68,20	3,3	30	33	0,11
Rebolo de CBN - heq = 0,05 μ m							
Ensaio	Ftc média (N)	Ra média (μ m)	G	Qw' ($mm^3/mm.s$)	a (μ m)	Vs (m/s)	Vw (m/s)
3	62,50	0,48	496,10	1,65	50	33	0,033
2	60,49	0,43	272,90	1,65	30	33	0,055
4	57,84	0,41	218,30	1,65	15	33	0,11
Rebolo de Al_2O_3 - heq = 0,1 μ m							
Ensaio	Ftc média (N)	Ra média (μ m)	G	Qw' ($mm^3/mm.s$)	a (μ m)	Vs (m/s)	Vw (m/s)
11	58,77	0,74	12,70	3,3	100	33	0,033
10	61,30	0,72	7,00	3,3	60	33	0,055
12	58,34	0,61	4,80	3,3	30	33	0,11
Rebolo de Al_2O_3 - heq = 0,05 μ m							
Ensaio	Ftc média (N)	Ra média (μ m)	G	Qw' ($mm^3/mm.s$)	a (μ m)	Vs (m/s)	Vw (m/s)
7	60,61	0,64	19,10	1,65	50	33	0,033
9	58,23	0,64	7,70	1,65	30	33	0,055
8	57,37	0,59	3,50	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 distinto quando da análise da rugosidade superficial e da relação G , para os ensaios realizados.

Comparativamente, não houve diferenças entre as duas ferramentas, quando da análise dos resultados obtidos para força tangencial de corte. A tendência de estabilização e manutenção, dentro de uma faixa de pequena amplitude, dos valores de força tangencial de corte para o rebolo de CBN (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, esta ferramenta apresentou 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 $6.000 mm^3/mm$). Isto possibilitou a obtenção de valores de rugosidade R_a inferiores à $0,55 \mu m$, os quais foram menores do que os observados para o rebolo convencional. 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.

Da análise do desempenho do rebolo convencional, este apresenta uma dureza do ligante classificada como mole, a qual é a adequada para a retificação de materiais DTG com rebolos convencionais. Segundo Vieira Jr. (1992), para materiais duros, o rebolo deve ser mole, ao passo que para materiais moles o rebolo deve ser duro. Ao se cortar um material com alto grau de dureza, o desgaste do grão é mais intenso e torna-se desejável a auto-afiação (para que a peça não fique queimada). Além disso, o desgaste do ligante pelo cavaco não é tão evidente,

uma vez que materiais duros normalmente produzem cavacos curtos e quebradiços. Já no corte de um material de baixo grau de dureza, o desgaste do grão abrasivo é mais lento e, portanto, com menor necessidade de novas camadas de grão. Soma-se a isso a possibilidade de ocorrer o surgimento de novas arestas de corte através da fratura de grãos (conforme a friabilidade do grão), e o fato de que o cavaco produzido no corte de materiais moles é, em geral, longo e dúctil, atuando com maior intensidade sobre o ligante (atrato).

Esta opção pela utilização de um rebolo mole permite a manutenção das forças de retificação e dos valores de rugosidade estáveis durante a usinagem, pela liberação e renovação constante de grãos abrasivos, pois aumentos na força de corte, resultado do desgaste dos grãos abrasivos, levam a uma liberação dos mesmos, devido a baixa dureza e capacidade de retenção do ligante do rebolo. Todavia, esta liberação constante dos grãos abrasivos resulta em uma perda diametral do rebolo e, conseqüentemente, uma queda na relação **G**. Caso contrário, se um rebolo com ligante classificado como duro for utilizado, o aumento excessivo da força tangencial de corte pelo desgaste do grão abrasivo e pela maior capacidade de retenção dos grãos desgastados pode levar a um aumento da energia de retificação requerida, aumento da temperatura na região de corte, provável incidência de danos térmicos e aumento da rugosidade superficial, do nível de vibrações, dentre outros.

Devido a estes fatores, a utilização de um rebolo convencional classificado como mole (dureza do ligante mole) permitiu manter os valores de força tangencial de corte estáveis ao longo dos ensaios, valores estes próximos aos obtidos para o rebolo superabrasivo de CBN. Porém, os valores de rugosidade superficial observados foram maiores que os observados para o rebolo de CBN (0,66 e 0,46 μm , respectivamente), devido a renovação constante dos grãos.

