

## **ESTUDO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA INTERNA DE Mergulho, COM REBOLO CONVENCIONAL, UTILIZANDO-SE O MÉTODO OTIMIZADO DE LUBRIFICAÇÃO PROPOSTO POR WEBSTER**

**Gabriel Nascimento Cuoco, gabrielcuoco@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Rubens Chinali Canarim, rubescanarim@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Manoel Cléber de Sampaio Alves, manoel@itapeva.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Ricardo Pio Barakat Biscioni, ric\_brkt@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Rodolfo Fischer Moreira Oliveira, rodolfo.oliveira@saint-gobain.com<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01, 17033-360, Bauru - SP

<sup>2</sup> Gerente do Grupo Saint-Gobain Abrasivos Ltda. Rua João Zacharias, 342, 07111-150, Guarulhos - SP.

**Resumo:** *A operação de retificação cilíndrica interna de precisão é empregada na fabricação de componentes de responsabilidade na indústria metal-mecânica em geral, como por exemplo, na fabricação de anéis de rolamento e outros componentes. Entretanto, esta operação é a que apresenta menor conhecimento e domínio; sendo assim, fica clara a necessidade de seu aprimoramento, possibilitando a obtenção de grandes níveis de precisão geométrica com maior agilidade. Em relação ao processo de retificação cilíndrica interna, foco de estudo desta pesquisa, cabe ressaltar a sua reduzida difusão no tocante à pesquisa acadêmica, devido à dificuldade de execução. Existem três principais problemas a serem resolvidos, a saber: a aplicação do fluido de corte, em virtude da grande dificuldade de penetração na região de contato entre peça e ferramenta e retirada os cavacos; a flexão da ferramenta utilizada, detentora de pequenas dimensões; e a geração de intenso calor, devido ao longo contato entre a peça e a ferramenta. Este trabalho visa o estudo do comportamento da retificação cilíndrica interna de mergulho a alta velocidade, no processo de acabamento de um aço endurecido, utilizando-se um rebolo convencional e dois métodos de refrigeração: o convencional e o otimizado proposto por Webster. O desempenho de cada operação será avaliado através de dados a respeito da rugosidade, dos erros de circularidade, da microdureza da peça retificada e através do desgaste diametral do rebolo.*

**Palavras-chave:** retificação cilíndrica interna, aplicação otimizada, rebolo convencional, fluido de corte.

### **1. INTRODUÇÃO**

Retificação é a designação mais comum com que se define o processo de usinagem que utiliza partículas abrasivas para promover a remoção de material. A retificação é tradicionalmente considerada como uma operação final de usinagem, capaz de proporcionar valores reduzidos de rugosidade ( $R_a$  de 0,2 a 1,6 $\mu$ m) dentro de apertados índices de tolerâncias. (Malkin, 1989; Chang & Szeri, 1998; Nathan et al., 1999; Diniz et al., 2000; Lee & Kim, 2001).

No processo de retificação, as interações entre os grãos abrasivos da ferramenta abrasiva e a peça são bastante intensas, fazendo com que a alta energia requerida por unidade de volume de material removido seja quase que integralmente transformada em calor, concentrado na região de corte. As elevadas temperaturas geradas podem produzir diversos tipos de danos térmicos à peça, como: queima superficial, alterações micro-estruturais envolvendo mudança de fase, surgimento de tensões residuais, proporcionando uma deterioração da qualidade final do componente produzido (Malkin, 1989; Liao et al., 2000).

O aprimoramento do processo, visando o controle das condições térmicas durante a operação, faz com que cada vez mais atenção seja dispensada à seleção adequada da ferramenta, em função do tipo de material a ser retificado e ao método de refrigeração e tipos de fluidos de corte empregados. Os últimos têm a função de reduzir o atrito e o calor, sendo responsáveis, também, pela expulsão do material removido (cavacos) da zona de corte. Adotando-se tais procedimentos, consegue-se trabalhar com altas taxas de remoção de material, produzindo peças de elevada qualidade dimensional e geométrica, proporcionando a ferramenta abrasiva uma longa vida útil (Sales et al., 1999; Webster et al., 1995 a).

