



## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO E VAZÃO DE FLUIDO DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM REBOLOS CONVENCIONAIS E SUPERABRASIVOS

**Eduardo Carlos Bianchi<sup>1</sup>, Rodrigo Daun Monici<sup>2</sup>, Eduardo Nunes de Siqueira Júnior<sup>1</sup>**

UNESP - Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica

(1) [bianchi@bauru.unesp.br](mailto:bianchi@bauru.unesp.br), (2) [daun@bauru.unesp.br](mailto:daun@bauru.unesp.br), Bauru, SP, Brasil

**Paulo Roberto de Aguiar**

UNESP - Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica

[aguiarpr@bauru.unesp.br](mailto:aguiarpr@bauru.unesp.br), Bauru, SP, Brasil

***Resumo.** No presente trabalho é apresentado um estudo sobre o efeito da vazão e pressão do fluido de corte no processo de retificação do aço VC131 temperado, bem como um estudo comparativo de três tipos de ferramentas abrasivas, sendo um rebolo convencional de Óxido de Alumínio ( $Al_2O_3$ ), um rebolo superabrasivo de CBN (Nitreto de Boro Cúbico) com ligante resinóide e um rebolo de CBN com ligante resinóide de alto desempenho. Os valores mostraram que a força tangencial de corte média para alta vazão e pressão com rebolo convencional, rebolo de CBN com ligante resinóide convencional e rebolo de CBN com ligante resinóide de alto desempenho, obtiveram valores superiores com relação à usinagem com baixa vazão e pressão. Para as outras variáveis de saída o comportamento foi contrário, pois os valores com relação à temperatura, emissão acústica e rugosidade superficial foram inferiores para a usinagem com alta vazão.*

***Palavras-Chave:** Retificação, Rebolo, Pressão.*

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação é conhecido como um dos mais complexos processos de usinagem, devido ao grande número de variáveis envolvidas. No processo de retificação profunda, muitas destas variáveis assumem comportamentos diferentes aos mostrados na retificação convencional. Desta forma, o processo é ainda pouco conhecido teoricamente e tem sido, por esta razão, um assunto de grande interesse no meio científico.

Os fluidos de corte são utilizados como um “agente externo” às condições de usinagem, com a função de otimizar o processo através do aumento da ação lubrificante e refrigerante na região de corte. Porém, a eficiência de um fluido de corte dependerá da vazão, direção e velocidade de aplicação do mesmo.

Há disponível no mercado uma grande diversidade de óleos e fluidos de corte para os diferentes processos de usinagem, nos quais se desejam usá-los. Diversos fatores influem na escolha do melhor fluido, como viscosidade, características técnica, custo, etc., e mesmo após a escolha do mesmo, ainda existem outras considerações que devem ser feitas para melhor

aproveitamento desse fluido. Entre as características citadas destacam-se a geometria do bocal pelo qual o fluido será introduzido na operação, intensidade de pressão e vazão na saída do bocal, qual a melhor posição que se deve colocar o bocal, entre outras, sendo todas de substancial importância para a melhoria da qualidade final da peça.

## **2. ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE NA RETIFICAÇÃO**

### **2.1. Como um fluido de corte afeta o processo de retificação**

De acordo com Mariani e Trebing (sd), as duas considerações mais importantes quando se trabalha com rebolos são refrigeração e lubrificação. Uma refrigeração adequada origina maior vida útil do rebolo. A lubrificação permite ao rebolo obter uma produtividade adequada a aplicação em que está sendo utilizado.

Segundo Malkin (1989), um fluido de corte não deve apenas promover uma boa refrigeração da peça por convecção. O fluido deve promover a predominância dos mecanismos de corte ao invés da deformação plástica sem a remoção de material (“plowing”). Assim, a energia específica total de retificação gerada no processo de usinagem é diminuída.

