

RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO DO AÇO ABNT 4340 SOB A APLICAÇÃO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL) COM A UTILIZAÇÃO DE REBOLO CONVENCIONAL DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO

Rafael Lemes Rodriguez, rodiguez.raaf@gmail.com¹

Rodolfo Alexandre Hildebrandt, hildebrandt@hotmail.com.br¹

José Claudio Lopes, jclaudio.lopes@hotmail.com¹

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

Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br²

Rosemar Batista da Silva, rosemar.silva@ufu.br³

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

³Universidade Federal de Uberlândia - UFU - Campus de Santa Mônica. Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121 – CEP 38408-100, Santa Mônica, Uberlândia - MG.

Resumo: A técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) na usinagem dos metais ganhou grande evidência como uma alternativa viável à utilização abundante dos fluidos de corte, proporcionando diminuição dos riscos de danos ambientais e à saúde humana, essa técnica possibilita um meio de produção mais limpo. O baixo consumo de óleo de corte na retificação conduz a técnica de MQL a ser considerada inovadora no que diz respeito à sustentabilidade ambiental e também econômico, assim possibilitando um meio de produção mais limpo. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o emprego da Mínima Quantidade de Lubrificante em razão da aplicação convencional (abundante), na retificação externa de mergulho do aço AISI 4340 com a utilização de rebolo convencional de óxido de alumínio branco. Para tal, serão analisadas três diferentes vazões de MQL: 30, 60 e 120 ml/h. As variáveis de saída analisadas do processo foram: erros de rugosidade, erros de circularidade e desgaste diametral do rebolo. A partir das análises dos resultados, os corpos de prova retificados sob a aplicação do método de lubrificação convencional apresentaram os menores erros em relação à rugosidade média e circularidade média, assim como menor desgaste da ferramenta abrasiva de corte. No entanto, os resultados obtidos para a condição de lubrificação de MQL à vazão de 120 ml/h foram em geral satisfatórios dos obtidos para a convencional, destacando-se a evidente economia de fluido de corte proporcionada pela aplicação da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) que mitiga efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente.

Palavras-chave: retificação, Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), sustentabilidade, rebolo convencional.

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação é empregado na fabricação mecânica para se obter peças com extrema precisão dimensional e excelente acabamento superficial (Malkin e Guo, 2008). Dessa forma, Nguyen e Butler (2005) caracterizam o processo de retificação como um dos processos finais de fabricação, no qual ocorre baixa taxa de remoção de material. O processo de retificação utiliza uma ferramenta denominada rebolo, que apresenta inumeráveis grãos abrasivos em alta velocidade de corte.

Durante o processo de retificação, a interação ocorrida entre os abrasivos da ferramenta e a peça usinada é intensa, assim grande quantidade de calor é gerada, podendo provocar danos térmicos à peça, como: trincas, queimas superficiais, mudanças na microestrutura e tensões residuais (Marinescu *et al.*, 2013). De acordo com Sharma *et al.* (2014), a energia é consumida para que a formação do cavaco ocorra por meio da deformação plástica da peça de trabalho e pela superação do atrito devido às ações mecânicas e químicas do rebolo, considerando-se que este está sendo mergulhado contra a peça de trabalho. As altas temperaturas envolvidas nos processos de retificação têm significativa influência nas propriedades dos grãos abrasivos, assim diminuindo a vida útil da ferramenta abrasiva (Wang *et al.*, 2015).

Dessa forma, Guo *et al.* (2007) inferem que a quantidade excessiva de calor gerado no processo pode vir a causar distorções na ferramenta e na peça de trabalho que, por conseguinte, prejudicam a precisão da retificação e limitam a qualidade da operação de acabamento. Para Diniz *et al.* (2008), a aplicação dos fluidos de corte ocorrem com o objetivo de minimizar os efeitos provocados pelo calor excessivo gerado na zona de corte. Assim, esses fluidos assumem funções como as de refrigerar, lubrificar, transportar cavacos e limpar a superfície do rebolo, havendo também prolongamento na vida útil da ferramenta e uma melhor qualidade da peça usinada.

Embora as vantagens tecnológicas promovidas pelo uso de fluidos de corte sejam evidentes, Dhar *et al.* (2006) apresentam que os efeitos negativos gerados têm sido questionados. Segundo Brinksmeier *et al.*, (2010), as altas velocidades periféricas de rotação e o fato dos fluidos serem pressurizados a altas pressões, possibilita a ocorrência de aerossóis com um grau de periculosidade elevado à pele humana e que pode ser inalado. Ademais, o seu descarte e armazenamento é consideravelmente complicado. É possível inferir também, segundo Tawakoli *et al.* (2009), que o custo total com esses fluidos (incluindo armazenamento, filtragem e descarte), é maior que o custo com rebolo.

Em meio ao desejo de reduzir os riscos à saúde humana e os impactos ambientais dos processos de fabricação convencionais, a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante foi criada com esse propósito. Tawakoli *et al.* (2010) investigaram a aplicação da técnica MQL na retificação cilíndrica do aço DIN 100Cr6 com a utilização de rebolo convencional de óxido de alumínio. Os resultados apontaram um melhor desempenho com a aplicação da técnica de MQL em relação ao método de lubrificarrefrigeração abundante ou convencional.

1.1. Fluidos de Corte

De acordo com Tawakoli *et al.* (2009), os fluidos de corte são descritos como os líquidos refrigerantes utilizados no processo de usinagem, sendo responsáveis por resfriar e lubrificar o processo. Rowe (2014) lista os propósitos para a utilização de fluidos de corte: lubrificação mecânica e químico-física, lubrificarrefrigeração da área de contato, retirada dos cavacos da zona de contato peça-rebolo e limpeza do rebolo.

Para Barczak *et al.* (2010), o controle da geração de calor se faz absolutamente necessário no processo de retificação para a qualidade e integridade térmica da peça final, assim que devido ao atrito, deformação elástica e remoção de cavaco, as temperaturas na zona de corte podem atingir 1800°C. Esta solicitação térmica dura poucos milissegundos, sendo proporcional à velocidade de corte. Na indústria, o método mais usado é o convencional, no qual a aplicação do fluido lubrificante ocorre com abundância na área de corte a uma velocidade baixa do fluido.

