

## **Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados**

Alves, M.C.S.<sup>1</sup>; Bianchi, E.C.<sup>1</sup>; Aguiar, P.R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Dept<sup>o</sup>. de Eng<sup>a</sup>. Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

e-mail: [manoelcsa@yahoo.com.br](mailto:manoelcsa@yahoo.com.br), [bianchi@feb.unesp.br](mailto:bianchi@feb.unesp.br), [aguiarpr@feb.unesp.br](mailto:aguiarpr@feb.unesp.br)

---

### **RESUMO**

A tendência mundial é o aumento da produtividade e da produção de peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional, com bom acabamento superficial, com baixo custo. A retificação é responsável pelo acabamento final no processo de usinagem de um material. No entanto, danos gerados nesta fase de produção comprometem todos os recursos utilizados nas fases anteriores. Grande parte dos problemas ocorridos na retificação deve-se à enorme temperatura gerada pelo processo devido às condições de usinagem. Atribui-se à velocidade de avanço, que está diretamente relacionada com a produtividade, os danos ocorridos na retificação, ficando esta variável limitada até valores que não proporcione danos. Neste trabalho, através da variação da velocidade de avanço no processo de retificação cilíndrica externa do aço ABNT D6, racionalizando a aplicação de dois fluidos de corte e usando um rebolo superabrasivo de CBN (nitreto de boro cúbico) com ligante vitrificado, avaliou-se a influência da velocidade de avanço nos danos superficiais de aços endurecidos. Os resultados permitiram concluir que a velocidade de avanço associada a uma eficiente refrigeração e lubrificação, não provocou danos térmicos (queima, trincas, tensões de tração) ao material. Tensões residuais e a rugosidade do material retificado apresentaram uma correlação com as condições de usinagem. O trabalho concluiu ser capaz um aumento dos índices de produtividade sem provocar danos nos componentes retificados.

**Palavras-chaves:** aços endurecidos, danos térmicos, rugosidade, tensão residual, retificação, velocidade de avanço.

---

## **Influence of the grinding wheel's dive speed on the damage of rectified hardened steels**

### **ABSTRACT**

The world tendency is the increase of the productivity and the production of pieces more and more sophisticated, with high degree of geometric and dimensional tolerances, with good surface finish and low cost. Rectification is responsible for the final finish in the machining process of a material. However, damages generated in this production phase affect all the resources used in the previous processes. Great part of the problems happenning in the rectification process is due to the enormous temperature generated in this activity because of the machining conditions. The dive speed, which is directly related to the productivity, is considered responsible for the damages that occur during rectification, limiting its values to those that do not cause such damages. In this work, through the variation of the dive speed in the process of cylindrical grinding of type ABNT D6 steel, rationalizing the application of two cutting fluids and using a CBN (cubic boron nitrate) abrasive wheel with vitrified blond, the influence of the dive speed on the surface damages of hardened steels was evaluated. The results allowed to say that the dive speed, associated to an efficient cooling and lubrication, didn't provoke thermal damages (including heated zones, cracks and tension stresses) to the material. Residual stresses and the roughness of rectified materials presented a correlation with the machining conditions. The work concluded that it is possible to increase the productivity without provoking damages in the rectified components.

**Keywords:** hardened Steels, rectification, thermal damages, roughness, residual stresses, grinding, dive speed.

## 1 INTRODUÇÃO

A retificação é conhecida como um dos mais complexos processos de usinagem devido ao grande número de variáveis englobadas. Tal processo confere à peça o acabamento final, minimizando as rugosidades e irregularidades superficiais.

Durante a retificação, as temperaturas geradas são devidas à energia entrando no processo. Tais temperaturas são dependentes do estado de afiação do rebolo, bem como das grandezas do processo [1].

Segundo Malkin [1], o processo de retificação requer uma quantidade significativa de energia para a remoção de material. Durante o processo, esta energia é transformada em calor, o qual é concentrado dentro da região de corte, e dissipada através da peça, sendo causadora de vários danos à peça, tais como queima, tensões residuais de tração, transformação de fase, trincas e redução de resistência à fadiga. Além disso, a expansão térmica da peça durante a retificação contribui para erros dimensionais e de forma no estado final da peça.

Um dos tipos mais comuns de dano térmico é a queima da peça. Quando a queima superficial começa, existe uma tendência do crescimento de adesão de partículas metálicas nos grãos abrasivos do rebolo, tendo como consequência o aumento das forças de retificação e a deterioração da qualidade superficial da peça. Isso leva ao aumento da perda diametral do rebolo, fazendo com que o desgaste volumétrico aumente.