Segundo Hitchiner (1990) o fluido de corte pode facilitar a remoção de material, atuando em dois fatores: na manutenção da afiação do rebolo, através da diminuição do desgaste do topo do grão, e pela manutenção da limpeza na região de corte. Com a diminuição do coeficiente de atrito, entre o grão e a peça, o calor gerado pelo deslizamento destes grãos na peça é diminuído. Isto traz uma maior facilidade de dissipação de energia, a qual é gerada em menor quantidade, pelo favorecimento do corte.

Os óleos integrais proporcionam menores forças de retificação, devido ao seu maior poder lubrificante, permitindo a diminuição do coeficiente de atrito e pela manutenção da afiação da ferramenta, gerando menores temperaturas na região de corte (Torrance, sd).

Além das propriedades lubrificantes, a capacidade de remoção de calor de um fluido de corte também é importante. No caso da retificação de aços temperados, estes são melhor retificados quando da utilização de óleos integrais, os quais proporcionam menores gradientes térmicos, diminuindo a incidência de transformações microestruturais. Para materiais mais dúcteis, os óleos solúveis e sintéticos podem ser vantajosos, pois altas taxas de resfriamento podem ser introduzidas sem o aparecimento de trincas, devido a própria constituição química do material. Entretanto diferentes combinações fluido-ferramenta-material podem ser utilizadas, devendo-se atentar principalmente a busca da diminuição da energia gerada na região de corte, gerando menores gradientes a serem removidos pelo fluido, permitindo assim a utilização de fluidos solúveis e/ou sintéticos.

Conforme Mariani e Trebing (sd), fluidos sintéticos tem uma viscosidade menor do que os óleos. Para aplicar corretamente um refrigerante sintético e um adequado lubrificante para operações de usinagem de diamante e CBN, é necessário aumentar o volume de refrigerante, velocidade ou rearranjar o bocal do refrigerante para capturar o quanto mais fluido possível para a peça de trabalho.

O cuidados para com os fluidos não deve ser esquecido, conforme Mariani e Trebing (sd), o arranjo do bocal de refrigerante pode maximizar a lubrificação e a refrigeração, ajustando o bocal para a parte crítica da interface entre o rebolo e a peça de trabalho para que o refrigerante seja continuamente jogado.

### **2.2. Efeitos da alta velocidade do fluido de corte**

Segundo Motta e Machado (1995) e Runge e Duarte (1990), os fluidos poderão exercer uma ou mais funções, dentre as seguintes: refrigerar a ferramenta, a peça e o cavaco gerado; lubrificar a região de contato peça-ferramenta, reduzindo o atrito, minimizando a erosão e o

desgaste da ferramenta, aumentando sua vida útil e contribuindo para uma diminuição da geração de calor na região de corte; controlar o surgimento da aresta postiça, no caso de ferramentas de geometria definida; conferir um poder de lavagem, expulsando os cavacos da região de corte e, no caso de operações de retificação, diminuindo a tendência de entupimentos dos poros do rebolo durante a operação de corte e propiciar uma proteção anticorrosiva. A importância relativa de cada uma das funções dependerá ainda do material usinado, do tipo de ferramenta utilizada (geometria definida ou indefinida), das condições de usinagem, do acabamento superficial e do controle dimensional exigido.

Fazendo uma comparação da aplicação do fluxo e do fluido de corte à alta velocidade, em todo o raio de ação da velocidade do jato, tanto as componentes da força tangencial de corte quanto o da força normal de corte são reduzidos mais do que 50% com a aplicação do jato à alta velocidade. As vantagens oferecidas pela alta velocidade do fluido de corte foram em termos de melhora da refrigeração/lubrificação da região de usinagem, reduzindo o uso de rebolo e a carga do mesmo, e melhorando o efeito da direção em mais de 50% pela redução da Rugosidade ( $R_a$ ). Então, o desempenho total do processo de usinagem foi melhorado pelo fluido de corte à alta velocidade.

