

## **MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO (MQL) - UMA ALTERNATIVA À RETIFICAÇÃO PLANA DE CERÂMICAS PARA UMA MELHORIA SOCIOECONÔMICA E AMBIENTAL**

**Daiane Mieke Iceri, ra712035@feb.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Rogério Melo e Sousa, ra611352@feb.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Rodrigo Santana Destro, ra611263@feb.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Marcos Hiroshi Oikawa, ra611328@feb.unesp.br<sup>1</sup>**  
**Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br**  
**Carlos Alberto Fortulan, cfortula@sc.usp.br<sup>2</sup>**  
**Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP – Campus de Bauru  
Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01 17033-360 Bauru - SP

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Trabalhador são-carlense, 400 . CEP 13566-590, São Carlos - SP/Brasil

**Resumo:** Com a exigência de uma alta qualidade superficial e a busca por novos materiais eficazes, a combinação entre cerâmica e retificação vem dando bons resultados, devido a vantagens que tal material possui sobre os outros: sua capacidade de operar a altas temperaturas, possuir alta dureza, densidade inferior à dos aços e sua alta resistência ao desgaste. Entretanto, há algumas dificuldades em se manusear as cerâmicas, devido a algumas de suas propriedades físicas e por isso ela deve ser usinada com um rebolo diamantado. Além disso, elas podem causar grandes riscos nocivos ao ambiente e a saúde dos seus operadores. Em tal processo de usinagem a necessidade da utilização dos fluidos de corte usado, na maioria dos casos, em grande quantidade. Eles exercem uma função importante durante a retificação, a de lubrificar (reduzindo o atrito da ferramenta com a peça), proporcionando assim, refrigeração na zona de contato, uma vida útil maior da ferramenta, remoção dos cavacos e proteção das partes metálicas contra a oxidação. Mas os fluidos apresentam graves problemas sócio-ambientais, então, buscam-se novos tipos e meios de aplicação destes, que possam dar bons resultados. O uso da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) veio então como uma grande solução à substituição do método convencional, pois este não é um sistema de lubrificação totalmente a seco, mas reduz em uma quantidade significativa a quantidade de fluido. Trazendo assim alguns benefícios para ao meio ambiente e às questões socioeconômicas. Assim, em tal trabalho foi realizado o estudo da substituição do método convencional pelo MQL, observando os dados do processo para os dois métodos, tais como força de corte, vibração, emissão acústica, rugosidade e desgaste do rebolo, representado pela relação G, sendo que em tal estudo há uma principal atenção aos dois últimos parâmetros. Foi possível observar que o método MQL obteve uma vantagem em relação ao menor prejuízo sobre o rebolo, possuindo uma relação G por volta de 20% maior que a lubrificação convencional. Entretanto, o acabamento superficial foi de menor qualidade, obtendo-se uma rugosidade de aproximadamente 30% maior com média de 0,75  $\mu\text{m}$ . Dessa forma, levando em consideração a dificuldade do descarte do fluido de corte e seu grande dano ambiental, o MQL pode ser uma ótima alternativa a ser utilizada nos processos de usinagem.

**Palavras-chave:** Retificação, cerâmica, MQL.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os materiais cerâmicos ganharam um grande interesse em suas pesquisas nas últimas décadas pela sua grande tendência de substituição dos aços em algumas aplicações devido às suas características exclusivas. Segundo Marinescu *et al.* (1998), os materiais cerâmicos apresentam deformação plástica apreciável e sua resistência ao impacto é reduzida, ou seja, possui baixa tenacidade. Assim, a baixa deformabilidade do seu retículo cristalino resulta em elevada rigidez e dureza. Em comparação com os metais, a energia de ativação é tão alta que o limite de resistência à fratura é atingido antes do movimento de discordâncias.

Porém, tais propriedades dificultam o trabalho com as cerâmicas, sendo os processos de usinagens os quais elas suportam muito restritos. De acordo com Jahamir *et al.* (1999), a retificação é o processo mais usado, atualmente, nas indústrias na usinagem de cerâmicas, o que pode representar até 90% do custo total do componente cerâmico.

