

## UTILIZAÇÃO DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO (MQL) NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO EM CERÂMICAS COM REBOLOS DIAMANTADOS

Marcos Hiroshi Oikawa, marcos\_oikawa@yahoo.com.  
Rodrigo Santana Destro, rod\_destro@hotmail.com.br  
Rogério Melo e Sousa, rogermsousa@gmail.com  
Humberto Fugita, hfugita@unipac.com.br  
Rafael Plana Simões; rafael@fc.unesp.br  
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br  
Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br  
Manoel Cléber Sampaio Alves, manoel@itapeva.unesp.br

<sup>1, 2, 3, 6, 7</sup>Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Engenharia Mecânica - Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa - Caixa Postal 473 CEP: 17033 - 360 - Bauru – SP.

<sup>4</sup>Unipac - Rua Dr. Luiz Miranda, 1700 CP: 64 – CEP: 17580-000 Pompéia/SP.

<sup>5</sup>Universidade Estadual Paulista - FC - POSMAT - Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa - Caixa Postal 473 CEP: 17033 - 360 - Bauru – SP.

<sup>8</sup>Universidade Estadual Paulista – UNESP- Itapeva - Rua Geraldo Alckmin, 519 18409-010 Itapeva - SP.

**Resumo:** *As cerâmicas avançadas têm sido exaustivamente utilizadas em aplicações na indústria nas últimas duas décadas, devido às suas propriedades de elevada resistência ao desgaste e dureza. Apesar disso, ainda se tem um alto custo agregado ao acabamento 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. Nesse contexto, as empresas vêm buscando a otimização no processo de retificação, como por exemplo, na redução do fluido de corte utilizada, visando, nesse caso, atender também as exigências mundiais preservação do meio ambiente. Desta forma este projeto pretendeu explorar a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação na retificação cilíndrica externa de mergulho em cerâmicas com rebolos diamantados. Foram utilizadas dois métodos de refrigeração, o convencional e o MQL, com três avanços de corte para cada caso. Foram usadas um bocal convencional, um bocal para a o MQL tendo este, um uniformizador de saída do jato. Foram analisadas como variáveis de saída a emissão acústica, relação G, microscopia eletrônica de varredura (MEV), rugosidade e circularidade. Dos resultados obtidos, pode-se concluir que a refrigeração convencional é a que apresenta os melhores resultados, comparando com a refrigeração com MQL. Entretanto, O MQL ainda apresentou resultados satisfatórios que podem ser suficientes em vários casos de retificação. Considerando a dificuldade de descarte do fluido de corte, devido ao seu grande impacto ambiental, dificuldade esta que tende a crescer nos próximos anos, o MQL vem como uma forte tendência para refrigerações em processos de usinagem.*

**Palavras-chave:** Retificação cilíndrica externa, MQL, preocupação ambiental, cerâmicas avançadas.

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo Bustamante & Bressiani (2000) a indústria de cerâmica brasileira tem grande importância para o país sendo que este segmento responde por aproximadamente 1% do Produto Interno Bruto (PIB). Apesar de suas atrativas características de dureza e resistência ao desgaste, ainda se tem um alto custo agregado relativo ao acabamento da peça, quase sempre feito pelo processo de retificação. 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. De acordo com Irani (2005) *apud* Uhlmann (1998), 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. Entretanto, devido à atual preocupação com o deterioramento do meio

## V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil

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.

Desse modo, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante vem como uma nova alternativa para as empresas que buscam uma solução para o problema dos fluidos de corte nos processos de usinagem.

Na técnica MQL, é aplicada na região de corte, uma quantidade mínima de lubrificante (de 10 a no máximo 100 ml/h) através de um jato de ar comprimido. A função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração principalmente pelo ar comprimido.

Este projeto avaliou a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) utilizada no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizando rebolos diamantados em cerâmicas avançadas, assim como o desempenho dos rebolos através dos resultados obtidos, visando a otimização do processo de retificação.