Tawakoli *et al.* (2009) ainda afirmam que, infelizmente, o uso dos fluidos de corte proporciona efeitos negativos, destacando-se principalmente riscos à saúde do operador de máquina, ao meio ambiente com a poluição devido ao descarte e aos gases emitidos, além da possibilidade de explosão (no caso em que há utilização de óleos minerais). Stanford *et al.* (2007) salientam que fluidos solúveis em água podem ser suscetíveis ao ataque e crescimento de microrganismos, tais como bactérias e fungos. A presença de alta taxa de microrganismos nos fluidos de corte pode provocar a degradação com as alterações na composição química e nas propriedades do fluido, como diminuição do pH e na capacidade de prevenir corrosão. Stanford e Lister (2002) salientam que o surgimento de leis trabalhistas e ambientais mais rígidas e complexas, faz com que as empresas busquem reduzir seu consumo de fluidos de corte, além de procurar e desenvolver métodos eficazes que permitir a reutilização desses fluidos, além da redução substantiva de sua utilização nos processos de usinagem. Este autor também destaca que estas supostas alternativas de otimização do seu uso, têm de atender aos requisitos de qualidade da peça, nunca deixando de considerar a importância de se diminuir a agressividade à saúde dos operadores e ao meio ambiente.

Outro fator de fundamental importância acerca dos fluidos de corte é com relação aos custos. De acordo com Sanchez *et al.* (2010), os custos com lubrificarrefrigeração representam aproximadamente 18% do custo total com a manufatura, assim como está apresentado na Fig. (1).

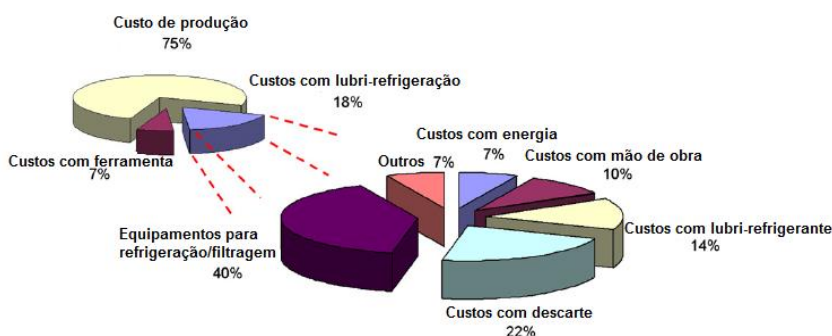


Figura 1. Distribuição dos custos da lubrificarrefrigeração no processo de usinagem na indústria automotiva (adaptado, Sanchez *et al.*, 2010).

Em relação ao que está sendo discutido, Sanchez *et al.* (2010) salienta que os custos efetivos com os fluidos lubrificarrefrigerantes são menos aparentes, assim que os maiores custos da lubrificarrefrigeração estão relacionados com os equipamentos para a refrigeração e filtragem. Mais além, os altos custos intrínsecos ao complicado processo de descarte são também sentidos. Nesse sentido, o autor preconiza que a redução da quantidade de fluido utilizada no processo de usinagem é substancial, gerando iminentes benefícios econômicos e ambientais. Em relação à energia gasta no processo de produção, 38,37% da energia consumida durante o processo de usinagem está relacionada direta ou indiretamente

com o uso de fluido de corte convencional, ficando ainda mais evidente não somente a influência causada pelo uso do fluido de corte no custo final do processo de manufatura, mas também os impactos ambientais.

Nesse sentido, os meios de produção estão procurando adequar-se, cada vez mais, aos padrões de sustentabilidade, mais conscientes do ponto de vista ambiental (Umeda *et al.*, 2012). Seguindo essa tendência, a sustentabilidade dos processos abrasivos conta com considerável esforço de pesquisas científicas (Aurich *et al.*, 2013).

1.2. A Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

A técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) é uma alternativa à utilização abundante de fluido de corte, consiste basicamente numa mistura de óleo e ar comprimido direcionada diretamente à região de corte, evitando-se a utilização do fluido de forma convencional e abundante, assim como determina Obikawa *et al.* (2006). Nesse sentido, é de extrema importância que a mínima quantidade de fluido de corte seja suficiente para que o atrito seja reduzido e a aderência de materiais seja evitada. Nessa técnica que envolve uma pequena quantidade de óleo lubrificante e um fluxo de ar comprimido, uma névoa é formada de modo a ser direcionada à região de contato entre a peça e o rebolo. Na medida em que há redução do atrito na zona de contato entre rebolo e peça, o calor gerado no processo de retificação é menor, não havendo prejuízos à integridade da ferramenta e da peça em razão de altas temperaturas (Oliveira *et al.*, 2012).

Em sua investigação acerca da retificação externa de mergulho do aço AISI 4340 sob a aplicação da técnica de MQL, Silva *et al.* (2013) chegaram a conclusão de que perante os parâmetros como a rugosidade, o desgaste diametral do rebolo, as forças de retificação e a tensão residual sofreram melhorias em razão do maior escorregamento do grão na zona de contato por apresentar excelente propriedade de lubrificação. Mais além sobre o estudo do comportamento da técnica da mínima quantidade de lubrificante na retificação externa de mergulho para esse material, os autores ainda afirmam que o sistema de MQL não apresentou nenhuma influência negativa à integridade superficial da peça de trabalho, além do fato de ser técnica mais sustentável que o método convencional de lubrificação.

Segundo Zhang *et al.* (2015), numerosos estudos e experimentos indicam que a técnica de MQL pode melhorar as propriedades lubrificantes no contato peça-rebolo em detrimento da lubrificação convencional, isso perante certas condições experimentais. O mais importante fato acerca dessa técnica é a diminuição substancial do volume de fluido aplicado, assim reduzindo os riscos ao trabalhador e ao meio ambiente. Para Tawakoli *et al.* (2010), o fluido lubrificante adere a superfície da peça de trabalho e forma uma camada de filme protetor.