O rebolo é o principal componente que diferencia o processo de retificação dos outros processos de usinagem, já que é uma ferramenta de corte sem geometria definida. É conhecido o fato de que a topografia e as condições as quais o rebolo é preparado exercem profunda influência sobre o desempenho da retificação, o que é evidenciado pelas forças de corte, energia consumida, temperatura na zona de corte e muitas vezes no acabamento da peça (Nguyen & Butler, 2007).

Mas como em todos os processos de usinagem de metais nas indústrias, na retificação de cerâmicas o uso de fluido de corte é indispensável, pois que este possui grande papel durante todo o processo.

Segundo Dutta (2008), toda a energia gerada durante a retificação é convertida em calor, o qual se concentra na zona de corte. Este é atribuído à alta velocidade e ao grande ângulo de inclinação negativo das arestas de corte do rebolo. A alta deformação plástica das cerâmicas é causada devido ao desgaste dos grãos que ocorre por causa do aumento do atrito e do carregamento do rebolo que tende a aumentar em função da temperatura da zona de corte.

Ainda conforme Dutta (2008), os fluidos de corte são aplicados na forma de inundações, jato ou neblina, que são as práticas mais comuns para redução da temperatura da zona de corte. Assim, suas funções básicas são de resfriar a peça, retirar os cavacos formados e lubrificar a região de corte. E graças a tais efeitos, há uma redução na força de atrito de fricção entre as faces de apuramentos dos grãos abrasivos e da peça. Dessa forma, a potência de entrada é reduzida e a geração de calor é limitada.

Constantes pesquisas são realizadas no intuito de encontrar melhores e novas formas de realizar a retificação plana de cerâmicas, buscando alternativas que sejam economicamente viáveis e utilizem menores quantidades de fluido de corte, assim como o método da Mínima Quantidade de Refrigeração (MQL).

Os materiais cerâmicos ganharam um grande interesse em suas pesquisas nas últimas décadas pela sua grande tendência de substituição dos aços em algumas aplicações devido às suas características exclusivas. Segundo Marinescu *et al.* (1998), os materiais cerâmicos apresentam deformação plástica apreciável e sua resistência ao impacto é reduzida, ou seja, possui baixa tenacidade. Assim, a baixa deformabilidade do seu retículo cristalino resulta em elevada rigidez e dureza. Em comparação com os metais, a energia de ativação é tão alta que o limite de resistência à fratura é atingido antes do movimento de discordâncias.

Porém, tais propriedades dificultam o trabalho com as cerâmicas, sendo os processos de usinagens os quais elas suportam muito restritos. De acordo com Jahamir *et al.* (1999), a retificação é o processo mais usado, atualmente, nas indústrias na usinagem de cerâmicas, o que pode representar até 90% do custo total do componente cerâmico.

A retificação é um dos processos de usinagem mais complicados, isso porque tal operação é realizada por meio de um rebolo que é composto de muitos pequenos, irregulares, afiados e aleatoriamente posicionados grãos abrasivos ligados por um elemento ligante, Liao *et al.* (2008).

Segundo Dutta (2008), boa parte da energia gerada durante a retificação é convertida em calor, o qual se concentra na zona de corte. Este é atribuído à alta velocidade e ao grande ângulo de inclinação negativo das arestas de corte do rebolo. A alta deformação plástica das cerâmicas é causada devido ao desgaste dos grãos que ocorre por causa do aumento do atrito e do carregamento do rebolo que tende a aumentar em função da temperatura da zona de corte. Para a diminuição da temperatura, os fluidos de corte são aplicados na forma de inundações, jato ou neblina, que são as práticas mais comuns para redução da temperatura da zona de corte. Assim, suas funções básicas são de resfriar a peça, retirar os cavacos formados e lubrificar a região de corte. E graças a tais efeitos, há uma redução na força de atrito de fricção entre as faces de apuramentos dos grãos abrasivos e da peça. Dessa forma, a potência de entrada é reduzida e a geração de calor é limitada.

Constantes pesquisas são realizadas a fim de encontrar melhores formas de realizar a retificação plana de cerâmicas, assim como o método da Mínima Quantidade de Refrigeração (MQL).

## 1.1. Material Cerâmico

As cerâmicas possuem características muito diferenciadas tais como ser muito duras, resistentes ao desgaste, frágeis, propensas ao choque térmico, más condutoras elétricas e térmicas, refratárias, intrinsecamente transparentes, não magnéticas, quimicamente estáveis e resistentes à oxidação. Porém, em muitas aplicações elas são extremamente melhores que os metais, os quais possuem características opostas às delas, Barsoum (2003).

