

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RETIFICAÇÃO DE AÇOS ENDURECIDOS, COM REBOLOS SUPERABRASIVOS DE CBN, E SUA INFLUÊNCIA NA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO MATERIAL

Ivan De Domenico Valarelli

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia/ Campus de Bauru

Departamento de Engenharia Mecânica, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru/SP, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta para a análise da influência da temperatura na retificação de aços endurecidos, utilizando rebolos superabrasivos de CBN (nitreto de boro cúbico) com ligantes resinóide e vitrificado, submetidos a diversas condições de usinagem, tendo como objetivo a análise da integridade superficial do material, durante a vida útil da ferramenta abrasiva. Foram determinadas as variações da rugosidade média superficial da peça, microdureza Vickers e média da temperatura máxima na superfície retificada da peça, em função do volume específico de material removido para dois valores de taxa de remoção de material. Para ambas ferramentas, através da análise dos resultados pós-retificação, não foram verificadas alterações significativas na microestrutura do material. Também o tipo de ligante não influenciou nos resultados obtidos, não sendo possível detectar diferenças significativas para a qualidade superficial nem para detectar alterações microestruturais, pois as temperaturas máximas verificadas, ao longo dos ensaios e na região de corte, não ultrapassaram os 125° C, não sendo então atingidas as temperaturas requeridas para tais alterações.

PALAVRAS-CHAVE: Rebolo CBN, Ligantes, Temperaturas de Retificação.

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação tem entre os seus objetivos melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade superficial dos componentes usinados, sejam elas tratadas termicamente ou não. Entretanto, excessivas temperaturas geradas durante o processo de retificação podem causar danos térmicos às peças. 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 elaboradas. A escolha incorreta do par fluido-ferramenta, a utilização de condições de usinagem e de afiação da ferramenta inadequados e uma lubrificação não eficiente podem afetar, negativamente, as propriedades mecânicas do componente usinado, pela diminuição de sua resistência à fadiga e ao desgaste. Isto deve-se a 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 estudar a influência da geração de calor e, conseqüentemente, da variação da temperatura na retificação de aços endurecidos, com dureza média de 60 HRc com rebolos superabrasivos de CBN, fabricados com dois tipos distintos de ligantes (resinóide e vitrificado) submetidos a duas taxas de remoção de material. A integridade superficial do material foi analisada durante os ensaios de microdureza Vickers e metalografia.

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 nos grãos abrasivos do rebolo, tendo como conseqüência, 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 na alteração da 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 de um processo de re-austenitização do material. Para aços temperados retificados sem queima superficial existe geralmente um amolecimento do material próximo à superfície, pelo fato de terem sido atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. Com a queima superficial ocorre a re-têmpera do material, a qual é conseqüência 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 conseqüente diminuição do número de ciclos destes aços após a retificação. Este comportamento é atribuído a 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 pelas 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 de usinagem. Entretanto, a demanda de 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 4 ensaios laboratoriais variando-se as condições de usinagem: velocidade de corte (v_s), velocidade da mesa (v_w) e penetração do rebolo (a) e os parâmetros de saída medidos: rugosidade média superficial da peça, microdureza Vickers, temperatura média na superfície da peça, utilizando termopares, análise da integridade superficial da peça e metalografia.

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 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 (v_s , v_w , a). Posteriormente dava-se início aos ensaios, medindo-se a 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 média (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 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 (relação entre o volume de material removido e o volume de rebolo gasto) era direta.

Durante e após os ensaios, amostras do material retificado eram removidas para posterior análise da integridade superficial através da microdureza Vickers e por procedimentos metalográficos de análise.

As temperaturas foram obtidas utilizando-se de 05 termopares, calibrados e embutidos na peça ensaiada. Desta forma, ao retificar-se o primeiro termopar (após a remoção de 5 mm, na altura do material), seriam removidos os primeiros 1200 mm³/mm de material e assim sucessivamente, até atingir os 6000 mm³/mm de material removido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Valores de temperatura obtidos na região de corte

Os resultados obtidos referentes ao comportamento das temperaturas de retificação ao longo dos ensaios é apresentado em forma de gráficos, relacionando as máximas temperaturas obtidas em função do volume específico de material removido ao longo do ensaio. Cada gráfico apresenta um conjunto de cinco curvas distintas. Cada uma das curvas corresponde a um dos cinco termopares embutidos na peça, espaçados de 5 mm, tomando-se como referência a superfície da peça para a colocação do primeiro termopar. Sendo assim foi possível monitorar a temperatura de retificação na região de corte (quando da retificação efetiva do termopar) e a propagação do aquecimento da zona retificada para o interior da peça, em função da colocação dos termopares ao longo da altura dos corpos de provas, os quais permanecem monitorando as temperaturas propagadas até serem efetivamente retificados.