### 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação (com relação à refrigeração convencional) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho para cerâmicas avançadas, usando um rebolo diamantado, analisando dados de força tangencial de corte, rugosidade, emissão acústica, energia específica, relação G, desvio de circularidade e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### 3. CERAMICAS AVANÇADAS

Segundo 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 possam suportar altas temperaturas (2000° C), com alta resistência ao desgaste e segurança.

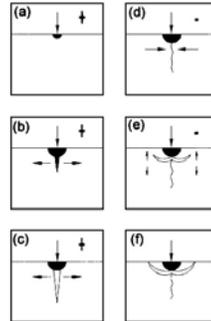
Segundo Ramesh et al. (2001), as cerâmicas são divididas geralmente em dois grupos principais, as cerâmicas oxidadas e as não-oxidadas. As ligações atômicas e as estruturas cristalinas desses materiais governam suas propriedades. As estruturas cristalinas dos materiais cerâmicos têm uma estrutura pouco simétrica comparada à estrutura dos metais, que são altamente simétricos. As estruturas cristalinas são formadas a partir de ligações covalentes, ligações iônicas e combinações de ambos. A relação de ligações covalentes em relação às ligações iônicas difere de 4:6 ( $Al_2O_3$  e cerâmicas oxidadas) a 9:1 (SiC e cerâmicas do não-oxidadas). As diferenças no tipo de ligação atômica são responsáveis pelas diferenças de dureza e módulo Young dos materiais cerâmicos. As cerâmicas com ligações covalentes são geralmente de alta dureza, rígidas e tem uma alta temperatura de fusão.

### 4. RETIFICAÇÃO EM CERÂMICAS

Segundo Ramesh et al. (2001), durante o processo de sinterização, há um “encolhimento” do material que não pode ser evitado. Consequentemente é necessário um processo de manufatura do material a fim de conseguir a forma e a precisão necessária para o componente.

De acordo com Liao et al (1994), a retificação é a mais favorável operação de acabamento dos materiais cerâmicos. De acordo com Mamalis et. al. (2000), 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 uma mudança 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.

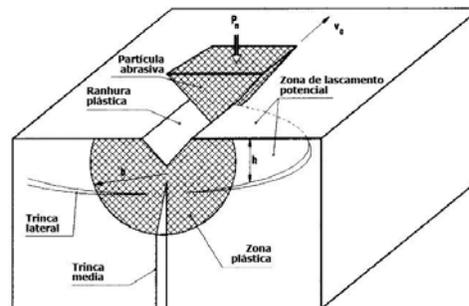
Malkin & Hwang (1996) fizeram um estudo sobre a formação de trincas baseada no modelo de indentação, usando uma esfera de pequeno diâmetro como indentador. As seis fases de formação das trincas podem ser vistas na Figura 1



**Figura 1** Estágios de formação das trincas através da indentação (Malkin & Hwang, 1996).

Inicialmente, uma zona plástica de pequeno diâmetro é desenvolvida próxima à superfície (Fig. 1a). Em seguida, uma pequena trinca longitudinal (trinca média) inicia-se devido ao campo de tensão desenvolvido (Fig. 5b). A trinca se propaga à medida que a indentação prossegue e aumenta de tamanho (Fig. 5c). Um decréscimo da carga resulta na redução do tamanho ou no fechamento da trinca longitudinal devido às tensões de compressão (Fig. 5d). A redução subsequente da carga promove a formação de trincas transversais devido às tensões laterais (Fig. 5e). 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 (Fig. 5f).

