

ADEQUAÇÃO DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM CBN

Bruno Kenta Sato, brunokentasato@gmail.com¹

José Claudio Lopes, jclaudio.lopes@hotmail.com¹

Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, sanchez@febunesp.br¹

Hamilton José de Mello, Hamilton@feb.unesp.br¹

Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br²

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CP 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

Resumo: A aplicação da técnica de MQL na retificação é um desafio devido a características intrínsecas do processo, alta energia específica e dificuldade na remoção de cavaco. Visando superar tais dificuldades e possibilitar a aplicação de MQL na retificação, o estudo analisou a eficiência de soluções simples e ecologicamente corretas. Foram analisados três parâmetros da técnica: tipo de fluido, diluição e utilização do sistema de limpeza. A composição do fluido, sua viscosidade e seu ponto de fulgor são fatores que influenciam na qualidade dos processos de usinagem, para avaliar a variação do comportamento de diferentes fluidos foram testados três com diferentes propostas (fluido desenvolvido especialmente para MQL, fluido sintético amplamente utilizado em refrigeração convencional e fluido de base aquosa com protetivo anticorrosivo). Além da variação do tipo de fluido, foram realizados testes com diferentes diluições de fluido sintético em água (fluido puro, uma parte de fluido para cinco partes de água) com o intuito de verificar o ganho no efeito refrigerante da técnica adicionando água. Para aumentar a taxa de remoção de cavaco por parte da técnica de MQL, utilizou-se um jato de ar comprimido diretamente na superfície de corte do rebolo. As propostas foram testadas em todas combinações (três tipos de fluido, duas diluições, com e sem limpeza) resultando em 12 condições. Para verificar a qualidade superficial provida de cada condição, a rugosidade das peças retificadas foi medida. Além disso, foi analisado a potência de retificação de cada condição após o final dos ensaios. Os resultados da pesquisa foram promissores, evidenciando que as adaptações foram benéficas para os parâmetros analisados.

Palavras-chave: Mínima Quantidade de Lubrificante, Retificação Cilíndrica, Adição de água, Limpeza com ar comprimido, Diferentes fluidos de corte

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão com geometria de corte não definida responsável pela produção de peças com bom acabamento superficial, alta precisão geométrica e dimensional (Mao *et al.*, 2012). Para obter esses *outputs* o processo exige parâmetros que levam ao aumento da energia específica, consumindo excessivas quantidades de energia para remoção de material. De toda essa energia apenas uma parte é efetivamente utilizada para remover material, o restante é despendido por processos secundários que não contribuem para o processo que acabam gerando grande quantidade de energia térmica, o calor (Ruzzi *et al.*, 2017). Toda essa energia térmica gerada deve ser dissipada para evitar temperaturas excessivas que causam expansões térmicas, prejudicando a precisão do processo e podendo causar mudanças microestruturais indesejáveis na peça, para evitar isso a aplicação de fluido de corte em abundância é amplamente utilizado. No entanto, a redução da utilização da aplicação de fluido de corte em abundância é almejada, pois essa substância apresenta riscos para o meio ambiente e para a saúde do trabalhador, além de representar alto custo (Silva *et al.*, 2013).

A Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) emergiu com o intuito de reduzir a utilização de fluidos de corte e extinguir resíduos dessa substância ao final do processo. Tradicionalmente o MQL utiliza apenas a quantidade de lubrificante necessária para lubrificar o processo, essa quantia é atomizada pelo jato de ar comprimido e a mistura penetra eficientemente na zona de corte devido à alta pressão (Silva *et al.*, 2013). Em processos com geometria definida, torneamento e fresamento, o MQL apresenta excelentes resultados pela sua alta capacidade lubrificante, no entanto, na retificação a técnica enfrenta problemas pela grande exigência, por parte do processo, em refrigerar e expulsar o cavaco alojado na porosidade da superfície de corte do rebolo.

