

Análise do Comportamento da Microestrutura de Materiais Endurecidos Retificados com Rebolos de CBN

*Eduardo Carlos Bianchi, Rodrigo Daun Monici, Eraldo Jannone da Silva,
Paulo Roberto de Aguiar, Ivan De Domenico Valarelli*

*Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica/
Engenharia Elétrica, C.P. 473, 17033-360 Bauru - SP, Brasil*

Received: August 16, 2000; Revised: October 7, 2000

CBN grinding wheels are superabrasive tools, with cutting ability higher than the conventional ones, specially used for grinding DTG (Difficult to Grind) materials. Due to the higher hardness and thermal conductivity of the CBN superabrasive grains, when compared with conventional abrasive grains, the use of CBN tools reduce the grinding temperatures decreasing the probability of workpiece's thermal damage. These properties of CBN grains permit lowering the energy partition because less heat is generated during grinding and much heat is dissipated through the grinding wheel instead of through the workpiece. This paper shows a research about the microstructural changes in the ground subsurface and the differences in the superficial integrity when using two types of superabrasive grinding wheels, manufactured with vitrified and resin bonds, analyzed in different cutting conditions. The ground material was the VC 131 steel, hardened and tempered. Were not observed microstructural changes in the subsurface ground with the two types of tools. As a result, the use of different types of the bonding do not affect the surface integrity neither resulted in microstructural changes, because the maximum temperatures measured in the grinding zone were lower than 125 °C, much less than the required level to cause microstructural changes.

Key words: *microstructure, CBN grinding wheel, resin bond, vitrified bond*

1. Introdução

Segundo Vieira *et al.* (1999), o processo de retificação tem entre os seus objetivos melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade superficial dos componentes usinados, sejam eles tratados termicamente ou não. Entretanto, excessivas temperaturas geradas durante o processo de retificação podem causar danos térmicos aos componentes. Segundo Shaw (1994), os danos na camada superficial da peça podem ser identificados como consequência da realização de operações de retificação sem controle, ou mal executadas. A escolha incorreta do par fluido-ferramenta, a utilização de condições de usinagem e de afiação da ferramenta inadequados e uma lubrificação/refrigeração não eficiente podem afetar, negativamente, as propriedades mecânicas do componente usinado, pela diminuição de sua resistência à fadiga e ao desgaste. Isto deve-se à incidência dos danos térmicos oriundos do processo de retificação, os quais provocam alterações microestruturais, pela introdução de uma zona termicamente afetada pelo calor, levando ao surgimento de tensões residuais de tração. Além

disso, a qualidade superficial do componente pode ser afetada pelo surgimento de trincas e a ocorrência de queima superficial, decorrentes das elevadas temperaturas na região de corte.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo experimental e comparativo das alterações microestruturais e da qualidade superficial, quando da retificação do aço VC131, temperado e revenido, decorrentes da utilização de rebolos de CBN fabricados com os ligantes resínico e vitrificado, submetidos à diversas condições de usinagem, através da alteração de parâmetros de entrada, tais como: penetração do rebolo na peça a [μm], velocidade da peça v_w [m/s] e velocidade de corte v_s [m/s]. Para tanto, as variáveis de saída monitoradas para a análise dos resultados serão: rugosidade superficial R_a [μm], relação G , microdureza Vickers, análise metalográfica da subsuperfície e avaliação do acabamento superficial utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2. Principais Danos Térmicos Decorrentes do Processo de Retificação

2.1. Queima superficial da peça

Um dos tipos mais comuns de danos térmicos é a queima da peça. Quando a queima superficial da peça se inicia, existe uma tendência do crescimento da adesão de partículas metálicas aos grãos abrasivos do rebolo, tendo como consequência, o aumento das forças de retificação, a deterioração da qualidade superficial da peça, podendo levar ao aumento da perda diametral do rebolo, fazendo com que seu desgaste volumétrico aumente. Segundo Malkin (1989) a queima superficial da peça influencia a microestrutura do material retificado.

Através da realização de medições de microdureza na subsuperfície de aços temperados verificou-se que a queima superficial induzida pelo processo de retificação é acompanhada por um processo de re-austenitização do material. Para aços temperados retificados sem queima superficial existe geralmente um amolecimento do material próximo à superfície, por terem sido atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. Com a queima superficial ocorre a re-têmpera do material, a qual é consequência da re-austenitização do mesmo, seguida da formação de martensita não-revenida. Esta pode ser constatada através de análise metalográfica, resultando no aumento da microdureza superficial. Evidências metalúrgicas e medições de microdureza indicam que o limite para início da queima visível coincide com o valor limite de temperatura para início da austenitização do material. Segundo Malkin (1989), a queima superficial da peça, observada em aços para rolamentos, traz um aspecto adverso quanto ao limite de resistência à fadiga e consequente diminuição do número de ciclos destes aços após a retificação. Este comportamento é atribuído à formação da martensita não-revenida, gerada no processo de queima superficial, em função do aquecimento à temperatura de austenitização e resfriamento rápido sem posterior alívio de tensões (revenimento).