De acordo com Webster e Ciu (1995), a aplicação do fluido em processos de usinagem está se tornando mais importante devido a alta taxa de remoção, alta qualidade e longa vida do rebolo. A seleção de um eficiente modo de aplicar isso, é um método de encontrar metas de produtividade que pode ser tão importante quanto a seleção das especificações do rebolo de usinagem. O papel do fluido em operações de usinagem são de refrigerar a peça de trabalho, retirar os cavacos, lubrificar a zona de usinagem, refrigerar e limpar o rebolo. Geralmente a energia de usinagem é dissipada no cavaco, na peça, no rebolo e no fluido.

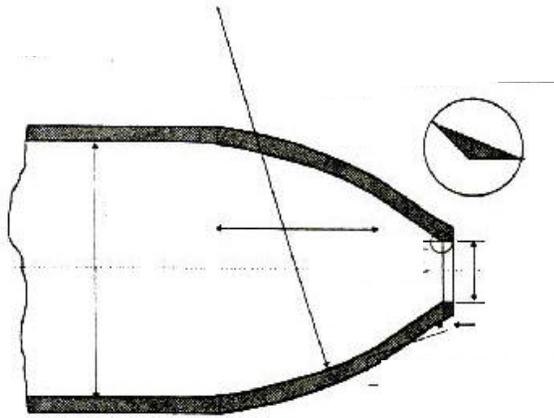
Conforme Malkin, apud Webster e Ciu (1995), a correta aplicação de fluidos reduzirão a queima pela diminuição da energia específica e segundo Guo e Malkin, apud Webster e Ciu (1995), reduzindo o contato de zona termicamente afetada.

Conforme Guo e Malkin, apud Webster e Ciu (1995) a aplicação de fluido que não gera vantagens para o desempenho do rebolo quanto, à retirada de calor da peça, causarão altas temperaturas mesmo quando o fluido retirar o excesso de material após a usinagem. Isto pode criar tensões indesejáveis na superfície da peça e também sobrecarregar o rebolo.

A procura por rebolos de CBN vem crescendo consideravelmente e paralelamente à isso os fluidos de corte estão cada vez mais requisitados no contexto mundial. O movimento fixo na direção de fluidos a base de água (emulsão) tornam a aplicação a alta pressão muito mais difícil quando comparado com óleos integrais por causa da menor viscosidade, que promove um jato disperso quando utilizado com bocais convencionais de refrigeração.

Conforme Webster e Ciu (1995), um bocal arredondado, como ilustrado na figura 1, foi construído pelo “Center for Grinding Research and Development”, baseado em Rouse et al., Webster e Ciu (1995), mostrado na Figura 1, onde D é o diâmetro inicial do bocal. O cálculo da velocidade do jato, deve ser baseado no diâmetro inicial com relação ao diâmetro final do bico.

O bocal tradicional geralmente tem uma ou duas paredes internas convexas, o que ocasiona uma tendência de separação das lâminas geradas internamente no bocal. O fluxo separado tem um elevado nível de turbulência e pressão, o que irá afetar significativamente a convergência do jato. Em contraste o novo bocal circular tem paredes internas côncavas, o que minimiza o surgimento da turbulência.



onde:

$D = 4,8 \text{ mm}$  é o diâmetro da tubulação de entrada

$D_n = 3,2 \text{ mm}$  é o diâmetro de saída do bico

$C_r (D/D_n) = 1,5 \text{ mm}$  é a razão de contração.

Figura 1: Bocal de aplicação de fluido de corte, baseado em (Webster, 1995).

### 3. METODOLOGIA

Visando a necessidade de se obter resultados consistentes, foram realizados ensaios a fim de se determinar as melhores condições de usinagem. Nos ensaios laboratoriais foram mantidas constantes as condições de usinagem, velocidade tangencial do rebolo ( $V_s$ ), velocidade angular da mesa ( $V_w$ ) e profundidade de usinagem ( $a$ ). Para tanto variou-se os valores de pressão e vazão, e mediu-se os parâmetros de saída força tangencial de corte ( $F_{tc}$ ), rugosidade superficial da peça ( $R_a$ ), emissão acústica (EA), temperatura e relação G.