Malkin & Hwang (1996) idealizaram ainda um modelo das trincas induzidas em função da indentação, conforme pode ser visto na Figura 2



**Figura 2.** Zona plástica e formação das trincas médias/radiais e laterais devido ao riscamento por um grão abrasivo (Malkin & Hwang, 1996)

## 5. 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 Equação 1.

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{V_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot V_f}{60 \cdot 1000 \cdot V_s} \quad (1)$$

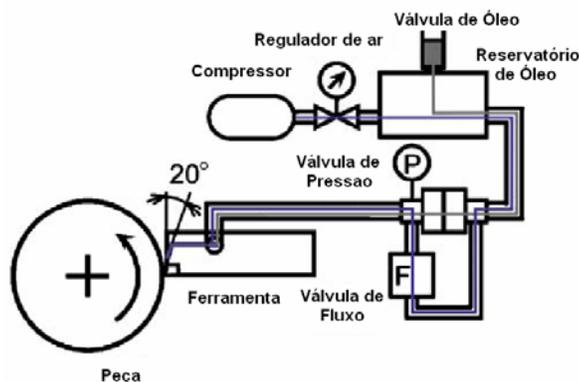
Segundo Malkin (1989), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada com o comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas como: forças de corte, rugosidade, vida da ferramenta etc. Diniz et al. (2000) afirma que um aumento do  $h_{eq}$  reflete no respectivo 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.

## 6. 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. (2000) 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 através de uma tubulação distinta da 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 100ml/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 previnir em grande escala a nebulosidade.

Obikawa et. al. (2006) mostra, esquematicamente, um sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação baseado no princípio de pressão, conforme Figura 3.



**Figura 3. Modelo esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação por pressão (Obikawa, 2006).**

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.

## 7. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MQL

Segundo Klocke & Einsenblätter (1997) e Young et al. (1997), existem muitas vantagens da utilização da MQL se comparado com a refrigeração convencional. Dentre elas, as principais são a redução da potência de retificação e energia específica, além da melhora da qualidade superficial e do menor desgaste do rebolo. Com relação aos fluidos convencionais, os resultados com MQL para retificação de superfícies são melhores com óleo de éster, pois sugere um bom comportamento de lubrificação.

Heisel et. al. (1998), relata que, no caso da retificação, uma vantagem da mínima quantidade de lubrificante é que não aparecem as tensões residuais causadas por grandes gradientes de temperaturas, sendo isto especialmente importante no caso de materiais de corte frágeis.

De acordo com Attanasio (2006), há várias vantagens devido a aplicação deste método. A névoa e o vapor, que são nocivos à saúde do trabalhador são reduzidos e o ajuste da mistura é muito fácil de ser controlada. Outras vantagens do

## V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil

MQL são: o barateamento na limpeza da peça final e a capacidade de visualização do processo, já que o local da usinagem não é inundado pelo fluido de corte como na técnica de refrigeração convencional.

Young et al. (1997) cita a mínima quantidade de lubrificação como uma das alternativas de um processo mais limpo menos prejudicial para o meio ambiente.

No Brasil, vem crescendo o número de empresas com certificados ISO 14001, norma que tem sido adotada por organizações de diversos países como base para seu sistema de gestão ambiental, demonstrando uma tendência positiva à adoção desse tipo de sistema de gestão.

Klocke et al. (2000) afirma que uma das grandes dificuldades do emprego da técnica de MQL na retificação é que o calor introduzido na peça no processo de retificação é superior quando comparado com as operações de usinagem com geometria definida, já que a geometria do grão abrasivo geralmente apresenta ângulo de cisalhamento negativo requerendo maior força de atrito na interação.

### 8. MATERIAIS E METODOS

Nessa seção são descritos todos os equipamentos e materiais que foram utilizados nos ensaios, assim como a descrição dos procedimentos e planejamentos durante a experimentação.

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  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ . A densidade aparente deste material é de  $3,7 \text{ g/cm}^3$ .

O rebolo utilizado foi um rebolo diamantado 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, tensocativos não iônicos, alcanolomidas, entre outros. Entretanto, o fluido foi complementado com um anti espumante também da ROCOL, de especificação Ultragurd AF(S) e um bactericida.