Todavia, este comportamento estável dos valores de força e da rugosidade foi acompanhado de uma perda diametral significativa da ferramenta, observando-se valores de desgaste radial da ferramenta de até 1,1mm para esta ferramenta, sendo que o máximo valor observado de desgaste radial para o rebolo de CBN foi de 80 μm . Desta forma, o volume máximo de material removido para os ensaios com rebolo convencional foi de 21.000 mm³ de material removido por ensaio, o que equivale à 4.200mm³/mm, pois a ferramenta, após a remoção deste volume, apresentava-se um desgaste radial acentuado, não sendo possível atingir os 6.000mm³/mm propostos para a realização deste trabalho.

Sendo assim, a diferença mais significativa entre as duas ferramentas, quanto às variáveis de saída, foi verificada quando da análise da relação **G**, sendo que os valores observados foram muito diferentes para as duas ferramentas (vide Tabela 1). Neste caso, o rebolo de CBN com ligante resinóide apresentou, para todos os ensaios realizados, um valor de relação **G** muito superior ao verificado para o rebolo convencional, removendo uma quantidade muito maior de material (6.000 *versus* 4.200mm³/mm, respectivamente). Isto acompanhado de um desgaste radial substancialmente menor. Através do comportamento estável dos valores de força tangencial de corte, e rugosidade e dos valores de **G** observados, conjuntamente com as outras variáveis medidas, pode-se caracterizar uma sub-utilização desta ferramenta nos ensaios realizados. Além disso, grande parte deste desgaste observado para o rebolo de CBN com ligante resinóide é função da operação perfilamento seguido de avivamento. O avivamento resulta em uma maior exposição dos grãos abrasivos, pelo desgaste do ligante. Em contrapartida, diminui-se a força de ancoragem do ligante sobre o grão, podendo ocorrer até o desprendimento dos grãos mal ancorados.

A variação de $h_{eq} = 0,1\mu\text{m}$ para $h_{eq} = 0,05\mu\text{m}$, para um mesmo rebolo, acarretou em uma ligeira melhoria da qualidade superficial da peça, para ambas as ferramentas. Foram obtidos menores valores médios para a rugosidade superficial da peça devido à menor espessura teórica dos cavacos arrancados, resultado da diminuição da taxa de remoção específica de material (de 3,3 para 1,65mm³/mm.s). Houve uma diminuição da rugosidade de 0,49 para 0,44 μm , quando da redução do h_{eq} , considerando-se o rebolo de CBN e de 0,69 para 0,62 μm

quando da utilização do rebolo convencional. Cavacos com menor espessura teórica tendem a ser removidos de forma mais suave, sendo mais facilmente alojados nas porosidades da ferramenta, riscando menos a superfície usinada (King e Hann, 1992). Todavia, a diferença verificada é de pequena ordem de grandeza. A força tangencial de corte apresentou o mesmo comportamento verificado para a rugosidade, quando da redução da taxa de remoção específica, pela diminuição do parâmetro h_{eq} .

Pode-se notar que nos ensaios onde foram utilizados os menores valores da taxa de remoção de material ($Q'_w = 1,65 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, que correspondem aos ensaios com $h_{eq} = 0,05 \text{ }\mu\text{m}$), os resultados de relação G tenderam, na maioria dos casos, sempre a serem maiores do que nos ensaios com maior taxa de remoção de material ($Q'_w = 3,30 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, que correspondem aos ensaios com $h_{eq} = 0,10 \text{ }\mu\text{m}$) (vide Tabela 1). Isto ocorre devido à menor solicitação que o rebolo sofre durante a operação de retificação para taxas menores de remoção de material, fazendo com que os grão abrasivos permaneçam por mais tempo na sua superfície de corte, diminuindo o desgaste radial da ferramenta.

Quando da comparação dos valores de força tangencial de corte e de rugosidade referentes a ensaios realizados dentro de um mesmo grupo de ferramenta e h_{eq} , variando-se a penetração (a) e a velocidade da peça (v_w), pequenas diferenças foram verificadas. Alterações significativas nos valores de força e rugosidade, quando da alteração da penetração de trabalho, mantendo-se h_{eq} constante, são mais pronunciadas em operações de retificação profunda do que em operações de retificação do tipo pendular (König, 1982). Desta forma, pequenas diferenças na qualidade superficial da peça foram verificadas, ocorrendo pequena melhoria da rugosidade superficial quando da diminuição da penetração da peça. Entretanto estas diferenças não se apresentaram de forma significativa.