Dessa forma, a técnica de aplicação MQL não somente reduz o custo operacional, podendo chegar à redução de até 20% do custo total do processo, mas também mitiga problemas inerentes ao uso de fluidos de corte de modo convencional. Problemas respiratórios e dermatológicos são erradicados, assim como a contaminação de solos e águas, em razão do descarte inadequado. Assim como afirma Pusavec *et al.* (2014), os riscos à saúde e ao meio ambiente são significativamente reduzidos devido ao fato de se diminuir o volume de óleo utilizado no processo na ordem de 1000 vezes e, em alguns casos, em 10000 vezes. Dessa forma, segundo Tawakoli *et al.* (2010), a técnica de MQL pode controlar precisamente a quantidade de fluido aplicado, com uma vazão de 30 a 100 ml/h, a qual é muito menor a 60 L/h de vazão do sistema convencional abundante.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em uma retificadora cilíndrica SULMECÂNICA, modelo RUAP 515H, equipada por um comando numérico. Os corpos de prova foram formados por anéis de aço ABNT 4340, temperado e revenido (60 HRC de dureza média), com diâmetro externo de $54 \pm 0,1$ mm, diâmetro interno de $30 \pm 0,1$ mm e espessura de $4 \pm 0,1$ mm. O rebolo utilizado foi de óxido de alumínio branco com ligante vitrificado e dimensões 355,6 mm de diâmetro externo, 127 mm de diâmetro interno e 25,4 mm de largura, da empresa NORTON. A tabela 1 apresenta as condições de usinagem adotadas.

Tabela 1. Condições de corte utilizadas na retificação do aço ABNT 4340.

Processo de Retificação	Cilíndrica Externa de Mergulho
Rebolo	Óxido de alumínio branco
Velocidade do Rebolo (v_s – m/s)	$v_s = 30$ m/s
Avanço Radial v_f – mm/min (taxa específica de remoção de material – mm^3/s)	0,50 (1,41)
Velocidade da peça (v_w)	$v_w = 0,58$ m/s
Profundidade Efetiva de Corte (a_e)	$a_e = 1,2; 2,5; 3,7$ $\mu\text{m}/\text{volta}$
Condições de Lubrificação	Convencional (abundante) e MQL
Fluido de Corte Convencional	Emulsão com óleo semissintético de base vegetal à concentração de 2,5%
Fluido para a técnica MQL	100% vegetal, biodegradável, viscosidade de 70 centistokes (25°C)
Vazão de Óleo MQL	$2,7 \times 10^{-8}$ m^3/s
Pressão de Ar no MQL	0,6 MPa
Material da Peça	Aço AISI 4340, temperado e revenido (60 HRC)
Dressador	Conglomerado de Diamante – dimensões de 15 mm $\times$ 8 mm $\times$ 10 mm
Profundidade de Dressagem (a_d)	$a_d = 0,200$ mm (50 ciclos – 0,004mm cada)
Sparkout (t_s)	$t_s = 8$ s
Velocidade de Dressagem (v_d)	$v_d = 740$ mm/min

Os equipamentos que compõem o sistema de MQL são o compressor, o regulador de pressão, o medidor de vazão de ar e o bocal. O aplicador utilizou um sistema pulsante de fornecimento de óleo, possibilitando separadamente a regulação da vazão de ar comprimido e de lubrificante, ele foi fornecido pela empresa ITW Chemical Products Ltda (especificação ITW Accu-lube 79053D de micro lubrificação). Os equipamentos são mostrados na Fig. (2).

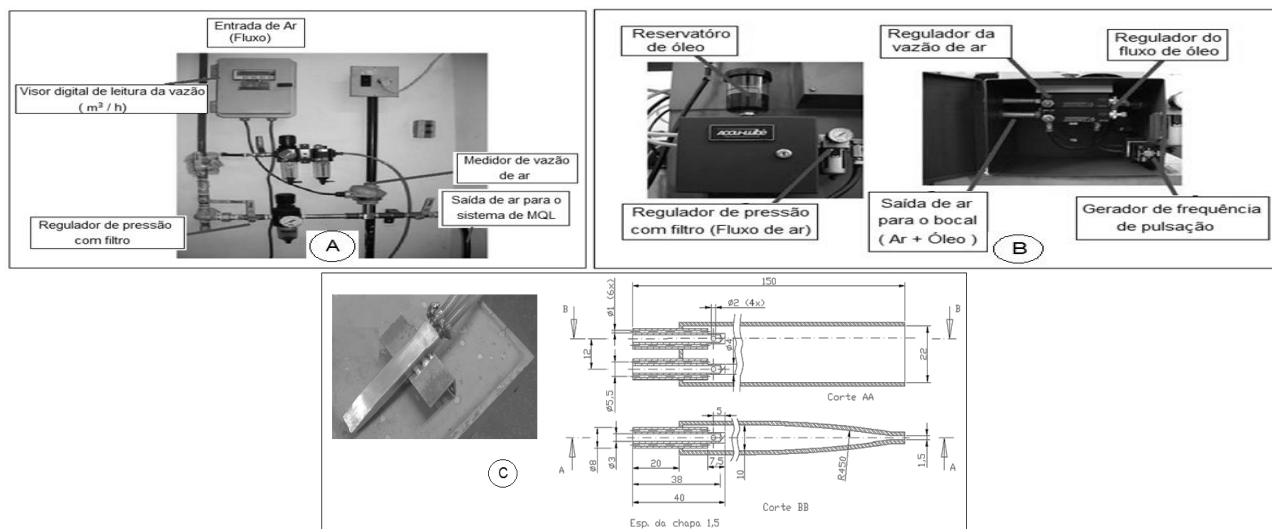


Figura 2. Esquema do sistema de lubrificação. (A) sistema de controle de entrada de ar com o controle da pressão e vazão de ar. (B) Unidade MQL para controle do fluxo de ar e dosagem de óleo. (C) Vistas do bocal aplicador do fluido de corte.

