

APLICAÇÃO DE AR FRIO JUNTAMENTE À TÉCNICA MQL NA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 COM REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO.

Ricardo Bega de Andrade, r-b-andrade@hotmail.com¹

Rodrigo de Souza Ruzzi, rodrigo.ruzzi@ufu.br²

Felipe Pereira Coelho, coelho621@hotmail.com¹

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

Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.edu.br³

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.edu.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, FEB/UNESP, Av. Eng. Luíz E. C. Coube, 14-01, Bauru, SP, Brasil.

²Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, Brasil.

³Departamento de Engenharia Elétrica, FEB/UNESP, Av. Eng. Luíz E. C. Coube, 14-01, Bauru, SP, Brasil.

Resumo: A retificação é um processo de usinagem que visa alta precisão dimensional e elevada qualidade superficial. Porém há alta geração de calor, sendo assim a refrigeração e lubrificação são muito importantes. Buscando métodos para reduzir a agressão ao meio ambiente na usinagem dos metais, tornando os processos mais sustentáveis, surgiu a técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) que consiste na redução de lubrificação a quase zero, gastando valores entre 10 e 150 ml/hora de lubrificante. Sua aplicação é realizada por meio da mistura entre a pequena taxa de fluido lubrificante com ar comprimido aplicado diretamente na área de corte. O sistema MQL tem várias vantagens, tanto com relação ao meio ambiente quanto com relação ao custo benefício de sua aplicação, porém apresenta deficiência em sua refrigeração, esta deficiência pode causar danos térmicos à peça, como por exemplo, formação de camada branca que fragiliza o material. O presente trabalho buscou mostrar uma maneira de reduzir esta deficiência, com a utilização de ar frio (a zero grau Celsius) na técnica MQL, utilizando rebolo convencional de óxido de alumínio e corpos de prova com formato anelar confeccionados em aço ABNT 4340 temperado e revenido. Para comparar as técnicas de lubri-refrigeração, foi avaliado o acabamento superficial (rugosidade média (Ra) e desvios de circularidade) e a integridade microestrutural (microdureza e análises metalográficas). Através dos resultados obtidos, foi possível observar que o resfriamento do ar embora melhore a refrigeração acaba piorando a lubrificação pelo aumento da viscosidade do fluido, sendo assim, o melhor desempenho foi apresentado pela técnica MQL convencional.

Palavras-chave: MQL com ar frio, Rebolo de óxido de alumínio, ABNT 4340, MQL.

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação consiste em utilizar uma ferramenta de corte denominada como rebolo, para remover pequenas quantidades de material de uma superfície mais macia que o mesmo, podendo haver rotação apenas do rebolo, ou de ambos os corpos, rebolo e peça, Marinescu *et al.* (2007).

Durante o processo de retificação, a temperatura na região de contato, peça-ferramenta, assim como a força de atrito, devem ser controladas, ou diminuídas, para níveis não prejudiciais. Esta tarefa é realizada com a utilização de líquidos que possuem características específicas, conhecidos como fluidos de corte. Os primeiros estudos a respeito da utilização de fluidos para lubrificar e refrigerar a região de corte, foram feitos por F. W. Taylor, em que obteve uma redução na temperatura da região de corte suficiente para possibilitar um aumento na velocidade de corte entre 30% e 40% da convencional, sem lubrificação, apenas utilizando a água como fluido de corte. Tal descoberta que também foi corroborada na prática por outros pesquisadores impulsionou o estudo e o desenvolvimento de vários tipos de fluidos de corte ao longo dos anos e, principalmente, nas últimas décadas, Machado e Diniz (2000).

O fluido de corte tem como características principais a refrigeração, lubrificação e retirada de cavacos, a lubrificação convencional, que consiste em jorro abundante de fluido de corte, faz isso por meio alto fluxo de fluido direcionado na interface entre ferramenta e peça, Ebbrell *et al.* (2000). No entanto, este grande uso de fluido de corte, além de consistir em um custo de aproximadamente 18% do custo total de produção Sanchez *et al.* (2010). O uso deste método de lubrificação também acarreta em danos ambientais e risco aos operadores, uma vez que estes fluidos sofrem contaminação bacteriana, havendo nesta carga de micro-organismos espécies patogênicas importantes na transmissão de doenças (Sandin *et al.* 1991 e Dilger *et al.* 2005).

Como alternativa a este uso expressivo de fluido de corte, foi desenvolvido a técnica de lubrificação por mínima quantidade de lubrificante (MQL), que emprega mínimas quantidades de fluido (10 a 150 mL/hora) para lubrificar e refrigerar a região de contato, peça-ferramenta, reduzindo o atrito e a temperatura na região, Marinescu *et al.* (2007).

Devido à baixa capacidade de dissipação de calor pela técnica MQL, algumas investigações vêm sendo realizadas sobre como se pode reduzir a temperatura na usinagem com a utilização da técnica MQL. Uma alternativa que tem sido relatada é a utilização de criogenia em conjunto com MQL. Os autores Sanchez *et al.* 2010 e Pereira *et al.* 2015 realizaram experimentos utilizando MQL e criogenia, os dois aplicaram jatos de CO₂, Sanchez *et al.* (2010) aplicou o CO₂ após o MQL (assim congelando a camada de óleo na superfície) e Pereira *et al.* (2015) aplicou o CO₂ juntamente ao jato MQL, ambos trabalhos apresentaram resultados satisfatórios realizando a aplicação de MQL com criogenia.

Este trabalho tem como objetivo geral seguir a linha de pesquisa MQL com criogenia, realizando a retificação utilizando a técnica MQL com o ar frio. Para isso foi desenvolvido um bocal onde é realizada a mistura entre o MQL e o ar frio, visto na Figura 1 A).