O equipamento para a aplicação da mínima quantidade de lubrificante é o aplicador 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  $8 \text{ Kgf/cm}^2$ .

A medição da emissão acústica foi feita com a utilização de um sistema de Emissão Acústica, modelo DM12, marca Sensis, com um sensor fixo que será posicionado no cabeçote móvel da retificadora próximo do contraponto, com o intuito de detectar as possíveis variações deste sinal e sua relação com as outras variáveis de saída.

A medição do desvio de circularidade foi realizada em uma máquina específica para controle de tolerâncias geométricas Tayrond 31c marca Taylor Hobson

A captação da rugosidade superficial será obtida através de um rugosímetro Surtronic 3+ , da marca Taylor Hobson, que fez a medição do parâmetro Ra.

As análises de microestrutura (através da microscopia de varredura - MEV) serão 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 será medido por meio do método de impressão do perfil do rebolo desgastado em um corpo devidamente preparado para tal fim. Nesse método será utilizado um aparelho TESA digital, modelo TT10, com precisão de  $1 \text{ } (\mu\text{m})$  micrometro.

Para os ensaios foram estabelecidos as seguintes condições de usinagem: velocidade de mergulho (vf) de 1 mm/min, velocidade de corte (vs) de 30 m/s, rotação da peça ( $\omega_w$ ) de 204 rpm, penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm, tempo de centelhamento (ts) igual a 5 segundos, largura de retificação de 4 mm, profundidade de dressagem (ad) 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, quantidade de peças cerâmicas por ensaio de 13 peças.

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

Desse modo, de acordo com a Equação (1), as três espessuras equivalentes de corte, denominadas apenas por heq1, heq2 e heq3 foram: heq1=0,0707um, heq2=0,094um e heq3=0,118um.

## 9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

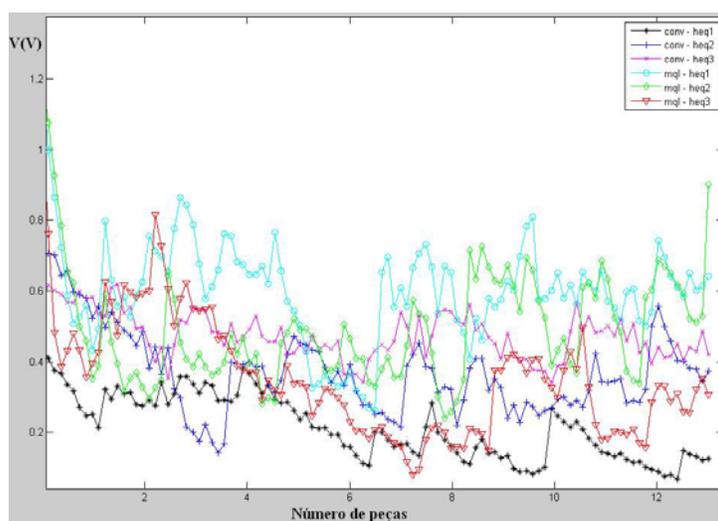
Nesta seção serão apresentados os resultados, para cada condição de retificação realizada, das variáveis de saída: emissão acústica, desgaste diametral e integridade superficial. Para a análise da integridade superficial avaliou-se a microestrutura, circularidade, rugosidade.

Ressalta-se que para as variáveis analisadas, mediante a construção de gráficos de barra e de linha para a circularidade, calculou-se os respectivos desvios padrões, os quais foram plotados juntamente com os valores médios reais das três repetibilidades executadas.

### 9.1. Emissão Acústica

Os resultados de emissão acústica (RMS) estão expressos em Volts (V) e são apresentados em função do número de peças acabadas, variando-se os sistemas de lubri-refrigeração e as espessuras equivalentes de corte.

A influência do tipo de refrigeração e da espessura equivalente de corte está representada na figura 5.