Dessa forma, o trabalho mapeou três desses grandes problemas e propôs soluções simples para adequar o MQL ao processo de retificação. Primeiramente o estudo analisou o comportamento de três fluidos de corte com diferentes propostas para determinar qual apresentaria o melhor comportamento na condição utilizada. Visto que o processo de retificação exige grande capacidade de refrigeração por parte do método de lubrificação, estudou-se a possibilidade da adição de água ao lubrificante da técnica de MQL para aumentar a capacidade refrigerante da técnica. De acordo com Yoshimura *et al.* (2005) a água aumenta significativamente a dissipação de calor do processo por possuir um ponto de ebulição inferior às temperaturas em que o processo ocorre. Com isso ao atingir a zona de corte as gotículas de água evaporam, absorvendo significativamente energia térmica e dissipando-a para a atmosfera. Além de aumentar a capacidade refrigerante da técnica, a adição de água reduz ainda mais a utilização de fluido de corte, contribuindo ainda mais para o meio ambiente (Ruzzi *et al.*, 2017).

Outro problema intrínseco do processo de retificação e que é intensificado com a utilização da técnica de MQL é o empastamento da superfície de corte do rebolo. A pequena vazão de fluido de corte é insuficiente para remover todo o cavaco gerado no processo, com isso os pequenos cavacos se acumulam na porosidade da ferramenta e misturados com o fluido formam uma massa que adere a superfície de corte do rebolo (Oliveira *et al.*, 2012). Esse fenômeno faz com que o rebolo perca seu potencial de corte, reduz a eficiência de penetração de lubrificante na zona de corte e prejudica que novos cavacos sejam removidos da zona de corte (Ruzzi *et al.*, 2017). Como solução o estudo propõe utilizar um jato de ar comprimido com pressão suficiente para expulsar toda e qualquer impureza alojada nos poros da superfície de corte do rebolo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados na retificadora cilíndrica externa de mergulho modelo RUAP 515H, fabricada pela empresa Sulmecânica. Para maior confiabilidade na análise a usinagem foi controlada por um Controle Numérico Computadorizado (CNC), cujo programa realizava 42 ciclos com avanços de 100 μm e tempo de centelhamento de 3 s.

A ferramenta abrasiva utilizada consistiu no rebolo de CBN com ligante vitrificado com especificação SBN 151 Q12 VR2, fabricado pela Norton. O CBN foi selecionado por apresentar condutividade térmica relativamente elevada 240 W/mK (Rowe, 2014), aumentando o fluxo de calor para a ferramenta dissipando a energia térmica concentrada na zona de corte.

O material de teste foi o aço ABNT 4340 temperado e revenido, apresentando dureza média de 54 HRC. Os corpos de prova possuíam formato anelar com diâmetro externo de 55 mm e espessura de 4,5 mm. Para garantir que todos os parâmetros de mantivessem constantes, com exceção do método de lubrificação, o rebolo foi dressado ao final de cada ensaio e um novo corpo de prova foi utilizado. A tabela 1 apresenta os parâmetros que foram mantidos constantes durante os ensaios.

Tabela 1. Parâmetros do processo de retificação mantidos constantes durante os ensaios

Parâmetros de entrada	
Tipo de retificação	Cilíndrica externa de mergulho
Retificadora	RUAP 515H Sulmecânica equipada com CNC
Rebolo	CBN com ligante vitrificado (SNB151Q12VR2)
Material	Aço ABNT 4340 temperado e revenido (54 $\pm$ 2 HRC) em formato anelar de diâmetro de 55 mm e espessura de 4,5 mm
Dressador	Conglomerado 15 mm x 8mm x 10mm
Velocidade de corte (v_s)	30 m/s
Velocidade de avanço (v_f)	0,5 mm/min
Profundidade efetiva de corte (a_e)	2,5 x 10 ⁻³ mm/rev
Velocidade da peça (v_w)	0,58 m/s
Tempo de spark-out (t_s)	3 s
Profundidade de dressagem (a_d)	0,02 mm
Velocidade de dressagem (v_d)	600 mm/min

A refrigeração convencional foi utilizada como referencia pela sua consolidação e ampla utilização no ambiente industrial. Para essa condição uma emulsão de 3% de fluido semissintético foi aplicada com vazão de 17 l/min e pressão de 2,9 x 10⁵ Pa.