Para o resfriamento do ar é necessário apenas um conjunto com compressor, filtro, secador de ar e um tubo de vórtice, podendo assim ser um método mais barato e com menor agressão ao meio ambiente comparado a utilização de CO₂, (Xiao e Zhang 2006 e Teicher *et al.* 2006).

O objetivo específico deste trabalho é analisar os resultados e realizar as comparações entre os métodos de lubrificação convencional, MQL e MQL com ar frio, quando utilizados na retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 com rebolo de óxido de alumínio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em uma retificadora cilíndrica da marca SULMECÂNICA modelo RUAP515H equipada com comando numérico computadorizado (CNC). Para realizar a retificação foi usado rebolo de óxido de alumínio da marca Saint-Gobain NORTON com a especificação 38A 150 L 6 V. Os corpos de prova foram confeccionados em aço ABNT 4340 com formato anelar com as dimensões: diâmetro externo 58mm, diâmetro interno 30mm e espessura 4 mm.

Os parâmetros de retificação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de retificação

Variáveis			
Avanço [mm/min]	0,25	0,50	0,75
Velocidade de corte (v_s) [m/s]	30	30	30
Qw' [mm ² /min]	45,55	91,10	136,66
Volume de material removido [mm ³]	2026,86	2026,86	2026,86
Espessura equivalente de corte (h_{eq}) [mm]	$2,53 \times 10^{-05}$	$5,06 \times 10^{-05}$	$7,59 \times 10^{-05}$
Número de ciclos	50	50	50
Avanço por ciclo (diâmetro) [mm]	0,10	0,10	0,10
Tempo de spark-out [s]	7,5	7,5	7,5

A dressagem foi realizada após cada experimento, com um dressador conglomerado de dimensões 15 x 8 x 10 mm, com profundidade (ad) de 20 µm e velocidade de dressagem (v_d) igual a 200 mm/min.

As comparações foram feitas para dois fluidos de corte em três condições de utilização, a primeira foi emulsão 1:39 da marca QUIMATIC tipo ME-2 de forma abundante (convencional), a segunda lubrificante puro da marca ITW Chemical linha Accu-Lube tipo LB 1100 na técnica MQL e a terceira o mesmo fluido LB 1100 na técnica MQL com ar frio, cada tipo de lubrificação tem um bocal específico de aplicação, Figura 1.

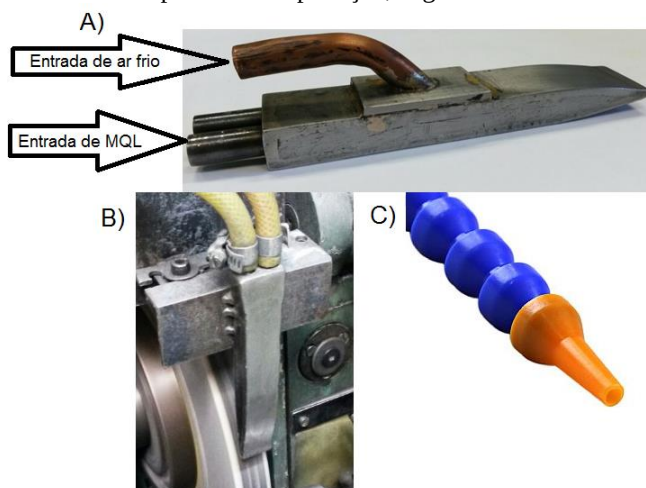


Figura 1. Bocais utilizados nos experimentos. A) MQL com ar frio, B) MQL e C) Convencional (abundante)

Os parâmetros de lubrificação estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de lubrificação

Parâmetros	MQL com ar frio	MQL	Convencional
Tipo de Fluido	LB 1100	LB 1100	ME-2, emulsão 2,5%
Vazão [ml/h]	150	150	$1,02 \times 10^6$
Pressão [bar]	6	6	4
Vazão de ar [m ³ /h]	9,72	9,72	#####
Temperatura [°C]	~ 0	~ 25	~ 25

A técnica MQL juntamente ao ar frio consiste na utilização de um bocal específico, onde além das mangueira que vem do sistema MQL é também adicionado uma mangueira que vem do tubo de vórtice, vide Figura 1 A). O ar é resfriado pela ação de um tubo de vórtice, Figura 2, este equipamento tem como característica abaixar a temperatura do ar a partir da temperatura ambiente para até -46°C, conforme dados do fabricante.

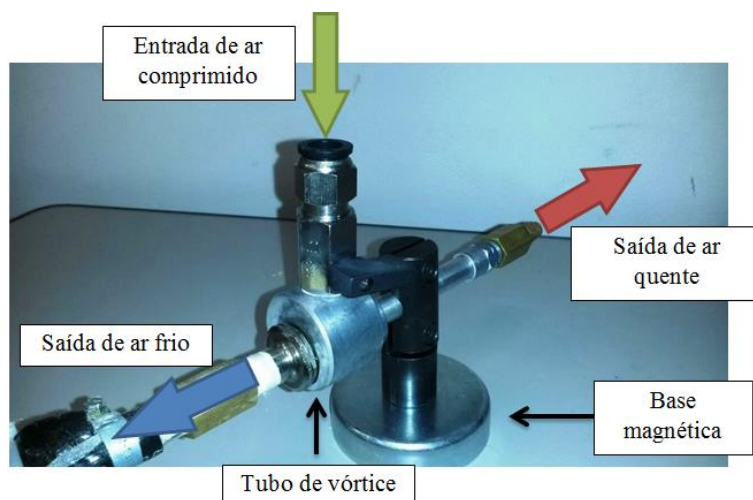


Figura 2. Tubo de vórtice

A Figura 3 é uma representação esquemática de como é realizado a lubrificação pela técnica MQL com ar frio. São utilizados sete (7) equipamentos principais, sendo eles, dois compressores, dois filtros de ar (com controlador de pressão embutido), um equipamento de MQL, um secador de ar e um tubo de vórtice. Assim chegando 3 mangueiras no bocal de MQL ar frio, sendo duas com óleo do MQL e uma com ar frio do tubo de vórtice.