**Figura 4. Emissão Acústica**

Analisando a Figura 4 referente à comparação entre as condições de usinagem com a técnica da MQL e a lubri-refrigeração convencional, percebe-se que o comportamento da lubri-refrigeração convencional e da técnica com MQL não apresentaram diferenças significativas em relação à emissão acústica. Pode-se perceber também que a condição que apresentou menor emissão, como um todo, foi o ensaio com a refrigeração convencional, com heq1 (condição de menor espessura equivalente de corte) e a que apresentou maiores valores de emissão no geral foi a condição que utilizou a técnica do MQL com heq1.

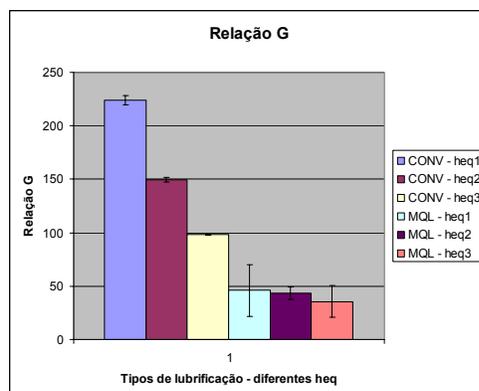
Uma das explicações para este tipo de fenômeno ter ocorrido é pequena influência da espessura equivalente de corte na técnica de refrigeração com MQL causada por uma outra variável mais significativa no processo, como por exemplo, a dissipação térmica da região de corte. Sendo que o MQL dissipa menos calor da zona de corte, a retirada do calor ocorre, principalmente, pela condução térmica do rebolo, que é constante para todos os ensaios. Sendo a espessura equivalente de corte determinada pela velocidade de avanço, a maior espessura equivalente de corte terá o maior avanço de corte. Consequentemente esta última terá uma maior área de contato peça-rebolo, o que provoca uma maior condução térmica. Nota-se que esse tipo de conclusão pode ser feita sabendo-se que o corpo de prova tem espessura pequena em relação à espessura do rebolo. Para corpos de prova com espessuras maiores, a condução térmica do rebolo pode chegar a um limite e esta deixar de ser um parâmetro constante para o processo de retificação.

### 9.2. Relação G

Neste item é apresentada a relação G obtida variando-se a espessura equivalente de corte e da condição de lubri-refrigeração. 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.

Na Figura 5 são apresentados os valores da relação G, ilustrando a influência da espessura equivalente de corte com o tipo de lubri-refrigeração empregado nos resultados desta variável de saída.



**Figura 5. Desgaste diametral do rebolo diamantado.**

Através da análise do gráfico é possível notar que os maiores valores obtidos para a relação G foram para a refrigeração convencional, comparado com 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.

Pode-se notar que para a refrigeração convencional, a espessura equivalente de corte é um grande fator influenciador no desgaste do rebolo, consequentemente na relação G. Analisando o gráfico, pode-se notar que quanto maior a espessura equivalente de corte, maior o desgaste do rebolo, consequentemente, 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 a níveis de resultados.

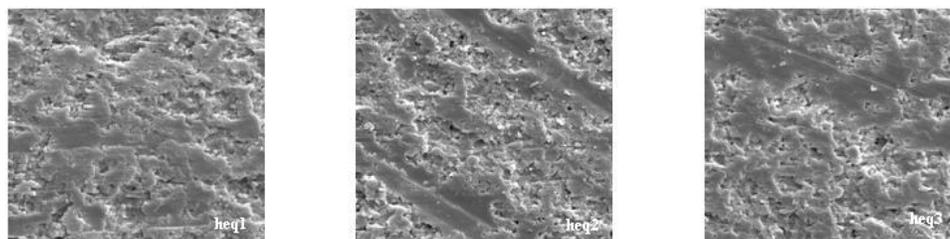
(1)

### 9.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A integridade superficial de uma peça é de extrema importância. Danos causados a superfície de um material podem afetá-la significativamente, causando alterações na resistência ao desgaste, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça.