2.2. Tensões residuais

O processo de retificação invariavelmente leva à tensões residuais nas adjacências da superfície acabada, as quais podem afetar o comportamento mecânico do material. As tensões residuais são induzidas por deformações plásticas não-uniformes nas proximidades da superfície da peça. Interações mecânicas dos grãos abrasivos com a peça resultam, predominantemente, em tensões residuais de compressão, resultado de deslocamentos plásticos localizados, comparado ao processo de “shot peening”.

Segundo Malkin (1989), as tensões residuais de tração são causadas, principalmente, por tensões induzidas termicamente e deformações associadas com as temperaturas de

retificação e o seu gradiente da superfície ao interior da peça. A formação de tensões termicamente induzidas é basicamente acompanhada por transformações de fases sólidas, as quais podem ocorrer durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, pois estas resultam em variações volumétricas.

Tensões residuais de compressão são consideradas benéficas nas propriedades mecânicas dos materiais, aumentando a resistência à fadiga, enquanto as tensões de tração são prejudiciais quanto à resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste (abrasão à altas temperaturas). De modo geral, deseja-se controlar a indução ou a magnitude das tensões residuais através da adequação das condições usinagem. Entretanto, a demanda por maiores taxas de remoção resultam em maiores tensões residuais de tração. Para a obtenção de tensões residuais de compressão é necessário a adoção de taxas de remoção inferiores. Entretanto, a introdução de rebolos de CBN, substituindo os rebolos de óxido de alumínio tem permitido a obtenção de tensões residuais de compressão, ao invés de tensões residuais de tração, quando, por exemplo, da retificação de aços para a confecção das pistas de mancais de rolamentos. Isto deve-se ao fato da redução das temperaturas geradas na retificação quando da utilização de rebolos de CBN, em função das menores energias específicas geradas com estes rebolos e pela alta condutibilidade térmica dos grãos de CBN, a qual permite que uma maior parcela do calor gerado escoe pela ferramenta, diminuindo a partição de energia introduzida na peça (Kohli, Guo e Malkin, 1995).

2.3. Trincas

Segundo Johnson (sd), as trincas superficiais são resultado do excessivo aquecimento durante a retificação. A severidade das trincas pode variar, sendo que as mesmas podem não ser visíveis, imediatamente após a retificação, tornando-se aparentes algum tempo depois. Em algumas superfícies submetidas à elevadas tensões residuais de tração, trincas irão formar-se abaixo da superfície, não sendo visíveis, até que o topo das mesmas seja atacado eletricamente. As trincas reduzem o limite de resistência à fadiga do material, ao mesmo tempo que aumenta a susceptibilidade da superfície do material sofrer ataque por processos corrosivos.

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: rugosidade superficial da peça, relação G , microdureza Vickers e análise da integridade superficial da peça através de MEV. As condições de usinagem serão apresentadas, adiante, na Tabela 1.

O material utilizado para a realização dos ensaios foi o aço VC131, 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 foi fixado sobre a mesa da máquina retificadora e posteriormente foram acertadas todas as condições de usinagem (velocidade de corte, velocidade da mesa e penetração do rebolo na peça). Posteriormente deu-se início aos ensaios, medindo-se a rugosidade superficial da peça e o desgaste diametral do rebolo no final de cada ensaio. Cada ensaio foi finalizado quando o volume específico de material removido atingiu $6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$, o que aconteceu, em média, após 9 h ininterruptas de ensaio. Os rebolos utilizados foram fabricados com a mesma especificação, diferindo apenas quanto ao tipo de ligante empregado (resinóide e vitrificado), ambos com grãos de CBN de mesma qualidade.

A rugosidade superficial (R_a) dos corpos de prova foi medida periodicamente (a cada número pré-determinado de passadas do rebolo sobre a peça, dependendo da condição de usinagem) em três posições distintas do corpo de prova (laterais e centro) e quatro vezes consecutivas em cada posição. Posteriormente foi calculada 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

serviu como referência para a medição da perda diametral do rebolo. No final de cada ensaio o perfil geométrico do rebolo foi marcado sobre uma chapa metálica (aço com baixo teor de carbono) para posterior medição do desgaste do rebolo. Como o volume de material removido foi constante para cada ensaio, a determinação da relação G foi direta.

Durante, e após os ensaios, amostras do material retificado foram removidas para posterior análise da integridade superficial através de MEV, da microdureza Vickers e das verificações de alteração na microestrutura do material por procedimentos de análise metalográfica.

