

Limpeza da superfície de corte de rebolos por um sistema de ar comprimido na retificação cilíndrica externa de mergulho de materiais cerâmicos refrigerados com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL)

(Grinding wheel surface cleaning using a compressed air system, in external plunge grinding of ceramics using the minimum quantity lubricant (MQL) technique)

E. C. Bianchi¹, A. E. Diniz², M. G. Pereira¹, J. F. da Silva Neto¹, P. R. de Aguiar³, L. G. Guermandi¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, C. P. 473 Bauru, SP, 17033-360

²Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas, SP, 13081-970

³Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, C. P. 473 Bauru, SP, 17033-360

Resumo

Nos processos de retificação, a utilização de fluidos de corte é uma maneira de implementar a qualidade final do processo, pois os fluidos têm como finalidade a lubrificação na área de contato entre a peça e ferramenta e a refrigeração das superfícies, assim evitando danificações na superfície da peça. Com isso, a utilização de fluidos de corte tem sido constantemente estudada, visando diminuir a utilização deste, pois a utilização de fluidos de corte tem seus problemas. O custo do produto final aumenta consideravelmente com o uso de fluidos de corte no processo de retificação, além de que os fluidos de corte são substâncias tóxicas e nocivas tanto às pessoas quanto ao meio ambiente. Portanto, indústrias, universidades e centros de pesquisas são levados a pesquisar métodos alternativos menos prejudiciais ao meio ambiente. Dentre as alternativas surge a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL), que também tem suas desvantagens, como por exemplo, a formação de um borra de óleo na superfície de corte do rebolo, o que gera uma rugosidade maior na peça. Porém, visando minimizar o problema da formação da borra de óleo podem ser usados jatos de ar comprimido incidindo na superfície de corte do rebolo, com o objetivo de limpar a mesma. Este estudo será feito através da análise da avaliação das variáveis de saída do processo de retificação externa, como o comportamento da rugosidade superficial e dos desvios de circularidade. Através dos resultados obtidos pretende-se estudar a técnica do MQL, visando melhorá-la através da limpeza da superfície de corte do rebolo com jatos de ar comprimido. **Palavras-chave:** retificação externa, mínima quantidade de lubrificante (MQL), preocupação ambiental, cerâmica, rebolo diamantado, limpeza de rebolos, jatos de ar comprimido.

Abstract

In grinding, the use of cutting fluids aims to improve the final quality of the process, because their purpose is to lubricate the contact area between workpiece and tool and the surface cooling, thus avoiding damages on the machined part. Therefore, this subject has been constantly studied, in order to diminish the amounts applied, due to some problems it may cause. The cost of the final product enhances considerably with the application of cutting fluids; they are environmentally hazardous substances, and the cause of many illnesses to the people involved. In this case, industries, universities and research centers are prompted to research alternative methods which are less harmful to the environment. Between these arises the minimum quantity lubricant (MQL) technique, however having also its disadvantages, like the formation of a grout on wheel surface, which generates higher surface roughness on the workpiece. Aiming to minimize the problems concerning this grout, compressed air jets can be applied in order to clean the abrasive tool, which is the subject of the present work. This study aims to analyze some output variables of the external plunge grinding as surface roughness and roundness errors. Using the obtained results, it is intended to study MQL technique, aiming its improvement through the surface cleaning of the grinding wheel by compressed air jets.

Keywords: external grinding, minimum quantity of lubricant (MQL), environmental concern, ceramics, diamond wheel, grinding wheel cleaning, compressed air jets.

INTRODUÇÃO

A cerâmica tem tido cada vez mais espaço em aplicações na indústria nas últimas duas décadas, devido

às suas características de elevada dureza e rigidez, porém o sucesso na maioria das aplicações depende não somente das propriedades do material e do projeto da peça, mas também da qualidade do produto usinado. Uma desvantagem desse

material é que possui alto custo agregado ao acabamento da peça, sendo o processo de retificação o mais utilizado para a usinagem deste material. Na fabricação de cerâmicas, devido principalmente à retificação, o custo com o acabamento é responsável por 50% do custo total da fabricação [1, 2]. A falta de confiabilidade, todavia, advém da grande dispersão dos valores de resistência mecânica provocada por defeitos, que podem ter origem no processo supracitado.