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 consumida ( $P_c$ ) pelo motor de acionamento da ferramenta abrasiva, durante o corte. Assim, utilizou-se um circuito condicionador de sinais, o qual permitiu 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 pôde-se então calcular a força tangencial de corte  $F_{tc}$  pela Equação (6), sendo que  $d_s$  é o diâmetro do rebolo:

$$F_{tc} = 60 \times P_c / (2 \times p \times n \times d_s) \quad (1)$$

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: 154 mm de comprimento, 50 mm de largura e 5 mm de espessura.

Inicialmente o corpo de prova foi fixado sobre a mesa da máquina retificadora e posteriormente foram ajustadas todas as condições de usinagem ( $V_s$ ,  $V_w$  e  $a$ ). O início dos ensaios foram realizados 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. A força tangencial de corte foi medida ao longo dos ensaios, somente no movimento concordante de

retificação, sendo que a força tangencial média foi assimilada pelo software ( desenvolvido em linguagem Labview5.0) em cada passada da ferramenta sobre o corpo de prova, totalizando 80 avanços da ferramenta para cada ensaio, após ser realizada a dressagem nos rebolos convencionais ( $Al_2O_3$ ) e o perfilamento nos rebolos superabrasivos.

Os valores de temperatura na peça foram medidos com três termopares que foram inseridos em pequenos furos transversais nas peças, espaçados de 5mm na direção vertical. O corpo de prova foi retificado até o início de cada termopar. Nessa fase do ensaio, o termopar desprendia-se naturalmente da peça, e o ensaio era conduzido até o último termopar. Os valores de temperatura também foram registrados via software (Labview 4.1).

A rugosidade superficial aritmética ( $R_a$ ) dos corpos de prova foi medida periodicamente (a cada número pré-determinado de passadas do rebolo sobre a peça, dependendo da condição de usinagem), utilizando-se um rugosímetro marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+ (cut-off de 0,8 mm e filtro 2CR (ISO)), em três posições distintas do corpo de prova (laterais e centro) e quatro vezes consecutivas em cada posição, para maior confiança nos resultados obtidos. 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 desnível ocasionado pelo desgaste. Como o volume de material removido foi constante para cada ensaio, a determinação da relação G foi direta. Também foi medida a emissão acústica via software.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio dos resultados obtidos pode-se verificar que em geral, para as condições de usinagem de alta pressão e vazão, houve uma tendência no aumento da força tangencial de corte, devido a elevada lubrificação e refrigeração da peça. Com o aumento da lubrificação os grãos abrasivos permaneceram por mais tempo presos ao ligante da ferramenta e devido ao aumento da área de contato do topo do grão abrasivo com a peça, ocasionou o aumento da força tangencial de corte do rebolo. Os rebolos superabrasivos apresentaram em média valores superiores de força tangencial de corte, quando comparados ao rebolo convencional, pois os primeiros possuem a característica de reterem por mais tempo os grãos abrasivos em sua superfície além do macroefeito, ocasionado pela dressagem, e microefeito, devido ao desprendimento dos grão abrasivos, e deterioração do ligante através do aumento da temperatura envolvida no processo. Assim as ferramentas convencionais, tenderam a desprender os grãos abrasivos de forma mais evidente.