4. Resultados e Discussão

4.1 Resultados de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de rugosidade

A Microscopia Eletrônica de Varredura consiste numa técnica capaz de analisar o estado de superfícies, permitindo uma visão geral e a noção de profundidade da mesma. Neste trabalho utilizou-se essa técnica para analisar superfícies de aço retificado (VC131, temperado e revenido), em diversas condições de usinagem, como mostra a Tabela 1. Esta tabela ainda contém os valores de rugosidade superficial da peça, obtidos para cada ensaio.

Table 1. Condições de usinagem e valores de rugosidade R_a dos rebolos de CBN com ligantes vitrificado e resinóide.

| Ligante vitrificado $h_{eq} = 0,1 \mu\text{m}$ | | | | | | |
|---|--------------------------|-------------------------------|-------|---------------------|-------------|-------------|
| Ensaio | Microdureza Vickers (HV) | R_a média (μm) | G | a (μm) | v_s (m/s) | v_w (m/s) |
| 1 | 716,7 | 0,91 | 159,7 | 100 | 33 | 0,033 |
| 5 | NR | 0,89 | 154,6 | 60 | 33 | 0,055 |
| 6 | NR | 0,79 | 150,2 | 30 | 33 | 0,11 |
| Ligante vitrificado $h_{eq} = 0,05 \mu\text{m}$ | | | | | | |
| Ensaio | Microdureza Vickers (HV) | R_a média (μm) | G | a (μm) | v_s (m/s) | v_w (m/s) |
| 3 | NR | 0,59 | 233,2 | 50 | 33 | 0,033 |
| 2 | NR | 0,60 | 226,6 | 30 | 33 | 0,055 |
| 4 | 719,2 | 0,54 | 220,1 | 15 | 33 | 0,11 |
| Ligante resinóide $h_{eq} = 0,1 \mu\text{m}$ | | | | | | |
| Ensaio | Microdureza Vickers (HV) | R_a média (μm) | G | a (μm) | v_s (m/s) | v_w (m/s) |
| 11 | 686,4 | 0,73 | 137,5 | 100 | 33 | 0,033 |
| 10 | NR | 0,71 | 128,3 | 60 | 33 | 0,055 |
| 12 | NR | 0,70 | 117,6 | 30 | 33 | 0,11 |
| Ligante resinóide $h_{eq} = 0,05 \mu\text{m}$ | | | | | | |
| Ensaio | Microdureza Vickers | R_a média (μm) | G | a (μm) | v_s (m/s) | v_w (m/s) |
| 7 | NR | 0,61 | 170,6 | 50 | 33 | 0,033 |
| 9 | NR | 0,67 | 157,6 | 30 | 33 | 0,055 |
| 8 | 695,6 | 0,59 | 144,9 | 15 | 33 | 0,11 |

Obs.: NR significa teste de microdureza não realizado para ensaio.

A análise da integridade superficial utilizando-se a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi feita nas dependências do Campus da UNESP de Botucatu, no qual utilizou-se um Microscópio de Varredura Eletrônica, marca PHILIPS, modelo SEM 515, com um aumento de aproximadamente 1200 vezes, para todas as amostras analisadas e uma tensão de 20 kV.

As Figs. 1 a 8 apresentam a visualização da superfície usinada, após a realização dos ensaios 1, 11, 6, 12, para $h_{eq} = 0,1 \mu\text{m}$, utilizando-se o rebolo com ligante resinóide e vitrificado. Também são apresentados os resultados dos ensaios 3, 7, 4, 8 para $h_{eq} = 0,05 \mu\text{m}$, utilizando-se o rebolo com ligante resinóide e vitrificado. As condições de usinagem são apresentadas na Tabela 1. Dispostas lado a lado, as figuras apresentam a visualização da mais afetada região da amostra analisada.

Através da visualização geral das figuras apresentadas (1 a 8), constatou-se a não ocorrência de danos térmicos, trincas e outros danos que comprometessem, de forma significativa, a integridade superficial das peças retificadas. Os valores máximos de temperatura observados nos ensaios foram inferiores a $125 \text{ }^\circ\text{C}$, para a operação de retificação com refrigeração. Este valores foram monitorados utilizando-se a técnica dos termopares embutidos, estando os mesmos dispostos espaçados de 5 mm, tomando-se como referência a superfície da peça para a colocação do primeiro termopar. Desta forma, ao retificar-se o primeiro termopar (após a remoção de 5 mm, na altura de material), foram removidos os primeiros $1200 \text{ mm}^3/\text{mm}$ de material e assim, sucessivamente, até atingir-se os $6.000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ de material removido, a qual é a condição de fim de ensaio.

