

APRIMORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO NA RETIFICAÇÃO DE AÇOS ENDURECIDOS

Danilo de Jesus Oliveira, daniloliv@gmail.com.br¹

Luiz Gustavo Guermandi, luiz_guermandi@hotmail.com²

Matheus Gonçalves Pereira, ra711756@feb.unesp.br²

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²

Anselmo Eduardo Diniz, anselmo@fem.unicamp.br³

Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br⁴

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Faculdade de Ciências de Bauru, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

²Universidade Estadual Paulista – UNESP- *Campus* de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

³Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Faculdade de Engenharia de Engenharia Mecânica. Cidade Universitária "Zeferino Vaz". Distrito de Barão Geraldo. 13081-970 - Campinas, SP, Brasil

⁴Universidade Estadual Paulista – UNESP- *Campus* de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

Resumo: *A retificação é o processo de usinagem amplamente empregado quando é necessária precisão dimensional e geométrica associada a um excelente acabamento superficial. Contudo, quando comparada a outros processos de usinagem, a retificação caracteriza-se pelas exigências de alta energia para remoção do material, o que provoca altas temperaturas na zona de corte. Caso estas temperaturas sejam muito elevadas, uma série de problemas pode surgir (danos térmicos, imprecisão geométrica, tensões residuais, alta rugosidade, trincas, entre outros.). Para minimizar tais efeitos, a temperatura é geralmente controlada com o uso de grandes quantidades de fluidos de corte, porém estes apresentam um elevado custo e seu uso traz sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Uma alternativa para redução de consumo de fluido de corte é a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL), porém a qualidade superficial de peças retificadas com MQL tem se mostrado inferior ao método convencional. Assim, o presente trabalho visa promover um aprimoramento no uso do MQL, através de um sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo. Para evidenciar tal aprimoramento foram retificadas peças de aço ABNT 4340, temperado e revenido, com o método convencional e MQL com sistema de limpeza. Analisaram-se parâmetros de integridade superficial (rugosidade e circularidade), desgaste diametral do rebolo e microestrutura. Em condições específicas de usinagem, os resultados obtidos com o MQL junto ao sistema de limpeza mostraram-se superiores aos obtidos por métodos convencionais. A análise dos resultados demonstra a possibilidade de substituição dos fluidos de corte por essa nova técnica, fato que permitirá às indústrias evitar gastos excessivos com manuseio e descarte de fluidos de corte, além de reduzir os impactos ao meio ambiente e à saúde humana.*

Palavras-chave: *retificação, MQL, otimização tecnológica*

1. INTRODUÇÃO

A retificação é caracterizada no âmbito da usinagem como o mais antigo processo. É requisitada no final do ciclo de produção de um produto onde se torna necessária qualidade superficial e tolerância dimensional precisa e por isso caracteriza-se como um processo caro. A retificação tem, atualmente, como grande objetivo, o seu uso na retirada de material, por meio de cavacos, de forma mais rápida e eficiente possível com poucos danos à superfície da peça que originará o produto final.

Para a retirada de material, é utilizado como ferramenta um rebolo com grãos abrasivos a alta velocidade de corte e a baixa profundidade de corte que acabam variando dependendo dos grãos da ferramenta. Com base nisso, um dos fatores limitantes no processo é o dano térmico. Em função da combinação das inúmeras arestas de corte e as altas velocidades, principalmente, é consumida grande quantidade de energia e essa energia é dissipada em forma de calor. Dessa forma, segundo Badger et al (2009), podem ocorrer queima na superfície da peça, modificações microestruturais com surgimento de tensão residual e fadiga. Também, se o material for muito sensível, a tensão residual e a expansão

térmica podem ocasionar trincas e distorções (Desa e Bahadur, 1999), comprometendo a integridade superficial do produto final.

Entretanto, esses problemas são amenizados com a aplicação de fluidos de corte que minimizam a geração de calor pela redução do atrito. Além da refrigeração e lubrificação, os fluidos retiram os cavacos da região de corte e desentopem os poros do rebolo. Porém existem sérios cuidados no manuseio de tais fluidos no processo de trabalho, pois estes podem causar danos à saúde humana e ao meio-ambiente. Por isso, torna-se conveniente a proteção individual dos trabalhadores e o correto descarte dos resíduos do processo de usinagem para que não agridam o ecossistema. Com isso agrega-se mais custo de produção.

Com base nisso, segundo Novaski e Dörr, (1999), a utilização de uma quantidade cada vez menor de fluido na região de corte tem representado grande importância no cotidiano, desde que não ocorra o comprometimento da usinagem. Dessa forma, Socovic e Mijanovic, (2001) dizem que para buscar alternativas e melhorias para os processos atuais de produção, é necessário substituir os métodos tradicionais para que se possam obter condições de fabricação associadas ao menor impacto ambiental e que estejam tecnológica e economicamente coerentes.

Assim, como a consciência ambiental é requerida, a fim de reduzir os impactos no ambiente de trabalho e no meio ambiente global, associada às reduções de custos relacionados com fluidos de corte, surgiram alternativas de lubri-refrigeração, entre elas a *mínima quantidade de lubrificante (MQL)*, já que a retificação a seco não é muito conveniente em função da geração excessiva de calor (Dudzinski et al 2004 *apud* Weinert et al 2004).

Essa técnica usa uma mistura de ar comprimido (refrigerante) e óleo (lubrificante), o que reduz o fluxo de fluido, que é misturado ao ar e expelido a alta pressão. Assim, diminuem-se bastante os resíduos finais. No entanto, essa alternativa tem mostrado, de modo geral, dificuldades em obter bons parâmetros de rugosidade superficial e desgaste do rebolo mesmo havendo a constatação, em certos casos, da diminuição da força tangencial de corte e energia específica que decorre da boa lubrificação.

Tal dificuldade associada ao uso da mínima quantidade de lubrificante está alicerçada no trabalho de Sahn e Schneider, (1996), pois quando são usadas ferramentas abrasivas com uma redução no uso de fluidos de corte, fica dificultada a limpeza dos cavacos na zona de corte e conseqüentemente ocorre um aumento no entupimento dos poros do rebolo, comprometendo a qualidade final da peça. Como o MQL usa baixo fluxo de fluido, não é conseguida uma limpeza eficiente usando essa técnica, pois, ao invés de os cavacos serem expelidos, eles se misturam ao fluido do MQL e originam uma pasta de óleo com cavacos que aderem à superfície de corte da ferramenta, entupindo seus poros.

Para suprir essa necessidade da limpeza, adiciona-se um sistema de ar comprimido para limpar a ferramenta durante o processo de retificação juntamente com o uso do MQL. O intuito de usar a limpeza do rebolo é, pois, aumentar a eficiência técnica da mínima quantidade de lubrificante já que esta é uma alternativa ecologicamente adequada em relação aos fluidos de corte.

A solução a esse problema, como proposta desse trabalho, foi, portanto, a utilização de jatos de ar comprimido para a limpeza da ferramenta de corte, com a eliminação da pasta de óleo mais cavacos, pois assim, é conseguido um aumento na profundidade de corte decorrente da diminuição do desgaste da ferramenta e, além do mais, é possível obter maior qualidade de forma geométrica e superficial, ou seja, melhores valores de rugosidade, como mostra Lee et al (2002).

1.1. Os Fluidos de Corte na Retificação

Os fluidos de corte podem ser entendidos como qualquer espécie de fluido introduzida no mecanismo de usinagem para o corte de material e, dessa forma, acaba sendo parte integrante dos processos de produção na indústria metal-mecânica (Runge e Duarte, 1990).

