



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

AS TÉCNICAS DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO (MQL) E REFRIGERAÇÃO OTIMIZADA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO DE CERÂMICAS COM REBOLOS DIAMANTADOS

Marcos Hiroshi Oikawa, marcos_oikawa@yahoo.com.br¹

Rodrigo Santana Destro, rod_destro@hotmail.com¹

Rogério Melo e Sousa, ra611352@feb.unesp.br¹

Rubens Chinali Canarim, rubenscanarim@hotmail.com¹

Rafael Plana Simões, rafael@fc.unesp.br¹

Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br²

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/n., CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

²Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/n., CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

Resumo: Nas últimas décadas as cerâmicas avançadas têm sido exaustivamente utilizadas em aplicações na indústria, sendo que esta utilização da cerâmica na indústria é correspondente a aproximadamente 1% do Produto Interno Bruto. Nos materiais cerâmicos têm-se vantagens não encontradas em outros materiais, como a sua capacidade de operação em altas temperaturas, alta dureza e alta resistência ao desgaste. Assim, são aptos a serem usados em situações que exigem pouco desgaste, tanto em temperatura ambiente quanto em temperaturas elevadas. Para os materiais cerâmicos, há a necessidade de um processo de acabamento da peça. Estima-se que, na fabricação de cerâmicas, o custo com o acabamento é responsável por 50% do custo total da peça. Esse acabamento, na grande maioria dos casos, é feito pelo processo de retificação, único processo economicamente viável que produz superfícies de elevada qualidade e precisão geométrica. O fluido de corte usado no processo de retificação, como em qualquer processo de usinagem, agrega um alto custo no processo atualmente, devido principalmente ao seu manejo e descarte que hoje em dia são regidos e controlados por leis ambientais. Nesse contexto, as empresas vêm buscando otimizações no processo de retificação, tanto para melhorias na qualidade da peça final quanto para o atendimento do desenvolvimento sustentável. Assim, este trabalho apresenta duas novas técnicas de refrigeração (Otimizada e MQL) utilizadas na retificação cilíndrica externa de mergulho de cerâmicas com rebolo diamantado. As analisadas as variáveis de rugosidade, desvio de circularidade, relação G e a técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise dos resultados mostra que a utilização do MQL é viável para certos parâmetros utilizados na pesquisa e que no caso da refrigeração otimizada, temos uma melhora no processo de retificação como um todo, sendo obtidas melhoras significativas na qualidade final das peças e menor desgaste do rebolo.

Palavras-chave: Retificação cilíndrica externa, MQL, refrigeração otimizada, cerâmicas avançadas

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Mamalis et. al. (2002), o número de peças feitas com material cerâmico tem crescido gradualmente no campo da Engenharia Mecânica nos últimos tempos. Esta cerâmica usada em peças mecânicas, denominada “cerâmica avançada”, é diferente da tradicional e conhecida cerâmica. Elas têm vantagens em relação a outros materiais, devido, principalmente, a três características principais: alta dureza e alta resistência ao desgaste e capacidade de operação em altas temperaturas. Um exemplo de utilização são em motores e turbinas de gás, que contém peças que podem suportar altas temperaturas (2000° C), ainda com alta resistência ao desgaste e segurança

De acordo com Irani et. al. (2005), a retificação é praticamente o único processo economicamente viável para a usinagem de materiais cerâmicos após a sinterização, a fim de obter superfícies de elevada qualidade e precisão geométrica. Na fabricação de cerâmicas o custo com o acabamento, devido principalmente ao processo de retificação, é responsável por 50% do custo total da fabricação.

Não diferente da indústria metal – mecânica, a retificação em cerâmicas é feita com usos de fluidos de corte. A função específica do fluido de corte no processo de retificação é a de proporcionar a lubrificação, (reduzindo o atrito da ferramenta com a peça), refrigeração, (removendo o calor gerado pelo atrito), remoção do cavaco gerado pelo processo e proteção das partes metálicas contra a corrosão.

Segundo Young et. al. (1997), ainda se tem um alto custo no uso de fluido de cortes. Estima-se que em um sistema de custos envolvendo as despesas gerais de produção e em particular, as despesas com fluidos de corte representa aproximadamente 17% do custo total de produção.

Além disso, devido à atual preocupação com o meio ambiente, os fluidos de corte ganharam uma atenção especial, devido ao seu alto poder de contaminação. Há, hoje em dia, leis que regem o uso e descarte desses fluidos nas indústrias e em qualquer ramo do setor de usinagem.

Deste modo, este trabalho vem a explorar diferentes métodos lubrificação na retificação cilíndrica externa de mergulho com rebolos diamantados em cerâmicas avançadas, com a técnica do MQL (mínima quantidade de lubrificação) e a técnica da refrigeração otimizada, em comparação com a refrigeração convencional, analisando variáveis de saída de qualidade da peça como rugosidade, circularidade e microestrutura por meio de uma análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), assim como variáveis de saída de desempenho do rebolo por meio da variável relação G

1.1. Retificação em Cerâmicas

Segundo Ramesh et al. (2001), durante o processo de sinterização, há um “encolhimento” do material que não pode ser evitado. Conseqüentemente é necessário um processo de manufatura do material a fim de conseguir a forma e a precisão necessária para o componente. Segundo Liao et al. (1995), a retificação é a mais favorável operação de acabamento dos materiais cerâmicos.

De acordo com Mamalis et. al. (2002), pelas características do material, é evidente que o processo de remoção no material no caso da retificação em cerâmicas difere consideravelmente da teoria da retificação clássica. No primeiro caso, há o chamado “processo de remoção dúctil”, onde a remoção do cavaco é feita por um processo de deformação elasto-plástica. Já no chamado “processo de remoção frágil” da retificação em cerâmicas, o material removido da cerâmica é retirado por um processo de trinca, separação e remoção do material.

