

# INFLUÊNCIA DAS TÉCNICAS DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE, REFRIGERAÇÃO OTIMIZADA E REFRIGERAÇÃO CONVENCIONAL NA QUALIDADE DE PEÇAS PRODUZIDAS COM AÇOS ENDURECIDOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

## INFLUENCE OF THE METHODS FOR MINIMUM AMOUNT OF LUBRICATION, OPTIMIZED COOLING AND CONVENTIONAL COOLING IN THE QUALITY OF PARTS PRODUCED WITH HARDENED STEEL IN GRINDING PROCESSES

Manoel Cléber de Sampaio Alves<sup>1</sup> Eduardo Carlos Bianchi<sup>2</sup> Paulo Roberto de Aguiar<sup>2</sup>

Recibido 18 de mayo de 2009, aceptado 12 de agosto de 2010

Received: May 18, 2009 Accepted: August 12, 2010

### RESUMO

Verificou-se a influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante, refrigeração otimizada e refrigeração convencional, com diferentes vazões e velocidade de aplicação do fluido de corte, na qualidade das peças produzidas com aços endurecidos, no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com a utilização de rebolos superabrasivos com baixa concentração de CBN. A análise da qualidade das peças foi realizada através da avaliação do comportamento da energia específica de retificação, rugosidade, tensão residual gerada e desvio de circularidade. Com a análise das formas de aplicação e das várias vazões e velocidades do fluido de corte utilizadas encontraram-se condições de lubri-refrigeração que propiciam a diminuição do volume de fluido de corte, diminuição do tempo de usinagem sem prejudicar os parâmetros dimensionais, o acabamento superficial e a integridade superficial. Em relação às diferentes formas de aplicação do fluido de corte notou-se o melhor desempenho da aplicação otimizada para maiores velocidades mostrando a eficiência de um novo conceito de bocal utilizado.

Palavras chave: Retificação, refrigeração otimizada, mínima quantidade de lubrificante, refrigeração convencional, CBN.

### ABSTRACT

*The influence of minimum lubrication, optimized and conventional cooling at different flows and application rates of cutting fluids on the quality of hardened-steel pieces produced by external cylindrical plunge grinding with super-abrasive grinding wheels with low CBN concentrations was verified. The analysis of the quality of the pieces was performed through the assessment of the behavior of the specific energy of the grinding, roughness, roundness deviation, and the generated residual stress. By analyzing of the application ways and of the several flows and application rates of the cutting fluid, one could encounter lubrication/cooling conditions that enable the reduction in cutting fluid volume, reduction in grinding time without compromising the dimensional parameters (superficial finishing, surface integrity). Regarding the different applications of cutting fluids, it could be noted the optimized application for higher velocities has presented the best performance, demonstrating the effectiveness of the new concept of nozzle utilized.*

*Keywords: Grinding process, minimum quantity of lubrication, optimized cooling, conventional cooling, CBN grinding wheel.*

### INTRODUÇÃO

A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica,

dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluir o meio ambiente. No entanto, diversos processos de usinagem, incluindo a retificação, utilizam fluidos de corte como meio de lubrificação e refrigeração da peça

<sup>1</sup> UNESP. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Industrial Madeireira. Departamento de Eng. Industrial Madeireira, Rua Geraldo Alckmin, 519, 18409-310, Nossa Senhora de Fátima, Itapeva, SP, Brasil. E-mail: manoel@itapeva.unesp.br

<sup>2</sup> UNESP. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, S/N°, 17033-360, Vargem Limpa – Caixa Postal 473. Bauru, SP, Brasil. E-mail: bianchi@feb.unesp.br

produzida. A retificação confere à peça o acabamento final, minimizando as irregularidades superficiais através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta (rebolo) e a peça a ser retificada.

Segundo Malkin (1989) [1] e Guo (1999) [2], nestes processos de fabricação, se a lubrificação e a refrigeração não forem satisfatórias, as elevadas temperaturas geradas podem produzir danos à peça produzida como queima superficial, mudanças microestruturais, aparecimento de tensões residuais, erros de forma e deterioração da qualidade final da peça produzida.