Segundo Agarwal & Rao, cerâmicas avançadas têm sido amplamente utilizadas na fabricação de peças de trabalho com demandas complexas em que os materiais necessitam de alta performance, que são derivados da combinação única de propriedades que as cerâmicas possuem. Cerâmicas estruturais tais como nitreto de silício e carboneto de silício estão sendo cada vez mais utilizadas em válvulas, bronzinas, pistões, rotores e outras aplicações nos quais a tolerância dimensional, alta precisão e bom acabamento superficial são necessários.

De acordo com Ramesh *et al.* (2001), a cerâmica durante a sinterização, que é seu processo de fabricação, aumenta consideravelmente a dureza da mesma pela união dos grãos. Portanto, a usinagem da cerâmica é necessária, após a sinterização, para atingir a forma de precisão necessária do componente a ser utilizado. Isso é devido à alta dureza dos materiais cerâmicos, a retificação usando rebolo diamantado é geralmente utilizada como principal processo de acabamento.

Ainda de acordo com Ramesh *et. al.*, na fabricação de cerâmica, os principais custos de acabamento são devido aos processos de retificação que constituem 50% do custo total de produção. Portanto, uma estratégia para diminuir os gastos aderidos ao produto final é importante a economia dos componentes do processo de usinagem. O processo convencional de retificação induz danos à superfície usinada, o qual resulta na degradação da força. Mesmo para uma pequena profundidade de corte envolve-se sempre uma energia específica alta que gera uma elevada temperatura de retificação. Tal temperatura produz uma tendência à formação de fraturas e rachaduras.

Dessa forma durante a retificação de cerâmicas, assim como em qualquer outro processo de usinagem os parâmetros devem ser controlados de forma a reduzirem custos e o uso de fluidos de cortes indispensáveis para que defeitos sejam evitados e se tenha um melhor acabamento final da peça.

## 1.2. Retificação Plana

O processo de retificação é bastante complexo e delicado, isso é devido a alguns fatores, tais como a determinação das condições de dressagem e usinagem, dificuldades na escolha do rebolo adequado, e por se tratar de uma operação de acabamento, ou seja, a peça possui grandes valores agregados devido ao fato de ter passado por diversos processos anteriores e assim qualquer erro cometido nesta fase final pode fazer com que a peça não tenha mais a precisão desejada e se torne uma peça sem utilidade. Dessa forma, o cuidado ao se analisar todos os parâmetros envolvidos deve ser essencial, fazendo com que se obtenha o melhor desempenho possível.

Segundo Malkin (1989), a retificação é considerada como o mais complicado dentre os processos de usinagem ou de remoção de material, isso devido ao fato, principalmente, da operação ser realizada por uma ferramenta de corte, conhecida como rebolo, que é composta de muitas pequenas partículas, os grãos abrasivos, que são afiados e possuem geometria irregular. Estes são ligados por um elemento ligante, o material aglomerante, que resistem às forças de retificação, às elevadas temperaturas, às forças centrípetas oriundas dos elevados níveis de rotação do rebolo e ainda aos ataques químicos provocados por componentes dos fluidos de corte. Os aglomerantes são os responsáveis por assegurar a rigidez do rebolo e manter as partículas abrasivas em posição.

O processo de retificação é composto basicamente pelo rebolo, corpo de prova e sistema de lubri-refrigeração. A Figura 1, de Liao *et. al.* (2008), representa as condições importantes da retificação, sendo eles o rebolo, a peça a ser usinada, a velocidade da peça ( $V_w$ ), a velocidade do rebolo ( $V_s$ ) a profundidade de corte ( $a$ ) e a zona de corte (circunferência  $b$ ).

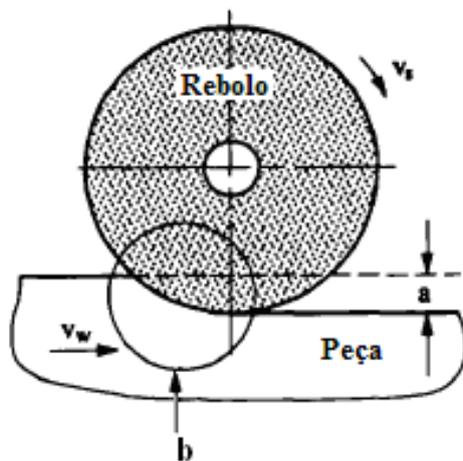


Figura 1 - Processo de Retificação (Liao et al., 2008).