Webster et al. (1995 a) ressaltam que a aplicação de fluido possui fundamental importância no processo de retificação, devido ao intenso atrito existente entre peça e ferramenta, elevando intensamente a temperatura. Não obstante, o jato de fluido possui importância por promover a remoção dos cavacos formados e dos abrasivos liberados durante o processo. Os autores analisaram os modelos convencionais de lubrificação, e verificaram que a extinção de dobras nos bocais poderia facilitar o fluxo do fluido de corte. Assim, optaram pelo desenvolvimento de um bocal capaz de proporcionar uma velocidade de saída acima de 45 m/s, maximizando o efeito de lubrificação na região de corte. Além disso, observaram que a aplicação dependia fundamentalmente do posicionamento do bocal, da velocidade do jato e da distância do local de contato entre peça e ferramenta. Campbell (1995) atenta ainda para os efeitos do posicionamento angular do bocal, pois, segundo ele, um direcionamento inadequado do fluxo pode permitir o surgimento de correntes de ar prejudiciais à trajetória do fluido de corte até a região de corte.

O principal objetivo deste trabalho, contudo, é verificar as possíveis vantagens na aplicação e nos resultados da técnica otimizada de lubrificação proposta por Webster em relação ao método convencional, no processo de retificação cilíndrica interna a alta velocidade de um aço endurecido, utilizando-se rebolo convencional. Essa comparação será feita através das seguintes variáveis de saída: rugosidade da peça a ser retificada, desgaste diametral do rebolo, desvios de circularidade nos corpos de prova e testes de microdureza; assim, será possível determinar quais parâmetros, inclusive os tipos de refrigeração, vazões e velocidades tangenciais, proporcionarão a obtenção de melhores resultados.

## 2. MÉTODO OTIMIZADO DE REFRIGERAÇÃO

De acordo com Webster et al. (1995 b), é possível reduzir a temperatura na região de corte consideravelmente através da utilização de um jato de fluido incidindo diretamente sobre essa área, porém altas velocidades são necessárias para a sua penetração efetiva. Em seu estudo, fazendo o uso de um bocal de formato circular, foi constatada a redução acentuada da temperatura, quando comparado ao jato convencional, de baixa velocidade e que tende a dispersar o fluido.

Outro problema a ser analisado é a barreira de ar existente entre o bocal e a peça, que deve ser vencida pelo fluido de corte; desse modo, faz-se necessária, novamente, a utilização de um bocal eficiente. Webster levou em consideração o formato do bocal durante a entrada e saída do fluido, bem como suas superfícies internas e por esse motivo o bocal desenvolvido por ele é considerado otimizado. As superfícies geométricas côncavas apresentam melhor efeito, pois tendem a aproximar as lâminas de fluido que se formam no interior do bocal. Isso diminui o efeito de turbulência, ao contrário daqueles com superfície convexa, cuja tendência é de separar as lâminas de fluido formadas no seu interior. Um outro aspecto muito importante no desenvolvimento do bocal são os cantos próximos à abertura de saída, como apresentado na Fig. (2.1.). Essa figura ilustra o bocal circular utilizado por Webster (1995 a) e um bocal tradicional muito utilizado.

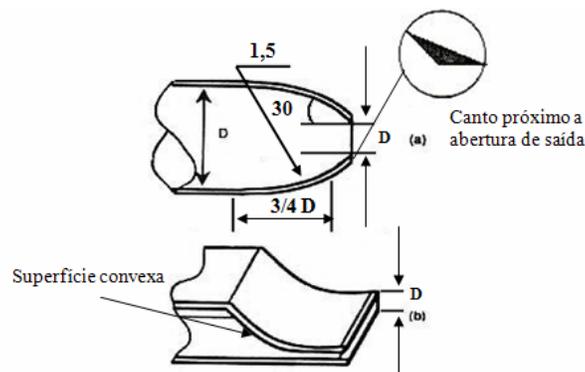


Figura 2.1. Formas de bocais de refrigeração (Webster, 1995 a).

Segundo pesquisa realizada por Webster (1995 c), a velocidade com que o fluido penetra na região de corte deve minimizar os possíveis impactos fluido/ferramenta durante sua penetração na região de corte. Isto foi constatado quando a velocidade do fluido se equivale à periférica do rebolo (relação unitária de velocidades). Neste caso, há a tendência da penetração do fluido, com a mesma velocidade do grão abrasivo, eliminando interferências significativas por parte do grão abrasivo durante a remoção de material.