Para analisar o comportamento de variados fluidos submetidos a diferentes condições na técnica de MQL foram escolhidos três fluidos com diferentes propostas. O Fluido 1 desenvolvido especialmente para aplicação em MQL. O

Fluido 2 desenvolvido para aplicação em abundância e amplamente difundido no ambiente industrial. O Fluido 3 desenvolvido para aplicação em abundância com protetivo anticorrosivo. Para cada fluido duas condições de concentração foram avaliadas, o fluido puro e o fluido diluído em água (uma parte de fluido para cinco partes de água). Além disso foi avaliado o desempenho dos fluidos quando utilizado o sistema de limpeza, realizou-se assim ensaios utilizando e não utilizando o sistema de limpeza com ar comprimido.

Os parâmetros mantidos constantes na técnica de MQL são pressão do ar comprimido $6,5 \times 10^5$ Pa, vazão de ar de $12,3 \text{ m}^3/\text{h}$, vazão do fluido de 100 ml/h . Dessa forma, o único parâmetro que variou foi o fluido utilizado pela técnica de MQL.

Para o sistema de limpeza com ar comprimido foi utilizado um jato de ar com pressão de 7×10^5 Pa, injetado através de um bocal posicionado a 1 mm da superfície de corte do rebolo com uma inclinação de 30° em relação a normal da superfície de corte do rebolo. A figura 1 apresenta o bocal utilizado para refrigeração convencional, o bocal utilizado para técnica de MQL e o bocal utilizado no sistema de limpeza com ar comprimido.

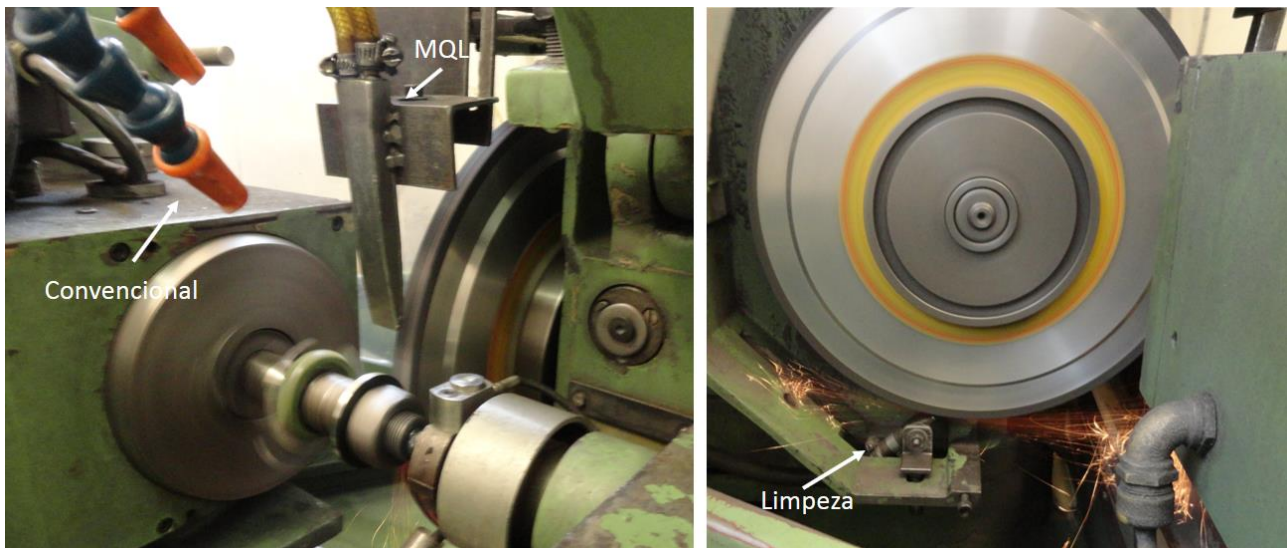


Figura 1. Posicionamento dos bocais utilizados na refrigeração convencional, técnica de MQL e sistema de limpeza por ar comprimido.

Dois parâmetros foram utilizados para mensurar a qualidade e eficiência do processo, rugosidade superficial e potência.