Malkin [1] afirmou que a queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado. Verificou-se que a queima superficial induzida pelo processo de retificação é acompanhada por um processo de re-austenitização do material. Em aços temperados retificados sem queima superficial existe normalmente um amolecimento do material próximo à superfície, uma vez que foram atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. Com a queima ocorre a retempera do material, consequência da re-austenitização, seguida da formação de martensita não-revenida. A constatação é feita com análise metalográfica, onde se verifica o aumento da microdureza superficial.

O processo de retificação acaba por originar tensões residuais na superfície usinada, afetando o comportamento mecânico do material. Tais tensões residuais são induzidas por deformação plástica não-uniforme na superfície da peça. Uma vez que o mecanismo de formação do cavaco na retificação inicia-se com deformações plásticas, resulta predominantemente em tensões residuais compressivas provocadas por deslocamentos plásticos localizados. Entretanto, o aquecimento e resfriamento de forma diferente ao longo da peça, mais rápido na superfície do que no núcleo, tendem a gerar tensões residuais de tração. Tal fenômeno torna-se de maior complexidade se houver transformação de fases, já que isto implica em mudanças de volume.

Tensões residuais de compressão são consideradas benéficas nas propriedades mecânicas dos materiais, aumentando a resistência à fadiga, enquanto as tensões de tração são prejudiciais para a resistência mecânica, a corrosão e o desgaste (abrasão a altas temperaturas). De forma geral, deseja-se controlar a indução das tensões residuais através da adequação das condições de usinagem. Todavia, a demanda por maiores taxas de remoção resulta em maiores tensões residuais de tração, necessitando adotar taxas de remoção menores.

A utilização de rebolos de CBN tem permitido [2] a obtenção de tensões residuais de compressão, ao invés de tensões residuais de tração, devido à redução das temperaturas geradas na retificação em função das menores energias específicas obtidas com tais rebolos, devido à alta condutibilidade térmica dos grãos de CBN, contribuindo para a remoção de calor e para a redução do risco de dano térmico no componente retificado.

Segundo Webster [2] [3], 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 não esteja penetrando na região de corte, efetivamente.

Nos processos de retificação, o uso de fluidos de corte tem como função remover o calor excessivo formado no ato do corte; lubrificar a região em que este ocorre; remover o excesso de cavacos formados; manter a ferramenta de corte (rebolo) limpa; e minimizar a corrosão dos materiais envolvidos [4].

A velocidade de avanço (mergulho) determina a taxa de remoção volumétrica do material a ser processado. Maiores velocidades de avanço aumentam [5] as forças de corte e os níveis de emissão acústica, sendo necessárias máquinas mais robustas para suportar tais forças. No entanto, maiores velocidades de mergulho possibilitariam menores tempos de usinagem e ganho na produtividade. Costuma-se associar maiores velocidades de avanço a maiores danos no material processado.

Neste trabalho verificou-se, na retificação cilíndrica externa de mergulho, a influência da velocidade de mergulho usando um rebolo de CBN e com a aplicação otimizada de diferentes fluidos de corte. Foram analisadas as variáveis de saída: rugosidade superficial, tensão residual e análise microestrutural.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise da influência da velocidade de avanço (mergulho) nos danos de aços endurecidos retificados empregou-se uma metodologia de ensaios utilizando uma retificadora cilíndrica modelo RUAP 515H do fabricante SULMECÂNICA equipada com um comando numérico CNC da Fagor. Utilizou-se a retificação cilíndrica externa de mergulho. Como parâmetros de entrada, utilizou-se a variação da velocidade de mergulho “ $v_f$ ” (cinco valores proporcionando grandezas distintas de taxa de remoção de material) e a utilização de dois fluidos de corte distintos.

Como ferramenta foi utilizado um rebolo superabrasivo de CBN (Nitreto de Boro Cúbico) 876-L360N3, fabricado com ligante vitrificado, diâmetro externo de 350 mm, largura de 20 mm e espessura de 5mm. Este tipo de rebolo (rebolo superabrasivo) possibilita ganhos significativos de produtividade e qualidade. As operações de dressagem da ferramenta abrasiva foram mantidas constantes para todos os ensaios. Para tanto, utilizou-se uma dressador do tipo conglomerado com dimensões 15x8x10. Nesta operação, a retirada de material do rebolo foi de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ , ou até que a ferramenta abrasiva não apresentasse nenhuma marca referente à usinagem.