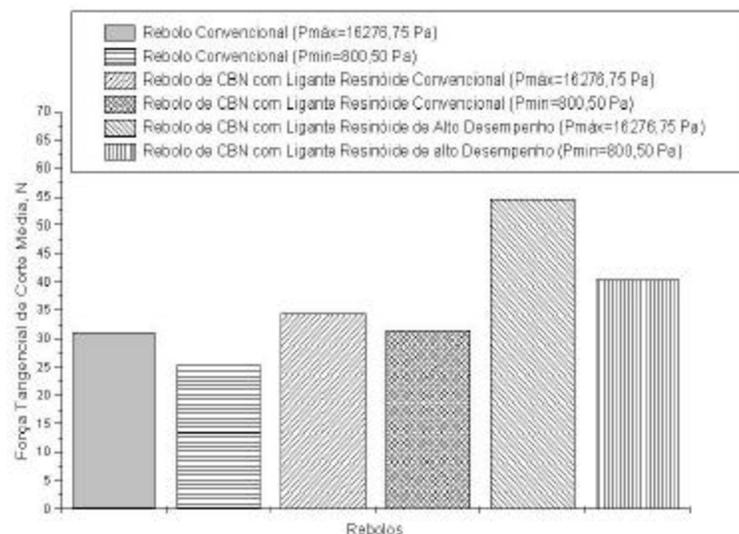


Figura 2 - Resultado da força tangencial de corte média.

Os valores obtidos para a temperatura podem ser evidenciados através da figura 3, pois com o aumento da refrigeração e lubrificação promovido pela elevada pressão ( $P_{m\acute{a}x.}=16276,75\text{Pa}$ ) e vazão ( $Q = 0,360 \text{ l/s}$ ) os efeitos de retirada de calor por condução foram superiores, além da melhor lubrificação fornecida pelo fluido de corte. Os valores de temperatura média evidenciados no gráfico foram obtidos através da média aritmética das temperaturas fornecidas pelos termopares ao longo do processo. A temperatura envolvida no processo, quando da utilização do rebolo convencional, foi menor devido aos macro e micro efeitos envolvidos no processo, sendo que para os rebolos superabrasivos os valores de temperatura obtidos com ligante resinóide convencional foi inferior ao obtido com ligante resinóide de alto desempenho, pois o coeficiente de transmissão do rebolo com ligante resinóide convencional mostrou-se superior se comparado ao outro rebolo superabrasivo. Os valores de temperatura são ilustrados através da figura 3.

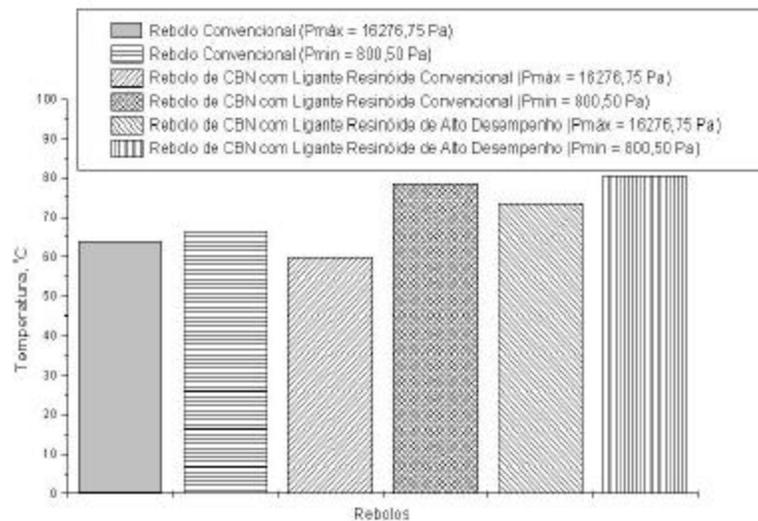


Figura 3 – Comportamento da temperatura com relação à ferramenta e aplicação de fluido de corte utilizada.

Os resultados obtidos para a rugosidade superficial podem ser visualizados na figura 4, onde a mesma mostra que os valores dessa variável de saída tenderam ser maior quando da utilização da baixa vazão e pressão em decorrência do menor efeito de lubrificação ocasionada por tal condição de ensaio. Pode-se verificar que o rebolo convencional apresentou um valor médio de rugosidade superior às outras ferramentas, devido a pequena capacidade de autoafiação dos grãos abrasivos, assim os grão abrasivos perdem a capacidade de remover material, deformando o mesmo sem a remoção efetiva de material gerando um acabamento inferior. Os rebolos superabrasivos de CBN apresentaram um valor de rugosidade inferior quando comparado ao rebolo convencional, pois os primeiros possuem a característica de autoafiação dos grãos abrasivos, mantendo as arestas de corte afiadas, gerando portanto um melhor acabamento superficial e reduzindo o valor de rugosidade.