Ainda segundo Webster, et al. (1999), devido ao crescimento da produtividade das indústrias e ao crescimento da utilização do processo de retificação, grandes volumes de fluido de corte estão se tornando necessários. Deve-se tomar certo cuidado, principalmente com a aplicação daqueles a base de água, com reduzida densidade e, que apresentam grande dispersão no momento de sua utilização com bocais convencionais. Dessa forma, com a necessidade de grandes volumes de fluido para compensar essa perda, se faz necessária a adoção de máquinas de grande porte, com enormes reservatórios, unidades de refrigeração e bombas de alta potência. Por outro lado, utilizando-se o método otimizado, há

a expectativa de uma redução no volume de fluido utilizado e, conseqüentemente, os gastos com aplicação, armazenamento e descarte, gerando assim economias para as indústrias.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, empregou-se uma metodologia de ensaios, utilizando como parâmetros de entrada as condições de usinagem, dando enfoque para o tempo de centelhamento (spark-out), a quantidade de material removido, o material da peça, os métodos de refrigeração e ainda o controle da vazão de fluido.

#### 3.1. Materiais

O banco de ensaios utilizado consistiu basicamente de uma retificadora cilíndrica CNC, modelo RUAP 515 H-CNC da SulMecânica, à qual foram acoplados alguns acessórios, tais como: um cabeçote de elevada rotação para retificação cilíndrica interna, onde foi fixado o rebolo convencional de óxido de alumínio; um suporte para fixação do corpo de prova, confeccionado a fim de eliminar os esforços concentrados encontrados na fixação por castanhas; e os bocais convencional e otimizado baseado no estudo de Webster. Tal banco de ensaios pode ser visualizado através da Fig. (3.1 a). Também foram utilizados um dressador, para realizar a operação de afiação do rebolo, e os corpos de prova, confeccionados em aço SAE 52100, temperado e revenido.

Nas Fig (3.1 b,c) são apresentados os bocais convencional e otimizado utilizados nesta pesquisa. Deve-se ressaltar que a construção do bocal otimizado baseou-se nos estudos realizados por Webster, levando em consideração as principais características geométricas, garantindo assim um jato de fluido com poucas turbulências e dispersões. Já para a lubrificação convencional foi utilizado um bocal muito comum na indústria, que devido às suas características não permite a utilização de elevadas vazões de fluido e não é possível obter um ótimo posicionamento do fluido para lubrificar a região de contato peça/ferramenta durante a usinagem. No caso da refrigeração convencional o fluido é despejado na região de contato sem nenhuma preocupação em relação à efetiva penetração do fluido, enquanto que no método otimizado existe uma maior preocupação no posicionamento do bocal, que direcionará o jato de fluido diretamente à região de contato peça/ferramenta, e na velocidade de saída do fluido refrigerante, que deve estar o mais próximo da relação unitária de velocidades.