Os ensaios foram realizados para quatro diferentes técnicas de lubrificação: a refrigeração convencional (fluido em abundância), MQL com vazão 30 ml/h, MQL com vazão 60 ml/h e MQL com vazão 120 ml/h. Para cada diferente condição de lubrificação foram realizados 3 ensaios.

A realização das medições da rugosidade média dos corpos de prova (R_a) foi feita através de um rugosímetro Surtronic3+, da marca Taylor Hobson. Com a medição sendo efetuada na direção perpendicular à superfície de retificação, o rugosímetro foi ajustado para realizar a medição com um comprimento de medição (cut-off) igual a 0,25 mm e percurso total (ln) igual a 1,25 mm. Em todas as medidas, para cada corpo de prova, foram realizadas 3 leituras em posições diferentes (120° cada).

Os valores do desvio de circularidade foram obtidos através de um equipamento marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C®, antes do início das medições o aparelho foi aferido e calibrado, seguida as amostras foram lavadas com álcool antes de cada medição para evitar que pequenas partículas abrasivas influenciassem na medição desta grandeza.

Para cada ensaio realizado foram feitas três medições, onde ao término de cada medida, a peça era solta e deslocava-se a um giro de 120° e reiniciava-se a medição. Os resultados referentes aos desvios de circularidade correspondem à média aritmética das leituras realizadas em cada peça.

Nas medições do desgaste do rebolo, para cada dois corpos de prova do ensaio (ABNT 4340), foi realizada uma impressão do desgaste (marcação do degrau criado no rebolo) em outro corpo de prova de (aço SAE 1020). Isso foi possível uma vez que não houve utilização da largura total do rebolo (bs) de 25,4 mm, pois a largura utilizada na retificação foi de 8 mm, ou seja, dois ensaios por rebolo. O instrumento utilizado na medição do desgaste do rebolo foi o programa de projeção e medição de perfil Taylor Hobson TalyMap, contido no rugosímetro Surtronic3+.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os dados de saída obtidos na realização do experimento de retificação do aço ABNT 4340 com rebolo convencional de óxido de alumínio.

3.1. Rugosidade

A rugosidade caracteriza-se por um parâmetro utilizado para quantificar a qualidade topográfica de uma superfície. Essa qualidade superficial tem forte relação com eficiência na lubrificação, a vida útil do rebolo, resistência à fadiga e corrosão, entre muitas outras (Hecker e Liang., 2003). Para Puerto *et al.* (2013), a evolução da rugosidade da superfície usinada está relacionada basicamente a quatro fatores principais, sendo eles: os parâmetros de dressagem, as condições de usinagem, as forças envolvidas e o desgaste diametral do rebolo.

A Figura (3) apresenta os resultados obtidos nos ensaios de rugosidade média aritmética (R_a) para as diferentes condições de lubrificação apresentadas. É importante ressaltar que a rugosidade apresentada no gráfico corresponde à média da rugosidade para os três corpos de prova realizados para cada condição de lubrificação.

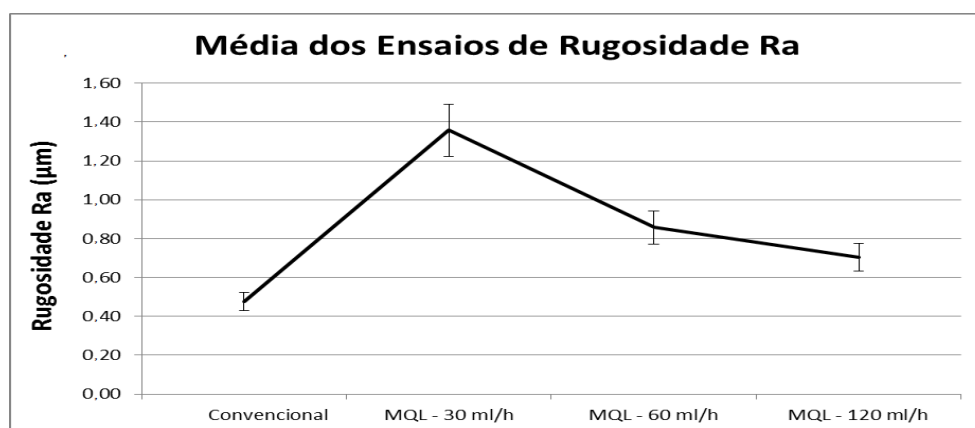


Figura 3. Rugosidade média aritmética (R_a) versus condição de lubrificação utilizada no ensaio.

De acordo com Puerto *et al.* (2013), pelo fato de a retificação ser um processo de usinagem por abrasão, em especial, destinado a obtenção de bom acabamento em materiais de alta dureza, sua finalidade caracteriza-se na obtenção de baixa rugosidade (R_a 0,1 µm até 2,0 µm). Segundo Saint-Gobain (2015), a relação de velocidade do rebolo e da peça (qs) é de fundamental importância de ser determinado, uma vez que através desta razão, pode-se estabelecer a configuração que o processo de retificação se encontra.

Ainda sobre os resultados na Fig. (3), pelo fato de a configuração do processo retificação aproximar-se de desgaste, pode-se notar que para todas as diferentes condições de lubrificação, todos os valores de rugosidade estão abaixo de 1,8 µm, assim se enquadrando dentro dos padrões de qualidade exigidos pelo processo de retificação. Segundo Malkin & Guo (2008), o acabamento superficial afeta, de uma forma significativa, a resistência à fadiga dos componentes fabricados principalmente daqueles que são submetidos a condições de trabalhos em condições com carregamentos alternados e em elevadas temperaturas. Assim a rugosidade de uma peça tem ligação direta com a lubrificação, dependendo principalmente do tamanho do grão abrasivo presente no rebolo, além das condições de dressagem, da taxa de remoção de material, do tempo de centelhamento e das condições de lubrificação. Da Figura (3), analisando-se mais cuidadosamente os resultados obtidos para os diferentes métodos de lubrificação, nota-se que os valores da rugosidade nos ensaios que utilizam lubrificação convencional foram menores, se comparado a todos os ensaios nos quais há utilização de MQL. Isso se apresenta contrastante ao que foi apresentado por Silva *et al.* (2013) que realizaram ensaios de retificação do mesmo material, em condições de corte semelhantes as deste trabalho, porém com rebolo de CBN vitrificado. Nos resultados encontrados por estes autores, eles observaram que os

melhores valores de rugosidade registrados foram atribuídos ao empregar a técnica MQL e atribuíram este melhor desempenho à propriedade lubrificação do óleo que era pulverizado na interface rebolo-peça. Com isso houve redução do atrito e maior facilidade de escorregamento do grão na zona de contato.