Segundo Pawlak et al (2004), os fluidos de corte foram aplicados na usinagem dos materiais com o propósito de reduzir, através da lubrificação, as características dos processos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta e também reduzir o calor na região de corte através da refrigeração e lubrificação. Dessa forma, o uso de fluidos de corte implica na possibilidade de uma velocidade de corte mais econômica e geralmente promove a eficiência do sistema de produção (Sokovic e Mijanovic, 2001).

Além disso, tais fluidos proporcionam, durante a operação da retificação, a supressão dos cavacos gerados na zona de corte para assim evitar o entupimento dos poros do rebolo. Com isso consegue-se, também, diminuição no atrito gerado e no consumo de energia (Attanasio et al 2006).

Outra função descrita por Stanford et al (2007) é com relação à diminuição das forças de corte por meio da lubrificação, conseqüentemente pela redução do atrito também. Adicionalmente e segundo esse mesmo autor, os fluidos de corte promovem propriedades anticorrosivas à peça e à máquina-ferramenta.

Com base em todas essas características e segundo Brinkmeier et al (1999), os fluidos de corte proporcionam estabilidade ao processo através da combinação das propriedades de lubrificação e refrigeração. Assim, é conseguido um alto nível de retificação, ou seja, produzindo superfícies com grandes qualidades de acabamento e tolerâncias dimensionais e, além do mais, proporcionando maior vida útil para a ferramenta e maior tempo de uso entre cada dressagem.

Apesar das vantagens tecnológicas que os fluidos de corte promovem, ultimamente vêm sendo questionados os efeitos negativos que eles causam (Dhar et al 2007). Entre esses efeitos, os que estão preocupando as entidades pesquisadoras junto às ambientais e até mesmo as indústrias são os causados ao ecossistema destacando o ser humano e o meio ambiente.

Segundo Pleifer et al (1994), os fluidos de corte são formados por substâncias tóxicas que têm a função de garantir maior vida útil de operação aos mesmos. Entre elas estão dispersantes, anticorrosivos, biocidas e clorantes. Conforme Anon, (2003), essas substâncias causam danos à saúde humana. As pessoas podem entrar em contato com tais substâncias por meio do contato pela pele, pela inalação da névoa de fluidos ou por engolir pequenas partículas. Em função disso, podem ocorrer problemas como irritação da pele, alergias e distúrbios respiratórios e digestivos. Tais distúrbios são devidos aos metais pesados existente na composição. Segundo Howes et al (1991), os principais problemas registrados são respiratórios e dermatológicos.

No trabalho de Socovic e Mijanovic, (2001), é relatado que os fluidos de corte podem sofrer contaminação durante o processo produtivo por meio de outros corpos, fluido ou microorganismos, degradando suas propriedades anticorrosivas e de lubrificação. Para enfatizar nesse aspecto, Sluhan, (1994) relata que muitos desses fluidos de corte tornam-se propícios ao crescimento de bactérias e fungos e, com isso, ficam mais tóxicos ao ser humano e ao meio ambiente.

Já com relação ao aspecto econômico, os fluidos de corte geram gastos em função da efetuação de limpeza, manutenção e descarte (Bartz, 1998). Brinksmeier et al (1994) relatam que todo fluido deve ser trocado após determinado tempo de uso para assim garantir um nível de produção consistente e isso deve ser feito da maneira mais ecológica possível. O meio ambiente, pois, pode ser afetado por efluentes líquidos, sólidos e gasosos que danificam o ar, água e solo.

Ainda segundo Ebrell et al (2000), apesar de os fluidos de corte trazerem muitos benefícios ao processo produtivo, às vezes são utilizados, tecnologicamente, de forma errônea com um índice muito alto de desperdício. Para que a lubrificação e refrigeração sejam eficientes, é importante que o fluido entre efetivamente na região de corte entre a peça e a ferramenta, reduzindo assim os gastos excessivos e os problemas que implicam em ofender o bem estar humano e ambiental.

1.2. A Mínima Quantidade de Lubrificação

Obikawa et al (2006) relata que a mínima quantidade de lubrificante (MQL) é definida como uma pequena quantidade de óleo misturada com ar comprimido e direcionada diretamente na região de corte, evitando as inundações de óleo observadas na refrigeração convencional.

No MQL, o aerossol pode ser entendido como inúmeras gotículas de óleo dispersas em um jato de ar, onde essas gotículas são carregadas pelo ar diretamente na zona de retificação, proporcionando eficiente lubrificação. Já os fluidos de corte convencionais, devido ao uso de aditivos, não conseguem entrar diretamente na zona de corte, sendo o MQL é mais eficiente, nesse aspecto.

Algumas vantagens são: cavaco, peça e ferramenta apresentam menor resíduo de fluido, sendo a limpeza dos mesmos mais fácil e econômica. Além do mais, durante a usinagem, como a peça não é totalmente coberta com fluido, é fácil de ser observada. Assim, uma redução significativa nos gastos pode ser obtida através da diminuição no uso de fluidos no processo de usinagem. Na mínima quantidade de lubrificante é usado baixo volume de fluido, ou seja, ao invés da ordem de litros são usados milésimos de litro, aproximadamente de $2,0 \cdot 10^{-9}$ a $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ a uma pressão de $4,0 \cdot 10^4$ a $6,0 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ como afirma Attanasio et al (2006).

De acordo com o trabalho de Hafenbraedel e Malkin, (2001), apesar de o MQL promover lubrificação eficiente, redução da energia de retificação e da energia específica para um nível de comparação com os fluidos de corte (óleos solúveis) em situações não muito severas de usinagem, os valores de rugosidade alcançados não são relativamente bons. Além disso, um grande desafio da técnica da mínima quantidade de lubrificação está na refrigeração, sendo problemática sua aplicação em situações onde se necessita de alta refrigeração, como a retificação, segundo Brinksmeier, (1996).

1.3. Fenômeno do Entupimento do Rebolo

Wang et al (2000) afirma que, quando a energia no contato rebolo/peça gera um aumento na temperatura, isso implica em uma maior tendência de aderência de partículas metálicas nos poros da ferramenta abrasiva. Com isso, irá ocorrer uma elevação ainda maior de temperatura, causando danos térmicos como a queima superficial da peça e além de piorar o acabamento e aumentar o desgaste do rebolo. Portanto, quanto menor a energia específica associada ao processo, menor a chance de danos ao trabalho, conforme Salmon, (1992).

Cameron e Warkentin, (2009) *apud* Ge et al (2003) explicam a fenomenologia do entupimento do rebolo da seguinte forma: quando o cavaco gerado no processo de retificação não é totalmente removido da zona de corte por meio do fluido refrigerante, esses cavacos alojam-se nos poros do rebolo, não deixando os fluidos entrarem perfeitamente na zona de corte e, dessa forma, dificultando a ação do efeito lubrificante, além de dificultar ainda mais a limpeza. Esses cavacos alojados na superfície de corte do rebolo afetam a eficiência e qualidade da operação de retificação, pois a única operação de corte será a deformação elástica e plástica. Quando isso ocorrer, a energia inicial do processo irá subir e o calor na zona de corte também.

Sinot et al (2006) relata que certas ligas são caracterizadas de difícil usinabilidade, pois entopem os poros do rebolo facilmente quando partículas metálicas são comprimidas e aderidas nos espaços entre os grãos. Com altas taxas de remoção, o fenômeno é mais acentuado e alguns rebolos estão sujeitos a entupir mais e outros menos.

Esse mesmo autor ainda descreve, em seu trabalho, duas maneiras de evitar o entupimento: usar um rebolo com uma estrutura aberta, mas isso pode aumentar a probabilidade da fratura do ligante; ou redressá-lo, o que aumenta o custo do processo. Um método alternativo aos anteriores é usar a limpeza com o próprio fluido de corte.

A Fig. (1) apresenta uma análise em microscópio da superfície de corte de um rebolo entupido com cavacos (aumento de 100X).

