

Influência da lubrificação-refrigeração na qualidade superficial de metais retificados

Influence of lubrication-cooling on the surface quality of metal grinding

Manoel Cléber de Sampaio Alves

Prof. Dr.,
UNESP-Faculdade de Eng. Industrial Madeireira,
Itapeva-SP, Brasil.
manoel@itapeva.unesp.br

Eduardo Carlos Bianchi

Prof. Titular,
UNESP - Faculdade de Engenharia de Bauru,
Bauru-SP, Brasil.
bianchi@feb.unesp.br

Paulo Roberto de Aguiar

Prof. Dr.,
UNESP - Faculdade de Engenharia de Bauru,
Bauru-SP, Brasil.
aguiarpr@feb.unesp.br

Resumo

Na fabricação de componentes mecânicos precisos, que necessitam de alta resistência mecânica e ao desgaste, utiliza-se o processo de retificação, para conferir o acabamento final desejado e, também, para eliminar as deformações ocorridas durante a têmpera do aço. No entanto, as condições de retificação devem ser adequadas, para que não sejam introduzidas falhas na peça. Novos conceitos de lubrificação e refrigeração, para o processo de retificação, estão sendo pesquisados, de forma a diminuir os custos e os danos ambientais causados pelos fluidos de corte. Nesse trabalho, é analisada a influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante (MQL), refrigeração otimizada e refrigeração convencional, com diferentes vazões e velocidade de aplicação do fluido de corte, na qualidade das peças produzidas com aço ABNT 4340 endurecido, no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com a utilização de rebolos de CBN. O Aço ABNT 4340 apresenta várias aplicações industriais, sendo considerado de uso aeronáutico devido, sua alta resistência mecânica sem aumentar o peso dos componentes que o utilizam. A análise da qualidade das peças foi realizada com a verificação das rugosidades e com a análise de microscopias eletrônicas de varredura. Verificou-se, ainda, a força tangencial de corte. Em relação às diferentes formas de aplicação do fluido de corte, notou-se o melhor desempenho da aplicação otimizada, para maiores velocidades, mostrando a eficiência do bocal utilizado. O processo otimizado e o processo MQL foram capazes de manter a integridade superficial das peças produzidas. Exceção somente para a condição MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h, que produziu trincas e queima superficial. Rebolos com baixa concentração de CBN, conseqüentemente mais baratos, proporcionaram bons resultados, quando associados com técnicas mais eficientes de aplicação de fluido de corte apresentando desgaste reduzido.

Palavras-chave: Retificação, CBN, Aço ABNT 4340, mínima quantidade de lubrificante (MQL), lubrificação convencional, lubrificação otimizada.

Abstract

In the manufacture of precise mechanical components, which requires high mechanical and wear resistance, the grinding process is used to give the desired finishing and to eliminate the distortion occurred during the quenching step in the steel heat treatment process. However, the grinding conditions should be appropriate so that flaws are not incorporated into the piece. New lubrication and cooling concepts for the grinding process are being researched in order to reduce costs and environmental damage caused by cutting fluids. The influences on the surface integrity and surface

quality of the ABNT 4340 hardened parts have been analyzed in this research by employing the minimum quantity of lubrication (MQL), optimized and conventional cooling, different flows and velocities in the application of the cutting fluid and a super abrasive grinding wheel in the cylindrical plunge grinding process. The ABNT 4340 steel, with several industrial applications, is considered for aeronautical use due to its high strength without increasing the weight of the components. The quality analysis of the parts was done by roughness verification and electron scanning microscopy (ESM). The tangential cutting force was also verified. Regarding the different forms of the cutting fluid application, the best performance was verified for the optimized for higher speeds showing the efficiency of the nozzle used. The optimized and the MQL processes were able to maintain the surface hardness and integrity of the produced parts. The only exception occurred for the MQL condition with a cutting fluid flow rate at 40ml/h, which led to cracks and superficial burns. Grinding wheels with low CBN concentration, therefore cheaper, produced good results when associated with more efficient techniques of cutting fluid application, showing reduced wear.

Keywords: Grinding process, CBN grinding wheel, ABNT 4340 Steel, minimum quantity of lubrication (MQL), optimized cooling, conventional cooling.