O MEV é uma poderosa técnica de avaliação microestrutural, possibilitando análises do estado de superfícies e noção de profundidade.

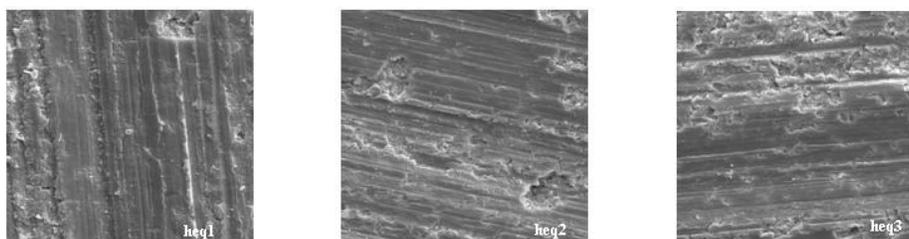
A Figura 6 representa os resultados obtidos para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) obtidos para as condições de lubri-refrigeração convencional, com espessuras equivalente de corte respectivamente de heq1, heq2 e heq3 com zoom de 1000 vezes.



**Figura 6. MEV para a refrigeração convencional para heq1, heq2 e heq3.**

Analisando as figuras, percebe-se que, na refrigeração convencional, o modo frágil de remoção do material predominou no processo. Percebe-se 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 7 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 heq1, heq2 e heq3 com zoom de 1000 vezes.



**Figura 7. MEV para a refrigeração pelo MQL para heq1, heq2 e heq3.**

Pode-se observar que 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 a presença reduzida de microtrincas, agente concentradores de tensão. Analisando as fotografias, pode-se observar que enquanto menor a espessura equivalente de corte, mais dúctil é o processo de remoção do material.

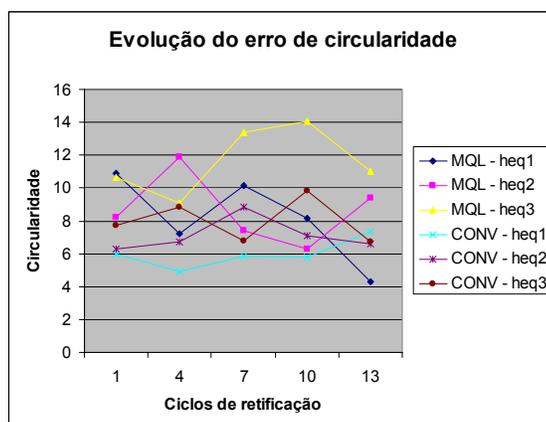
A melhor caracterização da superfície da peça retificada com a refrigeração utilizando a técnica do MQL em relação à peça retificada com a refrigeração convencional pode ser explicada pelo maior poder lubrificante do óleo utilizado na técnica do MQL em comparação ao fluido de corte emulsificado utilizado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

#### **9.4. Circularidade**

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 as medições de 5 corpos de prova retificados de cada ensaio (corpos de prova 1, 4, 7, 10, 13).

O gráfico da Figura 8 apresenta uma evolução do erro de circularidade para todas as condições utilizadas neste experimento.

**V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**  
14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil



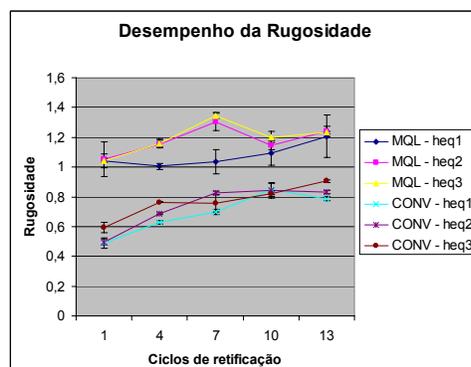
**Figura 8. Evolução do erro de circularidade**

Analisando este gráfico pode-se notar que somente para a condição mais severa da lubrificação com MQL o erro de circularidade aumentou drasticamente.