Nas figuras 1 e 2, são apresentados os resultados de temperatura obtidos com o rebolo fabricado com o ligante vitrificado e nas figuras 3 e 4 com o ligante resinóide, para duas condições de usinagem.

Conforme pode ser observado da análise dessas figuras, os máximos valores medidos não foram superiores à 125°C. Isto deve-se ao fato dos rebolos de CBN apresentarem uma menor partição da energia gerada para a peça, segundo estudos realizados por Kohli, Guo e Malkin (1995). A análise dos resultados obtidos indicam que a menor partição de energia introduzida pelos rebolos de CBN à peça deve-se ao fato de que uma porção significativa do calor gerado durante o processo é transportada para a ferramenta, ao invés de ser transportada para a peça, devido a maior condutibilidade térmica dos grãos abrasivos de CBN, a qual é muito maior do que a dos grãos de óxido de alumínio. A menor partição de energia, quando da utilização de rebolos de CBN permite uma diminuição das temperaturas na região de corte. Desta forma, os resultados obtidos se aproximam dos resultados verificados por Kohli, Guo e Malkin (1995), aproximadamente 400°C quando utilizados rebolos de óxido de alumínio e 100°C para rebolos de CBN. Isto tende a proporcionar uma menor possibilidade de indução de danos térmicos à peça.

Conforme mostrado na tabela 1, em todos os casos pode-se notar que, com a aumento da penetração (a), do rebolo nos corpos de provas, houve elevação dos valores médios da temperatura máxima. Isto ocorre pelo aumento da densidade de grãos ativos na região de contato entre o rebolo e a peça, devido ao aumento do comprimento de contato. Logo, cada grão abrasivo passa a remover um volume menor de material. Entretanto o somatório das perdas dissipativas, devido ao atrito e riscamento dos grãos abrasivos sobre a peça é maior, e

proporcional ao desgaste da superfície de corte do rebolo, pelo aumento das áreas no topo dos grãos (pelo desgaste abrasivo). O aumento das parcelas de atrito e riscamento contribuiu para a elevação dos valores de temperatura observados. Entretanto, as diferenças verificadas são praticamente desprezíveis.

Tabela 1. Condições de usinagem, valores de microdureza Vickers, rugosidade média e valores médios da temperatura máxima com rebolos de CBN com ligantes vitrificado e resinóide.

Ligante vitrificado heq = 0,1 μm						
Ensaio	Microdureza Vickers (HV)	Ra média (μm)	Média de T _{máx} (°C)	a (μm)	vs (m/s)	vw (m/s)
1	716,7	0,91	80	100	33	0,033
Ligante vitrificado heq = 0,05 μm						
Ensaio	Microdureza Vickers (HV)	Ra média (μm)	Média de T _{máx} (°C)	a (μm)	vs (m/s)	vw (m/s)
2	719,2	0,54	57	15	33	0,11
Ligante resinóide heq = 0,1 μm						
Ensaio	Microdureza Vickers (HV)	Ra média (μm)	Média de T _{máx} (°C)	a (μm)	vs (m/s)	vw (m/s)
3	686,4	0,73	62	100	33	0,033
Ligante resinóide heq = 0,05 μm						
Ensaio	Microdureza Vickers	Ra média (μm)	Média de T _{máx} (°C)	a (μm)	vs (m/s)	vw (m/s)
4	695,6	0,59	42	15	33	0,11

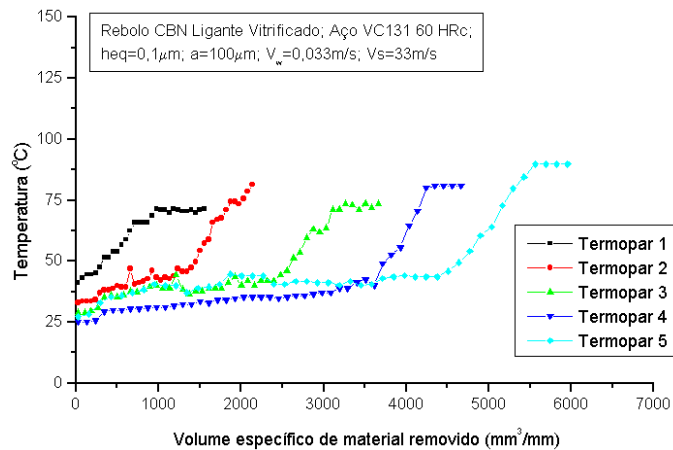


Figura 1. Resultado obtido com o rebolo fabricado com o ligante vitrificado utilizado como $h_{eq} = 50 \mu m$