1. Introdução

Segundo Souza et al. (2003), o aço ABNT 4340 é denominado aço de alta resistência e foi desenvolvido para estruturas de grande porte, não apresentando aumento de peso nas construções, quando comparado com outros aços de menor resistência.

O Aço ABNT 4340 é o aço com a mais alta temperabilidade entre os de construção mecânica, sendo de difícil usinabilidade e soldabilidade apresentando boa forjabilidade. É utilizado na fabricação de virabrequins para aviões, tratores e veículos em geral. É, também, usando também em engrenagens, bielas, eixos muito solicitados e componentes com boas propriedades mecânicas.

O aço ABNT 4340 é muito utilizado na fabricação de peças que exigem boa combinação de resistência e tenacidade, com valores relativamente uniformes em toda a seção. Essas propriedades são obtidas através do beneficiamento através de têmpera e revenimento. Porém, na fabricação de peças precisas, após a peça ser temperada, é necessário retificá-la, para eliminar as distorções dimensionais causadas durante a têmpera e para melhorar o acabamento superficial.

A retificação confere à peça o acabamento final, minimizando as irregularidades superficiais através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta (rebolo) e a peça a ser retificada.

A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluir o meio ambiente. No entanto, diversos processos de usi-

nagem, incluindo a retificação, utilizam fluidos de corte como meio de lubrificação, refrigeração, limpeza e proteção da peça produzida (Boubekri et al., 2010). Nesses processos de usinagem, se a lubrificação e a refrigeração não forem satisfatórias, as elevadas temperaturas geradas podem produzir danos à peça produzida, como queima superficial, mudanças microestruturais, aparecimento de tensões residuais, erros de forma e deterioração da qualidade final da peça produzida (Malkin & Guo, 2008).

Os fluidos de corte são, muitas vezes, descartados no meio ambiente. Essa atitude não condiz com a situação atual, devido ao rigor das leis ambientais e da conscientização ambiental crescente da sociedade. Grandes volumes de fluido de corte estão se tornando necessários devido ao crescimento da produtividade das indústrias e ao crescimento da utilização do processo (Webster, 1999). Ainda existe o alto custo relativo aos fluidos de corte, que vem se tornando mais acentuado devido ao elevado consumo e ao tratamento desse fluido de corte no momento do descarte de forma a atender as exigências ambientais (Boubekri et al., 2010). De acordo com Silva & Soares (2009), os custos com fluidos de corte podem chegar a 20% dos custos de produção.

Se isto não bastasse, ainda existe o problema de que muitos fluidos de corte ainda trazem muitas conseqüências à saúde dos operadores das máquinas envolvidas com esses fluidos. No entanto, esse problema vem sendo solucionado através do uso de fluidos à base vegetal, que trazem menos danos à saúde (Dhar & Khan, 2010).

Dessa forma, deve-se procurar maneiras de diminuir a utilização em massa dos fluidos de corte. Para tanto, são necessárias análises mais aprofundadas das conseqüências da diminuição do uso de fluidos de corte com relação ao estado final do componente usinado.

Webster (1995) afirma não ser necessários grandes volumes de fluido de corte, se houver uma entrada efetiva de fluido na região de corte entre a peça e a ferramenta, realizando uma eficiente lubrificação e refrigeração. Esse autor afirma, ainda, que, em métodos convencionais de aplicação de fluido de corte, não ocorre uma penetração efetiva do fluido na região de corte.

Considerando essas informações, surge a importância de avaliar a qualidade das peças produzidas através do uso de métodos mais eficientes de aplicação de fluido de corte. Nesse trabalho, avaliou-se a qualidade de peças retificadas através de três formas de aplicação de fluido de corte (método convencional, método otimizado e método da mínima quantidade de lubrificante - MQL), na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 usando uma ferramenta de CBN com baixa concentração de abrasivos. Utilizaram-se, ainda, novos conceitos de bocais aplicadores de fluido e dois fluidos de corte de baixo impacto ambiental e à saúde. Buscou-se, nesse trabalho, encontrar formas de lubrificação mais eficientes através de bocais inovadores. A influência na qualidade foi avaliada através da análise da rugosidade, da força tangencial de corte e da análise de microscopias dos corpos-de-prova ensaiados.