Malkin & Hwang (1996) fizeram um estudo sobre a formação de trincas baseada no modelo de indentação, usando uma esfera de pequeno diâmetro como indentador. Ele identificou seis fases de formação das trincas que podem ser descritas em uma seqüência de fatores: (1) A zona plástica de pequeno diâmetro é desenvolvida próxima à superfície. (2) Em seguida, uma pequena trinca longitudinal (trinca média) inicia-se devido ao campo de tensão desenvolvido. (3) A trinca se propaga à medida que a indentação prossegue e aumenta de tamanho. (4) Um decréscimo da carga resulta na redução do tamanho ou no fechamento da trinca longitudinal devido às tensões de compressão. (5) A redução subsequente da carga promove a formação de trincas transversais devido às tensões laterais. (6) Após a liberação da carga, devido ao campo de tensão residual desenvolvido, o tamanho da trinca lateral aumenta, conduzindo à separação do material na forma de cavacos.

1.2. Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Segundo Peters & Decneut (1975) *apud* Oliveira (1988), a espessura da camada de material removida pelo rebolo numa volta completa denomina-se de espessura equivalente de corte h_{eq} , e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho, sendo ainda definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material Q_w' e a velocidade de corte. Desta forma, de acordo com Graf (2004), a espessura equivalente de corte para o processo de retificação cilíndrica externa pode ser representada pela Eq. (1).

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{V_s} = \frac{\pi d_w V_f}{60.1000.V_s} \quad (1)$$

Onde Q_w' é a taxa de remoção específica do material, V_s é a velocidade de corte do rebolo, d_w é o diâmetro da peça, V_f é a velocidade de avanço.

Segundo Malkin (1989), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada com o comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas como: forças de corte, rugosidade, vida da ferramenta etc. Diniz et al. (2000) afirma que um aumento do h_{eq} reflete no respectivo aumento das forças de corte, rugosidade e diminuição da vida do rebolo. Deste modo, busca-se sempre utilizar rebolos cujas ligas suportem elevadas rotações de trabalho a fim de se melhorar a rugosidade, aumentar a vida útil da ferramenta e diminuir os esforços de corte.

1.3. A Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação

Segundo Obikawa et al. (2006), a técnica de mínima quantidade de lubrificação consiste numa mistura de óleo e ar comprimido, que formando uma névoa, é aplicada na região do corte, no lugar da convencional inundação de fluidos de corte, miscíveis ou imiscíveis em água.

De acordo com Heisel et al. (1998) e Klocke et al. (2001) os sistemas de Mínima Quantidade de Lubrificação podem ser classificados de três formas distintas. A primeira delas consiste no sistema de pulverização de baixa pressão, em que o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar e levado até a superfície. Estes sistemas apresentam um fluxo volumétrico de refrigerante entre 0,5 a 10l/h. O segundo modelo utiliza bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma quantidade definida de lubrificante até a superfície sem a presença de um fluxo de ar comprimido. Estes sistemas são utilizados em processos intermitentes, com taxas de fluxo definidas entre 0,1 e 1ml por ciclo, podendo atingir 260 ciclos por minuto. O terceiro e o mais empregado sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação é o de pressão, que será utilizada neste trabalho, em que o refrigerante é bombeado por uma tubulação distinta do ar comprimido. Somente no bocal este refrigerante é misturado ao fluxo de ar e, então direcionado a interface de contato peça-ferramenta. Este modelo é bastante interessante pelo fato de permitir um ajuste independente das vazões de ar e de lubrificante. O consumo de óleo neste método é reduzido, definido entre 10 e 100 ml/h, já que o mesmo conta com o desempenho refrigerante do ar comprimido. Outro aspecto positivo deste sistema se concentra no fato da mistura coaxial de refrigerante e ar no bocal prevenir em grande escala a nebulosidade.

Heisel et al. (1998) relata que o fato de que os sistemas de Mínima Quantidade de Lubrificação requererem um espaço muito pequeno para instalação, ele pode ser fixado em diversas posições. Deste modo, o sistema de MQL torna-se flexível podendo ser aplicado tanto na retificação quanto em outros processos de corte.

1.4. A Técnica da Refrigeração Otimizada

A técnica da lubri-refrigeração otimizada consiste na utilização de um bocal otimizado, diferente dos bocais convencionais, e de outros acoplamentos a fim de proporcionar uma nova forma de aplicação de fluido de corte na região de interface entre peça e ferramenta.

Segundo Campbell (1995) existem alguns fatores que afetam diretamente a eficiência da aplicação do fluido de corte, incluindo-se o tipo e a velocidade do fluido utilizado, o posicionamento do bocal, o ângulo de abertura do bocal, o projeto do bocal, a utilização de um dispositivo para quebrar a barreira de ar envolta do rebolo e o tamanho dos grãos abrasivos do rebolo.

De acordo com Guo & Malkin (1992), a aplicação de fluidos de corte é pouco eficiente nos métodos convencionais, especialmente sob condições de aplicação severas, já que a energia armazenada durante a sua aplicação não é suficiente para vencer a força centrífuga do rebolo ou penetrar na barreira de ar formada pelo rebolo.

Segundo Webster (1995) a otimização do processo de retificação implica não só na adoção do tipo mais efetivo de fluido de corte e sua mais adequada forma de aplicação. A qualidade da peça e o custo estão intimamente relacionados com a forma de aplicação do fluido de corte na região de interface rebolo-peça. Um jato de fluido incidindo de forma direta sobre a região de corte é capaz de reduzir de forma significativa a temperatura nessa região, porém altas velocidades do jato de fluido são necessárias para a penetração do fluido de maneira efetiva, na região de corte. Também deve ser levada em consideração a abertura geométrica do bocal na entrada e saída do fluido, bem como as superfícies internas, sendo que se as mesmas forem de superfície geométrica côncava apresentarão um melhor efeito, pois estas tendem a aproximar as lâminas de fluido que se formam no interior do bocal (isto diminui o efeito de turbulência do fluido de corte). O bocal deve ser projetado de forma a causar a menor ocorrência de turbulência possível durante a saída do fluido.