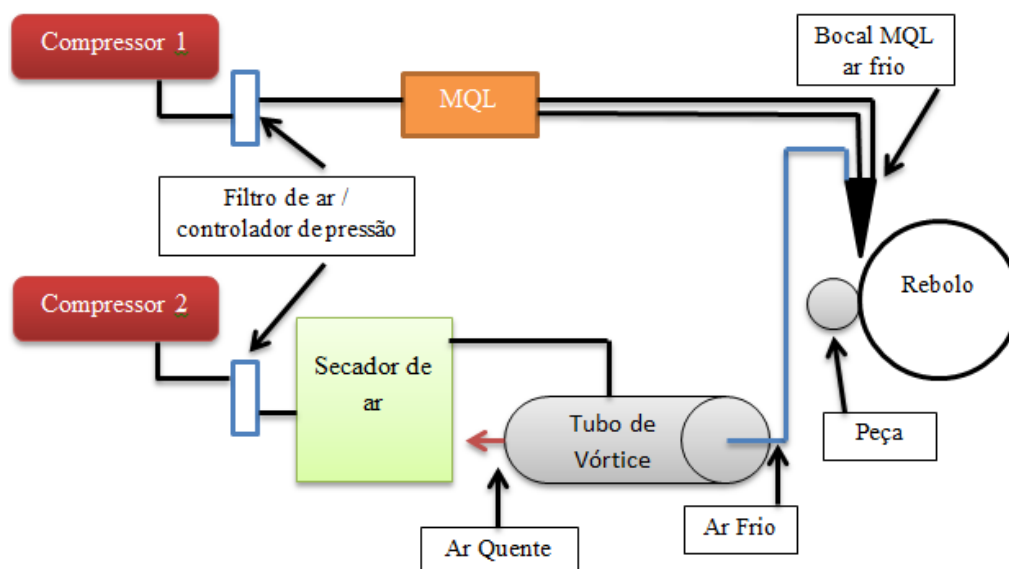


Figura 3. Esquema do método de lubrificação MQL ar frio

Foram realizadas as medições e análises de quatro variáveis de saída, sendo eles, rugosidade, circularidade, microdureza e metalografia. Para realizar essas medições são utilizados os equipamentos indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Equipamentos para medição das variáveis de saída

Parâmetro de saída	Equipamento
Rugosidade	Taylor Hobson, Surtronic 3+
Circularidade	Taylor Hobson, Tayround 31C
Microdureza	Mitutoyo, HM-200, indentador Vickers
Metalografia	Microscópio: Olympus BX51M com câmera acoplada Software: analySIS imager

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados advindos dos experimentos realizados, as variáveis analisadas são rugosidade, circularidade, microdureza e análise metalográfica.

3.1. Rugosidade

A Figura 4 apresenta os valores de rugosidade média (Ra) para os diferentes métodos de lubrificação e diferentes velocidades de mergulho.

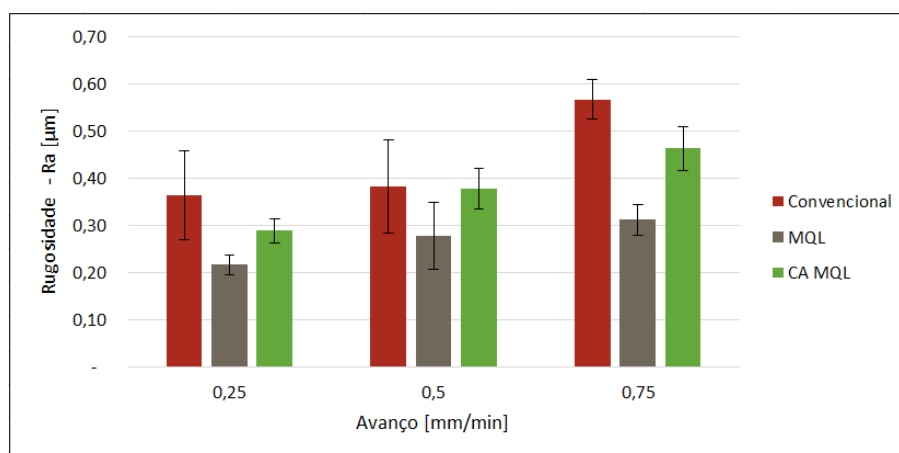


Figura 4. Valores da rugosidade média (Ra) para os métodos de lubrificação a diferentes velocidades de mergulho.

É observado na Figura 4 que todos os valores encontrados de rugosidade apresentam valores menores do que 0,65 μm , sendo assim estão de acordo com o que é sugerido por Malkin *et al.* (2008), que são considerados aceitáveis para o processo de retificação valores de rugosidade abaixo de 1,6 μm .

Além do avanço e da lubrificação utilizada, há outros fatores que influenciam na rugosidade, por exemplo, a granulometria do rebolo e a espessura equivalente de corte, a espessura equivalente de corte é proporcional ao avanço, sendo relatada por Heizel e Bleil (2007).

É apresentada a mesma tendência para todos os métodos de lubrificação, que indicou um aumento da rugosidade com o aumento do avanço, consequentemente com o aumento da espessura equivalente de corte. Sohal *et al.* (2014) explanam que devido ao aumento da velocidade de mergulho, há o aumento das forças de corte que geram maiores vibrações na máquina e aumenta os valores de rugosidade.

Realizando a análise da Figura 4, para qualquer avanço as rugosidades mais altas foram obtidas pelo método convencional de lubrificação, sendo que o valor mais baixo para rugosidade foi encontrado com MQL e o valor intermediário para a técnica MQL com Ar Frio (CA MQL).