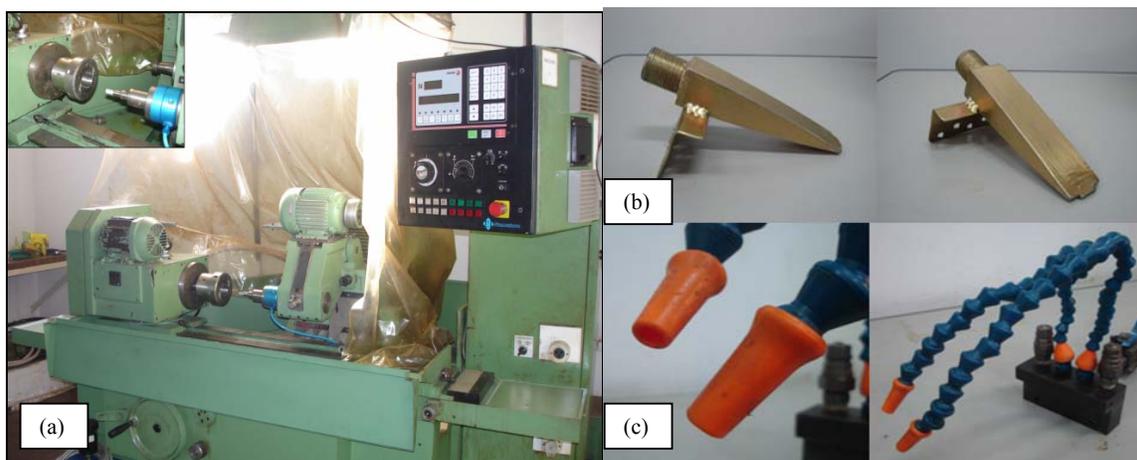


Figura 3.1. (a) Banco de ensaios montado para a realização dos experimentos; (b) bocal otimizado e (c) bocal convencional.

#### 3.2. Métodos

Neste trabalho, foram retificados 20 corpos de prova, sendo os cinco primeiros submetidos ao método convencional de lubri-refrigeração com vazão de fluido empregada de 10 l/min, pois o bocal convencional não suportava maiores vazões; e os outros, submetidos ao método otimizado de lubri-refrigeração proposto por Webster. Para o último, foram utilizadas três vazões distintas de fluido: 12 l/min, 16 l/min e 21 l/min, garantindo velocidades de saída de aproximadamente 15 m/s, 20 m/s e 27 m/s, respectivamente. O intuito de se empregar essas vazões era verificar a influência da velocidade do jato na eficiência do processo. Inicialmente desejava-se uma velocidade de jato do fluido igual à velocidade periférica do rebolo de 30 m/s (condição ótima), porém a bomba não fornecia vazão suficiente e por isso foi adotado o valor de 27 m/s ou 21 l/min de vazão.

Checada a concentração de óleo no fluido de corte, que deveria estar em torno de 5%, tomou início o programa CNC da máquina para a execução do ensaio. Nesta operação, foram executados 180 ciclos de 8µm de avanço radial (ou

mergulho), removendo ao final um total de 1,44 mm no raio interno da peça. Após o final de cada ensaio, foi realizada a numeração e armazenagem do corpo de prova e posteriormente foram feitas as análises das variáveis de saída (rugosidade, erros de circularidade, desgaste diametral do rebolo e microdureza).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados coletados, na forma de gráficos de barras, com seus respectivos desvios-padrão, para facilitar a visualização, como pode ser visto nas Fig. (4.1) e (4.2); posteriormente, será feita uma análise desses parâmetros, verificando a influência das variáveis de entrada.

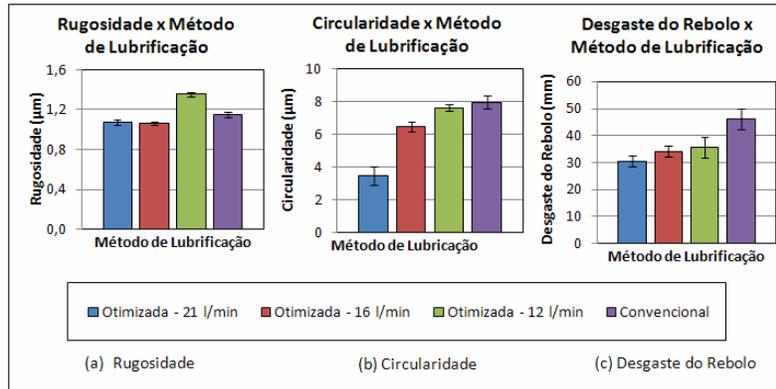
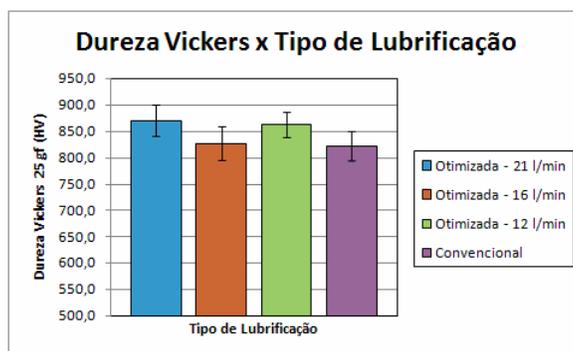


Figura 4.1. Resultados obtidos de rugosidade, erro de circularidade e desgaste do rebolo.

