

Análise de diferentes métodos de lubri-refrigeração no processo de retificação cilíndrica do aço ABNT 52100 com rebolo de carbeto de silício com liga resinoide

Analysis of different lubri-cooling methods during cylindrical grinding ABNT 52100 steel grade with silicon carbide grinding wheel with resin binder

Larissa Nogueira de Castro¹, Eduardo Carlos Bianchi¹,
Ricardo Bega de Andrade¹, Hamilton José de Mello¹,
Paulo Roberto Aguiar¹, Luiz Maurício Gonçalves Neto¹

¹ Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.
e-mail: bianchi@feb.unesp.br; hamilton@feb.unesp.br; aguiarpr@feb.unesp.br; r-b-andrade@hotmail.com;

RESUMO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão destinada a obtenção de peças com baixas tolerâncias dimensionais e de acabamento superficial. Neste processo é indispensável para garantir a qualidade superficial da peça, a lubri-refrigeração, proporcionada pela ação do fluido de corte. Entretanto, o uso de tal fluido gera elevado custo de descarte, risco para o meio ambiente e a saúde dos operadores. O objetivo deste trabalho é o estudo de métodos que minimizem tais desvantagens através da otimização da aplicação do fluido de corte (método otimizado) ou através da redução de consumo de tal fluido (método da MQL). Os métodos propostos foram avaliados especificamente na retificação cilíndrica do aço ABNT 52100, amplamente usado na fabricação de rolamentos, utilizando rebolo convencional de carbeto de silício com ligante resinoide. Os ensaios foram realizados em três diferentes velocidades de avanço: 0,25, 0,50 e 0,75mm/min, sendo as taxas de remoção de material, respectivamente, 0,72, 1,44 e 2,16 mm³/mm.s. A análise dos resultados foi feita através da avaliação das variáveis de saída do processo de retificação, tais como rugosidade, desgaste do rebolo, relação G, microdureza e microestrutura. Foram obtidos bons resultados de rugosidade para todos os métodos, porém os resultados de desgaste do rebolo e os possíveis danos à peça aumentam conforme menor for a capacidade refrigerante do método de lubri-refrigeração utilizado devido à reatividade do carbeto de silício com o ferro a altas temperaturas. O método de lubrificação com MQL apresenta menores esforços de corte, conseqüentemente é requerida menor potência de usinagem, porém o método de lubri-refrigeração convencional, no geral, apresenta melhores resultados.

Palavras-chave: Retificação cilíndrica, MQL, rebolo de carbeto de silício, método otimizado, método convencional.

ABSTRACT

Grinding is a machining process by abrasion dedicated to obtain workpieces with low roughness and dimensional accuracy. In this process, it is indispensable to ensure superficial quality of the machined workpiece, the lubricant and cooling method provided by the action of the cutting fluid. However, the use of such fluid generates high cost of disposal, risks to the environment and to the machine operator's health. The main goal of this work is the study of methods that minimize such disadvantages through the optimization of the application of the cutting fluid (optimized method) or through the reduction of the fluid consumption (MQL method). The proposed methods are evaluated specifically on the cylindrical grinding of the ABNT 52100 steel grade, widely used in the manufacture of bearings by utilizing conventional silicon carbide grinding wheel with resin binder. The experiments were carried out with three different feed rates: 0.25, 0.5 and 0.75mm/min, that resulted in the following material removal rates, respectively, 0.72, 1.44 and 2.16 mm³/mm.s. The analysis of the results was made through the evaluation of the grinding process's outputs, such as roughness,

grinding wheel wear, G ratio, micro-hardness and micro-structural. Good results of roughness were recorded for all of the methods, however, the results for the grinding wheel wear and the likely damages to the work-pieces increase as the cooling capacity of the lubricant and cooling method decreases due to the reactivity of the silicon carbide to the iron in high temperatures. Lower cutting efforts were obtained after machining with the MQL cooling technique consequently demanding lesser machining power. However, in general, the conventional lubri-cooling method, provides better results.

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

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem empregado a fim de se obter superfícies de tolerância dimensional precisa e reduzidos valores de rugosidade, utilizando para isso uma ferramenta contendo grãos abrasivos (reboło). Devido a um grande número de variáveis envolvidas, esse processo é considerado um dos mais complexos dentre os processos de usinagem. Segundo OLIVEIRA *et al.* [1], todos os sistemas de acabamento superficial por abrasão têm a função de “gerar superfícies”. Esta geração de superfície pode ser puramente estética ou também, em alguns casos, por fator de segurança. A qualidade superficial não é apenas relacionada com acabamento superficial ou exatidão dimensional, mas também é relacionado com a integridade superficial. Na retificação o calor produzido durante o processo não é efetivamente removido da superfície usinada, isto pode afetar negativamente a integridade superficial da peça usinada, por exemplo, oxidação e transformação metalúrgica [2]. Segundo KOVACEVIC e MOHAN [3], a remoção de calor na usinagem é o melhor modo para manter a taxa de desgaste do reboło sob controle e é obtida pela utilização do fluido de corte.

Atualmente, engenheiros da área de usinagem empregam as técnicas mais modernas de retificação em linhas de produção, com o objetivo de tornar o processo cada vez mais eficiente. Em um mundo industrial globalizado, a redução dos custos de usinagem com garantia de qualidade das peças é constante e praticamente uma condição de sobrevivência de qualquer indústria [4]. Este trabalho visa observar o comportamento do reboło de carbeto de silício resinoide na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 52100, analisando os seguintes parâmetros: Desgaste diametral do reboło, Relação G, Rugosidade, Potência de Usinagem, Microestrutura e Microdureza.

1.1 O fluido de corte no processo de retificação

Conforme IRANI *et al.* [12] um fator limitante do processo de retificação é a ocorrência de dados térmicos na peça, causados pela grande geração de calor, devido a baixa eficiência da ação do fluido de corte. Desta forma, a aplicação de fluido é muito importante, pois são requeridas taxas de remoção cada vez mais elevadas, alta qualidade e vida útil do reboło mais longa. EL BARADIE [5] reforça a utilidade desse agente nos processos de usinagem, ao afirmar que a redução na temperatura faz com que o desgaste da ferramenta seja menor proporcionando uma maior vida útil.

Além de retirar calor da superfície da peça, o fluido de corte se faz importante na qualidade do processo, pois também é responsável por remover o cavaco da região de corte, limpar o reboło e lubrificar melhor a região de corte e, em alguns casos, minimizar a corrosão na máquina-ferramenta. Essas características trazem grande influência na temperatura do processo, na estrutura superficial e no desgaste da ferramenta [6]. Na retificação, a não utilização desses fluidos poderá ocasionar a queda de rendimento do reboło devido ao aumento da temperatura no processo, além de perda de qualidade dimensional e acabamento superficial das peças provocado pela incrustação de cavaco nos poros da ferramenta abrasiva.

A escolha do melhor tipo de fluido e de um modo eficiente de aplicá-lo são dois aspectos significativos para alcançar objetivos de produtividade, e podem ser tão importantes quanto as especificações do reboło. Uma boa aplicação de fluido reduzirá a incidência da queima, pela redução de energia específica, e diminuirá as temperaturas da zona de contato [7].

As principais funções dos fluidos de corte são: lubrificação da área de contato peça/ferramenta, reduzindo e minimizando as forças envolvidas na usinagem e promovendo maior dissipação do calor, devido à redução do atrito da interface; refrigeração, evitando a geração excessiva de calor; expulsão dos cavacos dos poros do reboło, prevenindo a formação de borra e ocasionando consequentemente uma maior qualidade superficial na peça [8, 9].

Quando se aplica fluido de corte no processo de retificação, o tipo de refrigerante, sua composição, a posição e o projeto do bocal e também a vazão de fluido são parâmetros que influenciam na produtividade, qualidade da peça e desgaste do reboło [10].