Segundo pesquisas realizadas por Webster (1995), a velocidade com que o fluido penetra na região de corte pode minimizar os impactos fluido/ferramenta durante a penetração do fluido na região de corte. Concluiu-se que quando a velocidade do fluido é igual à velocidade periférica do rebolo, o fluido tende a penetrar na região de corte com a mesma velocidade do grão abrasivo, não havendo assim interferências significativas por parte do fluido durante a remoção de material.

Os bocais devem ser projetados de forma a ocasionarem a menor ocorrência possível de turbulência durante a saída do fluido. Muita importância é atribuída ao raio de contração, que expressa a razão entre os diâmetros de entrada e saída do bocal, onde tal razão apresenta de maneira significativa a possibilidade da ocorrência de turbulência no bocal.

Irani et. al. (2005) listou alguns tópicos sobre o melhor *design* de construção do bocal:

- O acabamento da superfície do bocal deve ser liso e côncavo.
- O bocal deve ter bordas afiadas na saída.
- O bocal deve ter uma elevada relação de contração, da entrada à saída.
- Quinas e mudanças bruscas no diâmetro do bocal devem ser evitadas.
- A performance não é muito sensível ao ângulo do bocal, contanto que o jato seja direcionado à região de corte.
- Pode-se não haver necessidade de um bocal perfilado desde que haja um grande bocal redondo eficiente ou vários bocais redondos eficientes pequenos. Se um bocal retangular precisar ser usado, uma razão de aspecto de 5 para 8 é recomendada.
- Uma tubulação reta colocada entre o condicionador de fluxo e a saída do bocal é necessária para provocar uma condição de velocidade e fluxo uniforme.

- Quanto mais baixo o número de Reynolds, mais eficiente é o jato.
- Rebolos de alta porosidade apresentam uma maior taxa de remoção de material quando usados fluidos à base de água em relação aos óleos integrais. Entretanto, quando se usa rebolos densos, o contrário é verificado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa *SULMECÂNICA*, modelo RUAP 515 H equipado com comando numérico computadorizado CNC.

Os corpos-de-prova consistem de cilindros de uma alumina comercial, composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos fundentes como SiO₂, CaO e MgO. A densidade aparente deste material é de 3,7 g/cm³.

O rebolo utilizado foi um rebolo de liga resinóide, com dimensões de 350mm (diâmetro externo) x 15mm (largura) x 5mm (camada), diâmetro interno de 127mm, dureza da liga N, concentração 50 e tamanho de grão de 126 mm (D 107 N 115 C50) da empresa Nikkon Ferramentas de Corte LTDA.

O fluido de corte utilizado foi uma emulsão de 5 % em água do óleo semi-sintético ROCOL 4847 Ultracut 370. Neste fluido de corte já há, na sua composição, anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, entre outros. Entretanto, o fluido foi complementado com um anti espumante também da ROCOL, de especificação Ultracut AF(S) e um bactericida.

O equipamento de lubrificação otimizada consiste na utilização do mesmo fluido usado na refrigeração convencional, mas com a utilização de uma bomba mais potente, um medidor de vazão, e um bocal de metal soldado projetado especialmente para este fim.

O equipamento para a aplicação da mínima quantidade de lubrificante é o baseado no princípio de pressão. 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 será 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 kgf/cm².

Para cada ensaio foram utilizados 13 corpos-de-prova. Foram utilizadas 3 espessuras equivalente de corte distintas para cada tipo de refrigeração.

Os resultados para a circularidade foram obtidos para todos os ensaios, sendo que para cada ensaio, obteve-se uma evolução do erro de circularidade com 5 medições em posições diferentes do corpo-de-prova retificados. Para obtenção dessa evolução, foram medidas os corpos-de-prova 1, 4, 7, 10, 13. A medição do desvio de circularidade foi realizada em uma máquina específica para controle de tolerâncias geométricas Tayrond 31c marca Taylor Hobson.

Os valores de rugosidade apresentados são médias de 5 medições de rugosidade em posições diferentes, para cada um dos 3 ensaios realizados para cada condição de lubri-refrigeração. Para a análise também foram incluídos os seus respectivos desvios-padrão. Novamente, foram tomados para análise da evolução os corpos-de-provas de número 1, 4, 7, 10, 13. A captação da rugosidade superficial foi obtida por meio de um rugosímetro Surtronic 3+ da marca Taylor Hobson, que fez a medição direta do parâmetro R_a.

As análises de microestrutura (microscopia de varredura - MEV) foram realizadas por terceiros, necessitando apenas de uma devida preparação dos corpos-de-prova, incluindo o corte e a fixação dos corpos em uma resina e limpeza para a realização da análise.

O desgaste diametral do rebolo foi medido a fim de se obter a relação G. A obtenção da relação G se deu por meio da medição do desgaste do rebolo com cálculos de volume desgastado de material. O desgaste do rebolo foi possível de ser medido devido a não utilização da largura total do rebolo, onde a largura do rebolo utilizável era de 15 mm e a largura da peça 4 mm. Desta forma o ressalto produzido no rebolo após o ensaio possibilitou a marcação do desgaste em um corpo-de-prova cilíndrico. A medição do desgaste foi feita utilizando-se um aparelho de deslocamento TESA digital, modelo TT10, com precisão de 1 micrometro.

Para os ensaios foram estabelecidos as seguintes condições de usinagem: 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 5 segundos, largura de retificação de 4 mm, profundidade de dressagem (a_d) de 0,02 mm, vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 22 l/min, vazão do fluido de corte no MQL de 100 ml/h, pressão do ar no MQL de 8 bar, velocidade de saída do ar de 30 m/s no bocal, velocidade de saída do fluido de corte na refrigeração otimizada 30m/s.