2. Metodologia

Foram analisados três métodos distintos de aplicação de fluido de corte, no processo de retificação. Foram analisados o método convencional (MC) com 2 bocais circulares, o método de mínima quantidade de lubrificante (MQL), com um bocal devidamente preparado para este tipo de aplicação, e o método otimizado (MO), com um bocal especialmente desenvolvido de forma a abranger toda a superfície a ser retificada. Foram utilizados novos conceitos de bocais que buscam criar condições possíveis de serem empregadas no meio industrial.

Tabela 1
Composição química do aço
ABNT 4340 (%).

Elemento	C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	Fe
%	0,4	0,77	0,026	0,30	0,011	0,81	1,71	0,22	0,016	0,18	0,04	95,517

S.A. Usaram-se uma concentração de 5% e um pH 9. O fluido de corte utilizado para o MQL foi o Accu-Lube LB 1000 Lote 39540 do fabricante ITW Chemical Products Ltda. O controle microbiológico do fluido de corte foi realizado com bactericida *ADEP 30* à base de triazina.

Os ensaios foram realizados com uma ferramenta de corte (rebolo) de CBN (nitreto de boro cúbico), fabricada com ligante vitrificado e concentração de 15% de volume de CBN com as seguintes características dimensionais (mm): 350x20 – 5x127, código SNB151Q12VR2, lote 7936, com granulometria fina do tipo duro com estrutura aberta. O rebolo foi dressado (afiado) após cada ensaio com dressador tipo conglomerado.

A lubrificação convencional é caracterizada pela aplicação do fluido de corte à baixa pressão, à baixa velocidade e com uma alta vazão. O bocal utilizado, nesse sistema de lubrificação, é composto por dois bicos difusores, cada um com 6,3 mm de diâmetro, para a saída do fluido.

O sistema de mínima quantidade

de lubrificação MQL é caracterizado pela aspersão de fluido de corte e ar comprimido com um ajuste preciso, ambos homogêneos. Dasch e Kurgin (2010) definem o MQL como um novo método de usinagem, em que uma névoa de óleo é misturada em um fluxo de ar comprimido. É composto, basicamente, de compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador e bocal projetado para a utilização de MQL na retificação. A Figura 1 apresenta o bocal utilizado no MQL.

O sistema otimizado é caracterizado por alta vazão e alta pressão do fluido de corte. composto, basicamente, por um bocal otimizado cuja saída do bocal apresenta um tubo retangular fabricado com chapa aço ABNT 1010. A Figura 2 apresenta o bocal otimizado utilizado.

As condições de usinagem utilizadas nos ensaios foram: Velocidade de mergulho (V_f) de 1 mm/min; Velocidade de corte (V_s) de 30 m/s; Rotação da peça (ω_w) de 204 rpm; Penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm; Tempo de centelhamento (t_s) igual a 8 segundos; Largura

de retificação de 12 mm; Ciclos de retificação:100; Espessura de corte equivalente máxima (h_{eq}) de 0,065 μ m; Espessura de corte equivalente mínima (h_{eq}) de 0,047 μ m.

Nas Tabelas 2, 3 e 4, são apresentadas, respectivamente, as condições de velocidades e vazões de saída do fluido de corte, na condição otimizada, MQL e convencional. Cabe ressaltar que a concentração do fluido de corte utilizado, na técnica otimizada e convencional, foi mantida constante em 5%.

A força tangencial de corte foi calculada pela determinação da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo-árvore do rebolo.

A força tangencial de corte F_{tc} (N) pode ser determinada em função da potência mecânica P_{mec} (W) entregue no eixo do motor para acionar o rebolo, do diâmetro do rebolo d_s (m) e da rotação do rebolo n em rotações por minuto, conforme Eq. (1):

$$F_{tc}(N) = (60 \cdot P_{mec}) / (d_s \cdot n \cdot \pi) \quad (1)$$

A rotação do rebolo foi obtida com um encoder industrial blindado analógi-



Figura 1

Vista da parte traseira do bocal MQL mostrando os orifícios de entrada de ar comprimido e fluido de corte e vista do bocal utilizado na experimentação com MQL instalado na Retificadora mostrando a ligação de ar comprimido.



Figura 2
Bocal otimizado construído e vista do jato formado.