FRANÇA *et al.* [11] relatam que o setor industrial conhece bem as vantagens da utilização dos fluidos de corte, mas nem sempre os utilizam corretamente. Consequentemente, perdas substanciais ocorrem durante o processo. Por isso, uma aplicação adequada do fluido deve ser cuidadosamente preparada para atender as necessidades de cada tipo de operação de retificação.

A aplicação de fluido de corte convencional, o mais utilizado na indústria, não é muito eficiente e pode não ser adequadamente penetrado na interface peça-ferramenta. Além disso, o custo empregado na compra do fluido, filtragem e descarte, representa grande parte do custo total do processo. Outras questões que fazem o fluido de corte comum um motivo de estudo de novas técnicas de lubri-refrigeração é colocar a saúde do operador em risco, reduzir efetivamente os custos do processo, através da reciclagem, redução de consumo ou completa eliminação desses fluidos dos processos de usinagem, e o impacto ambiental negativo causado pelo incorreto descarte, além do mal ao meio ambiente, as leis ambientais estão cada vez mais severas e levando as empresas a se adequarem a área de gestão ambiental e obter selos de qualidade ambiental (por exemplo, ISO 14000). [12, 2, 13].

1.2 Método otimizado da aplicação do fluido de corte

A eficácia de um fluido de corte depende de fatores como o posicionamento do bocal, o projeto do bocal, velocidade e vazão de aplicação. A barreira aerodinâmica gerada pela elevada rotação do rebolo no processo também prejudica a aplicação de fluido refrigerante [14].

De acordo com WEBSTER *et al.* [15], a aplicação do fluido a base de água em velocidades elevadas é muito difícil, comparada aos óleos puros porque sua baixa viscosidade promove um jato disperso (ao se usar bocais convencionais), além de requerer um posicionamento o mais próximo possível da região de corte. Um projeto inadequado do bocal e das tubulações leva à dispersão do jato de fluido durante a tentativa de aumentar a sua velocidade de saída. O desempenho dos fluidos de corte será aumentado se todo o sistema de aplicação (bomba, projeto de bico e tubulações) for otimizado. Segundo CAMPBELL [16], a forma de aplicação do fluido na região de corte está intimamente relacionada com a qualidade final da peça.

Os bocais tradicionais permitem a entrada de ar, causando turbulências no fluido de corte e diminuindo a coerência do jato. Deste modo, a condutividade térmica do fluido é prejudicada, bem como a precisão do jato na região de corte.

Para corrigir essas deficiências, WEBSTER *et al.* [15] desenvolveram um bocal otimizado que tem demonstrado desempenho superior em diversas condições de retificação. O bocal de Webster para retificar peças de largura reduzida tem formato arredondado com paredes internas côncavas, capazes de garantir maior coerência do jato.

WEBSTER *et al.* [15] relatam que elevadas velocidades do jato de fluido são necessárias para permitir uma penetração eficiente na região de corte.

1.3 O método da mínima quantidade de fluido de corte

O uso dos fluidos de corte, apesar de ter importância inegável no processo de retificação, acarreta muitos inconvenientes, como a dificuldade e alto custo da reciclagem e descarte, poluição ambiental e danos à saúde das pessoas expostas. Por esses motivos, estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de minimizar a utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem. Porém, isso deve ser feito sem se perder os benefícios que o emprego desses fluidos proporciona, principalmente em relação ao aumento da vida útil da ferramenta e a melhoria da qualidade da peça [17].

A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) atua como elo entre os métodos de lubri-refrigeração convencionais e a usinagem a seco [18]. Ao estudar a usinagem a seco, que seria o método ideal em termos de custos e meio ambiente, conclui-se que a ausência de lubrificante torna o processo inviável quando se leva em conta a vida útil da ferramenta, os esforços da máquina e a qualidade superficial da peça retificada. Desta forma, a técnica de MQL representa uma alternativa interessante, pois alia o ar comprimido, que é responsável pela refrigeração, a uma vazão extremamente pequena de óleo (até 100 ml/h a uma pressão de 4,0 a 6,0 kgf/cm²), responsável pela lubrificação da interface de contato peça/ferramenta.

Segundo YOUNG *et al.* [19], a MQL pode, dessa forma, representar uma alternativa de um processo mais limpo e menos prejudicial para o meio ambiente.

Segundo TAWAKOLI *et al.* [6], a técnica MQL é uma mistura de ar comprimido com óleo, em forma de aerossol. As gotas de óleo são carregadas pelo ar diretamente para a zona de retificação, proporcionando lubrificação.

KLOCKE *et al.* [20] relatam que o sistema mais importante e mais empregado no meio industrial de

utilização da técnica MQL é o de pressão, em que o refrigerante é bombeado através de uma tubulação distinta da do ar comprimido. Somente no bocal este refrigerante é misturado ao fluxo de ar e, então é direcionado à interface de contato. Este modelo apresenta como vantagem o fato de permitir um ajuste independente das vazões de ar e de lubrificante. O consumo de óleo é reduzido, definido entre 10 e 100 ml/h, haja vista que este método conta com o desempenho refrigerante do ar comprimido. Além disso, a mistura coaxial de refrigerante e ar no bocal previne em grande escala a nebulosidade.

1.4 O rebolo de carbeto de silício (SiC)

Esse tipo de grão convencional é obtido indiretamente por meio da reação química de sílica pura com carvão coque em fornos elétricos. Segundo SALMON [21], o SiC foi o primeiro abrasivo a ser manufaturado. Constitui o mais duro dos abrasivos convencionais, mas tem menor resistência ao impacto que o óxido de alumínio sendo, portanto, mais quebradiço. Segundo MARINESCU *et al.* [22], o carbeto de silício tem um baixo coeficiente de expansão térmica, que diminui com o aumento de temperatura. Além da alta dureza, apresenta uma aresta de corte afiada, o que o qualifica como um bom abrasivo.

Segundo SALMON [21], o SiC é usado para a usinagem de carbeto de tungstênio, ferro fundido, mármore e cerâmicas, alumínio, titânio, latão e cobre. Recomendado para usinagem de materiais não ferrosos ou com excesso de carbono, uma vez tende a reagir com o ferro a temperaturas elevadas, apresentando um desgaste acentuado dos grãos, porém o rebolo é utilizado neste experimento por indicação da empresa SIVAT, considerando a experiências anteriores de campo que a empresa possui.

Apesar do rebolo de carbeto de silício é limitado para a retificação de materiais não ferrosos, devido à sua reatividade com o ferro a altas temperaturas, algumas empresas utilizam este rebolo no processo de retificação “centerless” de passagem de rolos e agulhas para rolamento, por obter ótimos resultados de rugosidade, o que é fundamental para a fabricação de seus produtos. Ao longo de cerca de 10 anos, percebeu-se melhor acabamento das peças com este tipo de rebolo. Apesar de serem realizados vários testes na produção com rebolos de óxido de alumínio, o melhor acabamento foi proporcionado pelo rebolo de SiC. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é estudar a retificação utilizando o rebolo de carbeto de silício na usinagem de metais e observar qual tipo de lubri-refrigeração obtém os melhores resultados, almejando a redução da utilização de fluido de corte, pois como citado no tópico “O fluido de corte no processo de retificação” há algumas desvantagens na utilização de fluido de corte, sendo algumas delas o custo de descarte, impacto no meio ambiente e saúde do operador.

1.5 Efeitos da temperatura na retificação

Danos térmicos ocorridos durante o processo de retificação são denominados queima de retífica. De acordo com MALKIN [23], o processo de retificação requer uma quantidade significativa de energia, por unidade de volume. Em grande parte, essa energia é convertida em calor, o qual é concentrado na região de corte. Existe uma variedade de danos térmicos causados por essa concentração de calor, tais como: queima superficial, alterações microestruturais, aquecimento superficial e subsuperficial da peça, gerando tensões residuais de tração indesejáveis, reduzindo o limite de resistência à fadiga do componente usinado.