A rugosidade superficial é um parâmetro importante de ser analisado por ser um dos outputs desejados no processo de retificação. As medições foram realizadas perpendicularmente as marcas de retificação utilizando a rugosidade média (Ra) como escala, *cut-off* de $0,25 \text{ mm}$ e percurso total (ln) de $1,25 \text{ mm}$. Foram realizadas 5 medidas em cada peça. A figura 2 apresenta os equipamentos e dispositivos utilizados para realizar a medição.

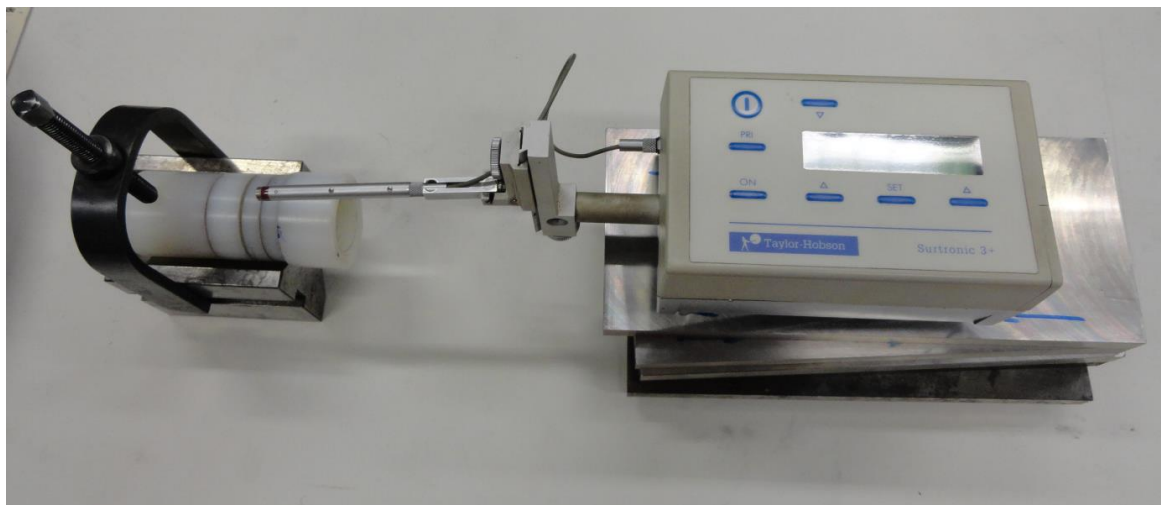


Figura 2. Equipamentos e dispositivos utilizados para efetuar a medição de rugosidade superficial.

A potência foi mensurada utilizando uma placa de aquisição de dados A/D e o *software* LabVIEW 7.1 da National Instruments. A potência foi captada no tempo e ao fim do experimento foi calculada a média da potência durante o ensaio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção apresentará os resultados obtidos na pesquisa. Dentre eles, ressaltasse que não estarão presentes os resultados da condição Fluido 3 puro, por limitações do dosador do MQL o Fluido 3 apresentou viscosidade excessiva.

3.1. Rugosidade Superficial

A figura 3, 4 e 5 apresentam as médias aritméticas das rugosidades superficiais de cada condição analisada dos fluidos Fluido 1, Fluido 2 e Fluido 3, respectivamente.

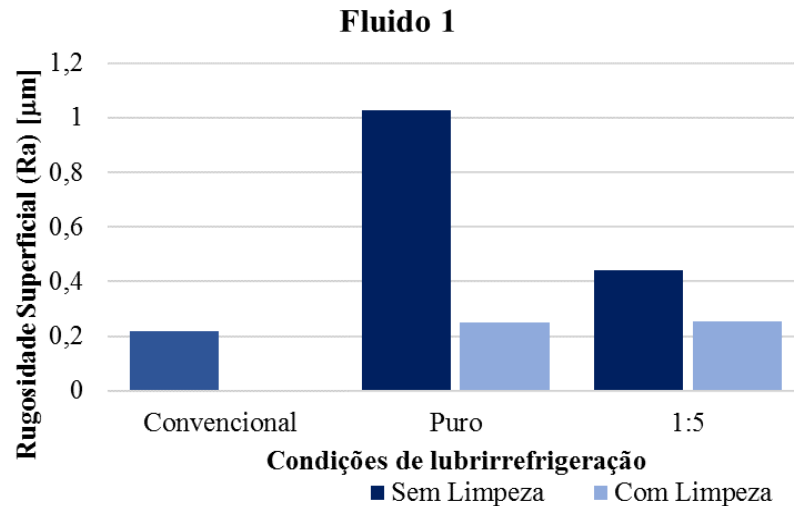


Figura 3. Média das rugosidades superficiais obtidas com a utilização do fluido 1 aplicado com a técnica de MQL.