Analisando-se os dados da Fig. (4.1 a) sobre a rugosidade das peças retificadas, pode-se verificar que, para as condições de ensaios onde se utilizou as vazões de 21 l/min e 16 l/min, houve uma maior penetração do fluido de corte na região de contato rebolo/peça pela quebra da barreira aerodinâmica e pela introdução do fluido no contato devido a maior proximidade da velocidade de corte (30 m/s). Ou seja, a refrigeração possibilitou a minimização do atrito entre o rebolo e a peça, da geração de calor e da força de corte. Quando o valor da vazão correspondeu a 12 l/min (15 m/s), a eficiência da refrigeração foi substancialmente reduzida, provocando a elevação da rugosidade da peça, já que não houve a quebra da barreira aerodinâmica e considerando que o jato de fluido é restrito, limitado a área de saída do bocal otimizado. Assim, quando de sua utilização o valor da rugosidade obtida foi a pior de todos os casos estudados. Pela avaliação do desvio padrão dos resultados, pode-se verificar que não houve diferença estatística entre os ensaios onde se utilizou as vazões de 21 l/min e 16 l/min.

De forma similar ao que ocorreu com os resultados de rugosidade, pode-se verificar através da análise da Fig. (4.1 b) a diminuição do erro de circularidade, para os maiores valores de velocidade do fluido. A mesma variável foi significativamente maior quando do uso da vazão de 21 l/min (27 m/s). Isto se deve ao fato de uma refrigeração mais eficiente reduzir o atrito entre o rebolo e a peça e, conseqüentemente, a força de corte, fazendo com que a flexão do eixo que suporta o rebolo seja reduzida em comparação com os casos de refrigeração menos eficiente. Neste sentido, a vibração provocada pelo processo de retificação no sistema máquina/rebolo/peça é menor; portanto, com a melhora da forma de aplicação do fluido de corte há a redução do erro de circularidade. Para os ensaios com refrigeração convencional e refrigeração otimizada de 12 l/min (15 m/s), não houve diferença estatística. Assim, a vazão de 21 l/min (27 m/s) foi a melhor de todas quanto à circularidade.

Considerando que o desgaste do rebolo se relaciona diretamente aos esforços de corte, pode-se verificar pela Fig. (4.1 c) que, em média, o ensaio onde se utilizou a vazão de 21 l/min (27 m/s) possuiu o melhor resultado. Nos ensaios com refrigeração otimizada não houve diferença estatística; entretanto, todos foram estatisticamente melhores, com relação à convencional. Assim, o desgaste do rebolo foi minimizado com a quebra da barreira aerodinâmica, mesmo de forma menos eficiente, como com a vazão de 12 l/min (15 m/s).



**Figura 4.2. Dureza Vickers em função do Tipo de Lubrificação empregado.**

Através da análise da Fig. (4.2), percebe-se que o tipo de lubrificação empregado não exerceu influência na microdureza do material usinado, devido à ausência de diferença estatística nos dados obtidos, quando modificadas a vazão e o tipo de lubrificação. O fato de essa característica se manter constante, garante que a aplicação do fluido de corte foi eficiente em todos os casos, impossibilitando um aumento excessivo da temperatura do corpo de prova durante a usinagem. Comprova-se, desse modo, que não ocorreu nenhuma alteração na microestrutura, como, por exemplo, a retêmpera do material do corpo de prova (queima) ou também o aparecimento de trincas superficiais resultantes de aquecimento excessivo.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos experimentos com os dois métodos de lubri-refrigeração (convencional e otimizado), pode-se concluir, para a retificação cilíndrica interna de mergulho do aço SAE 52100 temperado e revenido, que:

- A quebra da barreira aerodinâmica e a melhor eficiência da penetração do fluido de corte na região de contato entre o rebolo e a peça ocorreram quando do uso da refrigeração otimizada de vazão de 21 l/min (27 m/s); neste caso, houve uma maior redução do atrito, das forças de corte e da temperatura segundo Minke apud Monici et al. (2005), fazendo com que os resultados de rugosidade, erro de circularidade e desgaste do rebolo fossem sempre os menores obtidos.
- Através da mensura da microdureza dos corpos de ensaio usinados, verificou-se a ausência de queima superficial, visto que os valores medidos se mantiveram praticamente constantes.
- O método otimizado de lubri-refrigeração se apresenta como uma alternativa viável à utilização de fluidos de corte na indústria, já que através dele foi possível obter bons resultados nas variáveis de saída em relação ao convencional. Deve-se apenas observar, entretanto, que a velocidade de saída do fluido deve ser a mais próxima possível da velocidade de corte do rebolo, para uma melhor penetração do fluido de corte na região de contato peça/rebolo.
- A realização deste trabalho foi capaz de proporcionar novas informações acerca da aplicação do método otimizado de lubri-refrigeração proposto por Webster, aplicado à retificação interna.

## 6. AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio concedido e a Universidade Estadual Paulista – Campus de Bauru, local de realização deste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campbell, J. D., 1995, “Optimized Coolant Application”, Technical Paper, MR95-211, Society of Manufacturing Engineers.
- Chang C. C.; Szeri A. Z., 1998, “A thermal analysis of grinding”, WEAR, n° 216, p. 77-85.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2000, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição.
- Lee E. S., Kim N. H., 2001, “A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, p. 937-951.
- Liao, Y. S.; Luo, S. Y.; Yang, T. H., 2000, “A thermal model of the wet grinding process”, Journal of Materials Processing Technology, n° 101, p. 137-145.
- Malkin, S., 1989, “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.

- Minke apud Monici, R. D.; Bianchi, E. C.; Catai, R. E.; Aguiar, P. R., 2005, "Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, nº46, p. 122-131.
- Nathan, R. D.; Vijayaraghavan, L.; Krishnamurthy, R., 1999, "In-process monitoring of grinding burn in the cylindrical grinding of steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91, p. 37-42.
- Sales, W. F., 1999, "Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte", Tese de Doutorado, Uberlândia, MG, Abril, 166p.
- Webster J., 1999, "Optimizing coolant application systems for high productivity grinding", *Abrasives Magazine*.
- Webster J., Cui C., Mindek Jr. R.B., 1995 a, "Grinding Fluid Application System Design", *Annals of the CIRP*, Vol. 44.
- Webster J., Cui, C. 1995 b, "Flow Rate and Jet Velocity Determination for Design of a Grinding Cooling System", presented at 1st International Machining & Grinding conference, September 12-14, Dearborn, MI.
- Webster J., 1995 c, "Selection of coolant type and application technique in grinding", *Supergrind*, p. 205-218.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

## **A STUDY OF INTERNAL PLUNGE GRINDING PROCESS, WITH AL2O3 WHEEL, USING THE OPTIMIZED COOLANT METHOD PROPOSED BY WEBSTER**

**Gabriel Nascimento Cuoco, gabrielcuoco@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Rubens Chinali Canarim, rubenscanarim@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Manoel Cléber de Sampaio Alves, manoel@itapeva.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Ricardo Pio Barakat Biscioni, ric\_brkt@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Rodolfo Fischer Moreira Oliveira, rodolfo.oliveira@saint-gobain.com<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01 17033-360 Bauru – SP

<sup>2</sup> Gerente do Grupo Saint-Gobain Abrasivos Ltda

**Abstract:** *The precision internal plunge grinding is employed on manufacturing responsibility parts of mechanical industry, as for example, bearing rings in general. Therefore, there is a lack of knowledge about this operation; thus, it is clear the need of its improvement, making possible to achieve high geometric precision tolerances with greater speed. In relation to internal plunge grinding, scope of the present study, its reduced diffusion regarding the academic research is noteworthy, due to the process difficult execution. There are three main problems to be solved, as follows: the cutting fluid application, due to the difficult penetration on the contact region between the workpiece and the wheel; tool bending, because of its reduced dimensions; and intense heat generation, due to the long contact between the workpiece and the tool. This work aims to study the behavior of high speed internal plunge grinding, of hardened steel finishing, using conventional Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wheel and two cooling methods: conventional and the optimized proposed by Webster. Each operation will be evaluated by means of output data as surface roughness, roundness errors, workpiece micro-hardness and diametral wheel wear.*

**Keywords:** internal plunge grinding, optimized application, conventional wheel, cutting fluid.