Segundo KOHLI *et al.* [24], o calor gerado na zona de retificação é dissipado através da peça, do rebolo, do cavaco gerado e pelo fluido de corte. Dependendo da eficiência destes elementos em dissipar a energia térmica gerada, haverá ou não dano térmico na peça retificada. O controle desses danos requer um conhecimento detalhado dessa partição de energia, do controle da energia introduzida na peça pelo processo de retificação através da otimização das condições de usinagem e da escolha correta do par fluido-ferramenta para o tipo de material que se deseja retificar [25].

Na retificação o processo de esquentar e resfriar a superfície acontece de maneira muito rápida. Somente uma fina camada é afetada, a retificação de aço endurecido com temperaturas acima da temperatura de transformação causa austenitização. Essa transformação pode ocorrer também abaixo da temperatura de transformação, devido a deformação mecânica. A tempera acontece pelo rápido resfriamento da subsuperfície, é comum a formação de uma camada branca na superfície e logo abaixo uma camada mais espessa preta [26].

A camada branca é devida a máxima temperatura na retificação e rápido resfriamento, formada principalmente por martensita, que é muito duro e quebradiço (facilitando a formação de trincas), enquanto a camada preta, que é o revenimento, é causada por uma temperatura um pouco abaixo da temperatura de transformação [26].

Os defeitos de têmpera e retêmpera só podem ser visualizados através de um exame metalográfico

destrutivo: o material deve ser cortado cuidadosamente para não criar danos térmicos adicionais, embutido em resina, lixado, polido, atacado quimicamente e posteriormente visualizado em microscópio. Uma diferença de coloração na microestrutura do material analisado indica a presença ou não de queima e retêmpera. Normalmente, esta camada retemperada possui pequena espessura e coloração mais clara e maior dureza e é seguida de uma região de perda de dureza, mais escura. Essas duas camadas de dureza diferentes podem causar um desgaste prematuro, nucleação de trincas e conseqüentemente a quebra do material.

A queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado. Um aço endurecido, retificado sem queima, apresenta uma pequena diminuição de dureza na superfície devido ao revenimento, por ter atingido temperatura abaixo da linha de austenitização. Ocorrendo a queima, há a tendência de um aumento da dureza superficial e queda da dureza subsuperficial. Este aumento de dureza se deve à reaustenitização seguida de formação de martensita não revenida [23].

Quando a queima superficial se inicia, as partículas metálicas tendem a aderir nos grãos abrasivos do rebolo, tendo como conseqüência o aumento das forças de retificação. Este aumento de forças provoca a deterioração da qualidade superficial da peça, podendo levar ao aumento da perda diametral do rebolo, fazendo com que seu desgaste volumétrico aumente [11].

O próximo tópico “2. MATERIAIS E MÉTODOS” tem o intuito de explicar como foram realizados os experimentos deste trabalho e apresentar quais os equipamentos utilizados para realizar os experimentos e realizar as devidas medições.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em uma retificadora cilíndrica equipada com comando numérico computadorizado (CNC), fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP 515H.

O rebolo utilizado foi de carbeto de silício (SiC) com aglomerante de liga resina fenólica tipo novolaca, granulometria de 100 mesh, alta dureza e dimensões 355,60 mm de diâmetro externo, 25,4 mm de largura e 127mm de diâmetro interno. Esta ferramenta foi fornecida pela empresa SIVAT.

Para realizar o processo de dressagem do rebolo foi utilizado o dressador multigranular do tipo conglomerado da empresa Master Diamond com dimensões 15x8x10 mm. A penetração aplicada no rebolo foi de 2µm por passada, até a eliminação total da camada desgastada durante o ensaio, com uma profundidade total de dressagem de aproximadamente 40 µm. A velocidade de translação do dressador foi de aproximadamente 100 mm/min (aplicada manualmente). Este tipo de dressador gera na superfície de corte do rebolo, apenas microefeito de dressagem; ou seja, não há a geração do macroefeito de dressagem que corresponde a rosca que seria gerada no rebolo, caso se utilizasse um dressador de ponta única. O microefeito de dressagem faz com que os grãos abrasivos sejam fraturados, gerando novas arestas de corte. É importante frisar que as condições de dressagem foram mantidas constantes para todos os ensaios, sendo que o rebolo foi dressado antes de cada uma das operações de retificação, permitindo a análise livre da influência do fenômeno de empastamento do rebolo.

Os corpos de prova consistem em anéis de aço ABNT 52100 temperado e revenido com dureza média de 62 HRC, diâmetro externo de $55 \pm 0,1$ mm, diâmetro interno de $30 \pm 0,1$ mm e espessura de $4 \pm 0,1$ mm, estes foram retificados reduzindo o diâmetro externo em 5 mm.

O fluido de corte utilizado no método convencional foi o óleo solúvel semi-sintético ME-I, fabricado pela empresa Tapmatic do Brasil Ltda, diluído em 6 partes de água, com vazão de 84 L/min e pressão de 0,4 MPa. Para o método otimizado foi utilizado o mesmo fluido com uma vazão de 18 L/min e pressão de 0,6 MPa. Para o método da MQL utilizou-se o Accu-Lube LB 1000 a uma vazão de 100 ml/h e pressão de 0,65 MPa.

O método convencional foi aplicado por um bocal convencional, visto na Figura 1, este foi posicionado aproximadamente a 30 mm de distância.



Figura 1: Bocal convencional de aplicação de fluido de corte. Fonte: MONICI [27] (adaptada).

No método otimizado, tende-se aproximar as lâminas de fluido formadas em seu interior, diminuindo o efeito de turbulência e mantendo uma velocidade do jato capaz de minimizar os impactos com a ferramenta de corte. O método otimizado tem uma vazão menor que o método convencional, porém tem uma pressão maior, o método convencional, devido a sua baixa pressão, não faz com que o fluido entre na interface de retificação devido à barreira aerodinâmica do ar em torno do rebolo, já o método otimizado, devido sua alta pressão, faz com que o fluido consiga romper esta barreira. O bocal utilizado no método otimizado foi posicionado a aproximadamente 30 mm da interface e atingiu toda a largura de retificação, este pode ser visualizado na Figura 2.



Figura 2: Bocal empregado no método otimizado de lubri-refrigeração.

O equipamento de aplicação da MQL é composto por compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar e bocal. O equipamento tem um sistema pulsante de fornecimento do óleo e permite a regulação da vazão de ar comprimido e lubrificante de maneiras separadas. A Figura 3 mostra o bocal empregado nesta técnica, que minimiza a turbulência da mistura ar-óleo e facilita a sua penetração na interface rebolo-peça.

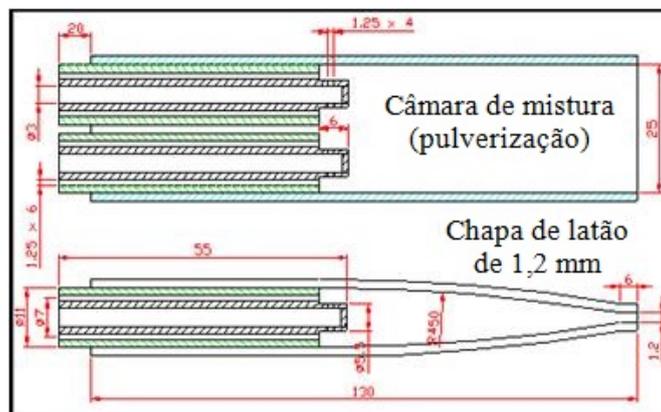


Figura 3: Desenho do bocal utilizado neste trabalho na técnica com MQL (Modificada). Fonte: SILVA *et al.*[28]

Foram empregadas três velocidades de avanço: 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, resultando em três taxas de remoção específica de material 0,72, 1,44 e 2,16 mm³/mm.s. Para cada ensaio foram retificados três corpos de prova a fim de se obter análises estatísticas dos parâmetros para cada condição de usinagem e ter-se uma boa confiabilidade das mesmas.