Os Corpos de Prova foram fabricados com o aço ABNT D6 (AISI/SAE D6, GERDAU D6, DINW.NR 1,2436 ,X210CrW12, VC 131,). Foram temperados e revenidos, obtendo-se dureza de 62 HRc. O aço ABNT D6, de enorme aplicação industrial, é um aço ligado para ferramentas utilizado para trabalhos a frio. Apresenta extrema estabilidade dimensional conhecido como indeformável, possuindo excepcional resistência à abrasão.

Utilizou-se como fluidos de corte o óleo emulsionável de base vegetal (a base de ésteres sintéticos), com especificação DMS 3200 F-1 com concentração de 3,5 %, com pH mantido em 9,0 e o fluido sintético, com a especificação AGECOOL 939/B, com concentração de 3,5% e pH igual a 9,0.

Foi utilizado um bocal circular conforme Webster [2] com saída circular de  $\varnothing 4\text{mm}$ , para distribuir o fluido de corte a uma velocidade aproximadamente igual à velocidade periférica do rebolo ( $V_s$ ). Tal velocidade é necessária para que o fluido de corte vença a barreira de ar gerada pela alta rotação do rebolo e penetre na região de contato entre ferramenta e peça sem perda de velocidade e pressão (Webster [2]), agindo de forma favorável à refrigeração do processo.

Para a análise dos ensaios foram avaliadas variáveis de saída pelas quais se possam analisar a influência da velocidade de avanço. Estas variáveis de saída foram:

-Rugosidade: a obtenção da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) foi realizada através de um rugosímetro portátil modelo Subtronic 3+ da marca Taylor Hobson e do software TalyProfile<sup>®</sup>, versão Lite 3.1.4. O rugosímetro era ajustado para efetuar a medição com um comprimento de amostragem  $l_c = 0,8 \text{ mm}$  e  $cut-off = 0,8 \text{ mm}$  e foi posicionado de uma forma que a medição fosse executada no sentido axial da peça.

-Tensão residual: para a obtenção da tensão residual foi utilizado um Difratômetro de Raios X Siemens Modelo D5000, através do método de múltipla exposição (determinação da distância interplanar para vários ângulos de inclinação da amostra). A análise dos dados obtidos foi realizada mediante o uso do software S2003 (R.M/2003).

-Integridade superficial: realizada através de um Microscópio Eletrônico de Varredura Leica, modelo Stereoscan 440. A utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi feita para verificar os possíveis danos causados à superfície do material através de solicitações térmicas e mecânicas.

Os parâmetros de corte utilizados foram: Velocidade de corte  $V_s=30 \text{ m/s}$ , penetração do rebolo na peça  $a=0,1\text{mm}$ , tempo de centelhamento  $t_s=8\text{s}$ , velocidade periférica da peça  $V_w = 1,24 \text{ m/s}$ , diâmetro da peça  $d_w=62 \text{ mm}$ , largura de retificação  $b=3\text{mm}$ , velocidade do jato de fluido de corte  $V_j = 30\text{m/s}$ , vazão de fluido de corte de 22,6L/min, bocal circular com  $\varnothing 4\text{mm}$  (refrigeração otimizada); Foram realizados 100 ciclos de usinagem para cada ensaio.

Os ensaios foram divididos em grupos de três, indicando a repetibilidade para cada velocidade de mergulho, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Velocidade de mergulho para os diferentes fluidos de corte.