Os fluidos de corte são muitas vezes descartados no meio ambiente, fato que não condiz com a situação atual levando-se em consideração o rigor das leis ambientais e devido à evolução ambiental do homem. Ainda existe o alto custo relativo aos fluidos de corte que vêm se tornando mais acentuados devido ao elevado consumo e o tratamento desse fluido de corte no momento do descarte de forma a atender as exigências ambientais. Segundo Webster (1999) [3], os grandes volumes de fluido de corte estão se tornando necessários, devido ao crescimento da produtividade das indústrias e ao crescimento da utilização do processo.

Se não bastasse, ainda existe o problema de que muitos fluidos de corte ainda trazem muitas conseqüências à saúde dos operadores das máquinas envolvidas com estes fluidos. No entanto esse problema vem sendo solucionado através do uso de fluidos à base vegetal que trazem menos danos à saúde.

Dessa forma, a utilização em massa dos fluidos de corte tende a diminuir com o passar do tempo. Para tanto, são necessárias análises mais aprofundadas das conseqüências da diminuição do uso de fluidos de corte com relação ao estado final do componente usinado.

De acordo com Webster (1995) [4], a lubrificação e a refrigeração dependem da efetiva entrada de fluido na região de corte entre a peça e a ferramenta, não havendo a necessidade de volumes elevados, considerando que parte deste fluido não penetra na região de corte efetivamente.

Considerando estas informações, surge a importância de avaliar a qualidade das peças produzidas através do uso de métodos mais eficientes de aplicação de fluido de corte. Nesta pesquisa utilizou-se três métodos de aplicação de fluido de corte para a avaliação do desgaste das peças produzidas (método convencional, método otimizado e método da mínima quantidade de lubrificante-MQL)

utilizando novos conceitos de bocais e rebolo de CBN com baixa concentração de abrasivos. Utilizou-se ainda fluidos de corte de baixo impacto ambiental e à saúde.

Neste trabalho avaliou-se a qualidade de peças retificadas através de três formas de aplicação de fluido de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 usando 2 diferentes tipos de fluidos de corte e uma ferramenta superabrasiva de CBN com baixa concentração de abrasivos. Buscou-se neste trabalho encontrar o compromisso entre qualidade, custo e meio ambiente quando aplicados sistemas de lubri-refrigeração mais eficientes através de bocais inovadores. A influência na qualidade foi avaliada através da análise da rugosidade, da força tangencial de corte e da análise de microscopias dos corpos de prova ensaiados.

## **METODOLOGIA**

Utilizou-se três formas distintas de aplicação de fluido de corte, onde foram usados o método convencional (MC) com 2 bocais circulares, o método de mínima quantidade de lubrificante (MQL) com um bocal devidamente preparado para este tipo de aplicação e o método otimizado (MO) com um bocal especialmente desenvolvido de forma a abranger toda a superfície a ser retificada. Utilizou-se novos conceitos de bocais que buscam criar condições possíveis de serem empregadas no meio industrial.

Utilizou-se uma retificadora cilíndrica da marca SULMECÂNICA, modelo RUAP 515 H-CNC equipada com um comando numérico computadorizado da marca Fagor. Foram retificadas 50 peças, sendo 15 mediante a aplicação de MQL, 25 com lubri-refrigeração otimizada, 5 peças foram retificadas sob a condição convencional e 5 sob a condição a seco (sem lubri-refrigeração também denominada de ensaio de queima).

O material utilizado na confecção dos corpos de prova foi o aço ABNT 4340, temperado e revenido. Esse aço é muito utilizado na fabricação de peças que exigem boa combinação de resistência e tenacidade, com valores relativamente uniformes em toda a seção.

Utilizou-se óleo emulsionável de base vegetal (a base de ésteres sintéticos), com especificação DMS 3200 F-1 do fabricante Shell do Brasil S.A. usado para aplicação pelo método convencional e pela técnica otimizada. Usou-se uma concentração de 5% e pH 9. O fluido de corte utilizado para o MQL foi o Accu-Lube LB 1000 do fabricante ITW Chemical Products Ltda. O controle microbiológico do fluido de corte foi realizado com bactericida ADEP 30 à base de Triazina.

Os ensaios foram realizados com rebolo de superabrasivos de CBN (nitreto de boro cúbico) fabricado com ligante vitrificado e concentração de 15% de volume de CBN com as seguintes características: 350×20-5×127-SNB151Q12VR2, com granulometria fina do tipo duro com estrutura aberta.