Dessa forma, assim como apresentam Malkin e Guo (2008) que se, nos processos de usinagem, a lubrificação e a refrigeração não forem satisfatórias, as elevadas temperaturas geradas podem causar danos à peça produzida, tais como: queima superficial, mudanças da microestrutura, aparecimento de tensões residuais, erros de forma e deterioração da qualidade final da peça produzida. Neste caso, é possível inferir que para a retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 com a utilização de rebolo convencional de óxido de alumínio branco, a lubrificação por MQL foi menos satisfatória em relação àquela proporcionada pela técnica de aplicação de fluido de corte convencional.

No caso da retificação utilizando-se da técnica de MQL, a condição que apresentou melhor resultado de rugosidade média (menor valor de Ra), foi a que se utilizaram 120 ml/h. Assim é possível apresentar que segundo Malkin e Guo (2008), para usinagem na qual se utilizaram 30 ml/h, que as funções de lubrificação e de refrigeração na região de corte proporcionadas por esta técnica não foram satisfatórias. Isso pode ser constatado pelos mais altos valores de rugosidade. Já o fato de usinagem com a técnica MQL e vazão 120 ml/h resultar em uma rugosidade menor em relação àquelas obtidas para a técnica MQL com vazões 60 ml/h e 30 ml/h, mostra que essa vazão combinada com o rebolo de óxido de alumínio não permitiu a ocorrência de entupimento do rebolo (“clogging”). Segundo Oliveira *et al.* (2012), como há alta tendência dos cavacos aquecidos se alojarem nos poros do rebolo, gerando o fenômeno de empastamento que por sua vez entope os poros entre os abrasivos do rebolo. Estes autores observaram a ocorrência do fenômeno de empastamento na retificação com rebolo superabrasivo de CBN sob ação da lubrificação MQL com uma vazão de 100 ml/h. Mais além, Cameron *et al.* (2010) explicam que quando os cavacos gerados no processo de retificação não são removidos totalmente da zona de corte por ação do fluido de corte, eles ficam alojados nos poros do rebolo de modo a dificultar a entrada do fluido de corte na zona de corte, assim colocando em risco a lubrificação no processo e afetando negativamente a eficiência e qualidade da peça usinada.

3.2. Circularidade

De acordo com Ayub *et al.* (2014), a geometria de produto final fabricado nunca terá um desvio de circularidade igual a zero, valor nominal verdadeiramente circular, uma vez que existem imperfeições no seu processo de manufatura, como é o caso da retificação também. No que está relacionado ao processo de fabricação, erros de circularidade são possíveis de ocorrerem pelas seguintes causas: lubrificação inadequada, ação incorreta de corte, desgaste da ferramenta, defeitos nos componentes da máquina, vibrações, desalinhamento dos mandris e etc.

De posse dos resultados obtidos para a circularidade, na Fig. (4) são apresentados os valores do desvio de circularidade em função do método de lubrificação utilizado. É importante reapresentar que para cada ensaio mediu-se três vezes o valor da circularidade.

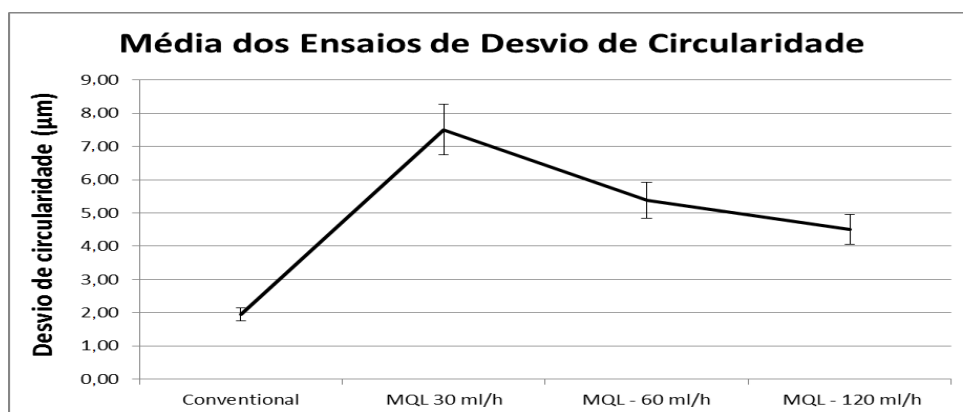


Figura 4. Circularidade em função do método de lubrificação utilizado.

Da Figura (4) observa-se que o menor desvio de circularidade foi registrado após a retificação com a técnica convencional. Fusse *et al.* (2004) defendem que o erro de circularidade ocasionado pelo processo de usinagem tem relação direta com as condições de retificação, e também com os danos térmicos e solicitações mecânicas, além da pressão e vazão de fluido de corte. O desvio de circularidade alto é indicativo de variação na geometria da peça. Um material durante a usinagem com grande geração de calor estará sujeito a uma maior variação dimensional e geométrica que aquele em que houve menor geração de calor. O fato de ter utilizado a técnica convencional de aplicação de fluido de corte resultou em maior capacidade de remover calor da área de corte, incluindo a própria peça, em relação a técnica MQL que utiliza uma quantidade muito inferior de fluido de corte. Quanto à técnica MQL, semelhantemente o observado para a rugosidade, os desvios de circularidade também foram os menores após a retificação com a vazão de

fluido de corte igual a 120 ml/h em relação às outras duas vazões testadas, 30 ml/h e 60 ml/h. Segundo Hadad *et al.* (2012), durante a retificação, a redução de fluido abundante provoca uma menor dissipação térmica de calor gerado na zona de corte, acarretando um maior desvio de circularidade, devido uma maior dilatação térmica da peça. Dessa forma, é possível inferir que a condição de lubrificação gerada pela vazão de 120 ml/h se mostrou mais eficiente nas condições investigadas.