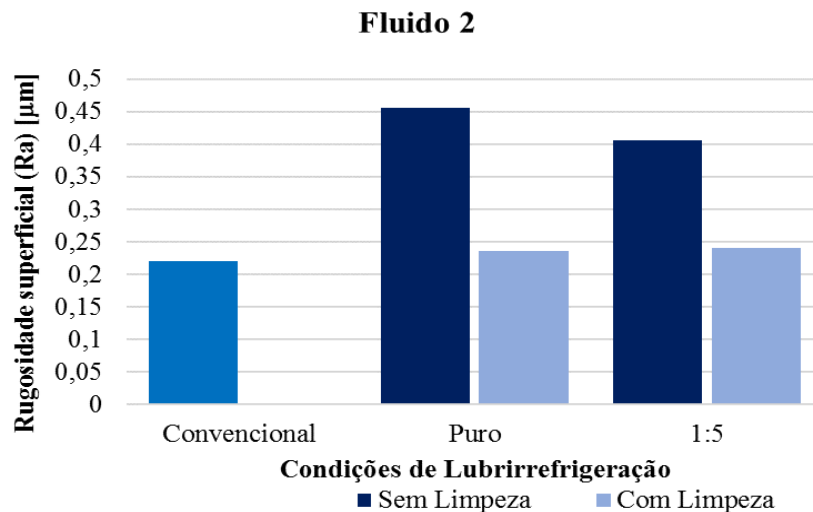


Figura 4. Média das rugosidades superficiais obtidas com a utilização do fluido 2 aplicado com a técnica de MQL.

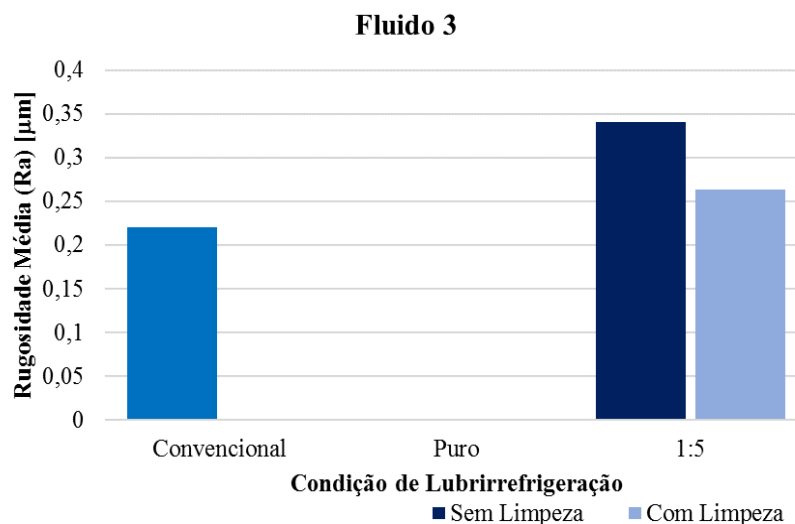


Figura 5. Média das rugosidades superficiais obtidas com a utilização do fluido 3 aplicado com a técnica de MQL.

A rugosidade superficial depende de vários fatores com: coeficiente de atrito, capacidade de lubrificação, condutividade térmica, resistência mecânica (Silva *et al.*, 2013). A adição de água influencia nas propriedades refrigerantes e lubrificantes do fluido, conforme a proporção de água aumenta o efeito refrigerante melhora com a redução da lubrificidade e viscosidade. Visto que os resultados apresentados nas figuras 3, 4 e 5 apontam melhores rugosidades com a adição de água, a variação nesses fatores interferem diretamente da qualidade superficial da peça.