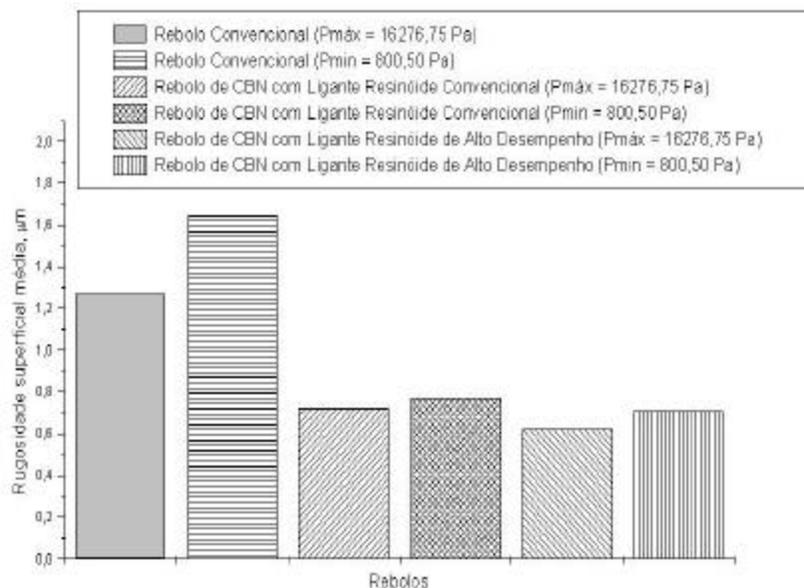


Figura 4 - Rugosidade superficial apresentada pelas ferramentas nas condições de ensaios.

Na figura 5 são apresentados os resultados de emissão acústica, sendo possível detectar que o fluido de corte agiu de certa forma como agente de absorção de impacto da ferramenta com a peça além de contribuir para a expulsão do mesmo. Assim os valores de emissão acústica apresentaram-se maiores para a condição de baixa pressão e vazão ( $P_{\min} = 800,50 \text{ Pa}$  e  $Q_{\min}=0,165 \text{ l/s}$ ) pois o fluido de corte nessa caso não promoveu a absorção de impacto e manutenção da afiação da ferramenta de maneira mais efetiva. Os rebolos superabrasivos apresentaram-se de forma geral com valores menores de emissão acústica pela característica de possuírem um maior grau de afiação e manutenção dos grãos abrasivos.

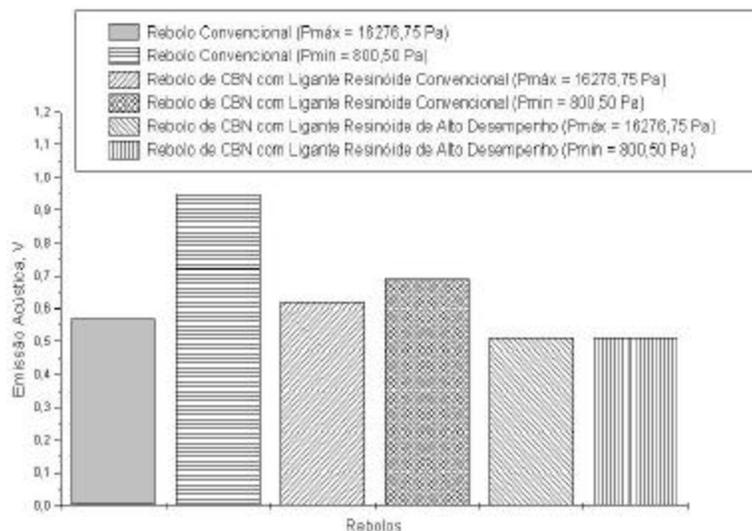


Figura 5 - Resultados obtidos de emissão acústica no processo.