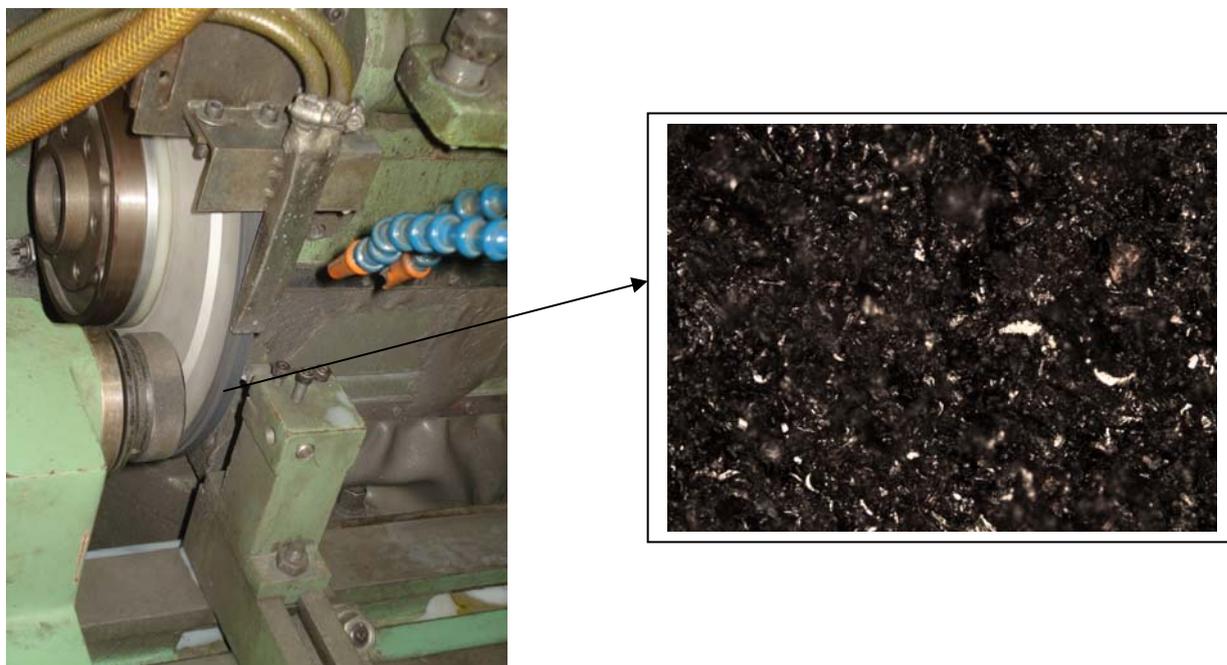


Figura 1. Cavacos aderidos à superfície de corte do rebolo.

1.4. Perspectivas do Jato de Ar Comprimido para a Limpeza

Conforme o trabalho realizado por Lee et al (2002) na retificação de canais em peças, o jato de ar comprimido é uma alternativa para impedir o fenômeno do entupimento, pois o ar incide no rebolo e retira todas as impurezas que aderiram à ferramenta, segundo a Fig. (2). Além disso, segundo Li e Seah, (2003), no trabalho com torneamento, o ar comprimido promove certo efeito lubrificante que não deixa as impurezas direcionarem-se e aderirem à ferramenta. Dessa forma, quanto menor a pressão do ar, menor será seu efeito de limpeza.

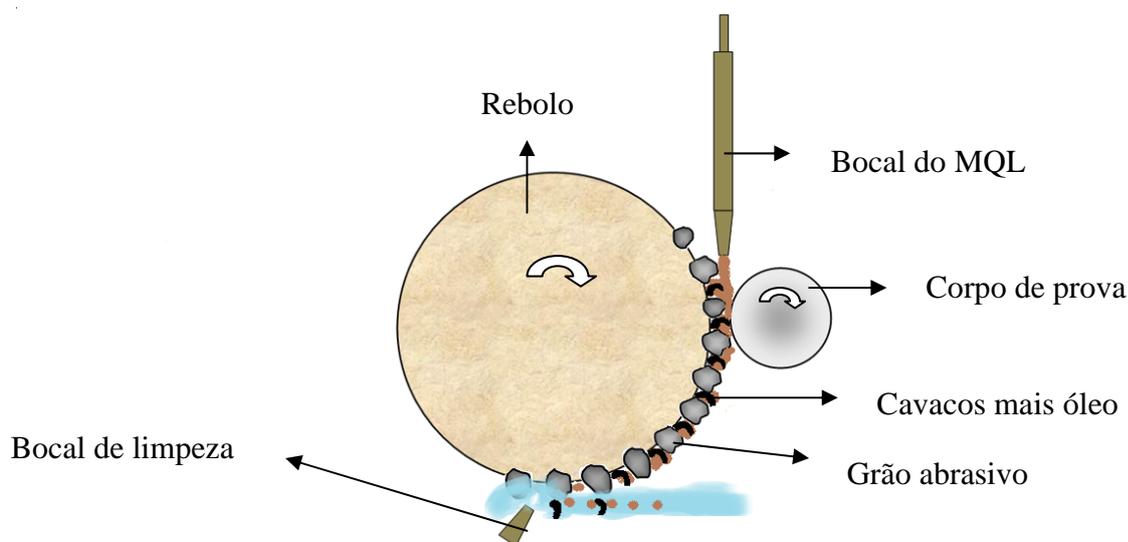


Figura 2. Ação do jato de ar comprimido na limpeza do rebolo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O banco de ensaios consiste de uma retificadora cilíndrica SULMECÂNICA, modelo RUAP 515H, equipada por um comando numérico.

O rebolo utilizado foi de CBN com ligante vitrificado e dimensões $3,5 \cdot 10^{-1}$ m de diâmetro externo, $1,3 \cdot 10^{-1}$ m de diâmetro interno, $2,0 \cdot 10^{-2}$ m de largura e $5,0 \cdot 10^{-3}$ m de espessura de material abrasivo, cujo código é SNB151Q12VR2, da empresa Nikkon Ferramentas de Corte LTDA.

O corpo de prova em aço ABNT 4340, temperado e revenido (54 HRC de dureza média), era em forma de anel com diâmetro externo de $5,4 \cdot 10^{-2}$ m, diâmetro interno de $3,0 \cdot 10^{-2}$ m e espessura de $4,0 \cdot 10^{-3}$ m.

O fluido de corte utilizado no método convencional de refrigeração foi óleo solúvel semi-sintético QUIMATIC ME-I, com concentração de 2,5%, sendo este aplicado a uma vazão de $2,83 \cdot 10^{-4}$ m³/s. Neste fluido de corte já há, na sua composição, anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocíativos não iônicos, alcanolomidas, entre outros.

O equipamento de MQL é composto por: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar e bocal. Nesse experimento, a vazão do ar possuía uma pressão de $6,0 \cdot 10^5$ N/m² e a vazão do fluido de corte $2,7 \cdot 10^{-8}$ m³/s. O aplicador utilizado nesta pesquisa foi o ITW Accu-lube 79053D de micro-lubrificação, fornecido pela empresa ITW Chemical Products Ltda. Esse equipamento usa um sistema pulsante de fornecimento do óleo e permite a regulagem da vazão de ar comprimido e lubrificante de maneiras separadas. A vazão de ar comprimido era monitorada com auxílio de um medidor de vazão do tipo turbina modelo SVTG12/12BA4A44BS fornecido pela empresa CONTECH e calibrado a uma pressão de $8,0 \cdot 10^5$ N/m².