Os resultados apresentados pela técnica de MQL em relação à técnica convencional ocorrem devido ao fato que a técnica MQL é capaz de romper a barreira aerodinâmica que se forma ao redor do rebolo em rotação, já o método convencional de lubrificação não tem a capacidade de romper esta barreira efetivamente. Assim devido a ação velocidade de aplicação e pressão do ar comprimido, a técnica MQL tem uma capacidade de realizar a entrega do fluido mais efetivamente na zona de corte promovendo uma lubrificação mais efetiva (Belentani *et al.*, 2014; Ruzzi *et al.*, 2016).

O método convencional é utilizado como parâmetro de comparação, sendo assim os dois métodos de lubrificação mostram resultados satisfatórios. A técnica MQL apresenta os melhores resultados obtidos.

De acordo com os resultados obtidos por Ruzzi *et al.*, (2016) e Belentani *et al.*, (2014), a qualidade superficial da peça usinada melhorou com a diminuição da viscosidade do fluido de corte devido à melhor penetração do mesmo na zona de corte, sendo assim, no presente trabalho pode-se atribuir os piores resultados apresentados após a usinagem utilizando MQL com ar frio à maior viscosidade do fluido na temperatura empregada, que foi aproximadamente 35% maior comparada à temperatura ambiente, o que dificultou a entrada do mesmo na zona de corte causando um maior atrito e consequente maior rugosidade.

3.2. Circularidade

A Figura 5 apresenta os valores do desvio de circularidade para os diferentes métodos de lubrificação e diferentes velocidades de mergulho.

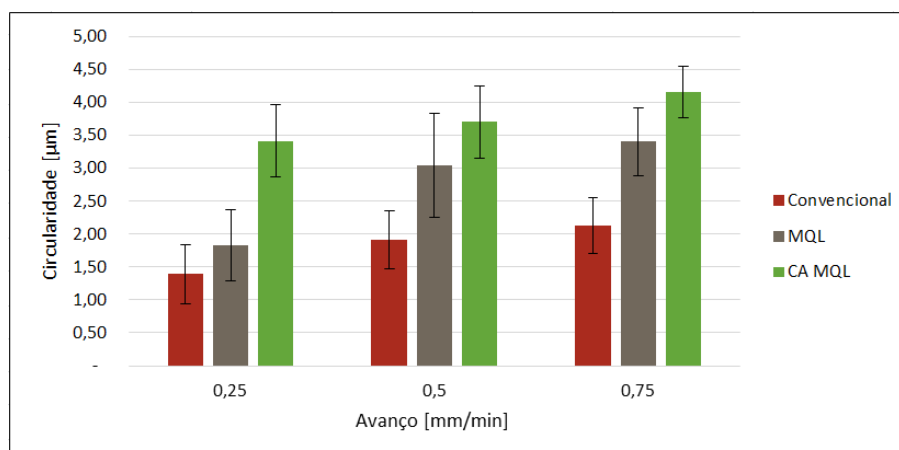


Figura 5. Valores do desvio de circularidade para os métodos de lubrificação a diferentes velocidades de mergulho.

Análogo aos resultados de rugosidade é relatado a mesma tendência de aumento do valor de desvio de circularidade conforme o aumento do avanço, para todas as condições de lubrificação, de acordo com Shaw (1996) esse efeito é relacionado com o aumento da espessura equivalente de corte e aumento da taxa de remoção do material, que piora a qualidade superficial. Diferindo da tendência encontrada para rugosidade, os melhores valores de desvio de circularidade foram relatados quando foi utilizado o método de lubrificação convencional, para todos os avanços, sendo seguido pela técnica MQL e os piores resultados foram encontrados quando os experimentos foram realizados com a técnica MQL com ar frio.

Segundo Ruzzi *et al.* (2016) o desvio de circularidade para o método MQL é pior que para o convencional devido à formação de borra na superfície do rebolo, que como consequência realiza o entupimento dos poros do rebolo, aumentando o atrito entre o rebolo e a peça e assim piorando os resultados de desvio de circularidade. A técnica convencional é mais efetiva na retirada de calor do processo, minimizando as distorções térmicas, melhorando a precisão dimensional e assim melhorando a circularidade, estando de acordo com os resultados encontrados.

De acordo com Oliveira *et al.* (2012) a técnica MQL gera mais calor na retificação, tornando o cavaco mais dútil, e assim este cavaco se aloja nos poros do rebolo e realiza o entupimento do rebolo.

A técnica MQL não é eficaz na retirada de calor, porém apesar de apresentar a média dos resultados piores comparados ao convencional esta apresenta resultados satisfatórios, se considerarmos o desvio padrão na Figura 5 conclui-se que para a velocidade de mergulho de 0,25 mm/min e 0,50 mm/min os resultados são estatisticamente iguais para técnica MQL e técnica convencional, isso devido a lubrificação da MQL ser efetiva.

De forma análoga aos resultados de rugosidade, os desvios de circularidade foram maiores para técnica MQL com ar frio comparado à técnica MQL, isso porque com a diminuição da temperatura o óleo aumenta a sua viscosidade e a lubrificação se torna não tão efetivo quanto à técnica MQL à temperatura ambiente, obtendo resultados piores, o que também é relatado por Ruzzi *et al.*, (2016) e Belentani *et al.*, (2014).

O valor de circularidade não depende apenas do avanço e do método de lubrificação utilizado, alguns dos parâmetros que interferem no desvio de circularidade são, rigidez do processo (máquina, ferramenta, peça) Moerlin *et al.* (2009), danos térmicos, entre outros.