É possível ainda verificar o caminho percorrido pelos grãos abrasivos, através da existência de sulcos originários

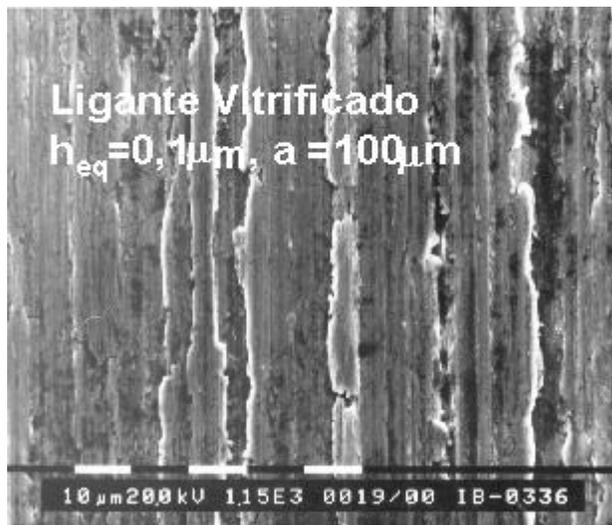


Figura 1. Ensaio 1.

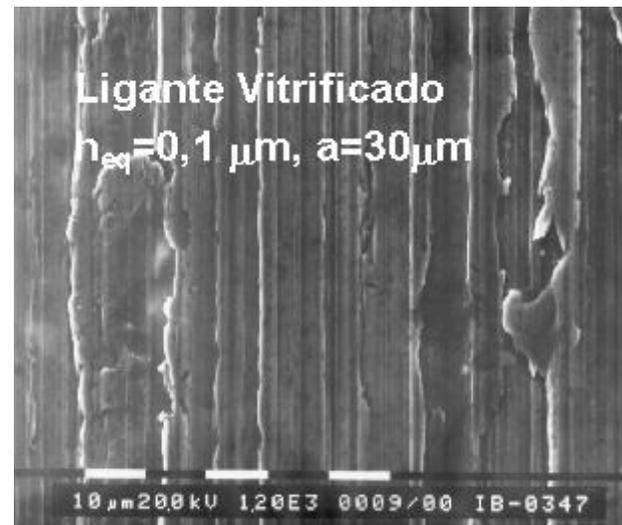


Figura 3. Ensaio 3.

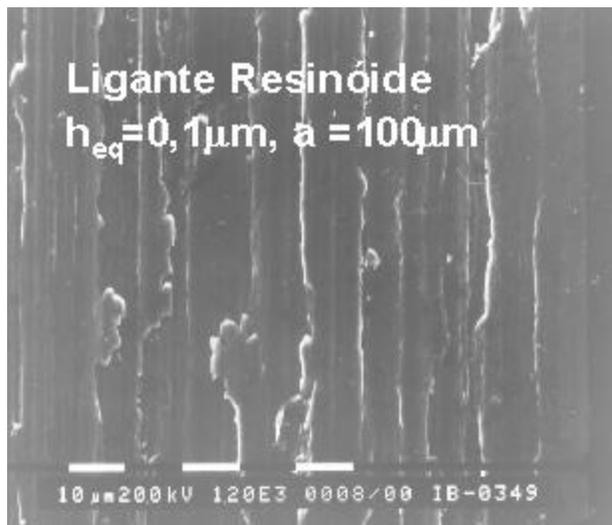


Figura 2. Ensaio 2.

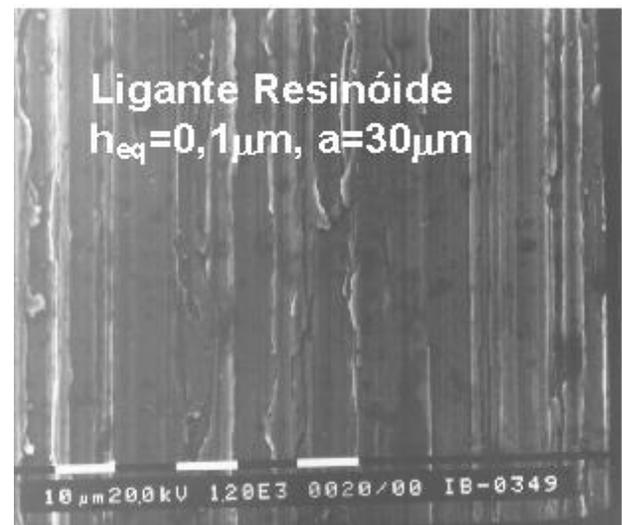


Figura 4. Ensaio 4.

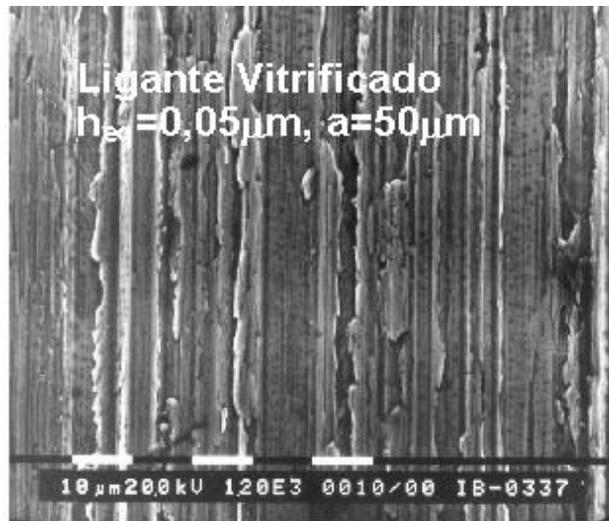


Figura 5. Ensaio 5.