Na retificação, as interações entre os grãos abrasivos da ferramenta 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, o que pode produzir danos térmicos à peça. Com isso, o uso de fluidos de corte se torna imprescindível na retificação de cerâmicas [3, 4]. A aplicação desses fluidos na retificação é viável, porém tem suas desvantagens, como: o aumento do custo final, o risco de saúde pela parte dos trabalhadores que possuem contato direto com o fluido e o impacto ambiental causado no seu posterior descarte. Devido a esses problemas, têm ocorrido excessivos esforços visando reduzir o uso de lubrificantes; assim, surge a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) como alternativa. A técnica do MQL tem mostrado ser ineficiente em obter uma boa rugosidade em relação à lubrificação convencional, pois é caracterizada por um baixo fluxo de fluido, tendo assim uma grande dificuldade de remover cavacos da superfície de corte do rebolo, causando um entupimento nos poros por uma “borra” de óleo com cavacos.

Deste modo, este trabalho visa experimentar a viabilidade da incidência de jatos adicionais de ar comprimido na superfície de corte do rebolo para efetuar sua limpeza durante o processo. Portanto, a utilização dessa limpeza é um método de providenciar maior eficiência ao uso da mínima quantidade de lubrificante, já que esta é uma alternativa ecologicamente viável perante as aplicações convencionais. Serão analisadas variáveis de saída da peça relacionadas à qualidade, como rugosidade superficial e os desvios de circularidade. Para a análise da eficiência da utilização de jatos de ar para a limpeza da superfície de corte de rebolos, serão comparados ensaios com refrigeração por MQL com e sem limpeza, e a refrigeração convencional.

Retificação de cerâmicas

O uso das cerâmicas no campo da Engenharia Mecânica tem crescido expressivamente nos últimos anos [5]. Esses materiais apresentam três características principais que fazem com que tenham vantagens em relação aos outros: sua capacidade de operação em altas temperaturas, alta dureza e alta resistência ao desgaste. Além disso, nota-se que a densidade das cerâmicas é bem menor que a dos aços. Ainda segundo esse autor, a remoção de material em cerâmicas pode ocorrer de duas maneiras diferentes, sendo uma pelo “processo de remoção por modo dúctil”, onde a remoção do cavaco é feita por uma mudança elasto-plástica, ou pelo chamado “processo de remoção frágil” em que o material

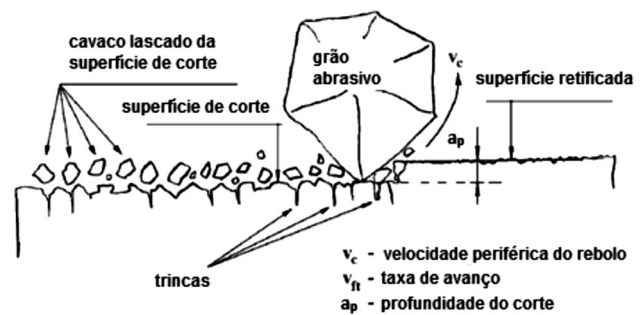


Figura 1: Modelo de formação do cavaco na retificação em cerâmicas [5].

[Figure 1: Model of chip formation in grinding of ceramics [5].]

removido da cerâmica é retirado por um processo de trinca, separação e remoção do material. Assim, é preciso estar atento às taxas de avanço, pois os movimentos dos grãos abrasivos da ferramenta provocam um lascamento adicional, aumentando a profundidade de corte, como pode ser visto na Fig. 1, o que ocorre um aumento na taxa de avanço de corte, que depende diretamente da profundidade de corte.