Condição	Vazão total de fluido de corte (l/min)	Velocidade de saída do fluido de corte, V_j (m/s)
Otimizada 30m/s	26,3	30
Otimizada 27m/s	23,7	27
Otimizada 25m/s	21,9	25
Otimizada 20m/s	17,5	20
Otimizada 15m/s	13,2	15

Tabela 2
Velocidades e vazões utilizadas na aplicação com a técnica otimizada.

Condição	Vazão total de fluido de corte (l/min)	Velocidade de saída do fluido de corte, V_j (m/s)
MQL 40ml/h	0,00067	30
MQL 60ml/h	0,00100	30
MQL 80ml/h	0,00133	30

Tabela 3
Velocidades e vazões utilizadas na aplicação MQL.

Condição	Vazão total de fluido de corte (l/min)	Velocidade de saída do fluido de corte, V_j (m/s)
Convencional	20	5,3

Tabela 4
Velocidades e vazões e velocidades utilizadas na aplicação convencional.

co modelo TH 10 R 3000, marca Abraf. O diâmetro externo do rebolo utilizado era 0,35m.

A partir de uma metodologia específica, relacionou-se a potência elétrica P_{elet} consumida pelo motor da retificadora

com a potência mecânica P_{mec} entregue no eixo do mesmo para acionar o rebolo. Essa relação é apresentada na Equação 2:

$$P_{mec} (W) = -2,3196 \cdot 10^{-8} \cdot P_{elet}^3 + 1,6659 \cdot 10^{-4} \cdot P_{elet}^2 + 5,3593 \cdot 10^{-1} \cdot P_{elet} - 28,961 \quad (2)$$

A determinação da potência elétrica (P_{elet}) consumida pelo motor de acionamento do eixo-árvore do rebolo foi obtida com o monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica, provenientes deste motor elétrico.

Para a medição da rugosidade média das peças, representada pelo parâme-

tro R_a , utilizou-se um aparelho da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+. A medição foi realizada na direção perpendicular à direção da retificação. O comprimento de medição (cut-off) utilizado foi de 0,8 mm e o filtro foi o 2CR-fase corrigida. O raio da ponta do diamante do medidor de rugosidade foi de 0,2 μ m.

As microscopias eletrônicas de varredura foram obtidas com um microscópio eletrônico de varredura da marca ZEISS, modelo DSM 960, utilizando-se a técnica dos elétrons espalhados, que permite a visualização com maior facilidade do relevo das estruturas na superfície analisada.

3. Resultados e discussões

A seguir são apresentados os resul-

tados de força tangencial de corte, rugo-

sidade e a análise das microscopias.

Força tangencial de corte

A Figura 3 apresenta a média das forças tangenciais de corte máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas, permitindo avaliar e comparar os métodos entre si. A análise

se da Figura 3 permite observar que as forças de corte envolvidas nos processos de MQL foram bem superiores que para o sistema convencional e sistema otimizado.

O sistema otimizado proporcionou

uma lubrificação eficiente, diminuindo o desgaste do rebolo. As altas velocidades do fluido de corte, nos processos otimizados, favoreceram uma melhor entrada de lubrificante entre a peça e o rebolo, diminuindo o atrito entre elas.

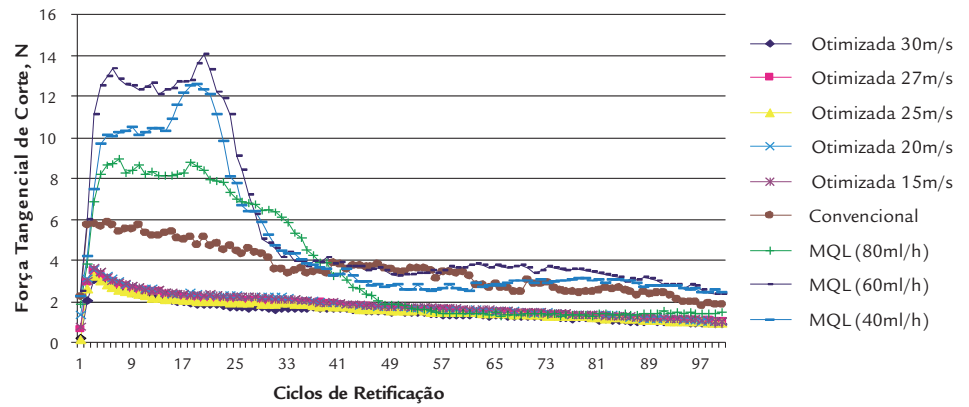


Figura 3

Análise das formas de aplicação de fluido de corte nas forças tangenciais de corte.