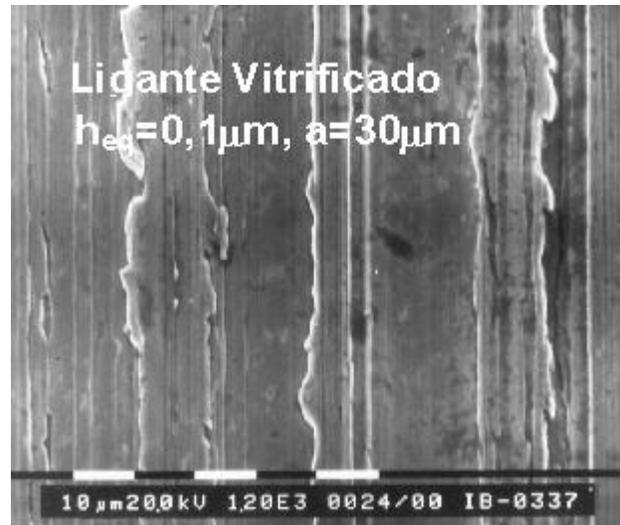


Figura 7. Ensaio 7.

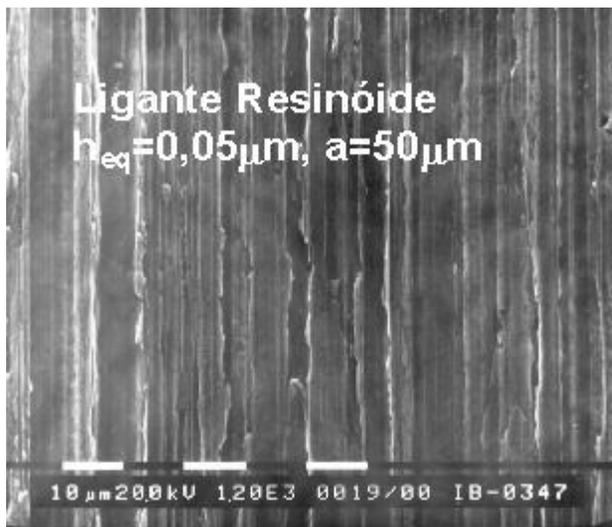


Figura 6. Ensaio 6.

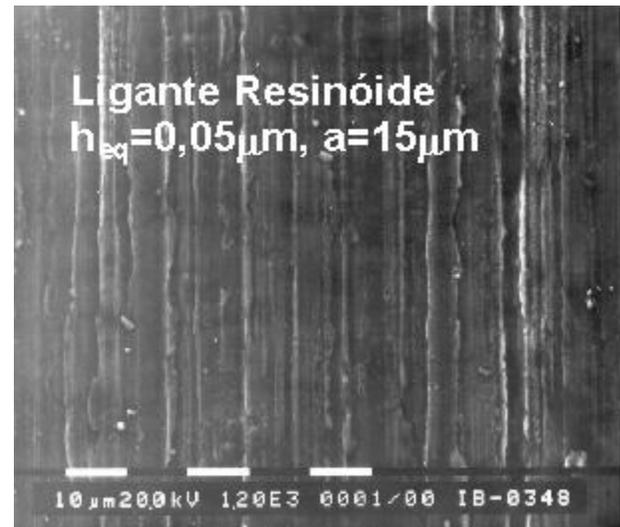


Figura 8. Ensaio 8.

do processo de retificação, presentes nas amostras. Estes sulcos são oriundos da penetração do grão abrasivo na peça, mais precisamente, de um dos mecanismos de remoção de material característico do processo, o “plowing”. Segundo (Malkin, 1989) o “plowing”, deformação plástica sem remoção de material, é associado ao escoamento lateral do material, em forma de “cristas”, ao longo do caminho de corte do grão abrasivo, ainda incluindo a deformação plástica do material passando por baixo do gume abrasivo. O corte efetivo de material só é realizado quando o grão abrasivo atingir uma profundidade de corte crítica h' . Os fatores que afetam a magnitude de h' incluem: o desgaste de área de topo de grão do rebolo (seu grau de afiação), a orientação e ângulo de incidência do grão e o coeficiente de fricção (atrito). Após o corte se iniciar, o “plowing” pode ainda persistir, com alguma parcela de material ainda

escoando em forma de cristas, ao invés de ser removido em forma de cavaco.