A Tabela 4, retirada da norma NBR 6158 – Tolerâncias e Ajustes da ABNT, apresenta o grau de tolerância desvios, onde IT1 é de alta precisão e IT8 baixa precisão.

Tabela 4. Grau de tolerância padrão. Fonte: NBR 6158, modificada.

Dimensão nominal	Graus de tolerância-padrão
------------------	----------------------------

(mm)		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
Acima	Até e inclusive	Tolerância μm							
50	80	3	5	8	13	19	30	46	75

Como observado na tabela os desvios de circularidade estão compatíveis com qualidade IT1 e IT2, ou seja, indicam que os resultados são de alta precisão.

3.3. Microdureza

Para as discussões dos resultados de microdureza foi escolhido analisar os resultados obtidos pelos parâmetros mais severos de usinagem, neste caso com avanço de 0,75 mm/min. O material tem a dureza média de 58 ± 2 HRC, ou 633 ± 38 HV, porém foi adotado como curva de referência o valor mais profundo medido (360 μm), pois cada corpo de prova tem sua dureza devido ao tratamento térmico e à sua homogeneidade da matriz.

A Figura 6 apresenta os resultados de microdureza para o método convencional.

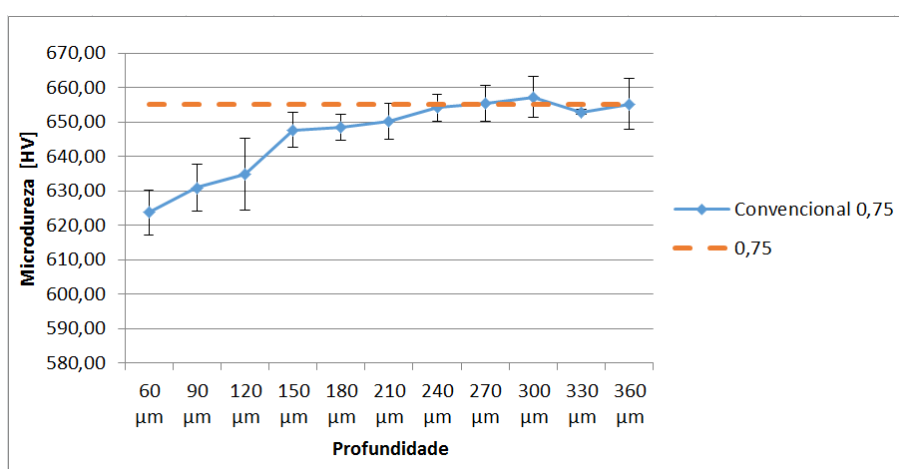


Figura 6. Valores de microdureza pela profundidade para o método convencional de lubrificação com avanço de 0,75 mm/min.

A diferença da dureza entre o ponto de menor profundidade medida (60 μm) e o ponto de maior profundidade medida é de 31,5 HV, ficando dentro da tolerância aceitável, indicada pela empresa que realizou o tratamento térmico.

A Figura 7 apresenta os resultados de microdureza para a técnica MQL.

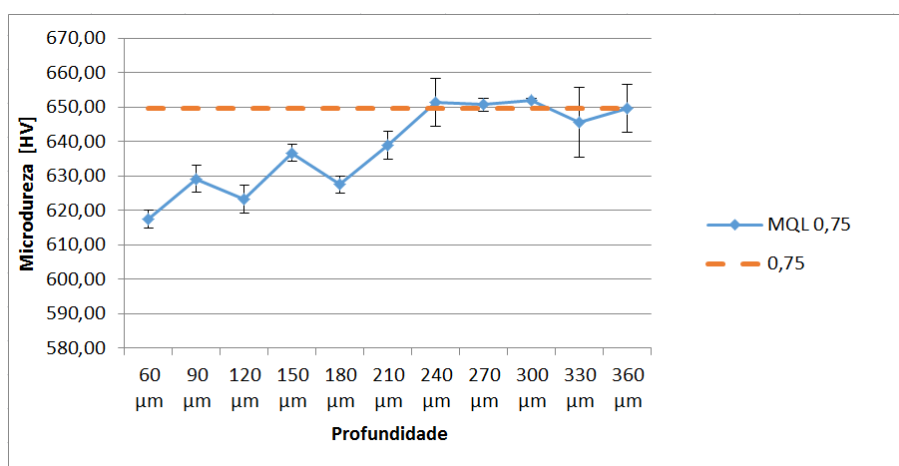


Figura 7. valores de microdureza pela profundidade para a técnica MQL de lubrificação com avanço de 0,75 mm/min.

A diferença da dureza entre o ponto de menor profundidade medida (60 μm) e o ponto de maior profundidade medida é de 32,1 HV, ficando dentro da tolerância aceitável, indicada pela empresa que realizou o tratamento térmico.

A Figura 8 apresenta os resultados de microdureza para a técnica MQL com ar frio.

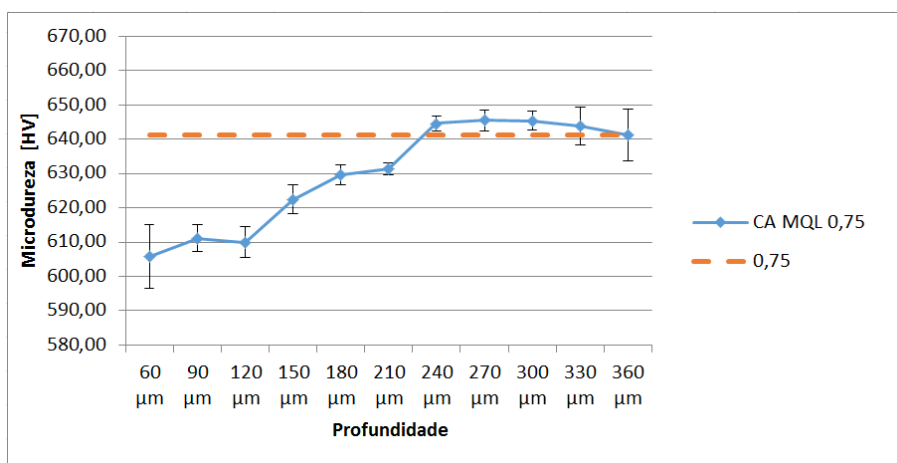


Figura 8. Valores de microdureza pela profundidade para a técnica MQL com ar frio de lubrificação com avanço de 0,75 mm/min.