A perda da afiação do rebolo é percebida com a diminuição da força tangencial de corte ao longo dos ciclos de retificação. A perda da afiação aumenta à medida que os grãos abrasivos vão sendo desgastados, tornando-se planos ou à medida que o rebolo tem seus poros obstruídos com cavacos (empastamento).

Tanto no sistema otimizado, quanto no convencional, a perda aparente da afiação foi muito sutil durante os 100 ciclos de usinagem testados. Nessas condições, o desgaste e o empastamento do rebolo foram baixos devido à lubrificação eficiente ocorrida entre a peça e o rebolo e devido à limpeza da superfície de corte do rebolo conseguida.

Em todas as condições testadas com o sistema MQL, ocorreu perda da

capacidade de corte do rebolo próximo ao 25º ciclo de retificação. Isto se deve, principalmente, ao empastamento ocorrido no rebolo, devido à deficiente limpeza da superfície de corte do rebolo proporcionada pelo ar comprimido.

Visto isso, nota-se que são necessárias menos afiações (dressagens) do rebolo nas condições otimizadas e convencional que na condição MQL.

Com relação à variação da vazão de fluido de corte de 40, 60 e 80ml/h, para a condição de MQL, notou-se uma diminuição da força de corte com o aumento da vazão do fluido. A condição MQL que apresentou o melhor desempenho foi com vazão de 80ml/h favorecendo a lubrificação na interface rebolo-peça.

Para os ensaios envolvendo lubrifi-

refrigeração otimizada, obtiveram-se melhores resultados que para a lubrificação convencional e MQL, sendo a lubrificação otimizada com velocidade de saída de fluido de corte igual a 30m/s a condição com menores forças tangenciais de corte.

Os resultados obtidos, nesse estudo, estão de acordo com Kovacevic e Mohan (1995). Esses autores mostraram que forças normais e tangenciais podem ser reduzidas com o aumento da velocidade do lubrificante.

Conforme Nguyen e Zhang (2003), a deficiente limpeza da superfície de corte do rebolo, proporcionada pelo MQL, faz com que os poros do rebolo fiquem obstruídos produzindo maiores forças de corte.

Rugosidade

O acabamento superficial afeta, de forma significativa, a resistência dos componentes fabricados, quando são submetidos a trabalhos onde são exigidos esforços de fadiga. A rugosidade de uma peça ainda está diretamente ligada à lubrificação e depende, principalmente, do tamanho do grão abrasivo presente no rebolo, das condições de dressagem, da taxa de remoção de material, do tempo de centelhamento e das condições de lubrificação (Malkin & Guo, 2008).

A Figura 4 apresenta as médias das rugosidades das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas.

Analisando-se os resultados obtidos, observa-se, de uma maneira geral, que os valores de rugosidade foram menores para lubrificação otimizada, seguida pela lubrificação convencional e por último a técnica de MQL. Os menores valores de rugosidade, para a utilização com MQL, são para a vazão do lubrificante igual a 80ml/h, comprovando-se, assim, que a

maior quantidade de fluido possibilitou menores valores de rugosidade devido à maior lubrificação alcançada.

A lubrificação convencional apresentou valores menores de rugosidade que a técnica de MQL. No entanto, com a vazão do lubrificante igual a 80ml/h na técnica MQL, foram obtidos valores de rugosidade comuns em certas aplicações industriais, como em retíficas de desbaste (R_a de 0,6 a 2,5 μm).

A melhor situação otimizada (velocidade de fluido de 20m/s) em relação à rugosidade R_a média da peça ficou 71,7% menor que a melhor condição MQL ($Q=80\text{ml/h}$) e 47% menor que a condição convencional de aplicação de fluido de corte.