Conforme apresentado na Tabela 1, tanto para $h_{eq} = 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ para $h_{eq} = 0,10 \text{ }\mu\text{m}$, a diminuição da penetração do rebolo na peça, acompanhado da elevação da velocidade desta, resultou no aumento do desgaste radial da ferramenta, devido ao aumento do número de choques pelo aumento de v_w , ocasionando, conseqüentemente, uma diminuição da relação G . Isto ocorre pois, para um mesmo volume de material removido ($Z_w = 30.000 \text{ mm}^3$ para o rebolo de CBN e de 24.000 mm^3 para o rebolo convencional de Al_2O_3), o qual mantiveram-se constantes para os respectivos ensaios com as duas ferramentas, o aumento do desgaste radial acarreta em um aumento do volume de ferramenta gasta (Z_s). Com a relação G é definida como sendo a razão entre Z_w e Z_s , um aumento de Z_s , mantido Z_w constante, levará a uma diminuição da relação G . Em outras palavras, a ferramenta apresenta um maior desgaste volumétrico para a remoção de um mesmo volume de material.

5. CONCLUSÕES

Da realização desta pesquisa experimental do estudo comparativo do desempenho de um rebolo de CBN com ligante resinóide e de um convencional de Al_2O_3 , 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 e Al_2O_3 no processo de retificação de aços endurecidos.

De uma maneira geral, através da análise dos resultados não foram verificadas diferenças significantes entre os dois tipos de rebolos quanto aos valores de força tangencial de corte. Para as observações referentes a rugosidade superficial, o rebolo de CBN apresentou melhores valores de rugosidade, para as mesmas condições de usinagem.

As diferenças mais pronunciadas foram verificadas quando da análise dos valores de relação G , onde o rebolo de CBN com ligante resinóide apresentou um desempenho muitas

vezes superior que o rebolo convencional (até 62 vezes maior), sendo que a maior diferença observada entre as ferramentas, para uma mesma condição de usinagem (ensaio 8) foi de 6.137%. Ou seja, o rebolo de CBN utilizado permite a remoção de uma mesma quantidade de material que o rebolo convencional, porém com um desgaste de ferramenta muitas vezes inferior ao desgaste verificado no rebolo convencional. Além disso, pôde-se verificar uma sub-utilização da ferramenta superabrasiva de CBN com ligante resinóide pelo comportamento estável dos valores de força tangencial de corte e rugosidade, os quais indicaram que esta possuía ainda uma capacidade de corte elevada, podendo retificar um volume muito maior de material, do que os 6.000mm³/mm propostos (30.000mm³) 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 desgastes 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 destes tipos de aços (DTG, com dureza igual ou superior 60HRC), o rebolo de CBN com ligante resinóide testado, apesar de seu custo inicial de aquisição ser mais elevado do que o de um rebolo convencional, leva grande vantagem em relação ao rebolo convencionais de óxido de alumínio, em relação as variáveis monitoradas para este trabalho e principalmente pelo pequeno desgaste radial da ferramenta, levando a diminuição do número de operações de afiação durante a fabricação de um determinado componente, aliado ao comportamento estável e controlado dos valores de força tangencial de corte e rugosidade superficial, resultado da elevada resistência dos grãos de CBN ao desgaste, o que permite a manutenção da capacidade de corte dos grãos por um período de tempo muito maior, quando comparados com os rebolos convencionais.

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.

REFERÊNCIAS

1. BORAZON CBN - General Electric Company, USA - Superabrasives. Produtos para Retifica. Publicação feita pela empresa GE Company USA, 1998a, 14p.
2. DIAMANTE RVG - General Electric Company, USA - Superabrasives. Produtos para Retifica. Publicação feita pela empresa GE Company USA, 1998b, 41p.
3. FELIPE Jr., J. “Estudo fenomenológico do processo de retificação creep-feed” São Carlos: EESC-USP, 1992. 190p. Dissertação (Mestre em Eng. Mecânica) - ESC-USP, 1992.
4. KRAR, S. F., RATTERMAN, E. Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond. McGraw-Hill, Inc., USA. 1990. 196 p.
5. KLOCKE, F., KÖNIG, W. Appropriate Conditioning Strategies Increase the Performance Capabilities of Vitrified-bond CBN Grinding Wheels. Annals of the CIRP, vol. 44/1/1995, pp. 305-310.
6. MALKIN, S. “Grinding Wheels: Composition and Proprieties”, In: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989. Cap. 2, p.18 a 44.
7. VIEIRA Jr., M. Avaliação da dureza de rebolos em trabalho através do uso da emissão acústica na dressagem. São Carlos, 1996. p.1-35. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.