As três velocidades de avanços escolhidas foram: 0,75mm/min, 1mm/min e 1,25mm/min.

Desse modo, de acordo com a Eq. (1), as três espessuras equivalentes de corte, denominadas apenas por h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3} foram: $h_{eq1}=0,0707\mu\text{m}$, $h_{eq2}=0,094\mu\text{m}$ e $h_{eq3}=0,118\mu\text{m}$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados, para cada condição de retificação realizada, das variáveis de saída: desgaste diametral e integridade superficial. Para a análise da integridade superficial avaliou-se a microestrutura por meio do MEV, o erro de circularidade e rugosidade.

Ressalta-se que para as variáveis analisadas, mediante a construção de figuras de barra, calcularam-se os respectivos desvios-padrão, os quais foram inseridos juntamente com os valores médios reais das três repetições executadas.

3.1. Rugosidade

A Figura (1) apresenta 3 análises comparativas de rugosidade, para h_{eq1} , h_{eq2} , e h_{eq3} , comparando a refrigeração convencional, a lubrificação com MQL e a técnica da refrigeração otimizada. Os resultados encontrados são os valores das médias dos 3 ensaios de repetibilidade juntamente com os respectivos desvios-padrão.

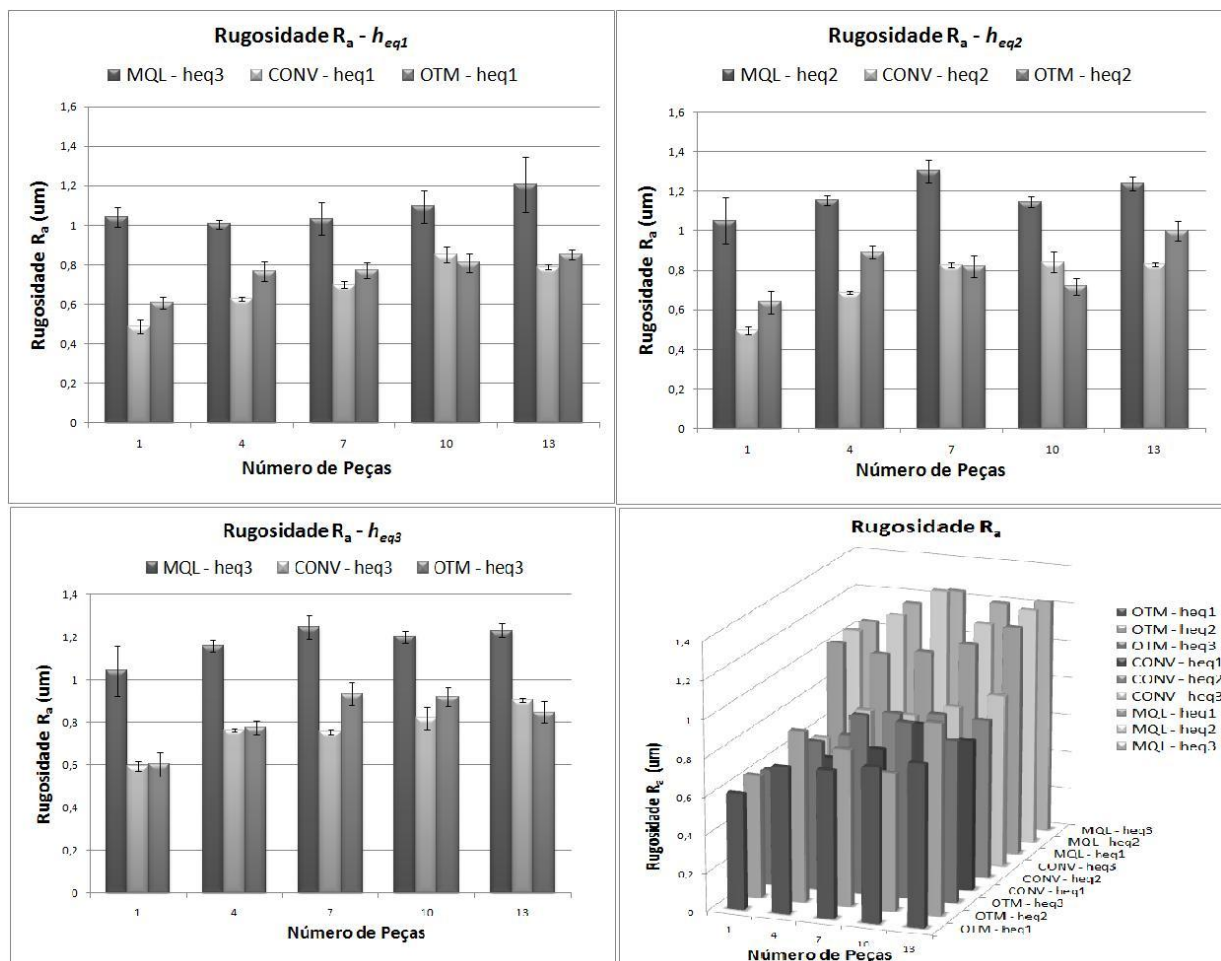


Figura 1. Rugosidade R_a para os 3 tipos de refrigeração

Analisando-se os resultados obtidos da Fig. (1) observa-se de uma maneira geral que os valores de rugosidade foram menores para a lubri-refrigeração convencional e otimizada em comparação da técnica do MQL, possivelmente provocada pela melhor remoção de cavaco da zona de corte feita pela refrigeração convencional.

No caso da refrigeração com a técnica do MQL, é formada uma “borra” de fluido com cavaco de difícil remoção, que mesmo ar comprimido a altas velocidades tem dificuldades de retirar. Esta borra de cavaco remanescente na zona de corte afeta consideravelmente os valores de rugosidade da peça.