A velocidade de corte utilizada (v_s) foi de 30 m/s. Foram realizados 60 ciclos de retificação para cada ensaio. A velocidade da peça foi de 0,5 m/s, com tempo de “*spark-out*” de 1 segundo.

A medição da rugosidade foi realizada usando-se um rugosímetro portátil modelo Surtronic 3+ da marca Taylor Hobson mensurado o parâmetro Ra, com “*cut-off*” de 0,25 mm. Os valores de rugosidade apresentados nos resultados são médias de 5 leituras em posições diferentes para cada um dos 3 corpos de prova usados para cada condição de lubri-refrigeração. A medição de desgaste do rebolo foi feita usando um corpo de prova cilíndrico de aço SAE/AISI 1020 para a impressão da superfície de corte do rebolo após o ensaio de retificação de cada peça. Esta medição foi possível pois a espessura da peça é menor do que a espessura do rebolo, causando um degrau no rebolo. Tal degrau foi medido utilizando o paquímetro. A microscopia ótica foi realizada após a preparação dos corpos de prova e foi utilizado microscópio com capacidade de ampliação de até 1000 vezes. A medição da microdureza foi feita através do microdurômetro Vicker. Foram feitas cinco identificações ao longo de cada amostra.

A potência de retificação é obtida pela potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, com monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica, vindas deste motor elétrico. Estes valores são transformados, por um módulo eletrônico, em sinais compatíveis para serem enviados à placa de aquisição de dados e manipulados pelo programa de aquisição de dados, utilizando o software Lab-View®, da National Instruments®.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme proposto, três métodos de lubri-refrigeração foram testados e comparados, neste trabalho, para a retificação cilíndrica do aço ABNT 52100 com rebolo convencional de carbeto de silício resinóide. São eles: método convencional de lubri-refrigeração por emulsão, método otimizado através do bocal de Webster e método MQL.

Nesta seção, será apresentada a comparação entre tais métodos através da integridade superficial dos corpos de prova, analisada pela rugosidade e microestrutura óptica e através das demais variáveis de saída: potência de usinagem, desgaste diametral do rebolo e relação G. Para as variáveis utilizadas, mediante a construção de gráficos de barra, calculou-se os respectivos desvios padrões, os quais foram plotados juntamente com os valores médios reais das três repetições executadas.

3.1 Desgaste diametral do rebolo

Os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo são mostrados na Figura 4.

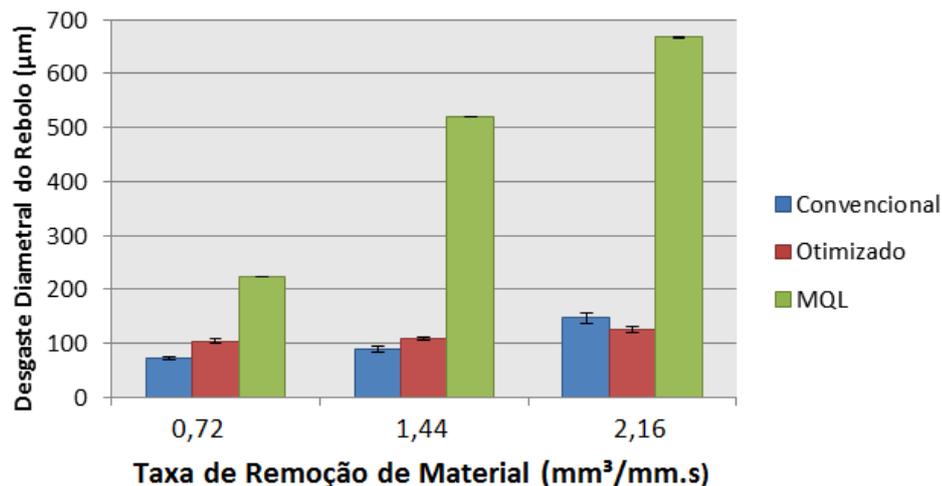


Figura 4: Resultados de desgaste diametral do rebolo para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Conforme pode-se observar, o desgaste diametral do rebolo foi elevado para o método da MQL e, para cada método, há uma tendência de crescimento desse desgaste conforme a taxa de remoção do material também aumenta.

De acordo com SALMON [21], quando submetido a altas temperaturas, o carbeto de silício tende a reagir com materiais ferrosos com baixo percentual de carbono. Tal fato pode explicar o alto nível de desgaste do rebolo, visto que o material retificado foi o aço ABNT 52100 (1,05% de carbono).

Além disso, segundo MALKIN [23], quanto menor a dissipação térmica da região de corte, maior é a perda de resistência do ligante, conseqüentemente, maior o desgaste do rebolo. Este fato, aliado à elevada sensibilidade do ligante resinóide a altas temperaturas, intensifica o desprendimento dos grãos da ferramenta.

Portanto, observa-se que em condições que proporcionam maior temperatura de retificação, o desgaste diametral do rebolo é tanto maior. A sensibilidade do ligante resinóide exige uma condição refrigeração intensa e constante, que não é atendida pelo método da MQL. Em condições brandas de usinagem (taxa de remoção de material de 0,72 mm³/mm.s) o método convencional se mostrou vantajoso para o rebolo de carbeto de silício. Para a condição de usinagem com taxa de remoção de material de 1,44 mm³/mm.s a refrigeração convencional também mostrou-se adequada e a refrigeração otimizada apresentou melhor resultado apenas na condição de corte mais severa, justamente a que necessita de melhor refrigeração, devido a capacidade de

rompimento, pela pressão de aplicação, da camada aerodinâmica causada pela rotação do rebolo.

3.2 Relação G

A relação “G” é um parâmetro adimensional usado para mensurar a eficiência do rebolo na retificação, sendo calculada pela divisão do volume de material removido da peça pelo volume de rebolo gasto, esta relação é de extrema importância na indústria, pois quanto maior for o valor da relação G, mais material da peça está sendo removido com menor desgaste do rebolo.

A Figura 5 mostra a relação G considerando os métodos de lubri-refrigeração em questão, convencional, otimizada e MQL, pelas taxas de remoção de material escolhidas para este trabalho, 0,72, 1,44 e 2,16 mm³/mm.s.

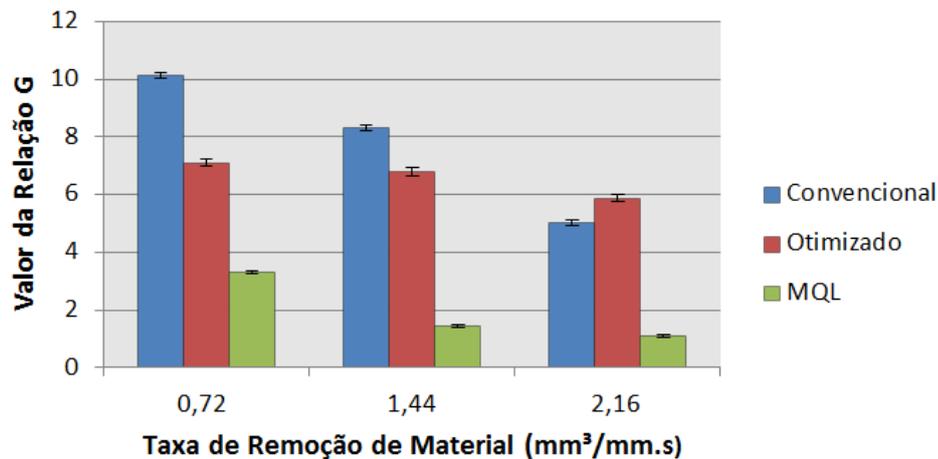


Figura 5: Resultados da relação G para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

É observada a tendência de diminuição da relação G, com relação a maior taxa de remoção de material, também é observado menor variação de valores quando é utilizado o método otimizado, em condição brandas de usinagem, onde a taxa de remoção de material é menor, o método convencional se comportou de maneira melhor. Porém em condições mais hostis tem-se uma grande diminuição da relação G para o método convencional, diferente do método otimizado que não houve grande variação.