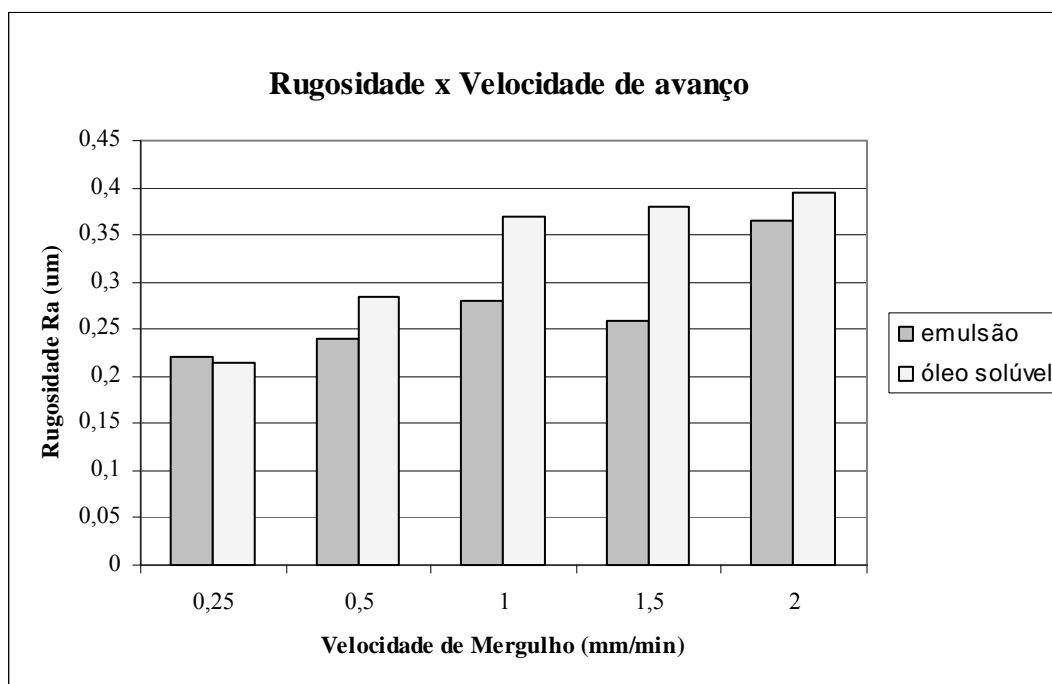
| Ensaios | Fluido de Corte                          | Velocidade de Mergulho ( $V_f$ ) (mm/min) |
|---------|--|---|
| 1 a 3   | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 2,00                                      |
| 4 a 6   | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 1,50                                      |
| 7 a 9   | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 1,00                                      |
| 10 a 12 | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 0,50                                      |
| 13 a 15 | Óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 | 0,25                                      |
| 16 a 18 | Emulsão Agecool 939/B                    | 2,00                                      |
| 19 a 21 | Emulsão Agecool 939/B                    | 1,50                                      |
| 22 a 24 | Emulsão Agecool 939/B                    | 1,00                                      |
| 25 a 27 | Emulsão Agecool 939/B                    | 0,50                                      |
| 28 a 30 | Emulsão Agecool 939/B                    | 0,25                                      |

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, são apresentados os resultados obtidos através da análise das variáveis de saída: força tangencial de corte, rugosidade superficial, tensão residual, desgaste radial do rebolo, emissão acústica, desvio de circularidade e análise da integridade superficial das peças retificadas.

#### 3.1 Resultados de Rugosidade

Nos resultados de rugosidade ( $R_a$ ) apresentados na Figura 1, para cada ensaio foram efetuadas três medições, possibilitando deste modo a determinação da média dos valores.



**Figura 1:** Rugosidade média para ensaios realizados com óleo solúvel de base vegetal e emulsão para as cinco velocidades de mergulho utilizadas.

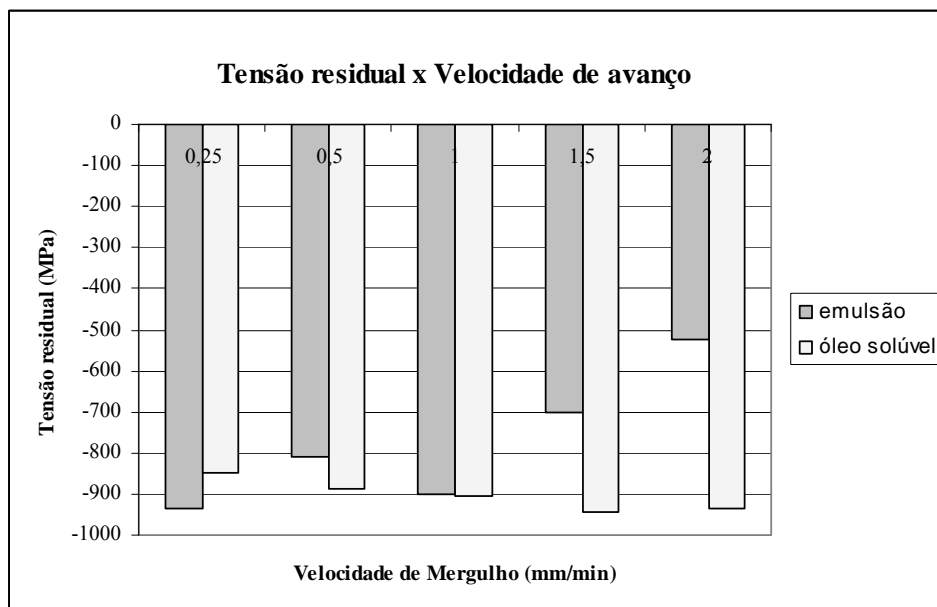
Para os resultados da rugosidade, percebeu-se que há um comportamento característico. Observam-se maiores rugosidades para maiores velocidades de mergulho, já que neste caso a taxa de remoção de material é maior; e menores rugosidades para ensaios com emulsão solúvel devido a melhor capacidade de lubrificação que este proporciona.