A diferença da dureza entre o ponto de menor profundidade medida (60 μm) e o ponto de maior profundidade medida é de 35,4 HV, dentro da tolerância aceitável, indicada pela empresa que realizou o tratamento térmico.

Todos os gráficos para microdureza apresentaram a mesma tendência, quanto mais próximo da superfície usinada mais diminui a dureza e todas apresentaram a mesma tendência de aumentar gradativamente até estabilizar a aproximadamente 240 μm de profundidade.

Pela análise de dureza, em nenhuma das situações foi detectado dano que descartasse a peça, pois em todos os casos obteve-se valores mais baixos do que o nominal, ficando dentro da tolerância. Com base no que foi relatado por Malkin e Guo (2008), indicando assim a ocorrência um super revenimento, que diminui a dureza onde atingiu temperaturas acima das temperaturas atingidas no revenimento, não houve a ocorrência de queima branca para as profundidades medidas, afirmando que o material não atingiu a temperatura de transformação do material, pois não ocorreu austenitização, se houvesse ocorrido a dureza seria maior do que a dureza nominal.

Realizando a análise da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Figura 7 e Figura 8 pode-se afirmar que a técnica MQL com ar frio foi a mais afetada pelo fenômeno de super revenimento, como este efeito está diretamente ligado à temperatura na zona de corte, pode-se afirmar que houve maior geração de calor quando utilizou-se esta técnica. A técnica convencional apresentou menor perda de dureza e a técnica MQL à temperatura ambiente apresentou uma queda pouco maior comparada à convencional, isso para o avanço de 0,75 mm/min.

Não é possível afirmar que não houve nenhum dano térmico, como queima branca, entre a superfície usinada e a profundidade de 60 μm, pois não é possível realizar esta medição mais próxima da superfície devido a limitações do equipamento, a medição na superfície não é indicada devido à peça ser cilíndrica, sendo assim, a superfície é abaulada impossibilitando a medição em sua superfície. Para analisar entre a superfície usinada e a profundidade de 60 μm, foi realizada a metalografia das peças, vide tópico 3.4.

3.4. Análises metalográficas

As análises metalográficas são realizadas para observar se houve mudanças na microestrutura do material usinado. Para realizar a metalografia foram feitas as devidas preparações dos corpos de prova. As fotos das microestruturas são obtidas da seção transversal do corpo de prova, ou seja, partindo da superfície usinada para o centro do corpo de prova. Para verificação de mudanças microestruturais utilizou-se lentes que proporcionaram aumento de 500 vezes e de 1000 vezes, com esse aumento é possível analisar se há alguma mudança na microestrutura da peça. São analisadas as metalografias dos casos mais severos de usinagem, avanço de 0,75 mm/min, para cada método de lubrificação.

A Figura 9, Figura 10 e Figura 11 apresentam duas imagens metalográficas das peças retificadas, uma com aumento de 1000 vezes e a outra com aumento de 500 vezes, utilizando a técnica convencional, MQL e MQL com ar frio, respectivamente.

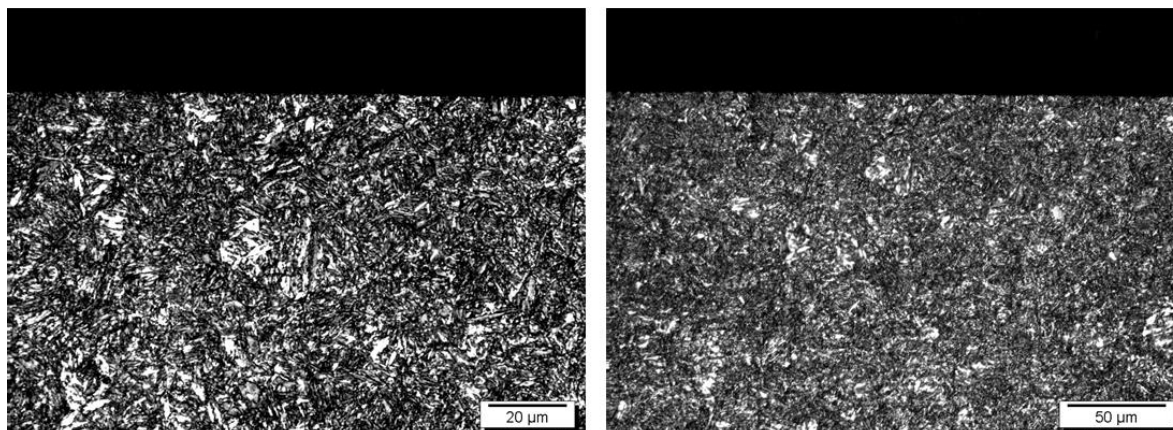


Figura 9. Metalografia para o método convencional de lubrificação com avanço de 0,75mm/min, a) ampliação de 1000X, b) ampliação de 500X.