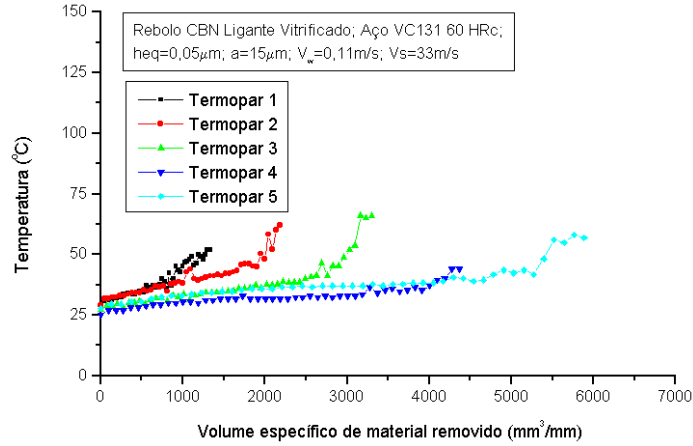


Figura 2. Resultado obtido com o rebolo fabricado com o ligante vitrificado utilizado com $a = 100 \mu\text{m}$ para $h_{eq} = 0,1 \mu\text{m}$

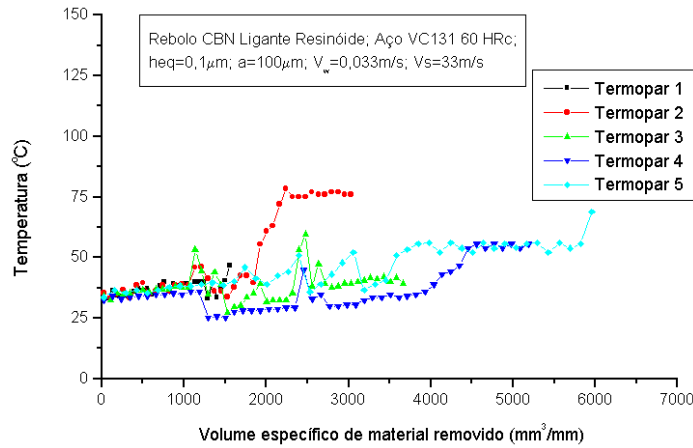


Figura 3. Resultado obtido com o rebolo fabricado com o ligante resinóide utilizado com $a = 100 \mu\text{m}$ para $h_{eq} = 0,1 \mu\text{m}$

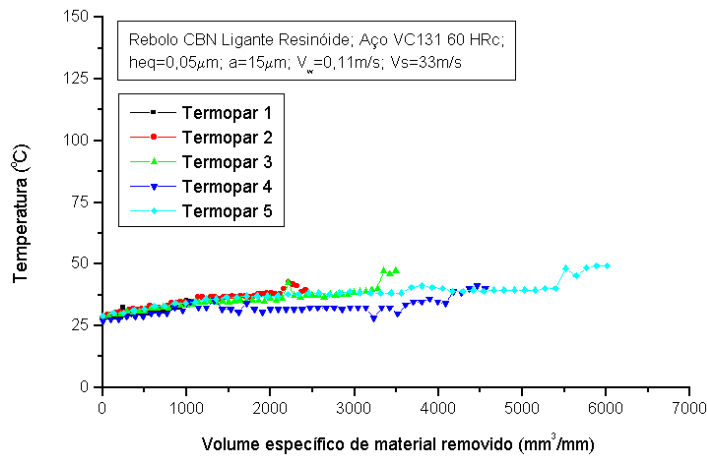


Figura 4. Resultado obtido com o rebolo fabricado com o ligante resinóide utilizado com $a = 50 \mu\text{m}$ para $h_{eq} = 0,05 \mu\text{m}$

4.2 Resultados de microdureza Vickers

Os valores de microdureza Vickers foram obtidos, utilizando-se um Microdurômetro, marca BUEHLER, modelo 1600-6300, realizada em amostras colhidas do material retificado com valores de volume removido pré-estabelecidos, para os 4 ensaios, 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 e dos valores de microdureza 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 as fato das baixas temperaturas verificadas e devido a excelente manutenção da capacidade de corte destas ferramentas.