Os resultados obtidos são coerentes com os obtidos por Lee e Kim [6], onde este afirma que, para maiores taxas de avanço, a rugosidade deve ser maior do que para condições mais amenas. Os valores de rugosidade obtidos nos ensaios são coerentes para o processo de retificação ( $R_a$  abaixo de  $1,6 \mu m$ ), o que é

atribuído, dentre outros, ao tempo de centelhamento. Segundo Hara [7], o efeito da rugosidade pode ser melhorado pelo fato dos ensaios terem envolvido regiões de centelhamento de 8 segundos.

### 3.2 Resultados para Tensão Residual

Os valores de tensões residuais de compressão gerados com a refrigeração otimizada, apresentados na Figura 2, indicam que o jato de fluido penetrou de maneira eficiente na região de corte, proporcionando uma boa lubri-refrigeração, reduzindo o atrito peça/rebolo e contribuindo para a manutenção da afiação do rebolo.



**Figura 2:** Tensão de compressão para o uso de óleo solúvel de base vegetal e emulsão para as 5 velocidades de mergulho empregadas.

Analisando-se todas as condições de usinagem com relação à peça submetida à têmpera e revenimento, nota-se que as condições testadas resultaram em valores de tensão residual de compressão que são benéficas às propriedades mecânicas do material, proporcionando assim uma melhoria na integridade superficial.

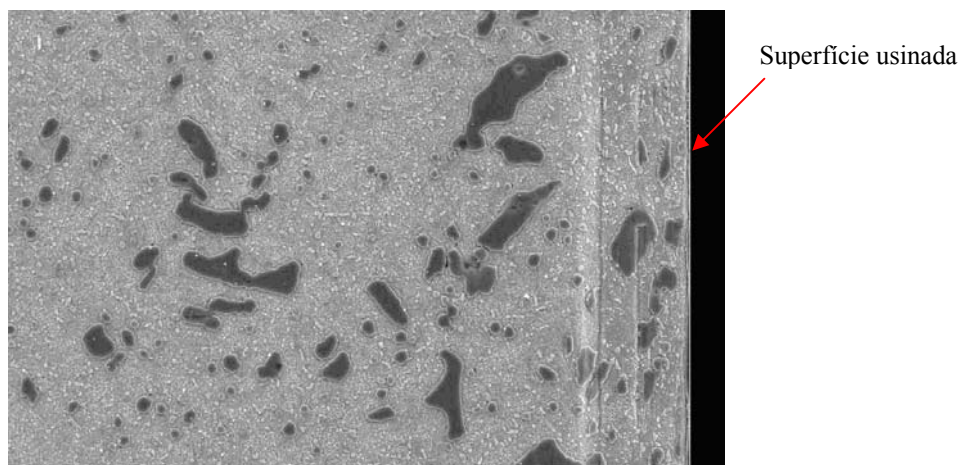
Observa-se que o óleo solúvel de base vegetal foi o fluido que apresentou os melhores resultados com os maiores valores de tensão de compressão.

Estes resultados são confirmados por Brinksmeier [8] pelo fato dos rebolos de CBN, que apresentaram alta condutibilidade térmica dos grãos, ser menos sensíveis às variações na quantidade de material removido, garantindo tensões residuais de compressão, mesmo após longos períodos de retificação.

Segundo Malkin [1], os fluidos de corte devem promover a predominância dos mecanismos de corte ao invés da deformação plástica, sem a remoção de material (*plowing*), pela manutenção da afiação do rebolo e pela diminuição do coeficiente de atrito peça-ferramenta (Hitchiner [9]). Desta forma, diminui-se a energia específica de retificação gerada no processo de usinagem, diminuem-se as temperaturas na região de corte e a possível incidência dos danos térmicos. No entanto este fato não ocorre em processos convencionais.

### 3.3 Resultados para a Integridade Superficial Através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Análises microestruturais realizadas através de microscopia eletrônica de varredura dos 30 corpos de prova ensaiados se mostraram semelhantes, não apresentando queima superficial, trincas, microtrincas e mudanças de fases. Para ilustrar, na Figura 3 é apresentada a microscopia para uma condição com velocidade de mergulho de 2 mm/min.