A lubri-refrigeração convencional, apresentada na Figura 1, é caracterizada pela aplicação do fluido de corte a baixa pressão, baixa velocidade e com uma alta vazão. O bocal utilizado neste sistema de lubri-refrigeração foi composto por dois bicos difusores, cada um com 6,3 mm de diâmetro para a saída do fluido.



Figura 1. Vista dos bicos difusores utilizados na refrigeração convencional.

A Figura 2 apresenta o bocal utilizado no sistema de mínima quantidade de Lubrificação MQL.



Figura 2. Vista do bocal utilizado na experimentação com MQL instalado na retificadora mostrando a ligação de ar comprimido.

O sistema de mínima quantidade de lubrificação MQL é caracterizado pela aspersão de fluido de corte e ar comprimido de forma homogênea. É composto basicamente de compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador e o bocal projetado para a utilização de MQL na retificação.

O sistema otimizado é caracterizado por alta vazão e alta pressão do fluido de corte. Composto basicamente por um bocal otimizado construído a partir de um bocal MQL. Foi introduzido na saída do bocal um tubo retangular fabricado com chapa aço ABNT 1010 para tornar o fluxo do jato paralelo ao bocal. A Figura 3 apresenta o bocal otimizado fabricado e utilizado.



Figura 3. Bocal otimizado construído e vista do jato formado no processo otimizado.

As condições de usinagem utilizadas nos ensaios foram: Velocidade de mergulho ( $V_f$ ) de 1 mm/min; Velocidade de corte ( $V_s$ ) de 30 m/s; Rotação da peça ( $\omega_w$ ) de 204/min; Penetração do rebolo na peça ( $a$ ) de 0,1 mm; Tempo de centelhamento ( $t_s$ ) igual a 8 segundos; Largura de retificação de 12 mm; Ciclos de retificação:100; dressador tipo fleese conglomerado.

A Tabela 1 apresenta as condições de velocidades e vazões de saída do fluido de corte na condição otimizada, MQL e convencional. Cabe ressaltar que a concentração do fluido de corte utilizado na técnica otimizada e convencional foi mantida constante em 5%.

A energia específica de retificação foi obtida através do monitoramento da velocidade periférica do rebolo e da força tangencial de corte. A força tangencial de corte  $F_{tc}$  foi medida pela determinação da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, com o monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica.

Para a medição da rugosidade média das peças, representado pelo parâmetro  $R_a$ , utilizou-se um aparelho da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+. A medição foi realizada na direção perpendicular à superfície de retificação. O comprimento de medição (cut-off) utilizado foi de 0,8 mm e o filtro foi o 2CR-fase corrigida. O raio da ponta do diamante do medidor de rugosidade foi de 0,2  $\mu\text{m}$ .

Tabela 1. Velocidades e vazões utilizadas nas aplicações com a técnica otimizada, MQL e convencional.

| Lubri-Refrigeração Otimizada            | Vazão total de fluido de corte, (l/min) | Velocidade de saída do fluido de corte, $V_j$ (m/s)   |
|---|---|---|
| Otimizada 30m/s                         | 26,3                                    | 30  |
| Otimizada 27m/s                         | 23,7                                    | 27  |
| Otimizada 25m/s                         | 21,9                                    | 25  |
| Otimizada 20m/s                         | 17,5                                    | 20  |
| Otimizada 15m/s                         | 13,2                                    | 15  |
| Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) | Vazão total de fluido de corte, (l/min) | Velocidade de saída do ar comprimido $V_j$ , (m/s)    |
| MQL 40ml/h                              | 0,00067                                 | 30  |
| MQL 60ml/h                              | 0,00100                                 | 30  |
| MQL 80ml/h                              | 0,00133                                 | 30  |
| Aplicação convencional                  | Vazão total de fluido de corte, (l/min) | Velocidade de saída do fluido de corte, $V_j$ , (m/s) |
| Convencional                            | 20                                      | 5,3   |

Os desvios de circularidade foram obtidos com um equipamento medidor de circularidade TALYROND 31C, da Taylor Hobson através do software TR31 instalado em um microcomputador acoplado ao medidor de circularidade.

A Tensão residual foi obtida através de um Difrátmetro modelo D5000 da marca Siemens, com tubos de raios X com alvo de cobalto e um Difrátmetro Rigaku, Modelo DMAX-2000 com tubos de raios X com alvo de Cromo. Utilizou-se o método de múltipla exposição ( $\text{sen}^2\psi$ ), por meio da difração de raios-X.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados de energia específica de retificação, rugosidade, desvio de circularidade e tensão residual para as três técnicas de lubri-refrigeração utilizada neste trabalho (MQL, MC e MO).