4.3 Resultados de metalografia

A seguir, são comentados os resultados referentes as 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.

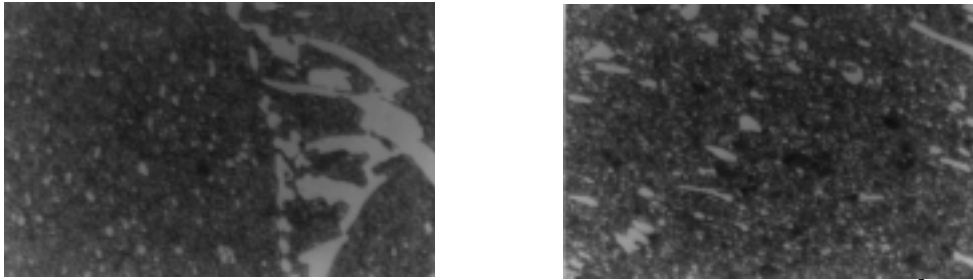


Figura 5. Resultados de metalográfica antes e após o ensaio 1; $Z_w = 1200 \text{ mm}^3/\text{mm}$

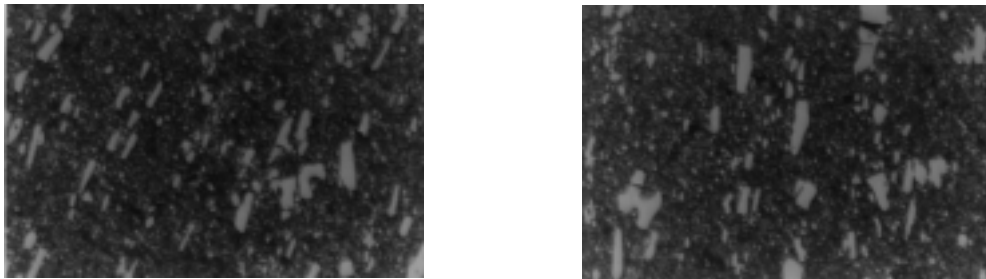


Figura 6. Resultados de metalográfica antes e após o ensaio 1; $Z_w = 3600 \text{ e } 6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$

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

Através de comparações entre as amostras retificadas e a não retificadas pode-se observar a mesma microestrutura presente, ou seja, uma estrutura de martensita revenida, apresentado 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°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. Soma-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 e os aspectos térmicos envolvidos no processo de retificação, quando da utilização desses tipos de ferramentas;

- De uma maneira geral, através das análises dos resultados para a maioria das 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 rugosidade média superficial da peça, microdureza Vickers e média da temperatura máxima na superfície retificada da peça, o tipo de ligante não influenciou, diretamente, as pequenas alterações verificadas (quando houveram) nestas variáveis;

- Com relação aos valores máximos de temperatura observados (sempre inferiores à 125°C, figuras 1, 2, 3 e 4) deve-se ao fato dos rebolos de CBN apresentarem uma menor partição da energia gerada para a peça, segundo estudos realizados por KOHLI, GUO e MALKIN (1995). A análise dos resultados obtidos indicam que a menor partição de energia introduzida pelos rebolos de CBN à peça, deve-se ao fato de que uma porção significativa do calor gerado durante o processo é transportada para a ferramenta e principalmente ao fluido de corte, ao invés de ser transportada para a peça, devido a maior condutibilidade térmica dos grãos abrasivos de CBN, a qual é muito maior do que a dos grãos de óxido de alumínio. A menor partição de energia, quando da utilização de rebolos de CBN permite uma diminuição das temperaturas na região de corte. Desta forma, os resultados obtidos se aproximam dos resultados verificados por KOHLI, GUO e MALKIN (1995), aproximadamente 400 °C quando utilizados rebolos de óxido de alumínio e 100 °C para rebolos de CBN. Isto tende a proporcionar uma menor possibilidade de indução de danos térmicos à peça.

REFERÊNCIAS

- JOHNSON, G. A. “Beneficial Compressive Residual Stress Resulting from CBN Grinding” *SME Second International Grinding Conference*, Philadelphia, Pennsylvania
- KOHLI S.P., GUO, C.; MALKIN, S. “Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels”. *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 117, 1995, p. 160-168.
- 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 a 171.
- SHAW, M. “Heat-affect Zones in Grinding Steels”. *Annals of the CIRP*, v 43/1, 1994, p. 279-282.