Como a estrutura cristalina da cerâmica é menos simétrica que a estrutura dos metais, mesmo o aumento de temperatura próximo ao ponto de fusão não resulta na ativação de mais do que dois ou três sistemas de deslizamento de discordâncias. Assim, há pouca deformação plástica e a elevada dureza persiste mesmo em altas temperaturas, ao contrário dos metais [6].

Uso dos fluidos de corte nos processos de retificação

Os fluidos de corte têm por finalidade a lubrificação (reduzindo o atrito da ferramenta com a peça), refrigeração, (removendo o calor gerado pelo atrito), remoção do cavaco produzido pelo processo e proteção das partes metálicas contra a corrosão. Através do fluxo de fluido de corte podem-se retirar os cavacos restantes da zona de corte, reduzindo assim, a possibilidade de dano à peça [7]. A aplicação de fluidos de corte nos processos de usinagem, quando feita de modo adequado, é responsável por aumentar a produtividade e reduzir custos, tornando possível a utilização de velocidades de corte mais altas com maiores taxas de remoção e profundidades de corte. Além disso, sua correta aplicação evita a ocorrência de grandes desgastes da ferramenta, reduz os valores de rugosidade e os níveis de energia consumida [8, 9]. Porém a usinagem com fluidos de corte tem várias desvantagens em relação à usinagem a seco, como por exemplo, o maior custo, o risco de saúde pela parte dos trabalhadores que estão em contato com o fluido de corte e o impacto ambiental causado no seu descarte corte, mas apesar das desvantagens a usinagem com fluidos de corte é mais viável, pois tem algumas funções essenciais que na retificação a seco estão ausentes, como diminuir o calor na região de corte. Porém, muitas indústrias aplicam fluidos de corte em abundância quando seu uso nem se quer se faz necessário. Tal medida deve ser

evitada, pois o custo dos fluidos de corte pode chegar a 20% do custo total do processo de usinagem [10]. Os fluidos de corte podem provocar sérios danos à saúde do operador da máquina. Estas podem ter contato direto com a pele, engolir partículas ou mesmo respirar a névoa, a qual tem um efeito irritante. Além disso, sua composição pode mudar durante as conseqüentes operações, tornando-se mais deletério à saúde de quem trabalha, através de produtos de reações químicas, corpúsculos estrangeiros e microrganismos [11]. A fim de satisfazer leis governamentais e locais no que diz respeito à poluição da água, todo fluido de corte solúvel em água deveria sofrer uma espécie de tratamento antes de ser expelido em rios, córregos ou ainda no sistema de esgoto, pois os elementos químicos nele contidos, tais como óleos nitritos, fenóis, fosfatos e metais pesados são extremamente poluentes. O conteúdo dos óleos de corte podem ser quebrados ou separados da emulsão por um tratamento de ácido ou sulfato de alumínio [8]

Devido aos problemas do uso de fluidos de corte indústrias, universidades e centro de pesquisas são levados a pesquisar métodos alternativos menos prejudiciais ao meio ambiente. Dentre as alternativas surge a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL), que consiste em uma mistura de ar comprimido e óleo, que juntos formam uma névoa que é aplicada na região de corte. A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) destaca-se atualmente como uma tendência dentre os métodos de lubrificação empregados nos processos de usinagem em geral. Tal técnica é responsável por trazer benefícios para as indústrias aumentando sua competitividade no mercado, pois combina a refrigeração com um consumo muito baixo de fluido de corte no processo de retificação, o que é essencial para que se obtenha maior vida útil da ferramenta e as qualidades superficiais requeridas [12]. O MQL é uma técnica que pode reduzir muitos problemas advindos do alto consumo de lubrificantes, como alto custo de usinagem e problemas ambientais e de saúde [7]. Porém o processo de retificação é um dos mais críticos referente à aplicação da técnica MQL, devido a grande quantidade de calor existente no processo, proveniente do atrito entre as inúmeras arestas de corte dos grãos abrasivos e a peça [13]. A pulverização levanta no ambiente de trabalho muitas partículas de óleo, provocando uma poluição no ar, exigindo assim, cuidados especiais, antes da implementação do sistema. É exigido uma máquina totalmente fechada, com guardas de proteção e um bom sistema de exaustão com controle de emissão de partículas [14].