Desta forma, de uma maneira geral, as superfícies usinadas com o rebolo de CBN com ligante vitrificado apresentaram, quando comparados com as retificadas com o rebolo com ligante resinóide, sulcos e escoamentos laterais de material ligeiramente mais pronunciados, devido à maior capacidade de retenção do grão abrasivo, o que gera um aumento na área desgastada do topo de grão, o que pode ocasionar uma maior incidência do mecanismo de “plowing”, pelo aumento da profundidade de corte crítica h' necessária para início do corte propriamente dito, decorrente do maior desgaste de topo de grão deste rebolo (Malkin, 1989). Desta forma, mais material é escoado plasticamente para as laterais, aumentando os esforços de corte e a rugosidade superficial da peça usinada. Estes aumentos foram constatados, porém as diferenças verifi-

casas são de pequena ordem de grandeza, fato este que pode ser verificado pelo pequeno desgaste radial de ambas as ferramentas utilizadas, sendo que o maior desgaste do rebolo com ligante resinóide pode ser atribuído à própria operação de avivamento. Em geral, ambos os rebolos apresentaram micro-desgaste e micro-fratura em pequena ordem de grandeza. Entretanto, uma pequena diferença foi verificada para os rebolos com ligante vitrificado, já que este tipo de ligante apresenta maior capacidade de retenção do grão, podendo levar a um micro-desgaste mais pronunciado.

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 devido à menor espessura teórica dos cavacos arrancados, resultado da diminuição da taxa de remoção específica de material (de 3,3 para 1,65 $\text{mm}^3/\text{mm.s}$). 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. Todos os ensaios realizados apresentavam apenas um sentido de retificação (discordante), sendo que durante o retorno do rebolo para sua posição inicial, o material não foi removido.

Quando da comparação das superfícies usinadas 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 na qualidade superficial foram verificadas. Comparando-se o ensaio 1 com o ensaio 6, da Tabela 1, as condições de usinagem do ensaio 1 são, relativamente, mais severas quando comparado com as condições de usinagem do ensaio 6. Desta forma, no ensaio 1 foi observado um valor de rugosidade superficial, maior que para o ensaio 6, porém, esta diferença apresentou uma pequena ordem de grandeza. Alterações significativas do valor de rugosidade, quando da variação da penetração de trabalho, mantendo-se o valor de 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 quando da diminuição da penetração da peça, conforme verificou-se através da análise comparativa entre os ensaios 1 e 6 (Figs. 1 e 6, respectivamente). Entretanto estas diferenças não se apresentaram de forma significativa. Este mesmo comportamento foi observado para as comparações entre os ensaios 3 e 4, 11 e 12, e 7 e 8.

4.2. Resultados de microdureza Vickers

A Fig. 9 apresenta os valores de microdureza Vickers, utilizando-se um Microdurômetro, marca BUEHLER, modelo 1600-6300, realizada em amostras colhidas do

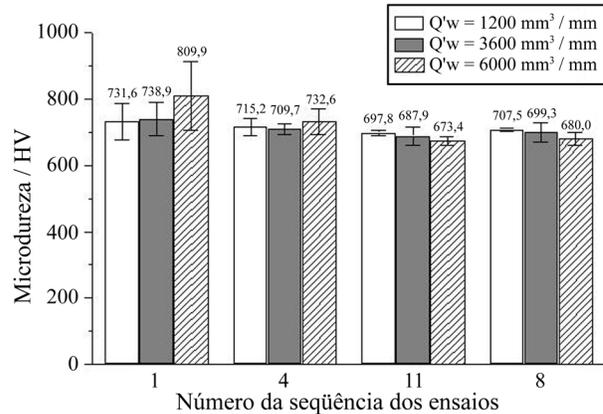


Figura 9. Valores de microdureza Vickers, realizada em amostras colhidas do material retificado, à valores de volume removido pré-estabelecidos, para os ensaios 1, 4, 8 e 11.

material retificado com valores de volume removido pré-estabelecidos, para os ensaios 1, 4, 8 e 11, cujas condições de usinagem e o tipo de ligante utilizado são apresentadas na Tabela 1.

Através da análise conjunta da superfície retificada, das inspeções metalográficas (Figs. 10 a 13) e dos valores de microdureza (Tabela 1) pode-se concluir que ambas ferramentas não afetaram, de forma significativa, a qualidade superficial da peça, nem provocaram alterações da microestrutura do material, não havendo alterações significativas dos valores de microdureza quando da variação, do h_{eq} , para uma mesma ferramenta ou da variação da ferramenta para um mesmo h_{eq} . Isto já era esperado, devido ao fato das baixas temperaturas verificadas e devido à excelente manutenção da capacidade de corte destas ferramentas.

4.3. Resultados de metalografia

A seguir, nas Figs. 10 a 13 são apresentados os resultados referentes às observações de alterações microestruturais na superfície retificada. Para a verificação das amostras do aço VC131 foi utilizada a prática metalográfica convencional e ataque químico com Nital 2%. A ampliação utilizada foi de 750 vezes.