Os menores valores de rugosidade, para o método otimizado, foram obtidos para maiores velocidades de fluido de corte, comprovando-se, assim, que a maior quantidade de fluido proporcionou menores valores de rugosidade, devido à maior lubrificação alcançada. Maiores velocidades do fluido de corte

permitem a expulsão do cavaco mais rapidamente, colaborando para o melhor acabamento. Maiores velocidade do fluido de corte facilitam a quebra da barreira aerodinâmica existente ao redor do rebolo, favorecendo a entrada de fluido. Proporcionam, ainda, uma expulsão rápida dos cavacos, evitando que estes afetem a qualidade da peça.

As diferenças de rugosidade obtidas entre as formas otimizadas são pequenas, mas apresentam uma tendência de melhor qualidade para maiores velocidades de aplicação de fluido de corte, resultado observado, também, por Alves (2005).

Condições que geram menores forças de tangenciais de corte geram, também, menores rugosidades (Bianchi et al., 2001), fato este também observado nessa pesquisa.

Morgan et al. (2008) afirmam que o jato de fluido de corte apontado tangencialmente pode facilitar a quebra da barreira de ar formada ao redor do rebolo, se a velocidade do jato for igual à velocidade do rebolo. Webster (1995)

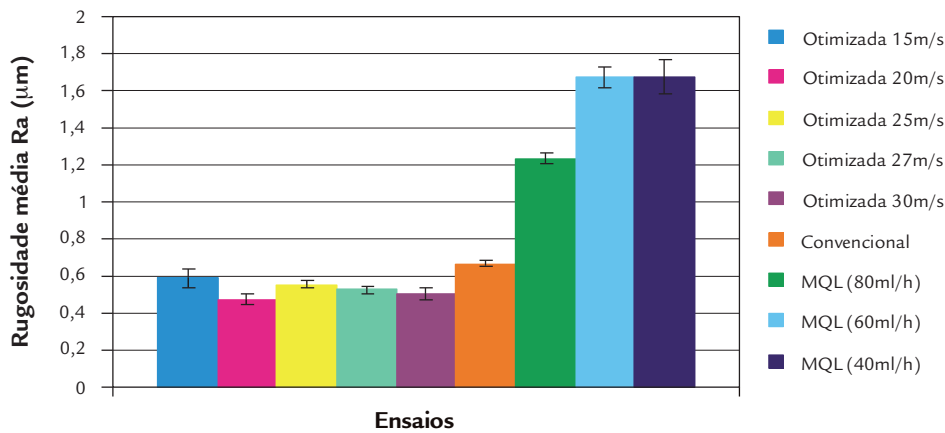


Figura 4
Análise das formas de aplicação de fluido de corte na rugosidade.

mostrou a necessidade de se utilizarem jatos de fluido de corte coerente para a obtenção de melhores acabamentos.

Os resultados obtidos, nesse estudo, diferem dos resultados obtidos por Silva et al. (2006). Esses autores

obtiveram melhores resultados de rugosidade com MQL do que com a técnica convencional.

Análise microestrutural

Os danos causados à superfície de um material podem proporcionar a degradação de propriedades relativas à resistência e ao desgaste, à corrosão, à nucleação e propagação de trincas e à 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).

Através das análises das microestruturas das peças retificadas pode-se afirmar que, nas diversas condições testadas, para a técnica otimizada e convencional de lubrificação, os resultados foram satisfatórios, ou seja, sem alterações significativas da microestrutura, não apresentando danos à superfície da peça. A refrigeração e a lubrificação com o sistema otimizado e convencional foram eficientes.

Resultados semelhantes são apresentados por Alves et al. (2009). Nessas condições, a quantidade de calor absorvida pela peça, durante o processo de retificação, não foi suficiente para produzir alterações subsuperficiais. Como exemplo é apresentada, na Figura 5, a microscopia para a condição otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 30m/s.

Exceção somente para a situação com vazão de fluido de corte de 40ml/h na técnica MQL, onde houve a presença de trincas e queima superficial. Nessa mesma situação, notou-se, ainda, um leve revenimento comprovado através da obtenção da microdureza Vickers na superfície da peça. Utilizando um microdurômetro da marca BUEHLER, modelo 1600-6300, e aplicando uma carga de 200g por 40 segundos, verificou-se que os corpos-de-prova, antes de serem re-

tificados, apresentavam dureza Vickers $HV=697 \pm 15$. Depois de retificados na condição MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h, os corpos-de-prova apresentaram dureza Vickers $HV=662 \pm 8$. A microscopia apresentada na Figura 6 refere-se à condição MQL com 40ml/h. Isto se deve, principalmente, à menor lubrificação proporcionada, aumentando a geração de calor, devido ao atrito do grão abrasivo com a peça.