Utilização de um sistema de ar comprimido para limpeza da superfície de corte dos rebolos

O rebolo diamantado é uma ferramenta abrasiva que mantém a forma superficial quando submetido a pequenos desgastes. Porém, a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) não consegue promover a retirada dos cavacos da região de corte, devido ao baixo fluxo de fluido, ocasionando o entupimento dos poros do rebolo

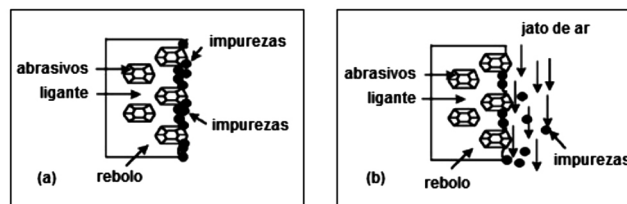


Figura 2: Efeito do jato de ar comprimido. (a) retificação sem limpeza do rebolo; (b) retificação com limpeza do rebolo [16].

[Figure 2: Effect of compressed air jet. (a) grinding without cleaning of the grinding wheel; (b) grinding with cleaning of the grinding wheel [16].]

pela formação de uma borra de óleo característica na superfície de corte do rebolo. A formação dessa borra acaba sendo um problema influenciando na rugosidade da peça e diminuindo seu valor no mercado, sendo que quanto maior a profundidade de corte, maior se torna esse problema de qualidade superficial [15]. Uma alternativa para superar esse problema [16], seria a utilização de jatos de ar comprimido incidindo na superfície do rebolo visando retirar essa borra, como ilustrado na Fig. 2. Ar promove certo efeito lubrificante, que impede as impurezas de se direcionarem aos poros do rebolo. Dessa forma, quanto menor a pressão do ar, menor será seu efeito de limpeza [17]. Assim, é possível aumentar a profundidade de corte decorrente da diminuição do desgaste da ferramenta e, além disso, obter maior qualidade de forma geométrica e superficial, ou seja, melhores valores de rugosidade [16].

METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados na retificadora cilíndrica fabricada pela empresa Sulmecânica RUAP 515 H equipada com comando numérico computadorizado (CNC), necessitando assim de um programa que foi elaborado para a usinagem dos corpos de prova. Os corpos de prova foram cilindros de uma alumina comercial, composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos fundentes como SiO_2 , CaO e MgO . A densidade aparente deste material é de $3,7 \text{ g/cm}^3$.

Foi utilizado um rebolo de liga resinóide, com dimensões de 350 mm (diâmetro externo) x 15 mm (largura) x 5 mm (camada), diâmetro interno de 127 mm, dureza da liga N, concentração 50 e tamanho de grão 126 mm (D 107 N 115 C50) da Nikkon Ferramentas de Corte Ltda. O fluido utilizado para a técnica da mínima quantidade de lubrificante foi o fluido de corte Accu-Lube LB-1000 da empresa ITW Chemical Products Ltda, sem diluição, que foi testado e aplicado em outras pesquisas realizadas neste laboratório. O fluido de corte utilizado na refrigeração convencional foi um óleo solúvel ME-I, concentrado, semi-sintético, com concentração de 5% em água. O equipamento para a aplicação da mínima quantidade de lubrificante foi o sistema ITW Accu-lube 79053D de micro-lubrificação, fornecido pela empresa ITW Chemical Products Ltd. Esse equipamento utiliza um sistema pulsante de fornecimento