3.2. Circularidade

Na Figura (2) são apresentados 3 análises comparativas de circularidade, para h_{eq1} , h_{eq2} , e h_{eq3} , comparando a refrigeração convencional, a lubrificação com MQL e a técnica da refrigeração otimizada. Os resultados encontrados são os valores das médias dos 3 ensaios de repetibilidade juntamente com os respectivos desvios-padrão.

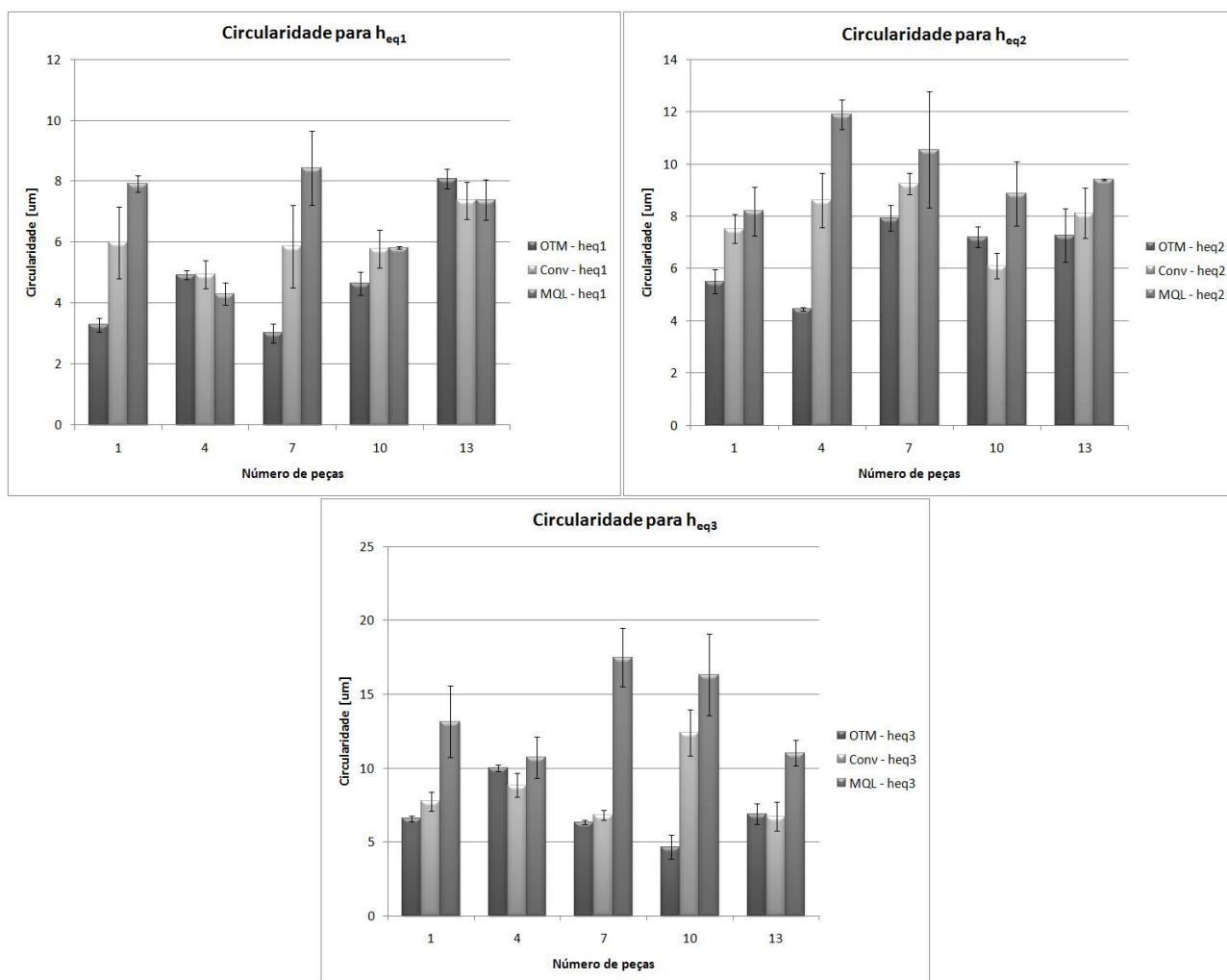


Figura 2. Erro de Circularidade para os 3 métodos de refrigeração.

Pode-se verificar, com a Fig. (2) de circularidade para h_{eq1} , que nos pontos 1, 7 e 10, a refrigeração otimizada apresentou estatisticamente melhores resultados. No ponto da peça 1, houve realmente a diferença entre as refrigerações, sendo a técnica da refrigeração otimizada a que obteve melhores resultados, seguida da técnica da refrigeração convencional, logo após a técnica do MQL. De modo geral, para circularidade de h_{eq1} há uma tendência de melhores resultados para a refrigeração otimizada, seguida da refrigeração convencional e logo após da técnica do MQL, porém, estatisticamente, não é possível fazer esta distinção em todos os pontos, somente em alguns pontos.

Para a Figura (2) com circularidade para h_{eq2} , pode-se notar que apenas no término da peça 4 pode-se inferir estatisticamente a tendência da refrigeração otimizada como a refrigeração que obteve melhores resultados dentre os três métodos de refrigeração, seguida pela refrigeração convencional, logo após a técnica do MQL. No fim do ciclo de retificação da peça 1, pode-se inferir que a refrigeração otimizada obteve melhores resultados comparado com os outros dois métodos de refrigeração. Nos outros casos, há apenas a tendência da média dos valores de circularidade obtida, não sendo possível afirmar que esta tendência é real, devido aos respectivos desvios-padrão obtido não mostrarem uma visível diferença no gráfico.