O equipamento para a limpeza é composto por: compressor, medidor de vazão e pressão de ar comprimido, distribuidor de fluxo e bocais. A vazão do ar foi $8,0 \cdot 10^{-3}$ m³/s e a pressão para cada bocal foi $7,0 \cdot 10^5$ N/m². O aparelho utilizado na medição da vazão do ar comprimido era um aparelho Siemens SITRANS - P, fornecido pela empresa Digitrol.

A potência de retificação foi obtida através da determinação da energia elétrica consumida pelo motor do cabeçote da retificadora, usando um módulo eletrônico e uma placa de aquisição de dados junto a um programa de aquisição de dados, o software LabView, da National Instruments®.

Para cada ensaio foram utilizados 3 corpos de prova. Foram usadas duas velocidades de avanço distintas. Para cada velocidade foram feitos ensaios com diferentes técnicas de lubri-refrigeração: a refrigeração convencional (fluido em abundância) e MQL mais a limpeza com a variação do ângulo de incidência do jato de limpeza na superfície de corte do rebolo. Assim, foram definidos quatro ângulos de incidência, ou seja, perpendicular, tangencial, 30 graus e 60 graus em relação ao perpendicular, como na Fig. (3), com referência ao trabalho de Cameron e Warkentin, (2009). Estes autores estudaram a limpeza com fluido de corte para esses ângulos de incidência do fluido na superfície de corte do rebolo. Já o bocal de limpeza foi fixado na posição mais próxima possível da interface peça-rebolo, sendo que a distância do bocal à superfície de corte do rebolo foi 10^{-3} m.

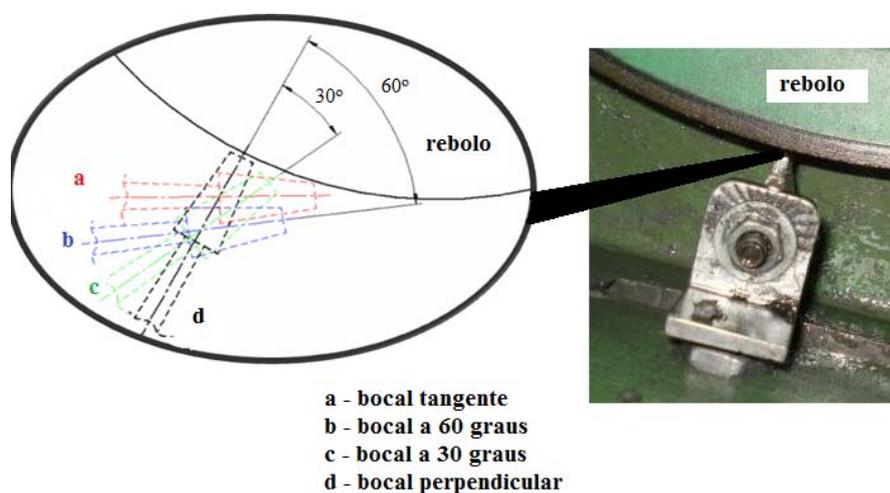


Figura 3. Ângulos de incidência do jato de ar comprimido na superfície de corte do rebolo.

A rugosidade foi obtida medindo o parâmetro R_a por meio de um rugosímetro da Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+. Os valores de rugosidade apresentados são médias de 5 medições de rugosidade em posições diferentes, com os desvios-padrões, para cada um dos 3 ensaios realizados para cada condição de lubri-refrigeração. A medição foi feita em cada uma das três peças de cada ensaio.

A medição do desgaste do rebolo foi feita usando um corpo de prova cilíndrico de aço ABNT 1020 para impressão do rebolo. Essa medição foi possível devido a não utilização da largura total do rebolo, onde a largura do rebolo utilizável era de $1,5 \cdot 10^{-2}$ mm e a largura da peça $4,0 \cdot 10^{-3}$ mm. Desta forma o ressalto produzido no rebolo após o ensaio possibilitou a marcação do desgaste no corpo de prova cilíndrico. A obtenção do desgaste diametral foi feita por meio de um programa, do rugosímetro Surtronic 3+, de projeção e medição de perfil. Foram feitas cinco medições em cada peça de cada ensaio.

Já as medições de circularidade foram obtidas para todos os ensaios, sendo feitas 5 medições em posições diferentes dos corpos de prova retificados. A medição do desvio de circularidade foi realizada em uma máquina específica para controle de tolerâncias geométricas Tayrond 31c marca Taylor Hobson.

Para os ensaios foram determinadas as seguintes condições de usinagem: velocidades de mergulho (v_f) 0,5 mm/min velocidade de corte (v_c) de 30 m/s, com base nas especificações do fabricante do rebolo, rotação da peça (ω_w) de 204 rpm, penetração do rebolo na peça (a) de 10^{-4} m, tempo de centelhamento (t_s) igual a 8 segundos, largura de retificação de $4,0 \cdot 10^{-3}$ m, profundidade de dressagem (a_d) de $2,0 \cdot 10^{-5}$ m, onde a condição de dressagem foi mantida constante, usando um dressador multigranular, tipo fliese.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico pretende apresentar os resultados de rugosidade, desgaste diametral do rebolo e circularidade para cada técnica de lubri-refrigeração utilizada. Para análise das variáveis analisadas, construíram-se figuras de barra e calcularam-se os respectivos desvios padrões, os quais foram inseridos juntamente com os valores médios reais das três repetições executadas.

3.1. Rugosidade

A Fig. (4) apresenta um gráfico com os resultados obtidos para a rugosidade média R_a , referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração convencional e as condições utilizando a técnica do MQL. Os valores de rugosidade apresentados são médias de 5 medições de rugosidade em posições diferentes nos corpos de prova, para cada um dos 3 ensaios realizados para cada condição de lubri-refrigeração.

Por meio de uma análise geral dos resultados de rugosidade, a maioria dos valores está abaixo de $1,6 \mu\text{m}$, valor máximo para uma peça retificada (Diniz et al 2001).

Assim, analisando-se estes resultados, verifica-se que todas as condições de limpeza foram satisfatórias, pois os valores obtidos de rugosidade média ficaram abaixo do obtido até mesmo com a condição convencional e muito abaixo daquele obtido com o MQL sem limpeza. Além disso, a condição de limpeza com a incidência perpendicular do jato de ar comprimido se igualou ao convencional, praticamente.

De uma forma geral, a condição MQL com limpeza para um ângulo de 30 graus foi a melhor condição, pois apresentou a menor rugosidade, muito abaixo do valor obtido com a condição convencional.

Com relação à eficiência do sistema de limpeza por meio do ar comprimido, essa é uma função da velocidade periférica do rebolo e de incidência do ar, já que a pressão e vazão do sistema foram mantidas constantes. Isso ocorre, pois o fenômeno da limpeza se dá pela soma vetorial dessas componentes de velocidades, a periférica do rebolo e a do ar comprimido, sendo esta última depende do ângulo de incidência. Assim, quanto mais eficiente essa combinação de velocidades, será gerada uma resultante que transferirá uma maior quantidade de movimento à “borra”, promovendo sua maior eliminação. Assim, de forma geral, o MQL com limpeza para uma inclinação de 30 graus foi a melhor combinação de velocidades.

Ainda pela análise da Fig. (4), apesar de a condição convencional ter um maior fluxo de fluido e eliminar os cavacos da zona de corte mais eficientemente (Attanasio et al 2006), em comparação ao MQL sem limpeza, a utilização da limpeza fez com que a rugosidade se tornasse próxima ou menor à rugosidade obtida com a técnica convencional. Com isso, pode-se afirmar que mesmo na convencional, os cavacos ainda acabam se alojando nos poros do rebolo, o que é natural do processo de retificação (Webster, 2008), mas na limpeza esta proporção de cavacos nos poros ficou ainda menor, pois o ar do sistema de limpeza age diretamente, como único e exclusivamente na eliminação da pasta de óleo mais cavacos aderido nos poros na superfície de corte do rebolo, que evitam de riscar a superfície da peça sendo usinada, melhorando, assim, sua rugosidade.