do óleo e permite a regulação da vazão de ar comprimido e lubrificante de maneira independente. A vazão de ar comprimido foi monitorada com auxílio de um medidor de vazão do tipo turbina modelo SVTG12/12BA4A44BS fornecido pela empresa CONTECH e calibrado a uma pressão de 8 kgf/cm². Para cada ensaio foram utilizados cinco corpos de provas. Foram testados quatro ângulos de incidência do jato de ar comprimido na superfície de corte do rebolo: ângulos tangente, perpendicular, 30° em relação à tangente e 60° em relação à tangente. A medição do desvio de circularidade foi realizada para cada corpo de prova, obtendo uma média para cada ensaio, em uma máquina específica para controle de tolerâncias geométricas Tayrond 31c Taylor Hobson. A captação da rugosidade superficial foi obtida cinco vezes para cada corpo de prova, obtendo uma média para cada ensaio, através de um rugosímetro Surtronic³⁺, Taylor Hobson, que fará a mensura do parâmetro R_a . Para os ensaios, foram estabelecidas as seguintes condições de usinagem: velocidade de mergulho (v_p) de 0,25 mm/min e 0,50 mm/min, velocidade de corte (v_s) de 30 m/s, rotação da peça (ω_w) de 204 rpm, penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm, tempo de centelhamento (spark-out, t_s) igual a 5 segundos, largura de retificação de 4 mm, profundidade de dressagem (a_d) de 0,02 mm, vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 22 L/min, vazão do fluido de corte no MQL de 100 mL/h, pressão do ar no MQL de 8 bar e pressão de 7 bar no sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Rugosidade

As Figs. 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para a rugosidade média R_a , referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração convencional, a técnica do MQL com e sem a limpeza de rebolo, para as diversas velocidades de avanço escolhidas.

Pode-se observar de uma maneira geral, em ambos os

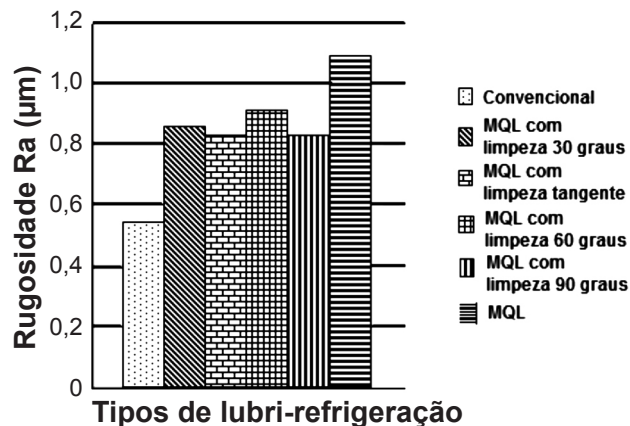


Figura 3: Rugosidade para as condições ensaiadas a uma velocidade de 0,25 mm/min.

[Figure 3: Roughness for the conditions tested at a speed of 0.25 mm/min.]

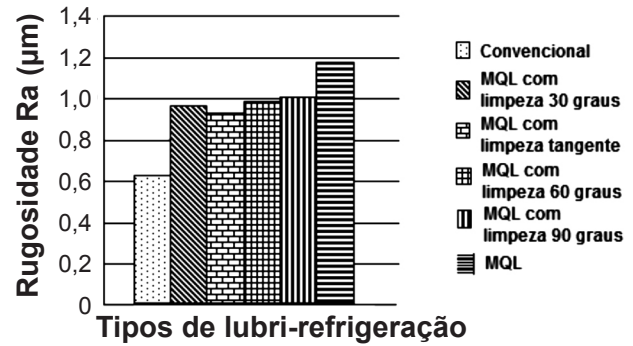


Figura 4: Rugosidade para as condições ensaiadas a uma velocidade de 0,50 mm/min.

[Figure 4: Roughness for the conditions tested at a speed of 0.50 mm/min.]