Nguyen et al. (2003) sugerem que a lubrificação obtida por uma pequena quantidade de óleo, inserida no fluxo de ar, pode reduzir, significativamente, o impacto térmico nas peças retificadas. Shen et al. (2008) retificaram ferro fundido com sistema MQL e rebolo de CBN sem gerar queima na peça. Isto foi observado para o método MQL com vazão de óleo de 60 e 80 ml/h (Figura 7).

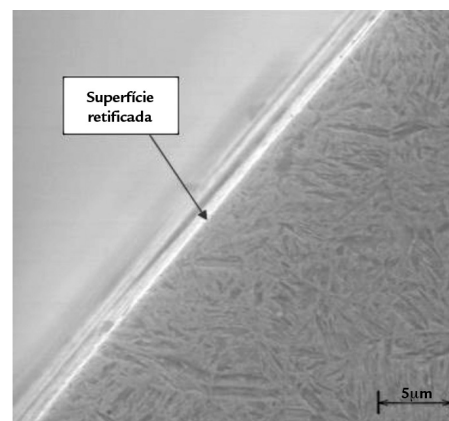


Figura 5
Microscopia de um corpo-de-prova submetido a ensaio com lubrificação otimizada com velocidade de aplicação do fluido de 30m/s.

4. Conclusões

A técnica otimizada demonstra ser fundamental para se obterem peças mais precisas comparada às outras técnicas

utilizadas, sendo, dessa forma, uma opção para se obterem peças com maior qualidade (menor rugosidade) sem fazer

mudanças de rebolos, fluidos de corte, condições de dressagem e corte, contribuindo para a diminuição dos volumes

Figura 6
Microscopia de um corpo-de-prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h.

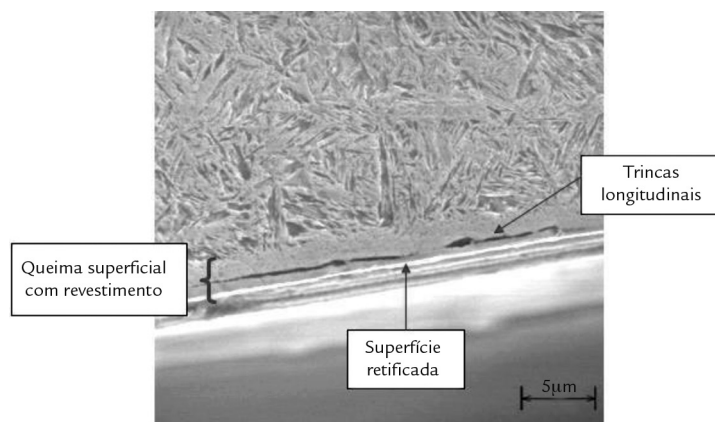
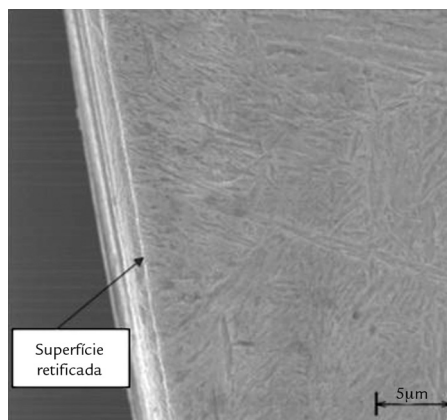


Figura 7
Microscopia de um corpo-de-prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 80ml/h.



de fluido utilizados.

Analisando a integridade superficial das peças retificadas, verificou-se que não ocorreram alterações das propriedades do material para todas as condições otimizadas e para a condição convencional.

A técnica MQL, nas vazões de 80ml/h e 60ml/h, não gerou defeitos térmicos nas peças. No entanto, para a vazão de 40ml/h, ocorreram trincas e revenimento nas superfícies das peças retificadas.