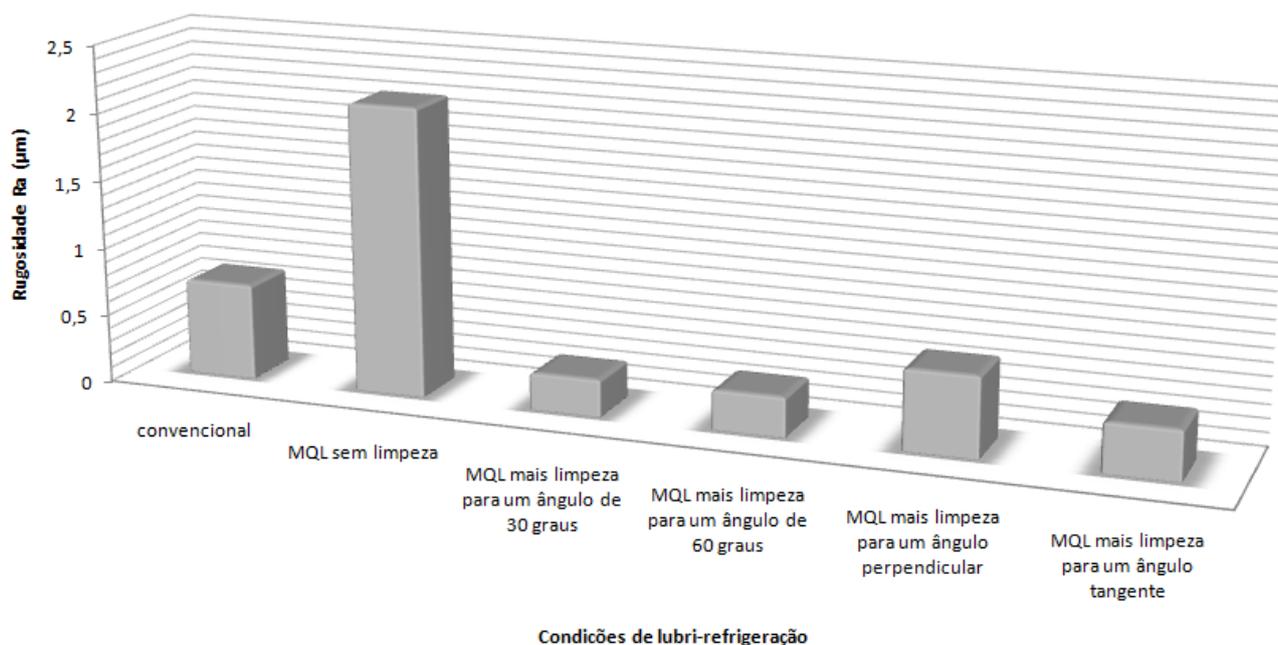


Figura 4. Resultados de rugosidade em função das diferentes formas de lubri-refrigeração.

3.2. Desgaste Diametral do Rebolo

A Fig. (5) mostra os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo. Nesta são comparadas as diversas condições de lubri-refrigeração também, ou seja, a convencional e o MQL mais a limpeza com os respectivos ângulos de inclinação do bocal de limpeza. Assim, a condição de referência também será a refrigeração convencional, com a qual os outros resultados são comparados.

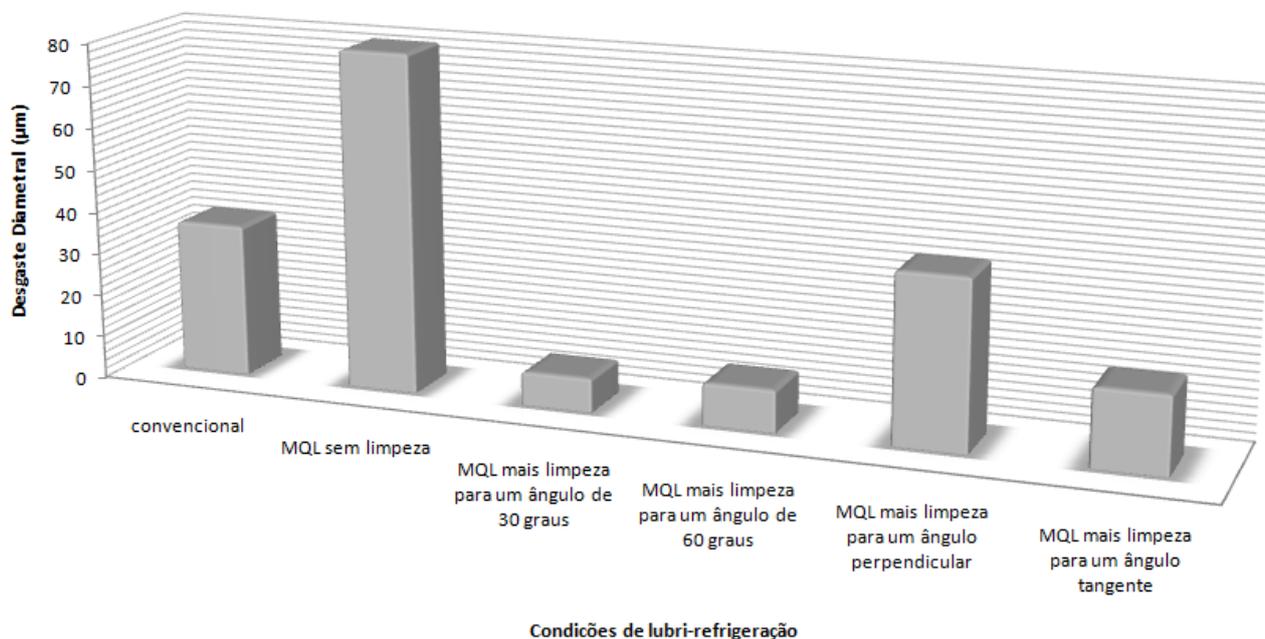


Figura 4. Resultados de desgaste diametral em função das diferentes formas de lubri-refrigeração.

Para o caso do desgaste diametral do rebolo, observa-se que este está também em função da velocidade periférica da ferramenta abrasiva e velocidade do ar comprimido, assim como a rugosidade.

Pela análise desses resultados, o menor desgaste foi para a condição MQL com limpeza para um ângulo de 30 graus, seguida da condição a 60 graus. Entretanto, a condição tangente também ficou abaixo do valor obtido com a condição convencional. De uma forma geral, o melhor resultado, assim como para a rugosidade foi para a condição MQL com limpeza para um ângulo de 30 graus. Já para a limpeza com o ângulo de incidência perpendicular, obteve-se um resultado ligeiramente maior que o obtido pelo convencional.

Nota-se, além do mais, uma coerência entre o desgaste diametral e a rugosidade, ou seja, quando a rugosidade fica maior o desgaste também é maior e quando esta se torna menor, o desgaste também diminui (Marinescu et al 2004).

Relacionando a condição mais eficiente de limpeza com a convencional, o desgaste diametral foi reduzido em grande escala, pois neste caso, assim como na rugosidade, têm-se as melhores somas vetoriais de velocidades do ar e periférica do rebolo, o que resultará na melhor expulsão da borra de óleo da superfície de corte do rebolo, influenciando, assim, em menor esforço nos grãos abrasivos, já que os poros estão mais limpos e, com isso, não há desgaste por desprendimento do grão. Portanto, tratando-se dos ensaios convencional e limpeza, o desgaste se caracterizou pela fratura do grão, ou seja, microdesgaste. Já no caso do MQL, o desgaste foi por desprendimento do grão ou macrodesgaste, o que resulta em um desgaste acentuado do rebolo.