## 5. CONCLUSÕES

A refrigeração é indispensável para um melhor rendimento dos processos de usinagem e desempenho dos rebolos, principalmente nos dias atuais, sendo que a tecnologia está crescendo rapidamente, onde as máquinas geram mais energia e parte desta precisa ser dissipada.

O bocal projetado, construído e utilizado mostrou-se eficiente para se obter um melhor aproveitamento do fluido de corte, isto é, melhor refrigeração na interface entre rebolo e peça.

Pode-se concluir que para a força tangencial de corte, temperatura, rugosidade, emissão acústica e desgaste diametral quando da utilização da máxima pressão (alta vazão), o desempenho do rebolo foi melhor quando comparado com valores de pressão e vazão mínima.

Analisando os tipos de rebolos, os resinóides apresentaram uma força tangencial de corte, emissão acústica e temperatura maior que o rebolo convencional pelo fato dos resinóides apresentarem ligantes que retém por mais tempo os grãos abrasivos. Porém os resinóides apresentaram uma rugosidade menor, pois atualmente é um fator relevante na produção de certas peças, onde deseja-se uma redução da força de atrito que significa maior desgaste.

## REFERÊNCIAS

- Guo, C.; Malkin, S. "Effectiveness of Cooling in Grinding". CIRP Annual Convention, STG, Enschede, 1995.
- Hitchiner, M. P. "Precision Grinding Systems for Production Grinding with Vitrified CNB" *SME Technical Paper MR90-507*, 1990, p 1-11.
- Mariani, G. and Trebing, C. "Synthetic Coolants Cut It in Superabrasive Grinding". Technical Services, Pillsbury DIV., Novamax Technologies Inc. (Livonia, MI), p. 3-7.
- Maris, M.; Snoyes, R. "Heat affected Zone in Grinding Operations" Proceedings of the 14th International Machining Tool Design and Research Conference, 1974, p. 659-669.
- Malkin, S.; Anderson, R. B. "Thermal Aspects of Grinding, Part 1 - Energy Partition" ASME Journal of Engineering for Industry Vol. 96, 1974, p. 1177-1183.
- 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.
- Motta, M. F. e Machado A. R. "Fluidos de corte: tipos, funções ,seleção, métodos de aplicação e manutenção". Revista Máquinas e Metais, p. 44-56, setembro de 1995
- Rowe, W.B.; Morgan, M.N. The effect of deformation on the contact area in grinding. IN: Annals of the CIRP., V42/1, 1993.
- Runge, P. R. F. e Duarte, G. N. " Lubrificantes nas indústrias – Produção, manutenção e controle" Triboconcept – Edições Técnicas, p. 71-99, 1990
- Webster, J.A., Ciu, C. "Flow Rate and Jate Velocity Determination for Design of a Grinding Cooling System", 1ª Conferência Internacional de Usinagem, Setembro de 1995.
- Webster, John, "Selection of coolant type and application technique in grinding". Supergrind 1995, p. 205-218, 1995.

## THE ANALYSE OF THE PRESSURE AND FLOW OF CUTTING FLUIDS ON GRINDING PROCESS WITH CONVENCIONAL AND SUPERABRASIVES WHEELS

**Abstract.** *This paper show a study of the cutting fluid with two values of the pressure and flow rate on the surface grinding. A unique cutting condition was applied and the cutting fluid pressure and flow rate were varied. The trials were conducted using  $Al_2O_3$  and CBN (two bonds) grinding wheel and the material of the test specimens was the VC 131 steel, 60 HRc. As a result, it can be concluded that an increase in the cutting fluid flow rate and pressure leads to an increase in the cutting force and a decrease in the grinding wheel wear (and, consequently, an increase in the G ratio), in the roughness and in the workpiece temperature.*

**Keywords:** *Cutting fluid, Abusive grinding, Cooling*