Analisando-se os resultados de circularidade obtidos como um todo, pode-se observar que, para condições mais brandas, a técnica de refrigeração com MQL não apresentou diferenças de erros de circularidade significativos.

### 9.5. Rugosidade

A Figura 9 apresenta um gráfico com os resultados obtidos para a rugosidade média Ra, referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração convencional e as condições utilizando a técnica da MQL. 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, com seus respectivos desvios padrões.



**Figura 9. Evolução da rugosidade ao longo dos ensaios.**

Analisando-se os resultados obtidos observa-se de uma maneira geral que os valores de rugosidade foram menores para a lubri-refrigeração convencional que na utilização da técnica da 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 pasta de fluido com cavaco de difícil remoção, que mesmo ar comprimido a altas velocidades tem dificuldades de retirar. Este cavaco permanente na zona de corte afeta consideravelmente os valores de rugosidade da peça.

Os menores valores para a utilização da MQL são quando utilizada os menores valores de heq, comprovando-se assim menores espessuras do cavaco possibilitam menores valores de rugosidade devido a menor taxa de remoção do material e maior lubrificação alcançada.

## V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil

Pode-se dizer que a rugosidade da peça retificada é influenciada principalmente pelo tamanho do grão abrasivo do rebolo, centelhamento, dressagem, taxa de remoção do material e condições de lubrificação. O fluido de corte tipo emulsão apresenta como característica marcante a refrigeração e baixa lubrificação da peça afetando assim a rugosidade.

### 10. CONCLUSÕES

Analisando os dados obtidos nos ensaios realizados, pode-se observar que:

Para a técnica do MQL a condição que apresentou os melhores resultados foi de menor espessura equivalente de corte,  $h_{eq1}$  (velocidade de avanço de 0,75mm/min).

Com relação à rugosidade a lubri-refrigeração convencional apresentou valores menores que a técnica de MQL, 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.

Analisando a integridade superficial das peças retificadas com a técnica do MQL com relação à microscopia eletrônica de varredura (MEV), observou-se que esta apresentou melhores resultados de superfície do corpo de prova em relação aos corpos de prova retificados com a refrigeração convencional.

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

A força tangencial de corte sofreu um pequeno aumento com a aplicação da técnica do MQL.

Com relação ao desgaste do rebolo, a técnica do MQL provocou um aumento considerável no desgaste em relação à refrigeração convencional. Consequentemente, sua relação G se apresentou relativamente menor em comparação à relação G da refrigeração convencional.

Dessa forma, a análise geral dos resultados indica que a técnica do MQL demonstrou ser viável como uma alternativa para a substituição da lubri-refrigeração convencional somente com a restrição nos casos em que a rugosidade necessária da peça retificada não seja inferior a 1,2. Além disso, para a viabilização do uso do MQL deve-se fazer um levantamento específico de custo para cada caso, pois no MQL há um gasto maior de material abrasivo (rebolo), entretanto, que pode ser compensado pela não necessidade de manutenção e descarte do fluido de corte, o que hoje em dia, é um custo considerável em um processo de produção, devido as normas atuais de preservação ao meio ambiente.

### 11. AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste projeto e em especial à FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) pela disponibilização dos recursos necessários a esta pesquisa.