3.3. Circularidade

A Fig. (6) apresenta os resultados de circularidade.

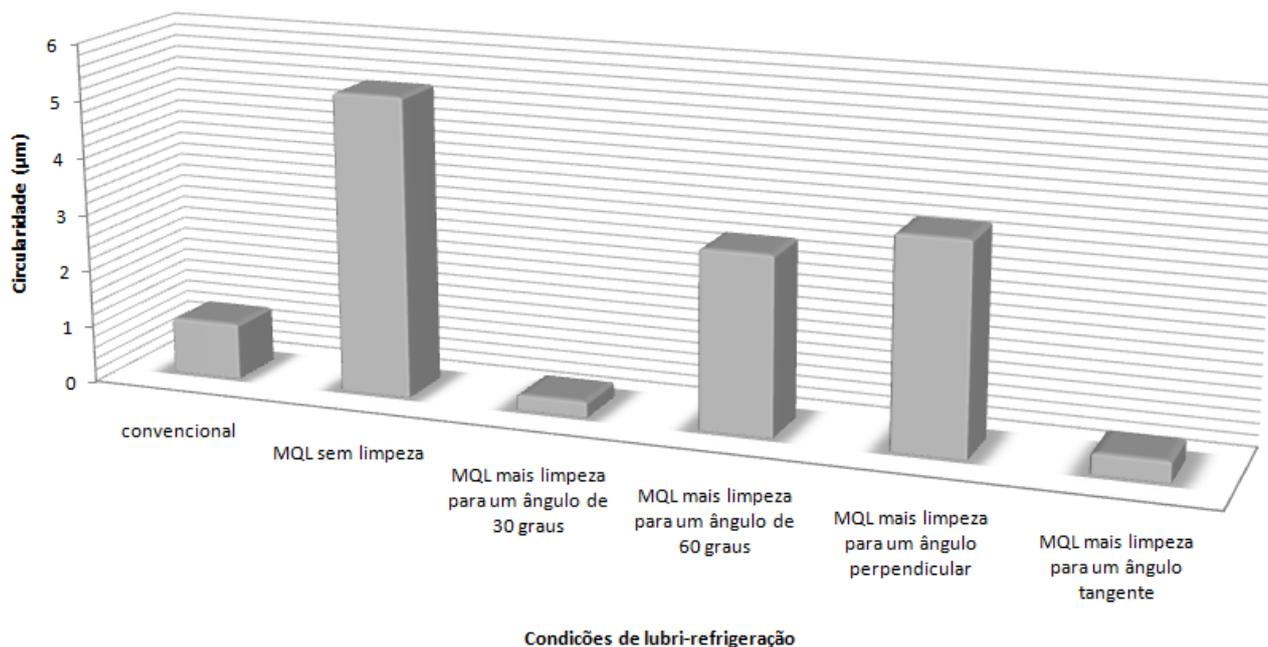


Figura 5. Resultados de circularidade em função das diferentes formas de lubri-refrigeração.

Pode-se verificar que as melhores condições obtidas foram o MQL mais limpeza para um ângulo de 30 graus e tangente. De modo geral, a melhor condição foi para o ângulo de 30 graus.

A influência das velocidades de incidência do ar comprimido e periférica do rebolo também se verifica na medida de circularidade, onde quanto melhor essa combinação vetorial, melhor a retirada dos cavacos aderidos aos poros do rebolo e melhor a qualidade dimensional obtida.

Nota-se, uma incoerência entre o resultado de rugosidade, para a condição de limpeza com um ângulo de 60 graus, e o resultado de circularidade. Isso ocorreu, pois a circularidade é uma grandeza mais sensível à rigidez do processo, ou seja, máquina, ferramenta, peça, entre outros.

No entanto, de forma geral, para as condições mais eficientes de rugosidade e desgaste diametral, têm-se as mesmas para a circularidade, pois na condição de limpeza a 30 graus, a proporção de cavacos aderidos aos poros do rebolo foi bem menor e com isso, houve menos partículas riscando indesejadamente a peça, atraindo ao mesmo tempo com a mesma o que diminuiu a geração de calor concentrada, evitando o aumento de sua rugosidade, erros de circularidade e desgaste diametral do rebolo.

3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microdureza

A integridade superficial de uma peça é de extrema importância. Danos causados à superfície de um material podem afetá-lo significativamente, causando alterações na resistência ao desgaste, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça. A integridade superficial de uma peça é afetada principalmente pela temperatura oriunda do processo de retificação, podendo causar danos térmicos na peça (Alves, 2005)

Assim, o MEV é uma poderosa técnica de avaliação microestrutural, possibilitando análises do estado de superfícies e noção de profundidade. A seguir serão mostradas as imagens de MEV dos ensaios onde as condições de lubri-refrigeração foram o convencional, MQL sem limpeza e MQL com limpeza para um ângulo de 30 graus (melhor condição de limpeza) e também o MEV para um corpo de prova não retificado.

Corpo de prova não retificado

A Fig. (6) apresenta a microscopia de um corpo de prova não retificado, mas apenas torneado, temperado e depois revenido.

Pode-se observar o não aparecimento de trincas. Também não há áreas onde tenham ocorrido fases diferentes (revenimento ou queima). Esta microscopia caracteriza uma referência para a superfície da peça após ocorrer a retificação, evitando aparecimentos destes danos.

Além do mais, essa microscopia não apresenta alterações subsuperficiais. A quantidade de calor e de deformação plástica que foi para a peça durante a o torneamento, têmpera e revenimento não foram suficientes para produzir alterações significativas na microestrutura do material. Esse corpo de prova apresenta microdureza 711,79 knoop.

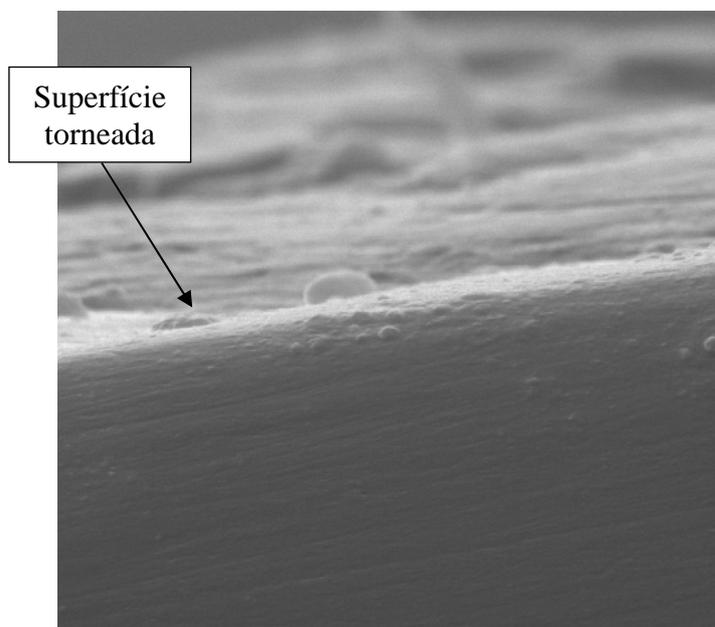


Figura 6. Microscopia de um corpo de prova não retificado (ampliação de 2000 vezes).

Ensaaios com o método de lubri-frigeração convencional

A Fig. (7) mostra os resultados de microscopia dos ensaios com a o método de lubri-refrigeração convencional.