A Fig. 10 apresenta a observação da microestrutura da superfície do aço VC131, temperado e revenido, antes da realização da operação de retificação. A observação desta microestrutura na Fig. 10 apresenta uma estrutura de martensita revenida, caracterizada pela área escura, com pontos negros, apresentado ainda carbeto precipitados, caracterizados pelas regiões claras na referida figura.

Já as Figs. 11 a 13 apresentam a microestrutura do material, através da observação da superfície usinada, pela análise de amostras retiradas em determinados volumes específicos de material removido (Z_w) para o ensaio 1.

Nestas figuras pode-se observar a mesma microestrutura presente na Fig. 10, ou seja uma estrutura de martensita

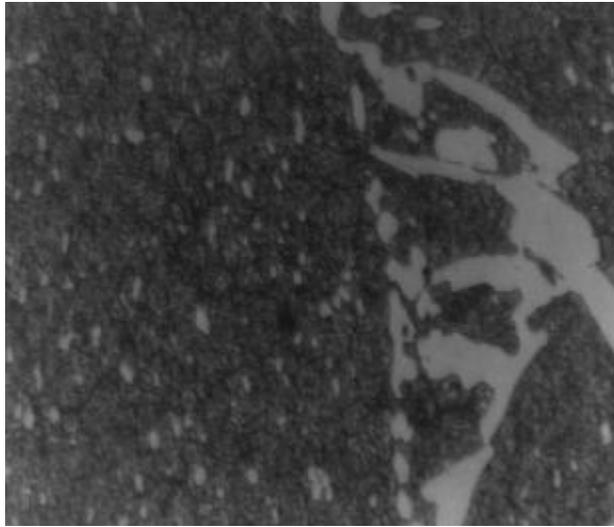


Figura 10. Antes do ensaio 1.

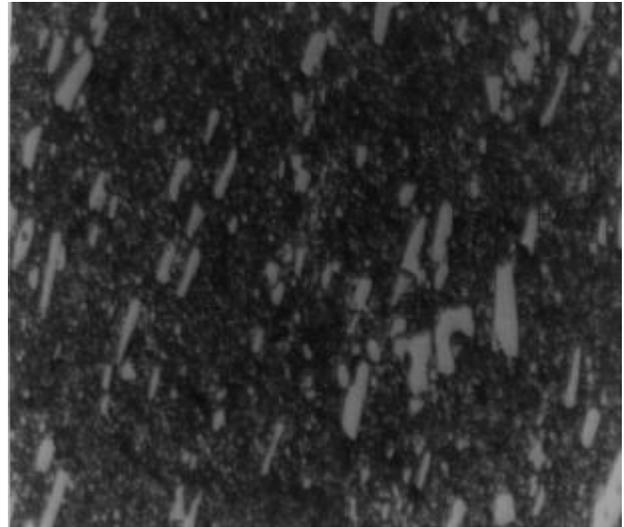


Figura 12. Ensaio 1; $Z_w = 3600 \text{ mm}^3/\text{mm}$.

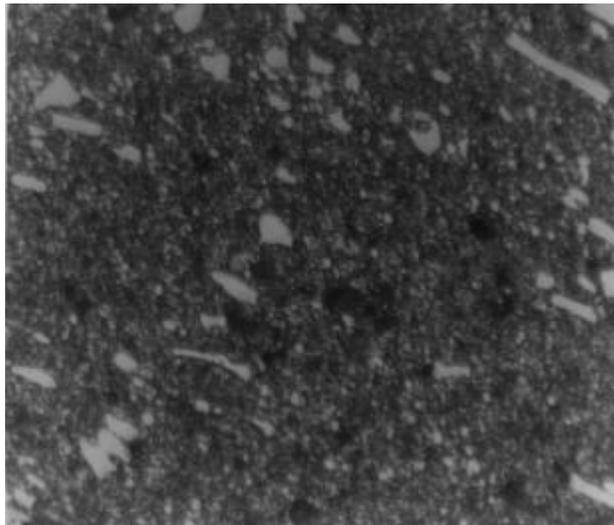


Figura 11. Ensaio 1; $Z_w = 1200 \text{ mm}^3/\text{mm}$.