5. Agradecimentos

Agradecimentos especiais à FA-PESP - Fundação de Amparo à Pesquisa

Todas as variáveis analisadas sofreram redução significativa com a aplicação da técnica otimizada, devido à boa lubrificação proporcionada pela técnica e devido à eficiência proporcionada pelo modelo de bocal inovador utilizado.

Apesar de ter sido usado um rebolo de CBN duro de estrutura aberta e com baixa concentração de CBN (15% no volume) e de granulometria fina (entre 100 e 120 mesh), os resultados para a técnica

otimizada e convencional foram satisfatórios, já que os resultados encontrados estão dentro de limites aceitáveis para o processo de retificação.

Melhores acabamentos superficiais foram obtidos com maiores velocidades do fluido de corte na técnica otimizada e com maiores vazões na técnica MQL. Ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados para maiores velocidades e vazões do fluido de corte.

do Estado de São Paulo pelo auxílio à pesquisa concedido.

6. Referências bibliográficas

- ALVES, M. C. S. *Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada*. Bauru: Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2005. 167 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial).
- ALVES, M. C. S., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., CATAI, R. E. Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho. *REM- Revista Escola de Minas*, v. 62, n. 1, p.65-71, 2009.
- BIANCHI, E. C., VALARELLI, I. D. D., AGUIAR, P. R., SILVA, E. J., MONICI, R. D., SOUZA, G. F. A contribuição dos rebolos de CBN para a melhoria da competitividade e qualidade. *Máquinas e Metais*. v. 37. n. 423. p.177-197, 2001.
- BOUBEKRI, N., SHAIKH, V., FOSTER, P. R. A technology enabler for green machining: Minimum quantity lubrication (MQL). *Journal of Manufacturing Technology Management*, v.21, n. 5, 2010, p.556-566, 2010.
- DASCH, J. M., KURGIN, S. S. K. A characterization of mist generated from mi-

- nimum quantity lubrication (MQL) compared to wet machining. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, v. 7, n. 1/2, p. 82-95, 2010.
- DHAR, N. R., KHAN, M. M.A. Effects of minimum quantity lubrication (MQL) by vegetable oil-based cutting fluid on machinability of AISI 9310 steel. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, v. 7, n. 1/2, p. 17-38, 2010.
- KOVACEVIC, R., MOHAN, R. Effect of high speed grinding fluid of surface grinding performance. In: *First International Machining and Grinding Conference*, Dearborn MI, 1995, p. 919-931.
- MALKIN, S., GUO. C. *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*. New York: Industrial Press, 2008. 372p.
- MORGAN, M. N., JACKSON, A. R., WU, H., BAINES-JONES, V., BATAKO, A., ROWE, W. B. Optimization of fluid delivery in grinding. *Annals of the CIRP*, v. 57, n. 1, p.363-366, 2008.
- NGUYEN, T., ZHANG, L. C. An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 140, p. 224-230, 2003.
- SHEN, B., SHIH, A. J., TUNG, S. C. Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding. *Tribology Transactions*, v. 51, n. 6, p.730-737, 2008.
- SILVA, L. R., BIANCHI, E. C., FUSSE, R. Y., CATAI, R. E., FRANÇA, T. V., AGUIAR, P. R., Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant - MQL in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, p. 412-418, 2006.
- SILVA, L.R., SOARES, C. B. Performance of the minimum quantity lubrication technique in turning Inconel 718 at high cutting speed. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, v. 5, n. 4, p. 401-416, 2009.
- SOUZA, R. C., NASCIMENTO, M. P., VOORWALD, H. J. C., PIGATIN, W. L. The effect of WC- 17 Co thermal spray coating by HVOF and hard chromium electroplating on the fatigue life and abrasive wear resistance of AISI 4340 high strength steel. *Corrosion reviews*, v. 21. n.1, p.75- 96, 2003.
- WEBSTER, J. A. Optimizing coolant application systems for high productivity grinding. *Abrasives Magazine*, p. 34-41, 1999.
- WEBSTER, J. Selection of coolant type and application technique in grinding. *Supergrind*, p.205-218, 1995.

Artigo recebido em 03 de março de 2011. Aprovado em 28 de maio de 2011.