Analisando a Figura (2) com circularidade para h_{eq3} , pode-se notar que a refrigeração convencional e a refrigeração otimizada mostraram melhores no ciclo de retificação da peça 1, 7, 10, comparada com a técnica da refrigeração com MQL, sendo que nestes casos, a refrigeração otimizada se mostrou estatisticamente melhor dentre os três métodos de refrigeração.

Pode-se observar, no geral, que a técnica de refrigeração com MQL não apresentou diferenças de erros de circularidade significativos no que se diz respeito às condições mais brandas (h_{eq1} e h_{eq2}). Para a condição mais severa (h_{eq3}), somente até o ciclo de retificação da peça 4 a técnica do MQL se mostra sem diferenças significativas.

3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura (3) representa os resultados obtidos para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) obtidos para as condições de lubri-refrigeração convencional, com espessuras equivalente de corte respectivamente de h_{eq1} , h_{eq2} , h_{eq3} com zoom de 1000 vezes.

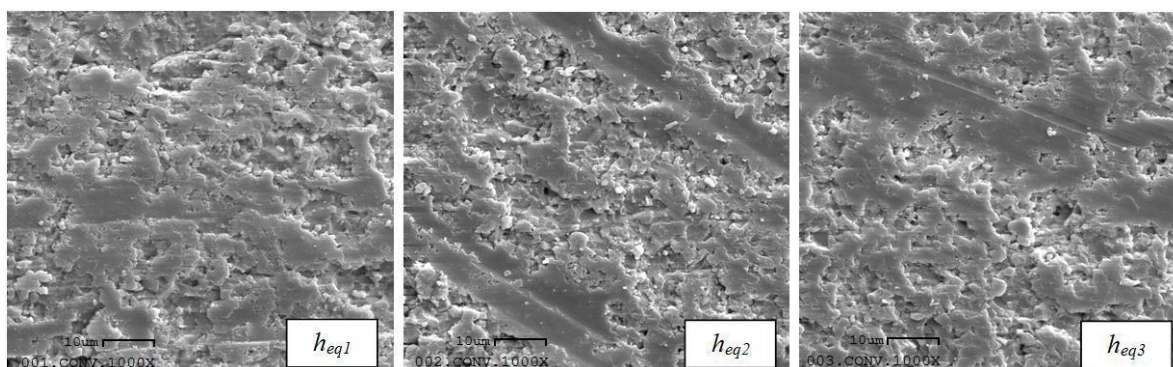


Figura 3. MEV para a refrigeração convencional para h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3}

Percebe-se que na refrigeração convencional, o modo frágil de remoção do material predominou no processo, caracterizado microcrateras parte da superfície retificada. Percebe-se uma tendência ao modo dúctil de remoção à medida que se aumenta a espessura equivalente de corte, proporcionando menores crateras e uma melhoria no acabamento da peça.

A Figura (4) representa os resultados obtidos para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) obtida para as condições da técnica da refrigeração otimizada, com espessuras equivalente de corte respectivamente de h_{eq1} , h_{eq2} , h_{eq3} com zoom de 1000 vezes.

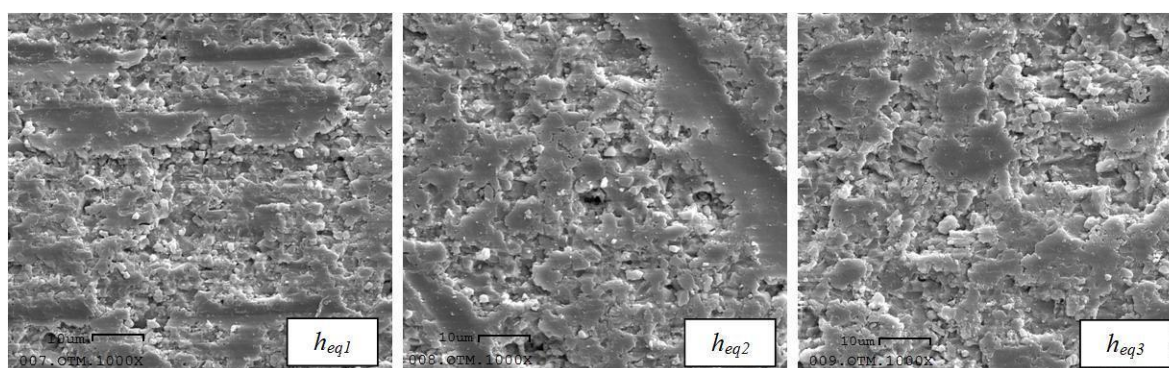


Figura 4. MEV para a refrigeração otimizada para h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3}

Percebe-se que, na refrigeração otimizada, assim como na refrigeração convencional, o modo frágil de remoção do material predominou no processo. Também se percebe uma tendência ao modo dúctil de remoção a medida que se aumenta a espessura equivalente de corte, proporcionando uma melhoria no acabamento da peça.

A Figura (5) representa os resultados obtidos para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) obtidos para as condições de lubrificação com a técnica do MQL, com espessuras equivalente de corte respectivamente de h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3} com zoom de 1000 vezes.