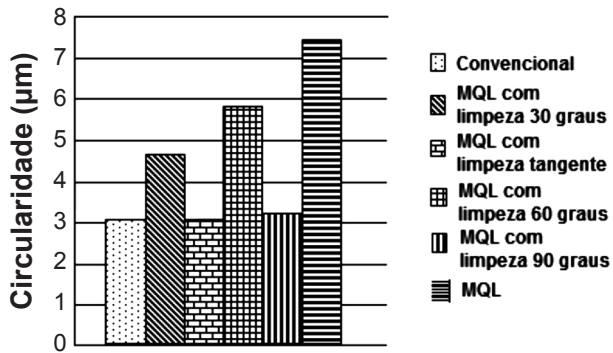
casos, que os valores de rugosidade foram menores para a lubri-refrigeração convencional em comparação com a técnica do MQL, possivelmente provocada pela melhor remoção de cavaco da zona de corte feita por aquela. Na refrigeração com a técnica do MQL, é formada uma “borra” de óleo com cavaco de difícil remoção, causando um aumento da rugosidade. Já em relação à técnica do MQL com a limpeza da superfície de corte do rebolo, notam-se algumas melhoras em relação ao MQL, porém ainda não superaram a refrigeração convencional, devido à difícil remoção do óleo com cavaco e ao calor gerado, que é maior que no método convencional. Além disso, nota-se que com a velocidade de avanço de 0,25 mm/min o ângulo que obteve melhor desempenho na limpeza foi o de 90°, já com a velocidade de 0,50 mm/min foi o ângulo tangente à superfície de corte do rebolo. Nota-se que para a velocidade de 0,25 mm/min e 0,50 mm/min a limpeza da superfície do rebolo com os melhores ângulos para cada condição obtiveram boa rugosidades, melhorando bem em relação ao MQL, porém não obtiveram resultados tão satisfatórios quanto os ensaios com refrigeração convencional.

Circularidade

As Figs. 5 e 6 apresentam os resultados obtidos para o erro de circularidade, referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração convencional, a técnica do MQL com e sem a limpeza de rebolo, para cada velocidade de avanço estudada.

Pode-se verificar que na refrigeração por MQL ocorreu um erro de circularidade maior que nos demais, devido à formação da “borra” de óleo e cavaco na superfície de corte do rebolo. Já na técnica do MQL com limpeza de rebolos foram obtidos erros de circularidades muito próximos dos erros da refrigeração convencional. Analisando o ângulo de incidência do jato, aquele que obteve melhor desempenho para o erro de circularidade na velocidade de 0,25 mm/min foi o tangente.

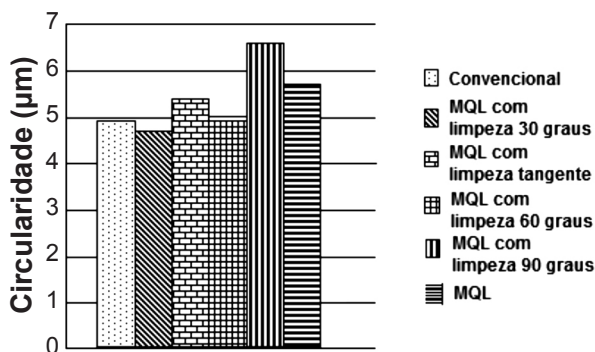
Pode-se notar que na velocidade de 0,50 mm/min de avanço os resultados foram próximos, sendo que a técnica do MQL não forneceu o maior erro, porém nota-se que o ângulo de 30° obteve resultados muito satisfatórios.



Tipos de lubri-refrigeração

Figura 5: Erro de circularidade para as condições ensaiadas a uma velocidade de 0,25 mm/min.

[Figure 5: Error of circularity for the conditions tested at a speed of 0.25 mm/min.]