De acordo com Ruzzi (2017) a lubrificação do processo faz com que as deformações plásticas causadas pelo atrito com os grãos abrasivos diminuam, resultando em uma melhor qualidade superficial. Além disso, os autores apontam que uma lubrificação reduz a geração de calor por atrito entre as superfícies. Dessa forma, a adição de água, por diminuir a lubrificidade do fluido, não contribuiria resultaria em uma melhor qualidade superficial. No entanto, é importante ressaltar que para que um fluido com alta lubrificidade lubrifique eficientemente a zona de contato é necessário que o mesmo a penetre, usualmente fluidos com alta lubrificidade apresentam maior viscosidade. Ruzzi *et al.* (2017) aponta que por mais que óleos integrais apresentem grande lubrificidade, podem não lubrificar eficientemente a zona de corte devido a sua viscosidade elevada.

De acordo com Walker (2013) fluidos com viscosidade elevada apresentam problemas durante a atomização. Esse fato foi observado durante a realização dos ensaios, a tentativa de realizar testes com o Fluido 3 puro não foi bem-sucedida devido a problemas com a atomização do fluido.

Dessa forma, por mais que a adição de água interfira negativamente na lubrificidade do fluido acaba melhorando o efeito lubrificante provido pela técnica de MQL, pois a redução da viscosidade permite que o fluido penetre eficientemente na zona de corte e seja atomizado corretamente. Nota-se que a resposta dos fluidos à adição de água variou, sendo que na condição de fluido puro o Fluido 2 apresentou melhores resultados (0,45 μm) e na condição de 1:5 o Fluido 3 apresentou melhores resultados (0,34 μm).

Os resultados apresentados em todas as condições da técnica de MQL com sistema de limpeza apresentaram uma variação de aproximadamente 4%. Oliveira *et al.* (2012) comprovou a eficiência da técnica de limpeza da superfície com ar comprimido em seu estudo. Considerando que o sistema de limpeza com ar comprimido apresente grande eficiência em evitar o fenômeno de empastamento do rebolo, observa-se que esse fenômeno é um grande problema para a aplicação da técnica de MQL na retificação.

3.2. Potência de corte

As figuras 6, 7 e 8 apresentam a potência de corte média de cada condição de lubrificação testada, Fluido 1, Fluido 2 e Fluido 3, respectivamente.

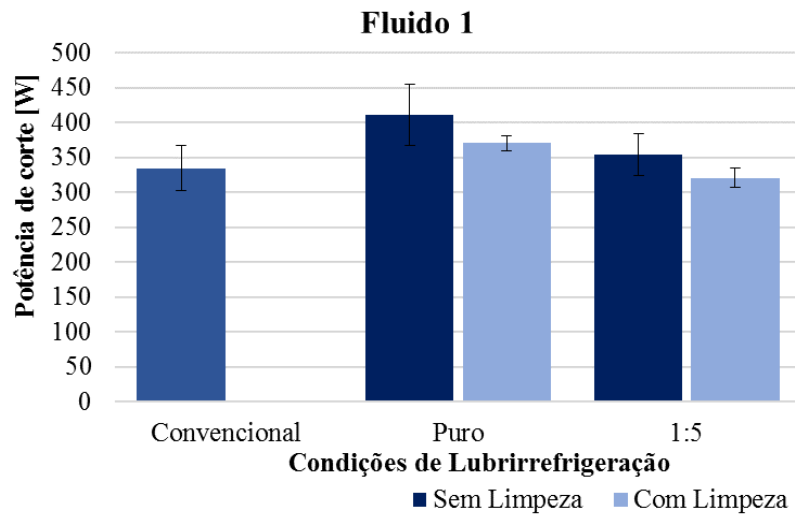


Figura 5. Média das potências de corte dos ensaios utilizando o Fluido 1 aplicado com a técnica de MQL.