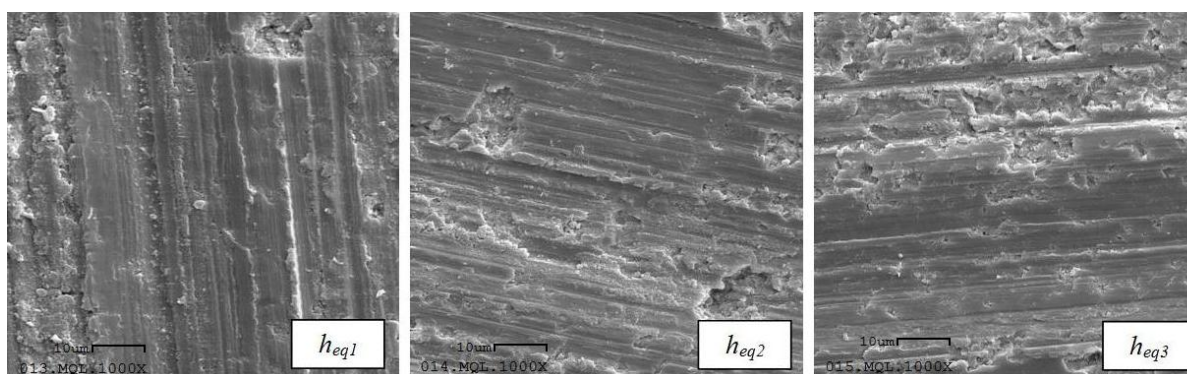


Figura 5. MEV para o MQL para h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3}

O modo de remoção predominante dos corpos-de-prova usinados utilizando a técnica do MQL foi o modo de remoção dúctil do material, o que proporciona ótimas condições de acabamento superficial no que diz respeito à resistência do material devido à presença reduzida de microtrincas, agente concentradores de tensão. Analisando as

micrografias, pode-se observar que quanto menor a espessura equivalente de corte, mais dúctil é o processo de remoção do material.

A melhor caracterização da superfície da peça retificada com a refrigeração utilizando a técnica do MQL em relação à peça retificada com a refrigeração convencional pode ser explicada pelo maior poder lubrificante do óleo utilizado na técnica do MQL em comparação ao fluido de corte emulsificado utilizado na refrigeração convencional.

3.4. Relação G

A Figura (6) mostra os resultados obtidos de Relação G para os três tipos de lubrificação.

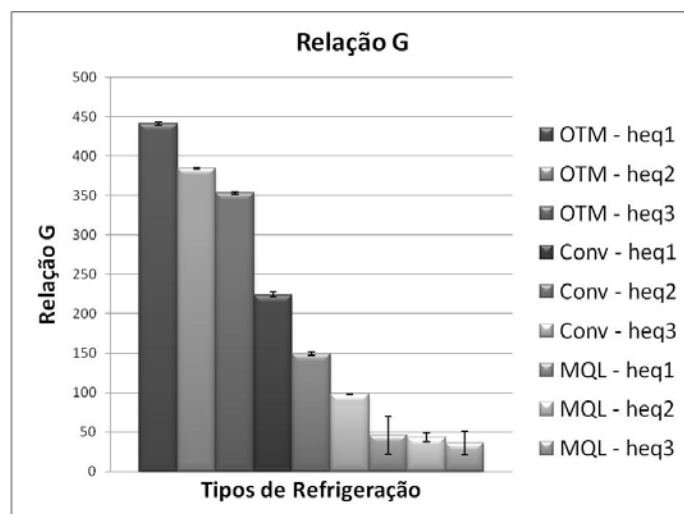


Figura 6. Relação G para os 3 tipos de lubrificação e h_{eq}

Pela análise do gráfico é possível notar que os maiores valores obtidos para a relação G foram para a refrigeração otimizada, seguida pela refrigeração convencional, depois para a técnica do MQL. Um dos possíveis causadores destes resultados é a menor dissipação térmica da região de corte provocada pela técnica do MQL, que faz principalmente o ligante perder sua resistência, fazendo o rebolo se desgastar mais. Analogamente, como na refrigeração otimizada a dissipação térmica é maior dentre os três casos, o ligante não perde sua resistência, fazendo o rebolo se desgastar muito pouco, o que aumenta a relação G. Pode-se notar que para a técnica da refrigeração otimizada e refrigeração convencional, a espessura equivalente de corte é um grande fator influenciador no desgaste do rebolo, conseqüentemente na relação G. Analisando o gráfico, pode-se notar que quanto maior a espessura equivalente de corte, maior o desgaste do rebolo, conseqüentemente, menor é a relação G.

Para a técnica do MQL a espessura equivalente de corte não influenciou efetivamente na relação G. Isso pode ser explicado por outros fatores que provavelmente predominaram para o desgaste do rebolo, como, por exemplo, a menor dissipação térmica na zona de corte, o que fez a influência da espessura equivalente de corte se tornar praticamente imperceptível.

Além disso, há um agravante na refrigeração com MQL, o qual há a formação de uma “borra” de cavaco com óleo que a força centrífuga do rebolo não consegue eliminar. Ela entope os poros do rebolo e prejudica a sua ação de corte. Esta provoca um desgaste excessivo do rebolo, o que projeta no seu aumento do desgaste, diminuindo relação G para esta técnica como um todo.

Para a técnica da refrigeração otimizada, obteve-se, em geral, um aumento significativo da relação G, sendo que a para a condição mais branda, h_{eq1} , obteve-se uma melhora de quase 200% em comparação a melhor condição da refrigeração convencional. Também se pode notar a influência da espessura equivalente de corte. Quanto maior a espessura equivalente de corte, maior o desgaste do rebolo, conseqüentemente menor a relação G.

4. CONCLUSÕES

Uma análise geral dos resultados indica que a técnica da refrigeração otimizada é a que garante melhores resultados, tanto em acabamento da peça, quanto economia de ferramenta de usinagem (rebolo).

Ainda segundo uma análise geral, a técnica do MQL demonstrou ser viável como uma alternativa para a substituição da lubri-refrigeração convencional para alguns casos de usinagem que não implicam em tolerâncias maiores que as encontradas neste trabalho. Analisando a integridade superficial das peças retificadas com a técnica do MQL com relação à técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV), observou-se que esta apresentou o modo de arrancamento dúctil de material. Assim, o MQL apresentou melhores resultados de superfície quanto às trincas, comparados a refrigeração convencional e otimizada.