Tipos de lubri-refrigeração

Figura 6: Erros de circularidade para as condições ensaiadas a uma velocidade de 0,50 mm/min.

[Figure 6: Error of circularity for the conditions tested at a speed of 0.50 mm/min.]

CONCLUSÃO

Uma análise geral dos resultados indica que a refrigeração pela técnica da refrigeração convencional é a que garante melhores resultados de rugosidade e erro de circularidade da peça. Pode-se notar que a limpeza obteve bons resultados, melhorando os acabamentos da peça em relação à técnica do MQL. Portanto, torna-se viável a utilização de jatos de ar comprimido incidindo na superfície de corte do rebolo, visando limpar a borra, pois alia as vantagens do MQL em preservação do ambiente e saúde do operador a um melhor desempenho, já que o MQL obtém resultados pouco satisfatórios em relação à refrigeração convencional. Nos resultados de erro de circularidade o MQL com limpeza de rebolos obteve resultados muito satisfatórios quando comparados com a refrigeração convencional. Portanto, nota-se que para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min

o ângulo de 90° obteve os melhores resultados e já com a velocidade de 0,50 mm/min o ângulo tangente mostrou-se o mais adequado. Os resultados foram muito satisfatórios, pois com a limpeza de rebolos torna-se mais viável a técnica do MQL, assim podendo-se reduzir custos, danos ao meio ambiente e à saúde do operador da máquina, no processo de retificação. Assim este trabalho visa contribuir para indústrias, por meio da utilização do MQL com limpeza de rebolos para substituir métodos que gerem problemas devido às desvantagens do fluido de corte, já citadas acima.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelos recursos financeiros disponibilizados para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Uhlmann, *Abrasive Magazine* (1998) 28.
- [2] R. A. Irani, R. J. Bauer, A. Warkentin, *Int. J. Machine Tools & Manufacture* **45** (2005) 1696.
- [3] S. Malkin, *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, 1st ed., Ellis Horwood Ltd., Chichester (1989).
- [4] Y. S. Liao, S. Y. Luo, T. H. Yang, *J. Mater. Proc. Technol.* **101** (2000) 137.
- [5] A. G. Mamalis, J. Kundrak, K. Gyani, M. Horvath, *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* **20** (2002) 255.
- [6] I. Marinescu, H. K. Tönshoff, I. Inasaki, *Handbook of Ceramic Grinding and Polishing*, Noyes Publ., New Jersey, EUA (1998) Cap.2.
- [7] A. Attanasio, M. Gelfi, C. Giardini, C. Remino, *Wear* **260** (2006) 333.
- [8] M. El Baradie, *J. Mater. Proc. Technol.* **56** (1996) 786.
- [9] C. A. D. Ramos, E. S. Costa, Á. R. Machado, "Tendências, utilização e aspectos ecológicos", *Ver. Máquinas & Metais*, ano XXXIX (2003) 116.
- [10] P. S. Sreejith, B. K. A. Ngoi, *J. Mater. Proc. Technol.* **101** (2000) 287.
- [11] M. Sokovic, K. Mijanovic, *J. Mater. Proc. Technol.* **109** (2001) 181.
- [12] T. Tawakoli, *Ind. Diamond Rev.* **1** (2003) 60.
- [13] F. Klocke, T. Beck, G. Eisenblätter, D. Lung, 12th Int. Colloquium Ind. Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen, Alemanha (2000) 14.
- [14] A. R. Machado, A. E. Diniz, "Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte", *Cong. Usinagem 2000*, S. Paulo, SP (2000).
- [15] W. Köenig, A. Arciszewski, *Ann. CIRP.* **37** (1988) 303.
- [16] S. W. Lee, Y. C. Lee, H. D. Jeond, H. Z. Choi, *J. Mater. Proc. Technol.* **128** (2002) 67.
- [17] X. P. Li, K. H. W. Seah, *Wear* **255** (2003) 1352. (Rec. 06/09/2010, Ac. 16/10/2011)