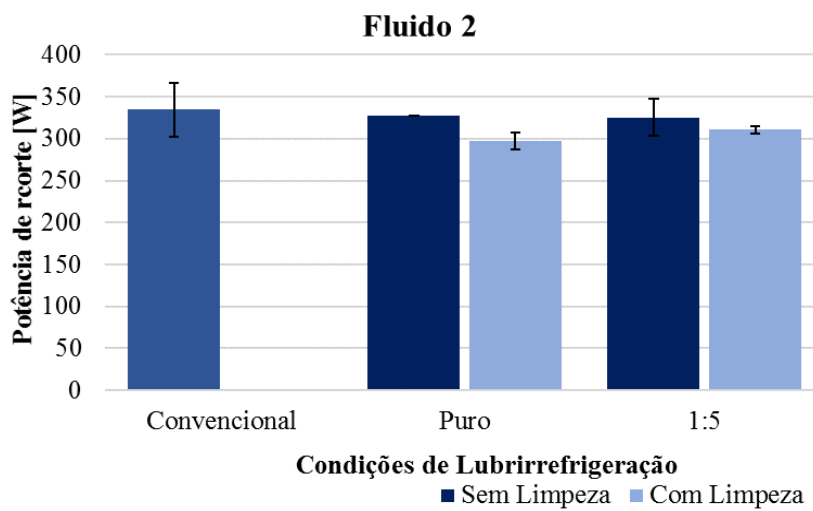


Figura 6. Média das potências de corte dos ensaios utilizando o Fluido 2 aplicado com a técnica de MQL.

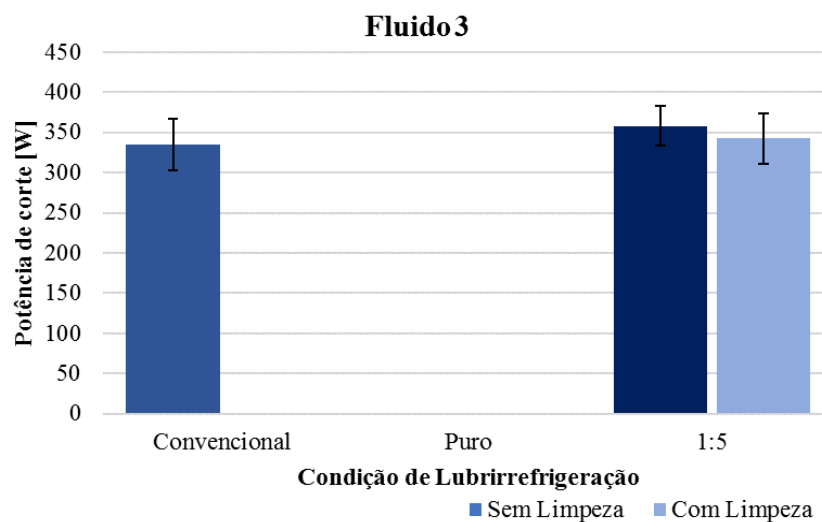


Figura 7. Média das potências de corte dos ensaios utilizando o Fluido 3 aplicado com a técnica de MQL.

Analisando o comportamento do Fluido 1 (Figura 5) há um decréscimo na potência de corte ao utilizar a diluição de uma parte de fluido para cinco partes de água. Apesar da grande redução de fluido de corte utilizado, a técnica de MQL apresenta potências de corte comparáveis com a refrigeração convencional, pois a técnica de MQL tem sucesso em penetrar a zona de corte devido a sua elevada pressão, diferentemente da refrigeração convencional que é aplicada com baixa pressão (Ruzzi *et al.*, 2017).

Um ponto interessante é a diferença no comportamento dos fluidos. Analisando o Fluido 2 (Figura 6), a adição de água influencia muito pouco na potência de corte, causando uma variação de aproximadamente 4,3% na condição sem limpeza e 1,16% na condição com limpeza.

A potência de corte do Fluido 3 foi compatível com a potência de corte da refrigeração convencional, sendo 6,93% maior na condição sem limpeza e 2,37% maior na condição com limpeza. Entre todas as condições da técnica de MQL a condição utilizando o Fluido 2 puro e com o sistema de limpeza apresentou menor potência de corte (310,634 W) e a condição MQL Fluido 1 puro sem limpeza apresentou maior potência de corte (410,66 W).