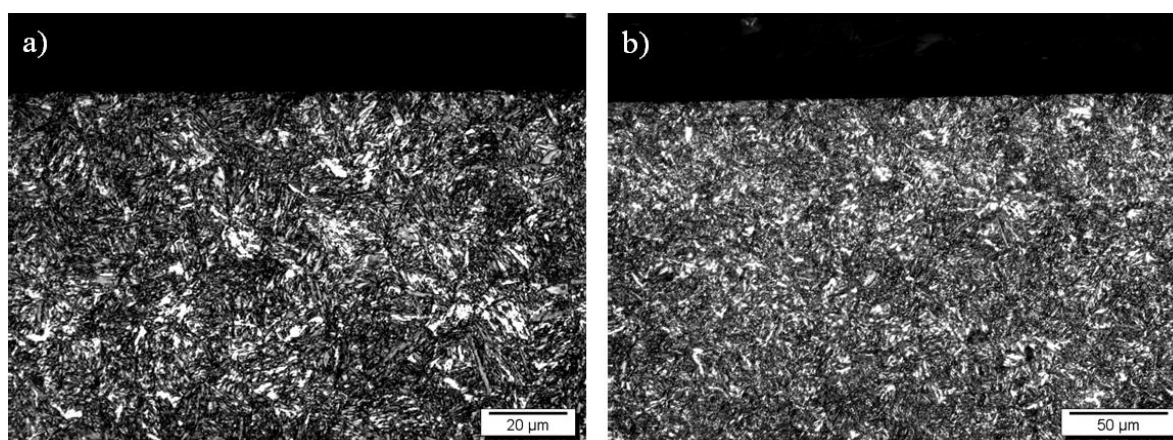


Figura 10. Metalografia para técnica MQL de lubrificação com avanço de 0,75mm/min, a) ampliação de 1000X, b) ampliação de 500X.

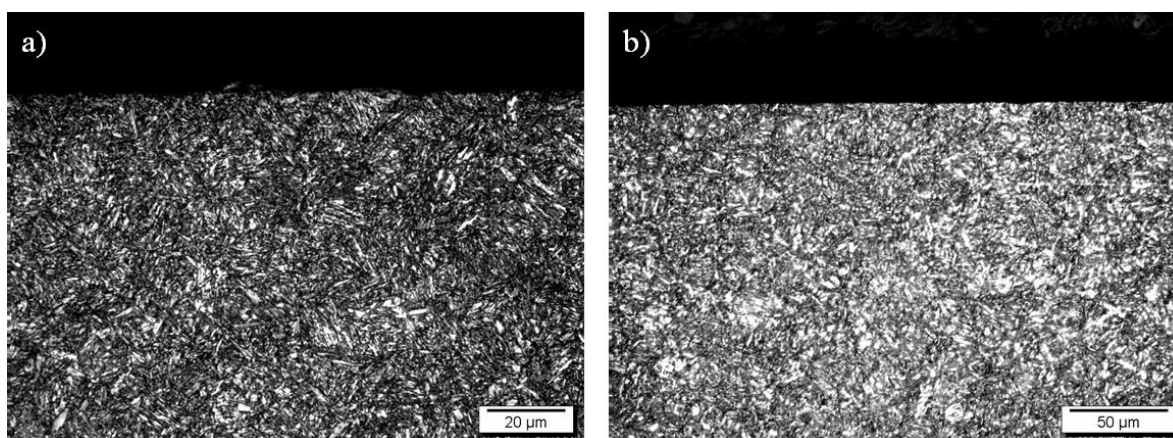


Figura 11. Metalografia para técnica MQL com ar frio de lubrificação com avanço de 0,75mm/min, a) ampliação de 1000X, b) ampliação de 500X.

Observando a Figura 9, a Figura 10 e a Figura 11 é possível verificar que em meio à homogeneidade do material há alguns pontos brancos, que são microestruturas de menor dureza dispersas em uma região escura caracterizada por carbonetos condensados nas regiões de contorno de grão, esses pontos são responsáveis pela leve diminuição da dureza próxima à superfície (Malkin e Guo, 2008). Além disso não foi detectado nenhum dano térmico que possa comprometer a peça retificada.

Comparando todas as metalografias é possível visualizar que a peça que apresentou maior número de pontos brancos é quando utilizado o método MQL com ar frio e o que apresentou maior homogeneidade foi a técnica convencional, comprovando que a maior retirada de calor implica na maior conservação microestrutural do material.