O método MQL tem os piores resultados em todas as taxas de remoção de material, mantendo a tendência de menor valor da relação G quanto maior é a taxa de remoção de material, os piores resultados estão relacionados a refrigeração do método MQL ser menos efetiva comparado aos outros métodos.

3.3 Rugosidade

Os corpos de prova retificados a taxas de remoção de material de 1,44 e 2,16 mm³/mm.s utilizando o método de MQL apresentaram abaulamento superficial, devido à elevação da temperatura na região de corte, o que provocou o elevado desgaste do rebolo, impossibilitando a medição das respectivas rugosidades.

Para os demais corpos de prova, foram feitas cinco medições de rugosidade superficial R_a em diferentes pontos das três peças retificadas para cada condição de usinagem. A Figura 6 ilustra a média dessas medições.

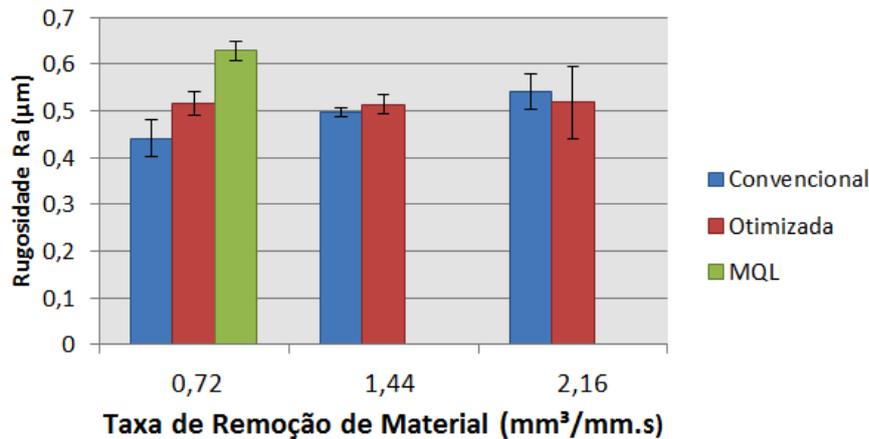


Figura 6: Resultados de rugosidade média para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Os resultados obtidos para a rugosidade dos corpos de prova seguem a mesma tendência do desgaste diâmetro do rebolo apresentado na Figura 4, ou seja, a rugosidade aumenta quando a condição de refrigeração se faz menos eficaz.

Como se pode observar na Figura 6, o intervalo do desvio padrão dos resultados de rugosidade da técnica otimizada abrange também resultados de rugosidade da técnica convencional. Assim, observa-se que o método otimizado apresentou resultados de rugosidade onde não houve diferença estatística aos resultados do método convencional. Esta mesma tendência pode ser observada na Figura 4, para o desgaste do rebolo nessas duas condições de lubri-refrigeração.

A taxa de remoção de material afeta na rugosidade obtida da peça, que se eleva com o aumento desta [29]. Em média houve o aumento da rugosidade à medida que aumentou-se a taxa de remoção de material, porém na refrigeração otimizada manteve-se constante. Entre tanto para as taxas de remoção de material de 1,44 e 2,16 mm³/mm.s não houve diferença estatística entre os métodos otimizado e convencional. Mesmo não sendo possível aferir as rugosidades médias das peças de MQL com 1,44 e 2,16 mm³/mm.s, admite-se que seguiram a mesma tendência, o que pode ser confirmado pelos demais resultados das variáveis de saída apresentados.

Além da ineficácia do MQL em abrandar a temperatura na retificação, para este método observa-se a formação de uma pasta de fluido com cavaco de difícil remoção. Esta pasta influencia no aumento da rugosidade, pois em contato com a peça, provoca riscos na mesma, gerados pelo cavaco. Apesar disso, todos os resultados de rugosidade foram aceitáveis para a operação de retificação (R_a de 0,2 a 1,6 μm) [17].

3.4 Potência na retificação

Os resultados de potência de retificação são apresentados na Figura 7.

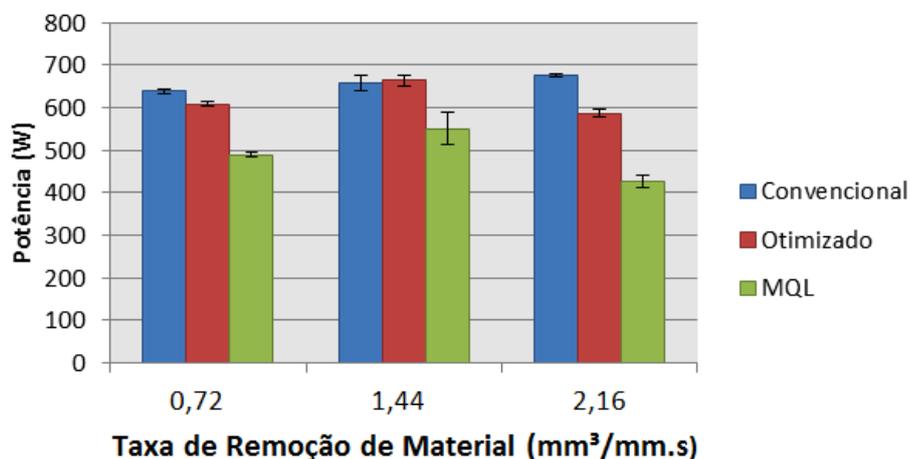


Figura 7: Resultados de potência de retificação para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Nota-se que os melhores resultados para a potência de retificação foram obtidos utilizando-se o método de MQL. Isso ocorreu pelo elevado desgaste do rebolo, observado nos resultados de relação G (Figura 5), que chegou próximo ao valor unitário, significando que o volume de material removido da peça é praticamente o mesmo de volume desgastado do rebolo. Uma hipótese para a diminuição da potência de corte é que a mistura ar/óleo sendo introduzida à alta pressão na interface entre o rebolo e a peça, gera melhor desempenho de penetração e o atrito na interface entre peça e grãos irá diminuir [30]. Com melhor lubrificação e conseqüente menor força de atrito, obtém-se menor potência na retificação.

Os piores resultados foram encontrados quando utilizado o método convencional. Isso ocorre por este método fornecer fluido de forma abundante, mas com baixa pressão, fazendo com que o fluido não atinja a zona de corte de maneira efetiva, devido ao efeito da barreira aerodinâmica próxima a superfície de corte do rebolo. Deste modo, exige-se mais do rebolo, pois deve ser vencida uma maior resistência ao atrito na interface grão/peça, gerando, portanto, maiores valores de potência de retificação.

Para a taxa de remoção de material de 1,44 mm³/mm.s, os resultados de potência de retificação para o método otimizado podem ser considerados sem diferença estatística a esses mesmos resultados para o método convencional de lubri-refrigeração.

3.5 Microestrutura

A análise da microestrutura ótica é uma técnica para se verificar a integridade superficial de uma peça por meio da ampliação da imagem de uma determinada superfície, permitindo assim visualizar e distinguir detalhes e componentes microestruturais não visíveis a olho nu. Esta análise foi realizada também para comparar as superfícies retificadas com a superfície de um corpo de prova não retificado, ou seja, se houve algum dano no material após sua retificação.