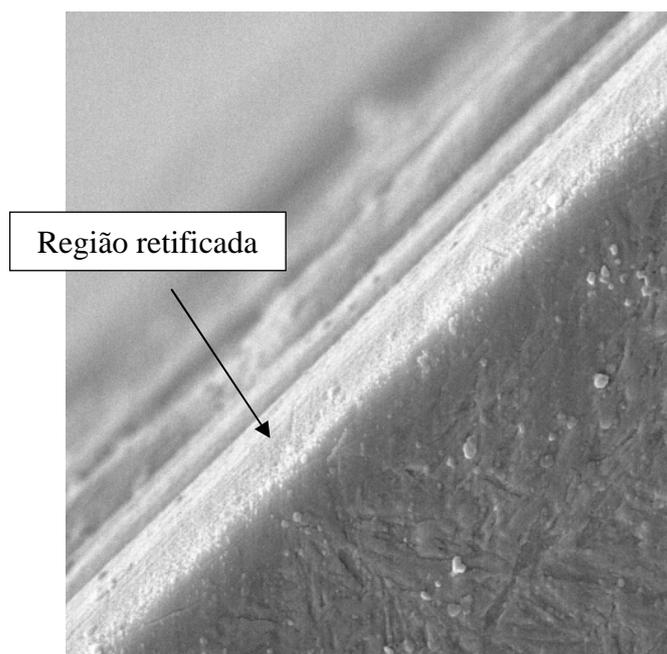


Figura 7. Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração convencional (ampliação de 2000 vezes).

Pela análise dessa figura, nota-se que não houve a queima superficial (revenimento) na retificação do corpo de prova. O resultado do ensaio de microdureza para a condição convencional foi **693,1** knoop, relativamente próximo ao resultado de microdureza para o corpo de prova sem retificação (711,79 Knoop). Isso ainda evidencia que não houve a queima superficial e com isso, a integridade superficial do corpo de prova foi mantida.

Ensaio com o método de lubri-refrigeração MQL sem limpeza

A Fig. (8) mostra os resultados de microscopia dos ensaios com a o método de lubri-refrigeração MQL sem limpeza.

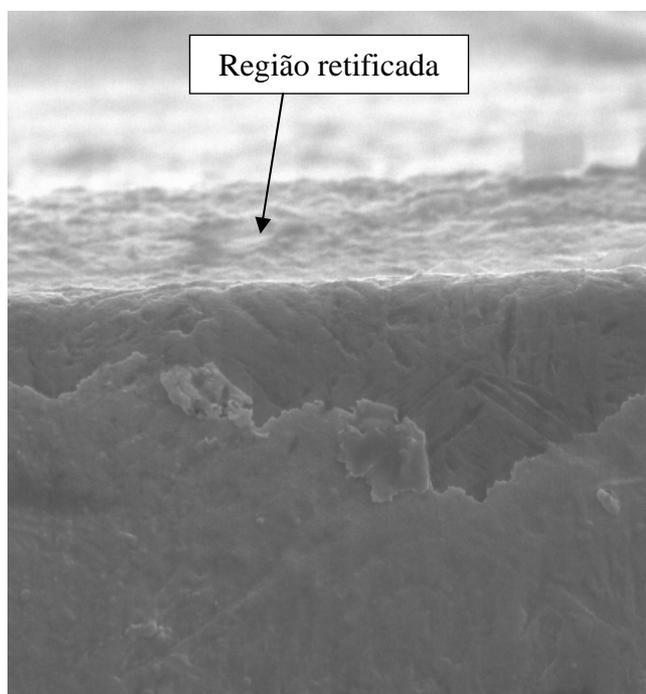


Figura 8. Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração MQL sem limpeza (ampliação de 2000 vezes).

Pela análise dessa figura, nota-se que não é nítida, na imagem de MEV, a queima superficial na retificação do corpo de prova. O resultado do ensaio de microdureza para a condição MQL sem limpeza foi **662,82** knoop. Apesar de não ser nítida a queima superficial ou revenimento, essa microdureza é menor que a obtida com o método convencional e para o corpo de prova sem usinar, evidenciando que nessa situação a retificação atingiu um pouco mais a integridade superficial do corpo de prova, mas não ao ponto de causar a queima superficial.

Ensaio com o método de lubri-refrigeração MQL mais limpeza para um ângulo de 30 graus

A Fig. (9) mostra os resultados de microscopia dos ensaios com a o método de lubri-refrigeração MQL com limpeza para um ângulo de incidência de 30 graus.

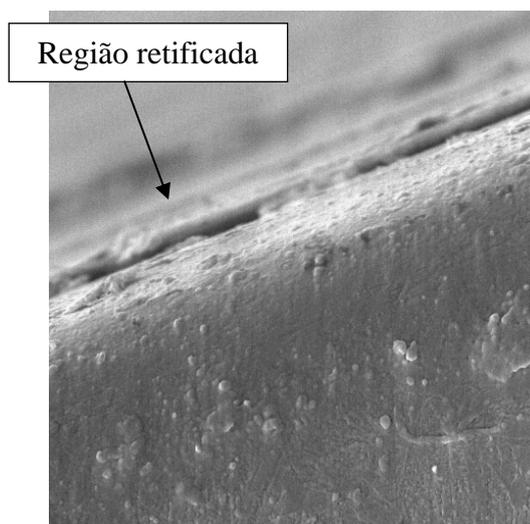


Figura 9. Microscopia para os ensaios com o método de lubri-refrigeração MQL com limpeza para o ângulo de 30 graus (ampliação de 2000 vezes).

Nessa imagem é nítido também que não houve queima superficial. Entretanto, o resultado de microdureza para esse ensaio foi **644,37** Knoop, abaixo do resultado obtido com o MQL sem limpeza. Esse resultado de microdureza evidencia que esta diminuiu devido à geração normal de calor no processo de usinagem, apesar de o revenimento não ser notável na imagem, mas também esta diminuiu porque, como houve a maior remoção dos cavacos que estavam aderidos nos poros do rebolo, diminuiu-se, assim, o número de partículas em choque com a superfície da peça que fez com que a mesma encruasse menos, apresentando microdureza menor em relação àquela obtida com a condição MQL sem limpeza.

4. CONCLUSÕES

Uma análise mais geral dos resultados indica que a condição de MQL com limpeza para um ângulo de 30 graus de incidência do ar comprimido foi a condição que proporcionou melhores resultados de acabamento superficial, circularidade e desgaste da ferramenta abrasiva. Tanto para uma velocidade de mergulho quanto para a outra, para essa melhor condição, as variações de resultados foram pequenas, implicando que existe a possibilidade de se usar a maior velocidade, com a limpeza, o que leva a um aumento de produção, com menor tempo de usinagem.

Dessa forma, é evidente na rugosidade, assim como no desgaste diametral do rebolo e circularidade, a grande diferença entre os valores obtidos com a condição convencional e a condição de limpeza a 30 graus. Com isso chega-se ao princípio de que a substituição dos tradicionais fluidos de corte em abundância, prejudiciais ao operador da máquina e ao meio ambiente, pela técnica do MQL com limpeza leva a uma importante linha de pesquisa que merece ser estudada a fundo, levando em conta as questões ambientais, humanas e econômicas nas comparações entre estas técnicas de lubri-refrigeração.

Em função disso, em suma, pode-se afirmar que essa substituição poderá ser algo concreto de se realizar, não só no aspecto saudável e ambiental, mas também em parâmetros finais de processo de produção, como redução do desgaste da ferramenta abrasiva, aumento do acabamento superficial e de forma, manutenção das qualidades da peça mesmo com o aumento da velocidade de mergulho, o que levaria a uma produção mais limpa, rápida e econômica.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Alves, M. C. S., 2005, “Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada”, Dissertação de Mestrado, UNESP Bauru, Brasil.
- Anon, H.S.E., 2003, “Warnings for grinding coolants”, *Metalworking Production*, Vol. 5, pp. 147.
- Atanasio, A., Gelfi, M., GiardinI, C., Remino, C., 2006, “Minimal Quantity Lubrication in Turning: Effect on Tool Wear”, *Wear*, Vol. 260, pp. 333–338.
- Badger, J. 2009, “Factors affecting wheel collapse in grinding”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58 pp. 307–310.
- Bartz, W.J., 1998, “Lubricants and the environment”, *Tribol. Int.*, Vol. 31, pp. 35–47.