### Energia Específica de Retificação

Segundo Silva (2000) [5], um dos parâmetros fundamentais para a caracterização de processos de usinagem é a energia específica de retificação que é a energia gasta por unidade de volume de remoção de material. Esta energia está relacionada com a potência e força de corte necessária à usinagem.

A Figura 4 apresenta a média das energias específicas de retificação máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas, permitindo avaliar e comparar os métodos entre si.

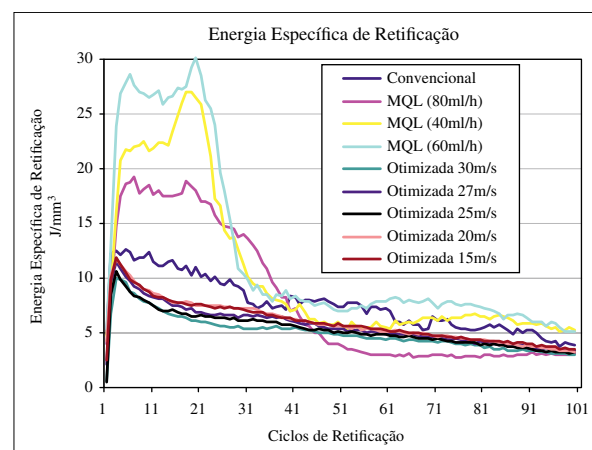


Figura 4. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na Energia Específica de retificação.

É importante salientar que o comportamento da energia específica de retificação verificada em todas as condições foi inferior a 60  $\text{J/mm}^3$ , citada por Malkin (1989) [1] como valor máximo para o processo de retificação de aços.

Nota-se uma diminuição da energia específica de retificação com o aumento da vazão do fluido. A condição que apresentou o melhor desempenho com relação à lubri-refrigeração convencional foi a MQL, com vazão de 80ml/h de fluido de corte. A lubri-refrigeração otimizada apresentou resultados melhores que as outras formas de lubri-refrigeração sendo que para a condição com velocidade de fluido de corte de 30m/s obteve-se os melhores resultados entre todas as condições ensaiadas.

O melhor comportamento demonstrado pelo método otimizado deve à melhor eficiência da penetração do fluido de corte proporcionada por este método devido às altas velocidades de aplicação utilizadas. Além disso, a maior quantidade de lubrificante proporcionada pelo método otimizado em relação aos outros métodos contribuiu para a redução do atrito peça e rebolo, proporcionando ao cavaco um deslizamento mais fácil.

A energia específica envolvida nos processos de MQL foi bem superior que para o sistema convencional e sistema otimizado.

O sistema otimizado mostrou-se capaz de lubrificar de forma muito eficiente, fazendo que com isso o desgaste do rebolo seja diminuído, aumentando sua vida. As altas velocidades envolvidas nos processos otimizados favoreceram uma melhor entrada de lubrificante na zona de contato peça e rebolo diminuindo a parcela de esforço gasto entre atrito da peça com a ferramenta.

### Tensão Residual

A Figura 5 apresenta os resultados de tensão residual médias para as condições de MQL, MO e MC utilizadas. É apresentado também o valor de tensão residual médio para ensaio de queima (ensaio a seco) e para uma peça somente torneada para fins de comparação.

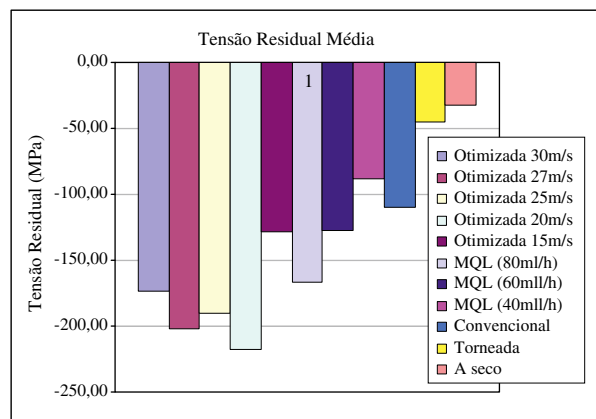


Figura 5. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual.