Quando a superfície da peça sendo retificada é exposta a altas temperaturas e tempo suficiente, alterações microestruturais podem ocorrer. E nesse aspecto as condições de lubri-refrigeração aliadas ao tipo de material da ferramenta exercem papel fundamental no controle das temperaturas e dissipação do calor.

Os corpos de prova foram preparados devidamente e sua análise foi realizada com microscopia ótica com capacidade de ampliação de até 1000 vezes. Porém, a ampliação mais adequada para o estudo foi de 500 vezes, sendo suficiente para detectar qualquer alteração na superfície.

Está apresentado na Figura 8 duas fotos-micrografias de um corpo de prova não retificado. As mesmas foram tiradas com o intuito de comparar as superfícies das peças retificadas com a peça não retificada.

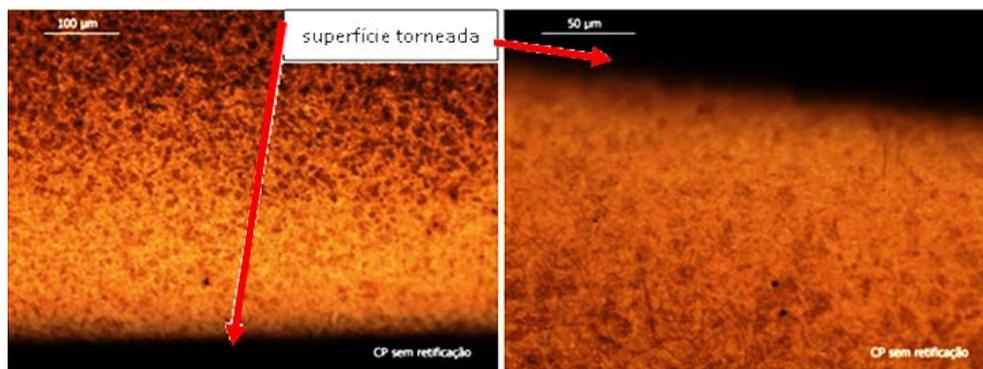


Figura 8: Metalografia de corpo de prova não retificado, Nital 2%. (a) ampliação de 200x. (b) ampliação de 500x.

É possível verificar que a microestrutura apresentada pelo aço ABNT 52100 temperado e revenido é homogênea. A região mais clara na metalografia, próximo à superfície torneada.

A Figura 9 mostra as fotos-micrografias das superfícies retificadas dos corpos de prova do método convencional.

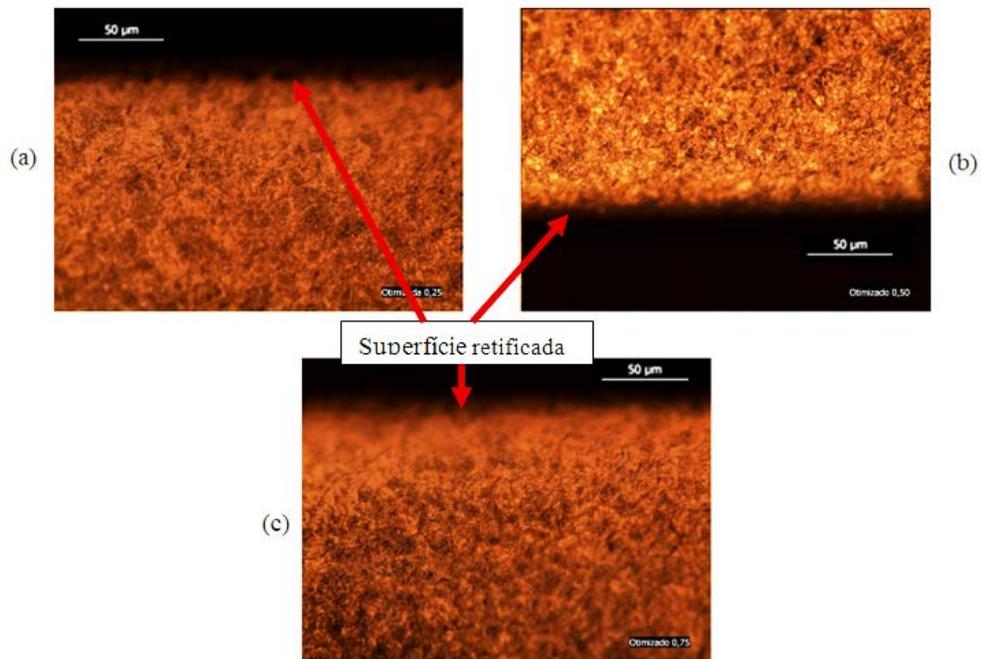


Figura 9: Metalografia dos ensaios com a técnica convencional de lubri-refrigeração, Nital 2%, ampliação de 500x. (a) $Q'w = 0,72 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, (b) $Q'w = 1,44 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, (c) $Q'w = 2,16 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$.

A Figura 10 mostra as fotos-micrografias das superfícies retificadas dos corpos de prova do método otimizado.

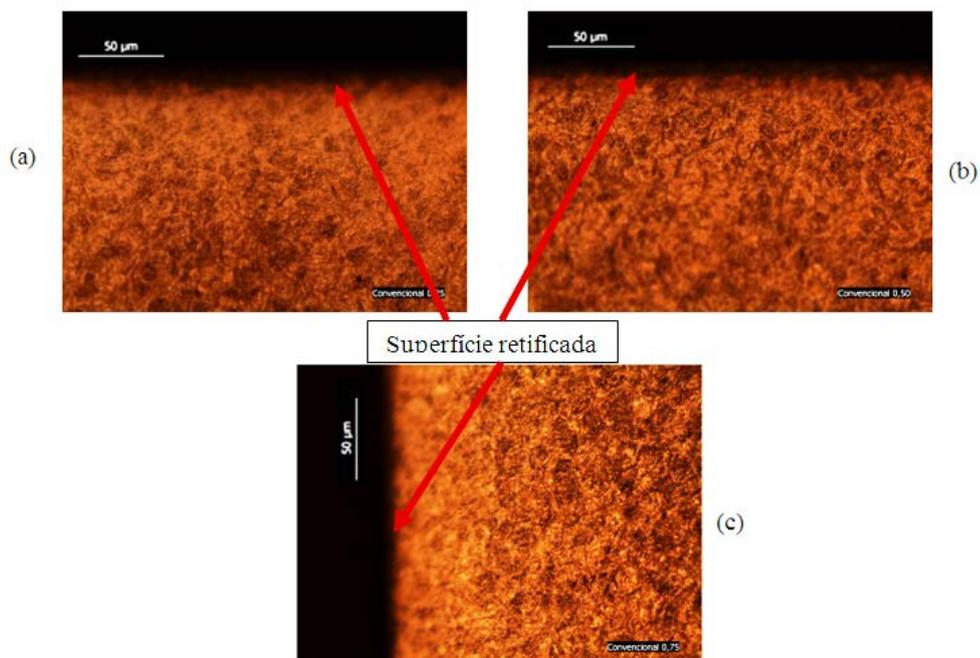


Figura 10: Metalografia dos ensaios com a técnica otimizada de lubri-refrigeração, Nital 2%, ampliação de 500x. (a) $Q'w = 0,72 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, (b) $Q'w = 1,44 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, (c) $Q'w = 2,16 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$.

As fotos-micrografias mostradas na Figura 9 e na Figura 10 demonstram que não houve qualquer alteração microestrutural decorrente do processo de usinagem nas superfícies fotografadas.

A Figura 11 mostra as fotos-micrografias das superfícies retificadas dos corpos de prova do método da MQL.