- Brinksmeier, E., Eckebrecht, J., Buhr, H., 1994, "Improving ecological aspects of the grinding process by effective waste management", *Journal of materials processing technology*, Vol. 44, pp. 171-178.
- Brinksmeier, E., Heinzl, C., Wittmann, M., 1999, "Friction, Cooling and Lubrication in Grinding", *Annals of the CIRP*, Vol. 2, pp. 48.
- Brinksmeier, E. and Brockhoff, T., 1996, "Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process", *Annals of the CIRP*, vol. 45, p. 283-286.
- Cameron, A., Warkentin, R.B., 2009, "An investigation of the effects of wheel cleaning parameters in creep-feed grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 08.
- Desa, O., Bahadur, S. 1999, "Material removal and subsurface damage studies in dry and lubricated single-point scratch tests on alumina and silicon nitride", *Wear*, Vol. 2, pp. 1264–1275.
- Dhar, N., Islam, S. and Kamruzzaman, M., 2007, "Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel", *G.U. Journal of Science*, Vol. 20, pp. 23-32.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2003, "Tecnologia da usinagem dos materiais". Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição, p.230-248.
- Fu, Y.C., Xu, H.J, Xu, J.H., 2002, "Optimization design of grinding wheel topography for high efficiency grinding", *Journal of material processing technology*, Vol. 129, pp. 118-122.
- Dudzinsk, D., Devillez, A., Moufki, A., Larrouque`re, D., Zerrouki, V. J., 2004, "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.
- Ebbrell, S., Woolley, N.H., Tridimas, Y.D., Allanson, D.R., Rowe, W.B., 2000, "Effects of cutting fluid application methods on the grinding process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 2, pp. 209–223.
- Ge, P.Q., Li, J.F., Lu, C.H. and Liu, Z.C., 2003, "Performance Evaluation and Action Mechanism Analysis of Extreme Pressure Additives Used for Oil-based Cutting Fluids", *Key Engineering Materials*, Vol. 250, pp. 281–286.
- Hafenbraedl, D. and Malkin, S., 2001, "Tecnologia Ambientalmente Correta para Retificação Cilíndrica Interna", *Revista Máquinas & Metais*, Vol. 37, pp. 40-55.
- Howes, T., Mindek R., 1996, "Creep-Feed Exam. Cutting Tool Engineering", Vol. 48, No. 4, pp. 73-80.
- Komanduri, R., Lucca, D.A. and Tani, Y., 1997, "Technological Advances in Fine Abrasive Processes", *Annals of the CIRP*, Vol.46, pp. 2.
- Lee, S.W., Lee, Y.C, Jeond, H.D. and Choi, H.Z., 2002, "The Effect of High Pressure Air Jet on Form Accuracy in Slot Grinding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 128, pp. 67–72.
- Li, X.P. and Seah, K.H.W., 2003, "A Pressured Air Jet Approach to Tool Wear Minimization in Cutting of Metal Matrix Composites", *Wear*, Vol. 255, pp. 1352–1358.
- Machado, A. R. and Diniz, 2000, A. E., 2000, "Advantages and Disadvantages of the Use of the Cutting Fluids", *Machining Congress*, São Paulo, SP, Brazil.
- Marinescu, I. D., Rowe, W.B., Dimitrov, B., Inasaki, I., 2004, "Tribology of abrasive machining processes", 1.ed. Norwich, William Andrew Inc.
- Novaski, O. and Dörr, J., 1999, "Usinagem quase a seco", *Revista Máquinas & Metais*, Ano. XXXVI, nº 406, 1999, p. 34-41.
- Obikawa, T., Kamata, Y. and Shinozuka, J., 2006, "High-Speed Grooving with Applying MQL", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1854–1861.
- Pawlak, Z., Klamecki, E. B., Rauckyte, T.; Shpenkpv, P. G. and Kokowski, A., 2004, "The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids", *Tribology International*, Vol. 38.
- Pfeifer, T., Eversheim, W., Köenig, W., Weck, M., 1994, "Manufacturing Excellence: The Competitive Edge", Chapman & Hall, London.
- Runge, P. R. F., Duarte, G. N., 1990, "Lubrificantes nas indústrias – Produção, manutenção e controle Triboconcept", *Edições Técnicas*, p. 71-171.
- Sahm, D., Schneider, T., 1996, "The production without coolant is interesting and must be more known", *Machines and Metals Magazine*, Vol. 367, pp.38–55.
- Sluhan, C.A., 1994, "Selecting the right cutting and grinding fluids", *Tooling and Production*, Vol. 2, pp. 7.
- Stanford, M., Lister, P. M., Kibble, K. A. and Morgan, C., 2007, "Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970-80A15 (En32b) plain carbon steel using WC-Co uncoated tooling", *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier.
- Wang, C.M., Cargill, G.S., Chan, H.M. and Harmer, M.P., 2000, "Structure of Y and Zr Segregated Grain Boundaries in Alumina", *Interface Science*, Vol. 8, pp. 243–255.
- Webster, J. A., 2008, "Coolant Calculus: Directing coolant into the right place at the right speed, in the right quantity", *Cutting Tool Technology*, Vol 60-2, pp. 58-66.
- Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W., Wacabayashi, T., 2004, "Dry machining and minimum quantity lubrication", *Annals of CIRP*, Vol. 53, pp. 511–537.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

IMPROVEMENT OF LUBRICATION AND COOLING CONDITIONS IN GRINDING OF HARDENED STEELS

Danilo de Jesus Oliveira, daniloliv@gmail.com.br¹
Luiz Gustavo Guermandi, luiz_guermandi@hotmail.com²
Matheus Gonçalves Pereira, ra711756@feb.unesp.br²
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²
Anselmo Eduardo Diniz, anselmo@fem.unicamp.br³
Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br⁴

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Faculdade de Ciências de Bauru, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

²Universidade Estadual Paulista – UNESP- *Campus* de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

³Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Faculdade de Engenharia de Engenharia Mecânica. Cidade Universitária "Zeferino Vaz". Distrito de Barão Geraldo. 13081-970 - Campinas, SP, Brasil

⁴Universidade Estadual Paulista – UNESP- *Campus* de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

Abstract. *Grinding is a machining process widely applied when it is necessary dimensional and geometric accuracy associated with an excellent surface finish. However, when compared to other machining processes, grinding is characterized by high energy requirements for removal of material, which causes high temperatures in the cutting zone. If these temperatures are very high, a number of problems can arise (thermal damage, geometrical inaccuracy, residual stress, high roughness, cracking, among others.). To minimize these effects, the temperature is usually controlled with the use of large amounts of cutting fluids, but these have a high cost and their use is a serious risk to human health and the environment. An alternative to reduce the consumption of cutting fluid is the technique of minimal quantity of lubricant (MQL), but the surface quality of parts ground with MQL has been shown to be less than the conventional method. Thus, this paper aims to promote an improvement in the use of MQL, through a system of cleaning the cutting surface of the wheel. To demonstrate this improvement were ground pieces of steel AISI 4340, quenched and tempered, with the conventional method and MQL with cleaning system. We analyzed parameters of surface integrity (roughness and roundness), diametrical wear of grinding wheel and microstructure. Under specific conditions of machining, the results obtained with the MQL by the cleaning system shown to be superior to those obtained by conventional methods. The analysis shows the possibility of replacement of cutting fluids by this new technique, a fact that will allow industries to avoid overspending with handling and disposal of cutting fluids and reduce the impacts to the environment and human health.*

Keywords: *grinding, MQL, technological optimization*