A condição que apresentou os melhores resultados foi a de menor espessura equivalente de corte, h_{eq1} (velocidade de avanço de 0,75mm/min), tanto para a refrigeração otimizada quanto para a técnica do MQL.

Com relação à rugosidade a lubri-refrigeração convencional e otimizada não obtiveram diferenças significativas. A técnica do MQL apresentou valores relativamente maiores, porém, os valores obtidos principalmente com o h_{eq1} , (velocidade de avanço a 0,75mm/min.) foram satisfatórios no processo de retificação cilíndrica externa de cerâmicas com rebolos diamantados.

Em relação ao erro de circularidade, não ocorreram diferenças significativas entre a lubri-refrigeração convencional, otimizada e a condição de MQL com o h_{eq1} e h_{eq2} (velocidades de avanço de 0,75mm/min. e 1mm/min.).

Com relação à variável relação G, a refrigeração otimizada obteve valores relativamente maiores em relação as duas outras técnicas de refrigeração estudadas. A técnica do MQL por sua vez, apresentou valores relativamente menores em comparado com as outras técnicas de refrigeração.

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

- CAMPBELL, J. D., 1995 “Optimized Coolant Application”, 1st International Machining and Grinding Conference, Technical Paper, Society of Manufacturing Engineers, p. 895-904.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., 2000, “Tecnologia da usinagem dos materiais”. Artiber Editora Ltda., Campinas, Brasil, 2ª Edição, p.225-244.
- GRAF, W., 2004, “Cylindrical Grinding”. WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p.
- Guo, C., Malkin, S., 1992 "Analysis of Fluid Flow Through the Grinding Zone", Asme Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, P.427.
- Heisel, U., Lutz, D., Wassmer, R., Walter, U., 1998, “A Técnica da Quantidade Mínima de Fluidos e sua Aplicação nos Processos de Corte”. Revista Máquinas e Metais, N.386, pp.22-38.
- IRANI R.A., BAUER R.J., WARKENTIN A., 2005, “A review of cutting fluid application in the grinding process”, International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 45, pp1696–1705.
- KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; PÖHLS, M., 2001, “Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding”, Institute of Machine Tools and Production Engineering, University of Technology.
- LIAO, T.W.; SATHYANARAYANAN, G.;PLEBANI L.J.; THOMAS, M.U.; LI, K., 1995, “Characterization of grinding-induced cracks in ceramics”. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 37, No. 9, pp. 1035-1050
- MALKIN S., HWANG T. W., 1989, “Grinding mechanism for ceramics”, Annals CIRP, Vol. 45(2), pp. 569, 1996.
- MALKIN, S., 1989, “Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives”, 1ª edição, Chichester, Ellis Horwood Limited.
- MAMALIS A. G.; KUNDRAK J., GYANI K.; HORVATH M.; 2002, “The Precision Grinding of Advanced Ceramics. International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, Vol. 20, pp. 255–258
- OBIKAWA T., KAMATA Y., SHINOZUKA, J., 2006, “High-speed grooving with applying MQL”, International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 46, pp. 1854–1861.
- OLIVEIRA, J. F. G., 1998. “Tópicos avançados sobre o processo de retificação”, Reimpressão em setembro de 1998.
- RAMESH K.; YEO S. H.; GOWRI S.; ZHOUL L.; 2001, “Experimental Evaluation of Super High Speed Grinding of Advanced Ceramics”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 17, pp 87–92.
- WEBSTER, J. A., 1995, “Selection of coolant type and application technique in grinding. Supergrind”, University of Connecticut, USA, p. 205-220.
- YOUNG P.; BYRNE G.; COTTERE M.; 1997, “Manufacturing and the Environment”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, pp. 488-493.

7. DIREITOS AUTORAIS

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



MIMINUM QUANTITY OF LUBRIFICATION (MQL) AND OPTIMIZED COOLING TECNIQUE IN EXTERNAL CYLINDRICAL GRINDING WITH DIAMOND GRINDING WHEEL.

Marcos Hiroshi Oikawa, marcos_oikawa@yahoo.com.br¹
Rodrigo Santana Destro, rod_destro@hotmail.com¹
Rogério Melo e Sousa, ra611352@feb.unesp.br¹
Rubens Chinali Canarim, rubenscanarim@hotmail.com¹
Rafael Plana Simões, rafael@fc.unesp.br¹
Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br²
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br¹

¹São Paulo State University—UNESP, Department of Mechanical Engineering, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/no., Vargem Limpa, Bauru, CxPostal 473, CEP 17033-360

²São Paulo State University—UNESP, Department of Electrical Engineering, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/no., Vargem Limpa, Bauru, CxPostal 473, CEP 17033-360

Abstract. *The ceramic materials have many advantages over other materials, including three main: capability of operating at high temperatures, high hardness and high wear resistance. For this reason, they are able to be used in situations that require little wear, both at ambient temperature or at elevated temperatures. These properties have made the advanced ceramics play an important role in industry applications in recent decades. However, the aggregated cost in the piece finishing is still very high. This finish is usually done by the grinding process, the only economically viable process that produces pieces with high surface quality and geometric precision. Then, the companies are looking for to optimize the grinding process exploring other forms of lubrication. Thus, this project sought to explore the optimization of the method of lubrication in the cylindrical grinding with the technique of minimum quantity of lubrication (MQL) and optimized cooling. It was used three methods of cooling, the conventional, the MQL and the optimized cooling, with three equivalent chip thickness (heq) in each case. It was analyzed as output variables the G Ratio, roughness and circularity errors, and the technique of scan electron microscope (SEM). From the results it was concluded that the MQL had unsatisfactory results in comparison to the other two methods, but still acceptable in some cases of grinding process. In the case of optimized cooling, significant improvements as a role were obtained, especially in the case of the G-ratio.*

Keywords: *External cylindrical grinding, MQL, optimized cooling, advanced ceramics.*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

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