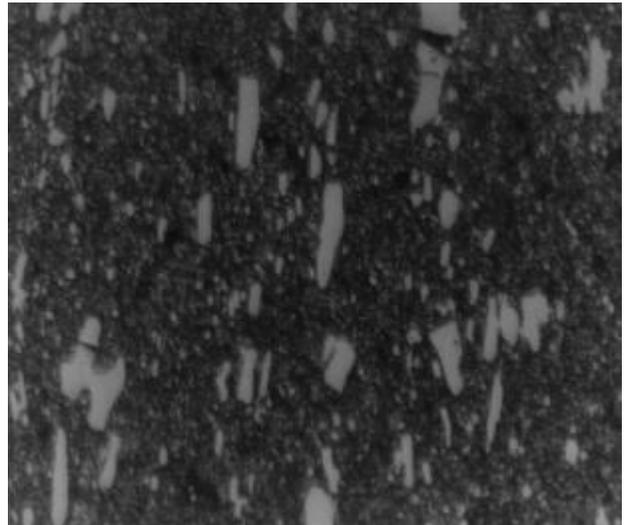


Figura 13. Ensaio 1; $Z_w = 6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$.

revenida, apresentando ainda carbeto precipitados, caracterizados pelas regiões escuras e pelos pontos claros, respectivamente. Não observou-se alterações da microestrutura do material usinado no decorrer do ensaio. Este fato já era esperado pois a ordem de grandeza das temperaturas observadas (inferiores à $125 \text{ }^\circ\text{C}$) não são suficientes para garantir alterações microestruturais do material. Além disso, nas observações de MEV e visuais não foram observados a incidência de danos térmicos. Some-se a isto, os resultados obtidos para a microdureza Vickers, onde não foram verificadas alterações significativas dos valores de microdureza quando da variação, do h_{eq} , para uma mesma ferramenta ou da variação da ferramenta para um mesmo h_{eq} , permitem também concluir sobre a não ocorrência de alterações microestruturais do material usinado.

5. Conclusões

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

A metodologia adotada para a verificação do desempenho 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 análises dos resultados para as variáveis de saída monitoradas, praticamente não foram verificadas diferenças significantes entre os dois tipos de rebolos testados (um rebole de CBN com ligante resinóide e outro com ligante vitrificado). Para as obser-

vações referentes a rugosidade, MEV e análises de micrografia realizadas, o tipo de ligante não influenciou, diretamente, as pequenas alterações verificadas (quando houveram) nestas variáveis. A superfície retificada obtida não apresentou danos consideráveis, conforme observações com MEV, com valores de rugosidade inferiores a 1 μm e com comportamento estável ao longo dos ensaios.

Com temperaturas máximas inferiores à 125 °C, como era de se esperar, não houve a incidência de danos térmicos, nem alterações microestruturais. Estes resultados devem-se ao fato da excelente capacidade de corte dos rebolos de CBN, da maior condutibilidade térmica de seus grãos, quando comparados com os convencionais. Menores temperaturas máximas na região de corte e menores gradientes térmicos tendem a diminuir a incidência de tensões residuais de tração, melhorando a resistência à fadiga do material usinado.

As diferenças mais pronunciadas foram verificadas quando da análise dos valores de relação **G**, onde o reboło com ligante vitrificado apresentou um melhor desempenho que o ligante resinóide. Estas seriam mais pronunciadas se o reboło com ligante vitrificado fosse fabricado com concentração entre 150 e 200. Desta forma esta ferramenta seria então a mais adequada para a retificação deste tipo de aço (VC131). A sub-utilização das ferramentas abrasivas testadas foi caracterizada pelo comportamento estável dos valores de 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 mm³/mm propostos (30.000 mm³) para a realização deste trabalho, sem a necessidade de uma nova operação de afiação. 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 às variáveis monitoradas para este trabalho, pois a excelente capacidade de corte destas ferramentas tendem a diminuir os esforços de corte, as temperaturas de retificação, gerando superfícies com melhor integridade super-

ficial, menor rugosidade e com a diminuição da incidência de danos térmicos decorrentes do processo.

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. e De Beers do Brasil Ltda. pelo subsídio na aquisição dos rebolos e pelo apoio técnico.

Referências

1. Johnson, G.A. "Beneficial Compressive Residual Stress Resulting from CBN Grinding" *SME Second International Grinding Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, p. 1-12.
2. King, R.I.; Hann, R.S. "Handbook of Modern Grinding Technology." 3 ed. cap. 6, p. 119-167, 1992.
3. Kohli S.P., Guo, C.; Malkin, S. "Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels". *ASME Journal of Engineering for Industry*, v. 117, p. 160-168, 1995.
4. König, W. *Fertigungsverfahren Bände 2. Schleifen*, Hohnen, Lappen. VDI Verlag GMBH Rudeldorf, 1972.
5. Malkin, S. "Grinding Mechanisms" e "Grinding Temperatures and Thermal Damage", In: Malkin, S. *Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives*. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989. Cap. 5 e 6, p.108-171.
6. Vieira JR., M.; Libardi, R.; Cancilieri, H.A.; Lima A. "Como o Calor pode Afetar a Integridade Superficial das Peças". *Revista Máquinas e Metais*, fevereiro de 1999, p. 28-36.
7. Shaw, M. "Heat-affect Zones in Grinding Steels". *Annals of the CIRP*, v 43/1, 1994, p. 279-282.

The publication costs of this article were covered by FAPESP