As tensões residuais obtidas foram compressivas. Fato mostrado por Brinksmeier (1982) [6] quando usando rebolos de CBN. A maior condutividade térmica do CBN possibilita que uma menor partição da temperatura dirija-se à peça diminuindo os efeitos térmicos.

De acordo com Kohli (1995) [7], a predisposição dos rebolos de CBN a produzirem tensões mais favoráveis ao processo (tensões de compressão), está diretamente ligada às propriedades dos grãos abrasivos deste material. A maior dureza de seus grãos permite um menor desgaste, menores forças de retificação e uma menor geração de calor. A maior condutibilidade térmica dos grãos de CBN permite uma menor partição da energia gerada para a peça assegurando uma melhor integridade superficial do componente usinado.

Observa-se ainda que a lubri-refrigeração otimizada apresentou, de uma forma geral, tensões de compressão

maiores que às geradas pela lubri-refrigeração convencional e MQL. Isso pode ser explicado pela maior retirada de calor do processo conseguida com a lubri-refrigeração otimizada proporcionando um menor aquecimento da peça.

### Rugosidade

O acabamento superficial afeta de forma significativa a resistência dos componentes fabricados quando são submetidos a trabalhos onde são exigidos esforços de fadiga. Segundo Malkin (1989) [1], a rugosidade de uma peça ainda está diretamente ligada à lubrificação e depende principalmente do tamanho do grão abrasivo presente no rebolo, condições de dressagem, taxa de remoção de material, tempo de centelhamento e condições de lubri-refrigeração.

A Figura 6 apresenta as médias das rugosidades das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas.

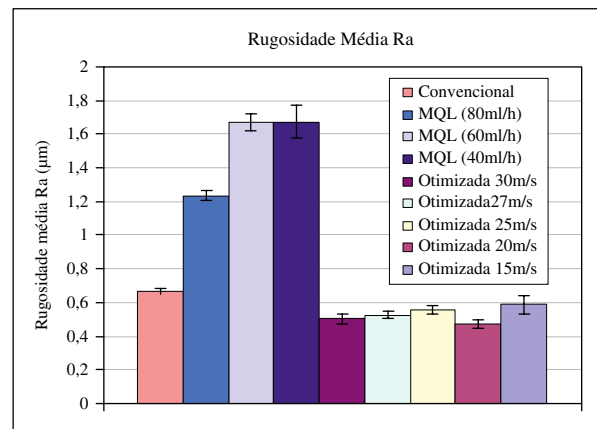


Figura 6. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na rugosidade média.

Os valores de rugosidade foram menores para lubri-refrigeração otimizada, seguida pela lubri-refrigeração convencional e por último a técnica de MQL. Os menores valores para a utilização da MQL são para a vazão do lubrificante igual a 80ml/h, comprovando-se assim que a maior quantidade de fluido possibilitou menores valores de rugosidade devido a maior lubrificação alcançada.

Maiores velocidades do fluido de corte permitiram a expulsão do cavaco mais rapidamente, colaborando para o melhor acabamento. As diferenças de rugosidade entre as formas otimizadas são pequenas, mas apresentam uma tendência de melhor qualidade para maiores velocidades de aplicação de fluido de corte.

### Desvio de circularidade

A Figura 7 apresenta os resultados do desvio de circularidade das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas.

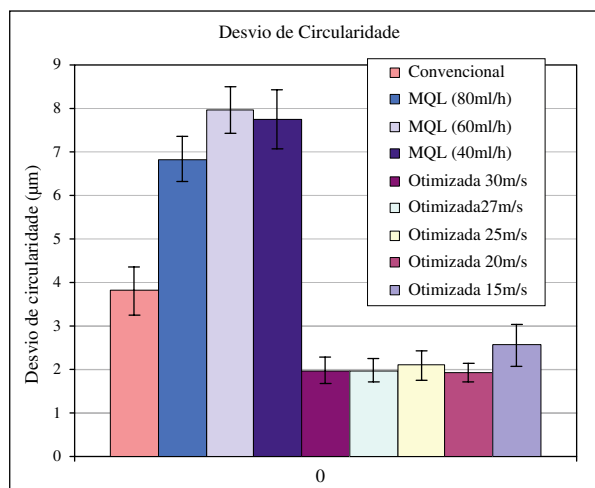


Figura 7. Análise das formas de aplicação de fluido de corte no desvio de circularidade.