Para Tawakoli *et al.* (2007), a técnica de lubrificação convencional é mais eficaz na limpeza da superfície do rebolo em relação ao MQL convencional, assim como foi observado na análise dos resultados de erros de circularidade. O mesmo ocorre para a rugosidade superficial, uma vez que com o aumento do volume de fluido de corte aplicado, a limpeza da superfície do rebolo foi mais eficiente, assim os erros de rugosidade foram menores.

Oliveira *et al.* (2012), ao realizarem ensaios de retificação com diferentes técnicas de lubrificação, relataram que a utilização do sistema MQL dificulta a remoção de cavaco da zona de corte devido ao óleo e ar que são lançados contra o rebolo. Isso faz com que os cavacos se aglutinem com o óleo do MQL e assim formem uma pasta, que se aloja nos poros do rebolo. Durante o processo de retificação, a quantidade de cavacos gerada continua aumentando (assim como o atrito) até que ocorra o contato entre a peça de trabalho e o cavaco alojado nos poros do rebolo, causando deformações tanto de origem elástica como plástica na peça de trabalho, como também atrito. Isso eleva as forças de corte, deteriora o acabamento e promove maiores desvios de circularidade na peça, como também eleva o desgaste diametral do rebolo. Desse modo, é possível ressaltar que a técnica MQL com vazão 120 ml/h promoveu as melhores condições tribológicas durante a retificação do aço ABNT 4340 nas condições investigadas neste trabalho, assim promovendo a remoção de cavaco mais eficiente em relação as outras vazões testadas pela técnica MQL.

3.3. Desgaste Diametral do Rebolo

Novoselov *et al.* (2016) apresentam que a produtividade da operação tecnológica, exatidão dimensional e acabamento superficial dependem do padrão do desgaste da ferramenta e também do estado de sua superfície de trabalho. Para Jiang *et al.* (2013), o desgaste do rebolo pode ser um bom indicativo da qualidade peça durante a retificação. Quando um rebolo se desgasta e os grãos abrasivos se tornam arredondados, haverá elevação na área de contato entre abrasivo e peça de forma que tanto as forças de corte como a geração de calor serão aumentadas também. Se o fluido de corte (tipo, vazão e pressão) não forem eficientes na remoção de calor da peça, esta poderá sofrer danos de origem térmica, trincas e tensões residuais de tensão, todos indesejáveis. Liao *et al.* (2000) inferem que existem três formas básicas de desgaste do rebolo durante a retificação de uma peça, sendo elas: atrito entre o grão abrasivo e a peça, fratura do grão e fratura do ligante. Ainda apresentam que as formas de desgaste ocorrem em decorrência das solicitações mecânicas as quais o rebolo é submetido, além da deterioração do ligante por causa da elevação da temperatura durante o processo de retificação.

De acordo com Ding *et al.* (2014), na medida em que as forças de retificação e a qualidade da usinagem são determinadas pelo desempenho da ferramenta de corte, é de suma importância estudar o comportamento do desgaste do rebolo para a qualidade e a eficiência do processo de retificação sejam atendidas. Na Figura (5) são mostrados os valores de desgaste diametral do rebolo obtidos em função das diferentes técnicas de lubrificação.

Com a análise da Fig. (5), é possível notar dos resultados que os menores valores de desgaste foram obtidos após a retificação com a técnica de aplicação de fluido convencional, semelhante ao comportamento observado para a rugosidade e circularidade já comentadas previamente. Ao empregar a técnica MQL, a maior vazão também foi responsável pelos menores valores de desgaste. Esta tendência permite inferir que há uma coerência entre o desgaste diametral e a rugosidade, e ao comparar os resultados nas Figs. 4 e 6, observa-se que o maior valor de rugosidade foi registrado quando o desgaste do rebolo atingiu o maior valor. Nesse mesmo sentido, quando a rugosidade atinge valores menores, o desgaste do rebolo também apresenta valores mais baixos. Iceri *et al.* (2012) apresentam que o desgaste do rebolo possui relação direta com capacidade de um fluido exercer a função lubrificação, e quanto mais predominante ela for, menor será o atrito entre grãos abrasivos e peça, de forma que os grãos irão permanecer ligados por mais tempo ao ligante, portanto mantendo-se afiados por mais tempo.

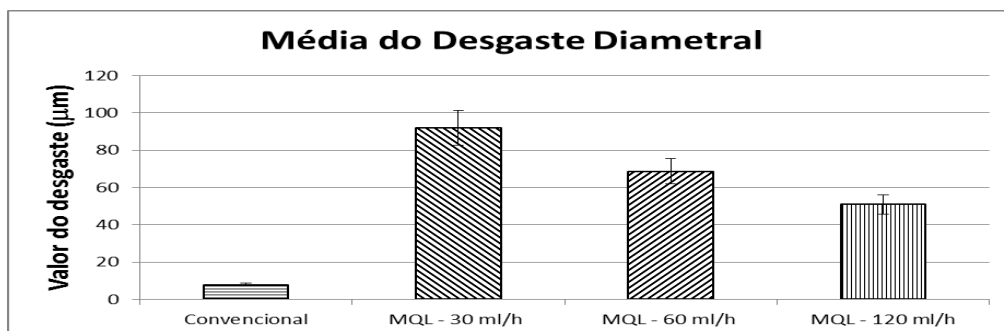


Figura 5. Desgaste diametral do rebolo em função da técnica de lubrificação aplicada.