4. CONCLUSÕES

As adequações propostas no trabalho demonstraram sucesso de forma a conseguir resultados compatíveis aos obtidos pela refrigeração em abundância. Observou-se que os fluidos se comportaram de formas distintas à adição de água, sendo que todos apresentaram melhores rugosidades com a adição de água. A eficiência do sistema de limpeza com ar comprimido foi comprovada. A pesquisa comprova a adição de água juntamente com o sistema de limpeza com ar comprimido são métodos capazes de adequar a utilização da Mínima Quantidade de Lubrificante na retificação, conseguindo assim reduzir os impactos ambientais sem perder a qualidade do processo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP (número do processo 2015/09868-9) pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- H. Yoshimura, H., Itogawa, F., Nakamura, T., Niwa, K., 2005, Development of nozzle system for Oil-on-Water droplet metalworking fluid and its application to practical production line, JSME International Journal vol. 48, n. 4, pp.723-729.
- Mao, C., Tang, X., Zou, H., Zhou, Z., Yin, W., 2012, Experimental investigation of surface quality for minimum quantity oil-water lubricating grinding, International Journal of Advanced Manufacturing Technology vol. 59, pp.93-100.
- Oliveira, D. J., Guermandi, L. G., Bianchi, E. C., Diniz, A. E., Aguiar, P. R., Canarim, R. C., 2012, Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning, Journal of Materials Processing Technology vol. 212, pp. 2559-2568.
- Ruzzi, R. S., Belentani, R. M., Mello, H. J., Canarim, R. C., D'Addona, D. M., Diniz, A. E., Aguiar, P. R., Bianchi, E. C., 2017, MQL with water in cylindrical plunge grinding of hardened steels using CBN wheels, with and without wheel cleaning by compressed air, International Journal of Advanced Manufacturing Technology vol. 90, pp. 329-338.
- Silva, L. R., Corrêa E. C. S., Brandão J. R., de Ávila R. F., 2013, Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process, Journal of Cleaner Production, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.01.033.
- Walker, T., 2013, MQL handbook: a guide to machining with minimum quantity lubrication, 1º ed., Unist, Inc. V1.0.3.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ADAPTATION OF MINIMUM QUANTITY OF LUBRICATION IN CYLINDRICAL GRINDING AISI 4340 USING CBN

Bruno Kenta Sato, brunokentasato@gmail.com¹

José Claudio Lopes, jclaudio.lopes@hotmail.com¹

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br¹

¹University São Paulo State University “Júlio de Mesquita filho”, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CP 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brazil

Abstract. Challenging is application of Minimum Quantity of Lubricant in grinding, due to some intrinsic characteristics of this machining process, e.g. high specific energy and hard chip removal. Aiming to overcome these problems and to allow apply MQL in grinding, this research analyzed the efficiency of simple and eco-friendly solutions. It was analyzed three MQL parameters: cutting fluid type, dilution and utilization of wheel cleaning system with compressed air. Formulation of cutting fluid, its viscosity and its flash point are some variables with influence in machining process quality, therefore, to analyze how different types of cutting fluids react to different condition, three types of cutting fluid were evaluated (cutting fluid manufactured to MQL application, synthetic fluid extensively applied in abundant flow and aqueous base cutting fluid with antioxidant protective). In addition, test varying the concentration of synthetic cutting fluid in water were done (pure synthetic fluid, one part of synthetic fluid to five parts of water) to evaluate what effect addition of water has in cooling effect of MQL technique. To rise chip removal rate from this machining process, a compressed air jet in high pressure was applied directly to cutting surface of grinding wheel. These three proposals were tested in all combinations (three types of cutting fluid, two concentrations and without and with wheel cleaning system) resulting in 12 conditions. To evaluate surface quality of workpiece after grinding under different conditions of lubri-cooling, surface roughness was measured. Also, grinding power was analyzed for each condition at the end of machining. The results of this research were promising and they proved that these three proposes influenced positively the analyzed output parameters.

Keywords: Minimum Quantity of Lubricant, Cylindrical Grinding, Addition of water, Wheel cleaning with compressed air, Different types of cutting fluids