### 12. REFERÊNCIAS

- BUSTAMANTE, G.M.; BRESSIANI, J.C.; A indústria cerâmica brasileira. Cerâmica Industrial. Maio/Junho, 2000.
- GRAF, W. Cylindrical Grinding. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.
- IRANI R.A., BAUER R.J., WARKENTIN A., A review of cutting fluid application in the grinding process, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1696–1705.
- KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; PÖHLS, M. “Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding”, Institute of Machine Tools and Production Engineering, University of Technology, 2001
- KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. “Dry cutting”, Annals of the CIRP, v. 46, n.2, p. 519-526, 1997.
- LIAO, T.W.; SATHYANARAYANAN, G.; PLEBANI L.J.; THOMAS, M.U.; LI, K. Characterization of grinding-induced cracks in ceramics.
- MALKIN S., HWANG T. W., “Grinding mechanism for ceramics”, Annals CIRP, 45(2), pp. 569, 1996.
- MALKIN, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, 1a edição, Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.
- MAMALIS A. G.; KUNDRAK J., GYANI K.; HORVATH M.; On the Precision Grinding of Advanced Ceramics. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. (2002) 20:255–258
- OBIKAWA T., KAMATA Y., SHINOZUKA, J. High-speed grooving with applying MQL, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1854–1861



**V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**  
**14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil**

RAMESH K.; YEO S. H.; GOWRI S.; ZHOUL L.; Experimental Evaluation of Super High Speed Grinding of Advanced Ceramics. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 17:87-92.  
YOUNG P.; BYRNE G.; COTTERE M.; Manufacturing and the Environment, International Journal of Advanced Manufacturing Technology International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (1997) 13:488-493.

## USE OF MINIMUM QUANTITY OF LUBRICATION (MQL) IN EXTERNAL PLUNGE GRINDING PROCESS IN ADVANCED CERÂMICAS WITH DIAMOND WHEELS

Marcos Hiroshi Oikawa, marcos\_oikawa@yahoo.com.  
Rodrigo Santana Destro, rod\_destro@hotmail.com.br  
Rogério Melo e Sousa, rogermsousa@gmail.com  
Humberto Fugita, hfugita@unipac.com.br  
Rafael Plana Simões; rafael@fc.unesp.br  
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br  
Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br  
Manoel Cléber Sampaio Alves, manoel@itapeva.unesp.br

<sup>1, 2, 3, 6, 7</sup>Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Engenharia Mecânica - Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa - Caixa Postal 473 CEP: 17033 - 360 - Bauru – SP.

<sup>4</sup>Unipac - Rua Dr. Luiz Miranda, 1700 CP: 64 – CEP: 17580-000 Pompéia/SP.

<sup>5</sup>Universidade Estadual Paulista - FC - POSMAT - Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa - Caixa Postal 473 CEP: 17033 - 360 - Bauru – SP.

<sup>8</sup>Universidade Estadual Paulista – UNESP- Itapeva - Rua Geraldo Alckmin, 519 18409-010 Itapeva - SP.

**Abstract.** *The advanced ceramics have been extensively used in applications in industry in the last two decades because of its properties with high resistance to wear and hardness. Nevertheless, even if you have a high cost added to finish the piece. That finish, in most cases is done by the grinding process, the only viable process that produces high quality surfaces and geometric precision. In this context, companies are seeking to optimize the grinding process, for example, in reducing the cutting fluid, aimed in that case also meet the requirements global preservation of the environment. Thus this project sought to exploit the technique of Minimum Quantity of Lubrication of the external cylindrical grinding in ceramics with diamond wheels. The project used two methods of cooling, the conventional and MQL, with three feed velocity in each case. We used a conventional nozzle, a mouthpiece for the MQL the latter having a uniform output of the jet. Variables were analyzed as the output acoustic emission, G relationship, scanning electron microscopy (SEM), roughness and circularity. Of the results, it was concluded that the conventional cooling is what gives the best results, comparing with the MQL. However, The MQL yet submitted satisfactory results that may be sufficient in several cases of adjustment. Considering the difficulty of disposing of the fluid cutting because of its large environmental impact, this difficulty that tends to grow in coming years, the MQL comes as a strong trend in cooling method for machining processes.*

**Keywords:** *External plunge grinding, MQL, environmental concern, advanced ceramics.*