Para cada condição usando técnica otimizada os valores não apresentaram diferenças significativas sendo a técnica que apresentou os melhores resultados de desvio de circularidade.

A quantidade de fluido de corte na técnica MQL mostrou-se de fundamental importância no desvio de circularidade.

O valor máximo do erro de circularidade obtido foi 7,9 µm para a condição de MQL com vazão do lubrificante igual a 60ml/h.

Outro fato relevante deve-se a alta condutibilidade térmica dos grãos de CBN que permite uma menor partição da energia gerada para a peça, facilitando desta maneira o controle dimensional e assegurando a integridade superficial do componente usinado.

## CONCLUSÕES

A análise geral dos resultados indica que a técnica da MQL demonstrou ser viável como uma alternativa para a substituição da lubri-refrigeração convencional dependendo do grau de precisão desejado ao componente, proporcionando ganhos ecológicos e econômicos.

- A técnica otimizada demonstra ser fundamental para se obter peças mais precisas comparada às outras técnicas utilizadas, sendo desta forma uma opção de obter peças com maior qualidade sem fazer mudanças de rebolos, fluidos de corte, condições de dressagem e corte.

- Maiores vazões e maiores velocidades de aplicação de fluido de corte proporcionaram melhores resultados para

o material usinado como menores rugosidades e menores desvios de circularidade.

- Nota-se a possibilidade de utilização de rebolos de CBN com menores quantidades de abrasivos associados a formas mais eficientes de aplicação de fluido de corte, sem prejudicar as propriedades dos componentes usinados, contribuindo para a redução de custos do processo de retificação.

- Fluidos de corte menos agressivos ao meio ambiente e à saúde humana, como os fluidos utilizados neste trabalho, mostraram-se capazes de serem utilizados em processos de retificação sem prejudicar a qualidade das peças produzidas contribuindo para uma diminuição dos prejuízos à saúde e à natureza.

- Todas as variáveis analisadas sofreram redução significativa com a aplicação da técnica otimizada, devido à boa lubri-refrigeração proporcionada pela técnica e devido à eficiência proporcionada pelo modelo de bocal inovador utilizado.

- Demonstrou-se que usando velocidades do jato de corte próximas da velocidade de corte obtém-se os melhores resultados, pois nestas condições quebra-se a barreira aerodinâmica ao redor do rebolo e favorece a entrada de fluido além de proporcionar um melhor expulsão do cavaco diminuindo os efeitos deste sobre a peça. Ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados para maiores velocidades de jato em relação à velocidade de corte.

- Conclui-se a possibilidade de utilização da técnica MQL usando rebolo com baixa concentração de abrasivo (15%) em situações onde a especificação da rugosidade e circularidade não são tão apertadas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-Brasil, ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Universidade Estadual Paulista UNESP - Campus de Bauru e Itapeva.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Malkin. "Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives". SME Society of Manufacturing Engineers. 1<sup>th</sup> Edition, p. 275. Dearborn, USA. 1989.
- [2] C. Guo. "Energy Partition and Cooling During Grinding". In 3<sup>rd</sup> International Machining & Grinding Conference, SME Society of Manufacturing

- Engineers, pp. 1-12. Cincinnati, Ohio, USA. October 4-7, 1999.
- [3] J. Webster. "Optimizing Coolant Application Systems for High Productivity Grinding". *Abrasives Magazine*, pp. 34-41. October/November, 1999.
- [4] J. Webster. "Selection of Coolant Type and Application Technique in Grinding". *Supergrind*, pp. 205-218. 1995.
- [5] E.J. Silva. "Análise da Influência dos Tipos de Fluido de Corte e Rebolo na Retificação do Aço SAE HVN-3". Dissertação para obter o grau de mestre. Universidade Estadual Paulista. Bauru, Brasil. 2000.
- [6] E. Brinksmeier. "A Model for the Development of Residual Stresses in Grinding". In: A. Niku-Lari. *Advances in Surface Treatments*. 5 Ed. Pergamon Press. Vol. 5, pp. 173-189. Oxford, USA. 1986.
- [7] S.P. Kohli, C. Guo and S. Malkin. "Energy Partition to the Workpiece for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels". *ASME Journal of Engineering for Industry*. Vol. 117, pp. 160-168. May, 1995.