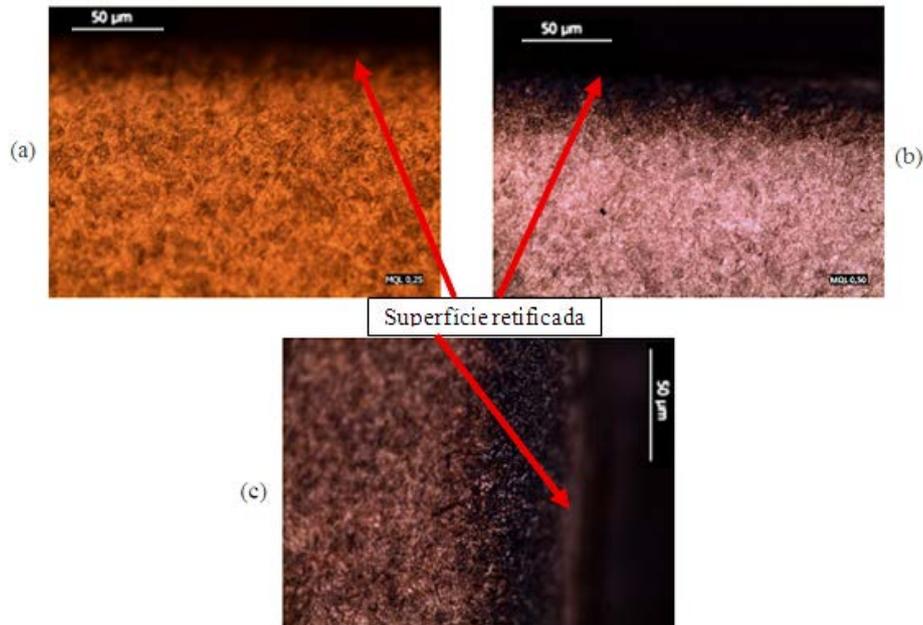


Figura 11: Metalografia dos ensaios com a técnica da MQL, Nital 2%, ampliação de 500x. (a) $Q'w = 0,72 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, (b) $Q'w = 1,44 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, (c) $Q'w = 2,16 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$.

Observa-se uma camada escurecida na superfície dos corpos de prova retificados à taxas de remoção de material de 1,44 e 2,16 $\text{mm}^3/\text{mm.s}$, utilizando o método da MQL. Observa-se uma camada escura gerada na superfície da peça, devido a elevação da temperatura durante a retificação, onde a aplicação de MQL não foi suficiente para refrigerar adequadamente a superfície usinada.

A usinagem empregando a técnica MQL com a taxa de remoção específica de material de 0,72 $\text{mm}^3/\text{mm.s}$ não apresentou danos à peça. Sua superfície é semelhante às superfícies das peças retificadas com os métodos convencional e otimizado.

3.6 Microdureza

A análise de microdureza é complementar à análise de micrografia do material, é feita para reforçar as afirmações feitas na análise de micrografia.

Foram feitas cinco identificações ao longo de cada amostra, para a medição da microdureza. Estas identificações foram distanciadas a um valor específico e constante em relação à superfície, a fim de se construir uma curva de dureza em função da distância relativa essa superfície. Para melhor observação, os resultados foram divididos em três gráficos. Estes resultados são mostrados na Figura 12, Figura 13 e Figura 14.

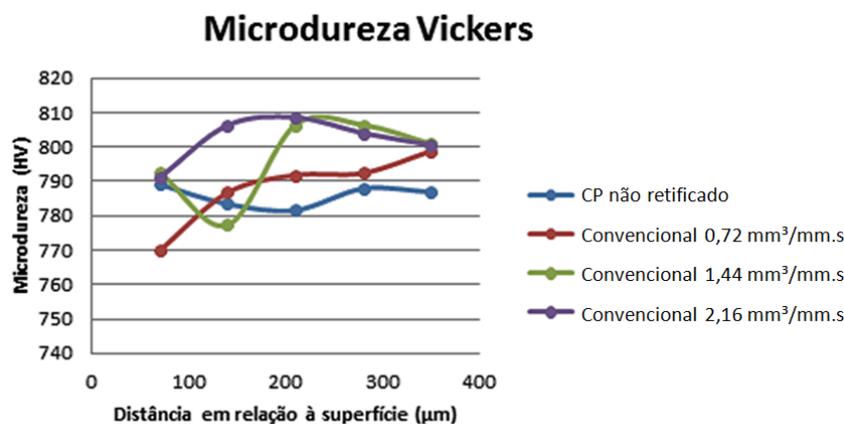


Figura 12: Resultados de microdureza para a condição de lubri-refrigeração convencional.

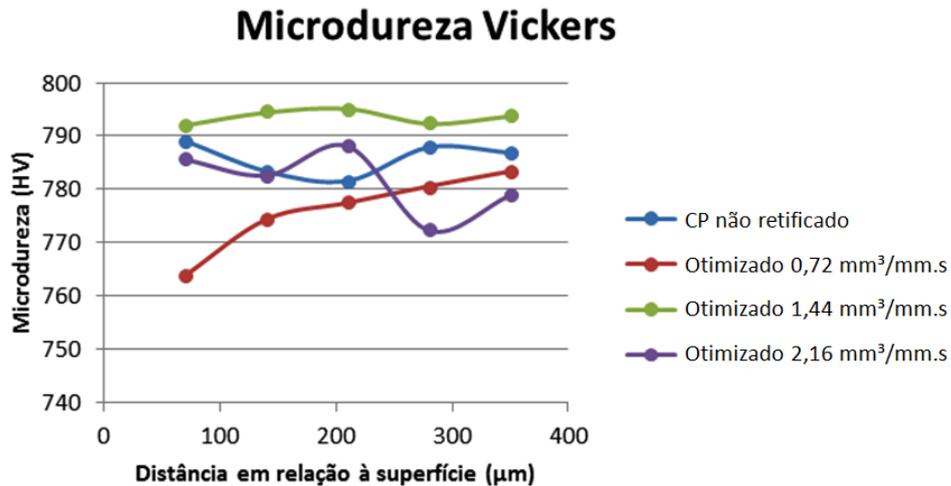


Figura 13: Resultados de microdureza para a condição otimizada de lubri-refrigeração.

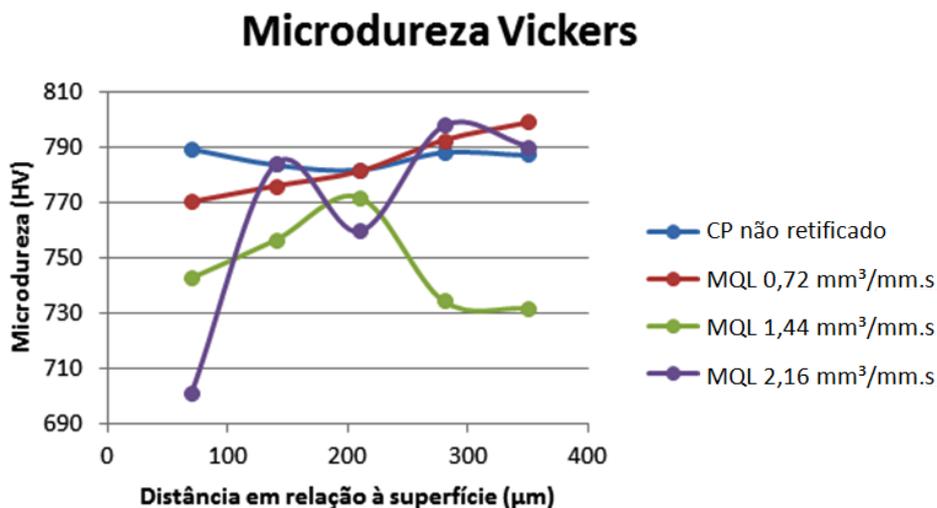


Figura 14: Resultados de microdureza para a condição de lubri-refrigeração da MQL.