**Figura 3:** Microscopia eletrônica de varredura para ensaio realizado com óleo solúvel de base vegetal, com velocidade de mergulho de 2,00 mm/min.

Pode-se afirmar que não ocorreram diferenças nas microestruturas quando da variação da velocidade de avanço e do tipo de fluido de corte, pois as condições de corte empregadas não foram tão agressivas que pudessem alterar a microestrutura do aço ABNT D6 temperado e revenido. A quantidade de calor gerada no processo, absorvida pela peça durante o processo de retificação, não foi suficiente para produzir alterações subsuperficiais, mostrando que a refrigeração através da otimização da aplicação de fluido foi eficiente. Resultados semelhantes foram encontrados por Klocke et al. [8] na retificação externa de mergulho aplicando-se refrigeração com bocal de sapata (24 l/min) e da técnica da MQL (215 ml/h).

Dos resultados obtidos, pode-se verificar que é possível o aumento das taxas de remoção de material no processo de retificação, aplicando condições de uso de fluido de corte otimizadas e rebolos superabrasivos, sem causar danos microestruturais nos aços temperados.

#### 4 CONCLUSÕES

Pode-se observar a influência das velocidades de avanço nos danos superficiais de aços endurecidos utilizando retificação cilíndrica de mergulho, otimizando a aplicação de fluido de corte e utilizando rebolo superabrasivo de CBN com ligante vitrificado. Pode-se concluir que:

- A análise das micrografias apresentou resultados semelhantes para todas as velocidades e tipos de fluido de corte utilizados não apresentando danos superficiais.
- Fluidos com maior refrigeração proporcionaram menores valores de rugosidade, devido ao seu maior poder de retirada do calor gerado no processo.
- Comparativamente o óleo solúvel de base vegetal apresentou melhores resultados para a tensão residual, pois este óleo proporciona, comparativamente com a emulsão, a menor taxa de resfriamento e o maior poder lubrificante, o que reduz o atrito e a geração de calor na zona de retificação.
- Quanto aos valores das rugosidades obtidas, constatou-se que há variações que demonstram um comportamento relacionado à taxa de avanço (velocidade de mergulho), ou seja, há uma rugosidade maior para maiores taxas de avanço.
- O aumento da velocidade de mergulho associada a uma aplicação otimizada e eficiente dos fluidos de corte não produziu alterações superficiais nos aços temperados retificados.
- É possível um aumento da produtividade do processo de retificação através do aumento da velocidade de avanço sem causar danos superficiais, proporcionando tensão residual benéfica de compressão e mantendo os níveis de rugosidade dentro de padrões aceitáveis.

#### 5 BIBLIOGRAFIA

- [1] MALKIN, S., *Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage*, In: Malkin, S. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, ed. 1, Chichester, Ellis Horwood Limited, pp.108-171, 1989.
- [2] WEBSTER, J.A., CUI, C., MINDEK JR., R.B., “Grinding fluid application system design”, *Annals of the CIRP*, v. 44, n.1, pp. 333-338, 1995.

- [3] WEBSTER, J., “Optimizing coolant application systems for high productivity grinding”, *Abrasives Magazine*, pp. 34-41, October/November 1999.
- [4] EBBRELL, S., WOOLLEY, N.H., TRIDIMAS, Y.D., ALLANSON, D.R., ROWE, W.B., “The effects of cutting fluid application methods on the grinding process”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 40, n. 2, pp. 209-223, January 2000.
- [5] NGUYEN, T., ZHANG, L.C., “An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 140, n. 1, pp. 224-230, September 2003.
- [6] LEE, E.S., KIM, N.H., “A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor”, *International Journal Of Machining Tools & Manufacture*, v. 41, n. 7, pp. 937-915, May 2001.
- [7] HARA, C.M., *Uma contribuição para o monitoramento de retificação cilíndrica de mergulho*, Tese de D.Sc., Unicamp, Campinas, SP, Brasil, 1999.
- [8] BRINKSMEIERS, E., “A model for the development of residual stresses in grinding”. In: Niku-Lari, A. *Advances in Surface Treatments*, ed. 5, Pergamon Press, v. 5, pp. 173-189, 1986.
- [9] HITCHINER, M.P., “Precision grinding systems for production grinding with vitrified CNB”, *SME Technical Paper Mr 90-507*, pp. 1-11, 1990.