4. CONCLUSÕES

Pelos dados analisados é possível concluir que os dois métodos de lubrificação alternativos, MQL e MQL com ar frio são competitivos com o método convencional, sendo que o método MQL apresenta resultados mais satisfatórios do que o MQL com ar frio para essas condições de retificação (tipo de rebolo, fluido e parâmetros utilizado). A retificação utilizando a técnica MQL com ar frio apresentou os piores resultados, implicando em maior gasto energético (necessidade de secador de ar e compressor de ar na linha). A técnica MQL comparada à técnica convencional, reduz o impacto ambiental, os custos de sua utilização e o risco à saúde do operador e apresentou melhor desempenho para rugosidade e resultados muito próximos para desvio de circularidade e microdureza. Concluindo que é viável economicamente e ambientalmente a retificação utilizando a técnica MQL para os parâmetros utilizados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Saint-Gobain NORTON pela doação do rebolo, EMUGE FRANKEN pela doação do tubo de vórtice, ITW Chemical e QUIMATIC pelas doações de fluido de corte. Agradecemos também ao Laboratório de Usinagem pro Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP *campus* Bauru onde foi realizado os experimentos e aos laboratórios de Materiais da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP *campus* Bauru e de Anelasticidade e Biomateriais da Faculdade de Ciências (FC) – UNESP *campus* Bauru onde foram realizados as preparações das peças e medições dos resultados.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995, "NBR 6158: Sistemas de Tolerâncias e Ajustes".
- Belentani, R. D. M., Funes Júnior, H., Canarim, R. C., Diniz, A. E., Hassui, A., Aguiar, P. R., Bianchi, E. C., 2014, "Utilization Of Minimum Quantity Lubrication (Mql) With Water In Cbn Grinding Of Steel", *Materials Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 88–96.
- Dilger, S. Fluri, A. Sonntag, Hans-Günther., 2005, "Bacterial Contamination Of Preserved And Non-Preserved Metal Working Fluids", *International Journal Of Hygiene And Environmental Health*, Vol. 208, No. 6, pp. 467–476.
- Ebbrell, S., Woolley, N. H., Tridimas, Y. D., Allanson, D. R., & Rowe, W. B., 2000, "The effects of cutting fluid application methods on the grinding process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No.2, pp. 209–223.
- Heizel, C. and Bleil, N., 2007, "The Use of The Size Effect in Grinding for Work Hardening", *Annals Of The CIRP*, Vol. 56, No. 1, pp. 327–330.
- Machado, A. R.; Diniz, A. E., 2000, "Vantagens E Desvantagens Do Uso (Ou Não) De Fluidos De Corte", *Máquinas E Metais*, São Paulo, Vol. 37, No. 419, pp. 134–151.
- Malkin, S., Guo, C., 2008, "Grinding Technology: Theory And Applications Of Machining With Abrasives". 2ª Ed., Industrial Press Inc.
- Marinescu, I. D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W. B., Inasaki, I., 2007, "Handbook Of Machining With Grinding Wheels", CRC Press.
- Moerlein, A. W.; Marsh, E. R.; Deakyne T. R. S.; Vallance, R.R., 2009, "In-Process Force Measurement For Diameter Control In Precision Cylindrical Grinding", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 42, No.1-2, pp. 93–101.
- Oliveira, D. 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, No. 12, pp. 2559–2568.
- Pereira, O., Català, P., Rodríguez, A., Ostra, T., Vivancos, J., Rivero, A., & López-de-Lacalle, L. N., 2015, "The use of hybrid CO₂+ MQL in machining operations", *Procedia Engineering*, Vol. 132, pp. 492–499.
- Ruzzi, R. De S., Belentani, R. De M., De Mello, H. J., Canarim, R. C., D'addona, D. M., Diniz, A. E., De Aguiar, P. R., Bianchi, E. C., 2016, "Mql With Water In Cylindrical Plunge Grinding Of Hardened Steels Using Cbn Wheels, With And Without Wheel Cleaning By Compressed Air", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–10.
- Sanchez, J. A., Pombo, I., Alberdi, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S., Martinez-Toledano, J., 2010, "Machining Evaluation Of A Hybrid Mql-Co₂ Grinding Technology", *Journal Of Cleaner Production* Vol. 18, No. 18, pp. 1840–1849.
- Sandin, M. Mattsby-Baltzer, I., Edebo, L., 1991, "Control Of Microbial Growth In Water-Based Metal-Working Fluids. International Biodeterioration", Vol. 27, No. 1, Pp. 61–74.
- Shaw, M. C., 1996, "Energy Conversion in Cutting and Grinding", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 101–104.
- Sohal, N., Sandhu, C. S., Panda, B. K., 2014, "Analyzing the Effect of Grinding Parameters on MRR and Surface Roughness of EN24 and EN353 Steel", *Mechanica Confab*, Vol. 3, No. 5, pp. 1–6.

Teicher, U., Ghosh, A., Chattopadhyay, A. B., Künanz, K., 2006, "On the grindability of titanium alloy by brazed type monolayered superabrasive grinding wheels", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 6, pp. 620-622.

Xiao, K. Q., Zhang, L. C., 2006, "The effect of compressed cold air and vegetable oil on the subsurface residual stress of ground tool steel", Journal of materials processing technology, Vol. 178, No. 1, pp. 9-13.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.

APPLICATION OF COLD AIR WITH MQL TECHNIQUE IN GRINDING PROCESS OF AISI 4340 STEEL WITH ALUMINUM OXIDE WHEEL.

Ricardo Bega de Andrade, r-b-andrade@hotmail.com¹

Rodrigo de Souza Ruzzi, rodrigo.ruzzi@ufu.br²

Felipe Pereira Coelho, coelho621@hotmail.com¹

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

Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.edu.br³

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.edu.br¹

¹Department of Mechanical Engineering, FEB/UNESP, Av. Eng. Luíz E. C. Coube, 14-01, Bauru, SP, Brazil.

²School of Mechanical Engineering, UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlandia, MG, Brazil.

³Department of Electrical Engineering, FEB/UNESP, Av. Eng. Luíz E. C. Coube, 14-01, Bauru, SP, Brazil.

Abstract: Grinding is a machining process that seeks high dimensional accuracy and surface quality. However, there is high heat generation, thus cooling and lubrication are very important. Searching methods to reduce the aggression to the environment due to machining of metals, new techniques have been developed, among them is the MQL (minimum quantity of lubricant) technique, which consists in the reduction of lubrication to almost zero, spending values between 10 and 150 ml/h of lubricant. Its application is achieved by mixing the small quantity of lubricating fluid with compressed air applied directly into the cutting zone. The MQL technique presents much advantages, both with respect to the environment and with regard to the cost benefit of its application, but it presents too a deficiency in refrigeration, that can cause thermal damages to the workpiece, as for example, white layer formation making the material fragile. The present work searched for a way to reduce this deficiency with the use of cold air (at zero degree Celsius) in the MQL technique, using conventional aluminum oxide grinding wheel and ring-shaped workpieces made of AISI 4340 quenched and tempered steel. In order to compare the cooling-lubrication techniques, the surface finish (surface roughness (Ra) and roundness) and microstructural integrity (microhardness and metallographic analyzes) were evaluated. It was possible to observe that the cooling of the air, although improving the refrigeration, causes a worst lubrication thanks to the increase of the viscosity of the fluid, thus, the best performance was presented by conventional MQL technique.

Keywords: MQL with cold air, Oxide of aluminium wheel, ABNT 4340, MQL.