Para Malkin e Guo (2008), o desgaste diametral do rebolo ocorre em função de dois fatores, que são a deterioração térmica e a elevada sollicitação mecânica a que o rebolo é submetido. Isto é, na medida em que melhor ocorre a dissipação térmica da região de corte, a perda de resistência do ligante é menor e, assim, menor é o desgaste diametral do rebolo. Mais além, Silva *et al.* (2007) explica que com o aumento da lubrificação pela aplicação do fluido de corte, ocorre a diminuição do desgaste diametral do rebolo. Isso ocorre em razão da diminuição do atrito entre o grão, a peça e o cavaco, o que permite aos grãos abrasivos que permaneçam por mais tempo aglutinados ao ligante, o que acarreta em menor desgaste diametral do rebolo.

4. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos durante a realização dos ensaios de retificação do aço ABNT 4340 sob a aplicação de lubrificação convencional e MQL, com a utilização de rebolo convencional de óxido de alumínio branco, pode-se concluir que:

- Em se tratando de parâmetros de qualidade normalmente utilizados na indústria, tais como a rugosidade e a circularidade, apesar da técnica de MQL ter se mostrado menos eficiente que a técnica convencional, os valores de rugosidade e circularidade foram satisfatórios e estão de acordo com o esperado para uma operação de desbaste nas três vazões com a aplicação de MQL (incluindo a condição mais severa de retificação com vazão igual 30 ml/h (a mais próxima da condição a seco), a qual apresentou maiores valores para os erros geométricos de rugosidade e circularidade). Com o emprego da técnica MQL, a vazão de 120 ml/h promoveu a condição de lubrificação proporcionou os melhores resultados de rugosidade e circularidade;
- Quanto ao desgaste do rebolo, a retificação com técnica MQL evidenciou novamente menor eficiência neste quesito perante a técnica convencional de aplicação de fluido de corte, independente da vazão testada. Devido ao menor poder refrigerante da técnica MQL, como também à maior propensão de formação de borra que causa entupimento dos poros, consequentemente alojamento de cavacos e passagem de fluido de corte durante a usinagem, há aumento no atrito e esforços de retificação na região de corte. Isso representa um consumo mais acelerado das ferramentas de corte, assim aumentando-se a frequência com que as ferramentas devem ser trocadas em função dos valores maiores de desgaste diametral do rebolo;
- Apesar da menor eficiência proporcionada após a retificação com a técnica MQL em relação a todas as variáveis de saída investigadas neste trabalho, destaca-se o fato de no caso da rugosidade e circularidade todos os valores encontrados estarem apresentados dentro do esperado para uma operação de desbaste. Outro ponto a ser destacado da aplicação da Mínima Quantidade de Lubrificante neste trabalho foi o fato de ela proporcionar economia de fluido de corte gerada com a aplicação da técnica de MQL, reduzindo-se substancialmente os riscos à saúde humana e ambientais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo apoio financeiro e na concessão da bolsa de Iniciação Científica (processo 2015/09197-7).

6. REFERÊNCIAS

- Aurich J.C.; B. Linke, B; Hauschild, M.; Carrella, M; Kirsch, B., “Sustainability of abrasive processes”, In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 62 653–672, 2013.
- Ayubi, M.A., Mohamed, A.B., Esa, A.H., “In-line inspection of roundness using machine vision”, Procedia Technology 15, 808-817, 2014.
- Barczak, L.M; Batako, A.D.L; Morgan, M.N., “A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions”, International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 50, p. 977-985, 2010.
- Brinksmeier E, Mutlugünes Y, Klocke F, Aurich JC, Shore P, Ohmori H., “Ultra-precision grinding”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 59, Issue 2, 2010, P. 652–671.
- Cameron, A., Bauer, R.J., Warkentin, A. (2010), “An investigation of the effects of wheelcleaning parameters in creep-feed grinding”, International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 50, Issue 1, January 2010, Pages 126–130.
- Dhar, N.; Islam, S.; Kamruzzaman, M., “Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel”, Journal of Materials Processing Technology, 172, p. 299-304, 2006.
- Ding, K., Fu, Y., Su, H., Gong, X., WU, Keqin., “Wear of Diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicone carbide” International Journal of Manufacturing Technology, 2014.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. Artiber Editora Ltda.,

Campinas, SP, Brasil, 6a Edição, 2008.