A dureza média dos corpos de prova é de 537,5 HV (convertido de Rockwell C para Vickers), podendo chegar a 887,5 HV na condição temperada. As amostras analisadas apresentaram microdurezas dentro dessa faixa.

Como observado na Figura 12 e Figura 13, não houve alterações significativas na microdureza dos corpos de prova relacionados nestas. As diferenças entre as leituras encontradas nesses corpos em relação ao corpo não retificado se devem ao fato de se tratarem de peças diferentes e a dispersão encontrada em todos os resultados é típica de medições de microdureza e, portanto, atende às tolerâncias especificadas nos projetos.

Observando a Figura 14, constata-se que as amostras de retificação utilizando o método da MQL com taxas de remoção de 1,44 e 2,16 mm³/mm.s apresentaram uma maior alteração na medição desse parâmetro, apesar destas continuarem na faixa de microdureza esperada. Foram estas, de fato, as peças mais afetadas pela ação das altas temperaturas, como se pode observar na metalografia apresentada pela Figura 14.

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos, pode se concluir que:

A refrigeração no método da MQL não foi suficiente para minimizar a temperatura no contato peça/rebolo; houve maior desgaste do rebolo e, conseqüentemente, o indesejado abaulamento do corpo de prova.

A microestrutura dos corpos retificados a maiores taxas de remoção apresentou-se alterada.

Os melhores resultados de potência de retificação foram obtidos com a MQL, devido a elevada friabilidade do grão do carbeto de silício.

O método convencional de lubri-refrigeração apresenta, de maneira geral, melhores resultados do que a técnica de MQL, com exceção da potência de retificação.

O método otimizado de lubri-refrigeração apresenta, de maneira geral, resultados estatisticamente similares aos do método convencional.

A técnica da MQL foi inviável, pois seu poder refrigerante não é suficiente para não causar danos às peças retificadas.

O método Otimizado com velocidade de avanço de 0,75 mm/min é o mais viável para a indústria por apresentar melhores resultados à maior taxa de remoção de material (menor tempo de usinagem).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP, empresa INA, do grupo Schaeffler pela doação dos corpos de prova e a empresa SIVAT pela doação do rebolo.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] OLIVEIRA, J.F.G., SILVA, E.J., GUO, C., *et al.*, “Industrial Challenges in Grinding”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 58, n. 2, pp. 663-680, 2009.
- [2] SANCHEZ, J.A., POMBO, I., ALBERDI, R., *et al.*, “Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology”, *Journal of a Cleaner Production*, v. 18, n. 18, pp. 1840-1849, Dec., 2010.
- [3] KOVACEVIC, R., MOHAN, R. “Effect of high speed grinding fluid on surface grinding performance”, In: *Technical paper – Society of manufacturing engineers – All Series*, pp. 919-931, 1995.
- [4] IRANI, R.A., BAUER, R.J., WARKENTIN, A. “A review of cutting fluid application in the grinding process”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 15, pp. 1696-1705, 2005.
- [5] EL BARADIE, M.A. “Cutting fluids: Part I. Characterization”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 56, pp. 786-797, 1996.
- [6] TAWAKOLI, T., HADAD, M.J., SADEGHI, M.H., *et al.*, “An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication - MQL grinding” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 49, n. 12, pp. 924–932, Oct., 2009.
- [7] WEBSTER, J., CUI, C. “Flow Rate and Jet Velocity Determination for Design of a Grinding Cooling System”, In: *1st International Machining and Grinding Conference*, pp. 12-14, Dearborn, MI, USA, Sep., 1995.
- [8] EBBRELL, S., WOOLLEY, N. H., TRIDIMAS, Y. D., *et al.*, “The effects of cutting fluid application methods on the grinding process”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 40, n. 2, pp. 209-223, 2000.
- [9] HRYNIEWICZ, P., SZERI, A. Z., JAHANMIR, S. “Coolant Flow in Surface Grinding with Non-Porous Wheels”, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 42, n. 12, pp. 2347-2367, 2000.
- [10] BRINKSMIEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M. “Friction, cooling and lubrication in grinding.” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 48, n. 2, p. 581-598, 1999.
- [11] FRANÇA, T.V., CASTELHANO, O.C., BIANCHI, E.C., *et al.*, “Aplicação de redes neurais artificiais no monitoramento de parâmetros do processo de retificação cilíndrica”, In: *XI Simpep*, Bauru, SP, Brasil, 2004.
- [12] EMAMI, M., SADEGHI, M.H., SARHAN, A.A.D. “Investigating the effects of liquid atomization and delivery parameters of minimum quantity lubrication on the grinding process of Al₂O₃ engineering ceramics”, *Journal of Manufacturing Processes*, v. 15, n. 3, pp. 374-388, Aug, 2013.
- [13] SILVA, L.A., BIANCHI, E.C., FUSSE, R.Y., *et al.*, “Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant – MQL in grinding”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 47, n. 2, pp. 412-418, Feb., 2007.
- [14] WANG, J. P. *Avaliação da retificação com rebolo de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho*. Tese M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, SP, Brasil, 2008.
- [15] WEBSTER, J.A., CUI, C., MINDEK, R. B., “Grinding fluid application system design”, In: *Annals of the CIRP – Manufacturing Technology*, v. 44, n. 1, pp. 333-338, 1995.

- [16] CAMPBELL, J.D. “Optimized Coolant Application.” In: 1st International Machining and Grinding Conference, Technical Paper, MR95-211, Society of Manufacturing Engineers, pp. 895-904, Dearborn, MI, USA, September, 1995.
- [17] DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 6^a ed. Campinas, Artliber, 2006.
- [18] HEISEL, U., LUTZ, M., SPATH, D., *et al.*, “A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte”, *Revista Máquinas e Metais*, v.34, n. 385, pp. 22-38, 1998.
- [19] YOUNG P., BYRNE G., COTTERELL M., “Manufacturing and the Environment”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 13,n. 7, pp. 488-493, 1997.
- [20] KLOCKE, F., BECK, T., EISENBLÄTTER, G., *et al.*, “Applications of Minimal Quantity Lubrication (MQL) in cutting and grinding”, In: *12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen*, pp. 11-13, January, 2000.
- [21] SALMON, S. C., *Modern Grinding Process Technology*, New York, McGraw-Hill, 1992.
- [22] MARINESCU, I. D., ROWE, W.B., DIMITROV, B., INASAKI, I., *Tribology of abrasive machining processes*, 1 ed., Norwich, William Andrew, 2004.
- [23] MALKIN, S., *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*, 2^a ed. New York, Industrial Press, 2008.
- [24] KOHLI S.P., GUO, C., MALKIN, S., “Energy partition to the workpiece for grinding with aluminum oxide and CBN abrasive wheels”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 117, n. 2, pp. 160-168, 1995.
- [25] GUO, C., MALKIN, S., “Analysis of Fluid Flow through the Grinding Zone”, *ASME Journal of Engineering for industry*, v. 114, n. 4, pp.427-434, 1992.
- [26] ROWE, W.B., *Principles of Modern Grinding Technology*, 2 ed., Kindlinton, William Andrew, 2013.
- [27] MONICI, R.D. *Análise da aplicação de vazões reduzidas de fluidos de corte na retificação de aços endurecidos*. Tese de M.Sc., Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2003.
- [28] SILVA, L. R., BIANCHI, E. C., FUSSE, R. Y., *et al.*, “Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant – MQL in grinding”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 49,n. 2, pp. 412-418, 2007.
- [29] ALVES, M. C. S. *Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada*, Tese de M.Sc., UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2005.
- [30] LIU, J., HAN, R., SUN, Y. “Research on experiments and action mechanism with water vapor as coolant and lubricant in green cutting”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 6, Pp. 687–694,2005.