- Dudzinsk, D., Devillez, A., Moufki, A., Larrouque`re, D., Zerrouki, V., Vigneau, J. “A Review of Developments Towards Dry and High Speed Machining of Inconel 718 Alloy”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 44, pp. 439–456, 2004.
- Fusse, R.Y.; Franca, T.V.; Catai, R.E.; Silva, L.R.; Aguiar, P.R.; Bianchi, E.C., “Analysis of the cutting fluid influence on the deep grinding process with a CBN grinding wheel”, *Materials Research, Sao Carlos - SP*, v. 7, n. 3, p. 451-457, 2004.
- Guo, C.; Shi, Z.; Attia, H.; McIntosh, D., “Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels”, In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 56, p.343-346, 2007.
- Hadad, M.J., Tawakoli, T., Sadeghi, M.H., Sadeghi, B., “Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication - MQL grinding process”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 54–55, 10–17, 2012.
- Hecker, R. L.; Liang S. Y., “Predictive modeling of surface roughness in grinding”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 43, p. 755–761, 2003.
- Iceri, D.M., Sousa, R.M., Destro, R.S., Oikawa, M.H., Bianchi, E.C., Aguiar, P.R., Fortulan, C.A., “Comparação entre os métodos de aplicação de fluido de corte convencional e otimizado na retificação plana de cerâmicas”, *Cerâmica* 58 (2012) Páginas 84-89
- Jiang, J.L.; Ge, P.Q.; Bi, W. B.; Zhang, L; Wang, D. X.; Zhang, Y., “2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 74, 29–40, 2013.
- Liao, T.W.; Zhang, Z.M.; Mount C.R., “A case based reasoning system for identifying failure mechanisms”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2000.
- Malkin, S., Guo. C. *Grinding Technology: Theory and applications of machining with abrasives*, New York: Industrial Press, p. 372, 2008.
- Marinescu, I. D.; Rowe, W.B.; Dimitrov, B.; Inasaki, I. “Tribology of abrasive machining processes”. 2ªed. Norwich, William Andrew Inc, 2013.
- Nguyen, T.A.; Butler, D.L., “Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.45, p. 1321–1328, 2005.
- Novoselov, Y.; Bratan, S; Bogutsky, V., “Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear”, In: *International Conference on Industrial Engineering, ICIE*, 2016.
- Obikawa, T., Kamata, Y., Shinozuka, J., “High-speed grooving with applying MQL”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, 1854–1861, 2006.
- Oliveira, D.J; Guernandi, L.G; Bianchi, E.C; Diniz, A.E; Aguiar, P.R; Canarim, R.C., “Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning”. *Journal of Materials Processing Technology*. v.212, p.2559-2568, 2012.
- Puerto, P., Fernández, R., Madariaga, J., Arana, J., Gallego, I., “Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear”, *Procedia Engineering*, 63: 174-182, 2013.
- Pusavec, F.; Deshpande, A.; Yang, S.; M'Saoubi, R.; Kopac, J.; Dillon, O. W. (Jr.); Jawahir, I. S. “Sustainable machining of high temperature Nickel alloy e Inconel 718: part 1 e predictive performance models”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 81, p.257. 2014.
- ROWE W. B. *Principles of Modern Grinding Technology*, Second Edition, 2014.
- Sanchez, J.A.; Pombo, I.; Alberdi, R.; Izquierdo, B.; Ortega, N.; Plaza, S.; Martineztoledano, J., “Machining evaluation of a hybrid MQL-CO2 grinding technology”, *Journal of Cleaner Production* 18, p. 1840 – 1849, 2010.
- SAINT-GOBAN ABRASIVOS. *Tecnologia Avançada em Processo de Retificação*, 2015.
- Sharma, V.S.; Singh G.; Sørby, K. 2014. “A Review on Minimum Quantity Lubrication for Machining Processes”, *Materials and Manufacturing Processes*, 2014.
- Silva, L.R.; Bianchi, E.C.; Fusse, R.Y.; Catai, R.E.; FRANCA, T.V.; AGUIAR, P.R., “Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant –MQL in grinding”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 47, p. 412–418, 2007.
- Silva, L.R.; Corrêa; E.C.S.; Brandão, J.R.; De Ávila R.F.; “Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process”, *Journal of Cleaner Production* . 2013.
- Stanford, M.; Lister, P.M., “The future role of metalworking fluids in metal cutting operations”, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 54 Iss: 1, pp.11 – 19, 2002.
- Stanford, M., Lister, P.M., Kibble, K.A., Morgan, C., “Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970- 80A15 (En32b) plain carbon steel using WCeCo uncoated tooling”, *Journal of Materials Processing Technology* 54, p. 11-19, 2007.
- Tawakoli, T.; Westkaemper E.; Rabiey M., “Dry grinding by special conditioning”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 33, p. 419–424, 2007.
- Tawakoli, T.; Hadad, M.J.; Sadeghi, M.H.; Daneshi, A.; STockert, S.; Rasifard, A. “An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication - MQL grinding”, *International. Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 49, p. 924–932, 2009.

- Tawakoli, T.; Hadad, M.J.; Sadeghi, M.H., "Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 50, 521 - 531, 2010.
- Umeda, Y.; Takata, S.; Kimura; Tomyama, T.; Sutherland, J.; Kara, S.; Herrmann, C.; Duflou, J.R., "Toward Integrated Product and Process Life Cycle Planning – an Environmental Perspective. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 61, Issue 2, 2012, Pages 681-702
- Wang, Y.G., Li, C.H., Li, B.K., Yang, M., Zhang, X.W. "Advances and recent patents in the field of grinding temperature measurement methods". Bentham Science. 2015
- Zhang, Y.B., Li, C.H., Jia, D., Zhang, D.K., Zhang, X.W., 2015. "Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil", Journal of Cleaner Production, Volume 87, 15 January 2015, p. 930–940

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

CYLINDRICAL GRINDING ABNT 4340 STEEL GRADE UNDER MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL) APPLICATION WITH ALUMINUM OXIDE GRINDING WHEEL

Rafael Lemes Rodriguez, rodiguez.raaf@gmail.com¹

Rodolfo Alexandre Hildebrandt, hildebrandt@hotmail.com.br¹

José Claudio Lopes, jclaudio.lopes@hotmail.com¹

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

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br¹

Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br²

Rosemar Batista da Silva, rosemar.silva@ufu.br³

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

³Universidade Federal de Uberlândia - UFU - Campus de Santa Mônica. Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, CEP 38400-902, Santa Mônica, MG, Brasil.

Abstract: Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique has earned such evidence in recent years due to its promising capacity to substitute conventional application of oil (abundant flow of cutting fluids) in machining process; it promotes not only reduction of risks to environment and human health, but also this technique makes possible cleaner production. Low consumption of oil in grinding process is the main propose of MQL application, being considered innovative in terms of environmental sustainability and production costs. Therefore, current work aims to evaluate the application of Minimum Quantity Lubrication on cylindrical grinding ABNT 4340 steel grade with aluminum oxide grinding wheel, results were compared with conventional method of cooling-lubrication. Three different flows were considered: 30, 60 e 120 ml/h. The following output variables of the process were measured and analyzed: workpiece surface roughness and roundness errors and diametric wheel wear. By results analysis in terms of roughness and roundness, specimen machined under application of conventional cooling-lubrication showed the least errors of surface roughness, roundness and diametrical wheel wear. Nevertheless, 120 ml/h MQL technique presented satisfactory results in comparison to the conventional application of lubri-cooling technique, so the economy generated by reducing fluid consumption is evident and it decreases danger to human health and environment.

Keywords: Cylindrical grinding machining, MQL, silicon carbide grinding wheel, optimized method, conventional coolant method.

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.