Segundo Pricken (1999), os rebolos devem ser corretamente condicionados antes ou depois do processo de usinagem a fim de produzir e manter a macrogeometria desejada, assim como a concentricidade e o perfil, tão bem quanto à microgeometria, descrita pela rugosidade da superfície do rebolo. Para gerar uma superfície na ferramenta de corte ideal para o trabalho devem ser bem realizados a dressagem e o perfilamento.

De acordo com Stemmer (1992), a dressagem é uma operação de avivamento ou “reação” dos grãos abrasivos. Esta operação consiste em remover ou fraturar grãos desgastados ou limpar o rebolo no caso em que este está empastado (sujo ou “carregado” de cavacos). Destina-se também a remoção do ligante para melhorar a exposição dos grãos abrasivos.

## 1.3. Aplicações de Fluidos de Corte – Convencional e MQL

Como na usinagem de quaisquer outros materiais nas indústrias de metais, na retificação das cerâmicas é também indispensável o uso do fluido de corte, que nestes casos é usado com abundância (elevada vazão, baixa pressão). A principal função 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.

Não utilizar o fluido de corte poderia ocasionar grande aumento de temperatura na região da usinagem, perdendo assim a qualidade do processo e conseqüente perda ou, danos graves ao rebolo. Uma alternativa é a eliminação total do fluido, através da usinagem a seco. A óbvia vantagem é a eliminação dos riscos à saúde e danos ecológicos, provenientes dos processos de disposição das peças, dos cavacos e do lubrificante em si, bem como dos custos envolvidos.

Os principais componentes presentes nos fluidos são: refrigerante (água), lubrificantes (óleos minerais, vegetais e sintéticos), inibidores de corrosão (aminas, nitritos, entre outros), umectantes/estabilizantes, bactericidas, aditivos de alta pressão e componentes anti-espumantes.

As pesquisas na área de lubri-refrigerantes intensificaram-se com o objetivo de restringir ao máximo o uso de fluidos de corte na indústria metal-mecânica. Os fatores importantes que justificam tal procedimento incluem os custos operacionais da produção, as questões ecológicas, as exigências legais quanto à preservação do meio ambiente e à preservação da saúde do ser humano (Diniz *et al.*, 2003).

Refrigerantes e lubrificantes são usados na zona de retificação de modo a reduzir o desgaste da máquina. Os fluidos de corte promovem ambos os benefícios, tanto à refrigeração quanto à lubrificação (Cambiella *et al.* 2007). Segundo Sokovic & Mijanovic (2001) a escolha correta de um fluido de corte pode aumentar a produtividade e reduzir custos de fabricação, possibilitando o incremento de velocidades de corte e taxas de remoção (avanços) mais elevadas. Além disso, a aplicação correta de fluido é responsável por aumentar a vida da ferramenta, reduzir a rugosidade superficial, aumentar a precisão dimensional e, também, diminuir a quantidade de energia consumida durante o processo.

Conforme Irani (2005) diz, a maioria dos fluidos de corte proporciona um ótimo meio para o desenvolvimento de bactérias que podem contaminar os operadores de máquinas. Ainda de acordo com esse autor, os fluidos de corte são conhecidos por causar problemas de pele como dermatites. Além disso, há potencialmente o efeito fatal dos metais pesados encontrados nos fluidos afetando assim o sistema respiratório e digestivo.

De acordo com Diniz *et al.*, os fluidos de corte podem causar grandes problemas se alguns cuidados não são tomados, por exemplo o impacto ecológico dos fluidos que afetam o solo e a água, quando descartados ao fim de sua vida e ao ar durante seu uso. Assim, os fluidos de cortes devem ser devidamente eliminados após perderem suas características, reciclando, ou serem substituídos por formas alternativas de refrigeração, reduzindo o volume (MQL) ou muitas vezes o eliminado (a seco).

Na lubrificação Convencional o fluido de corte é aplicado de forma abundante (elevadas vazões) à baixa pressão. A lubrificação e refrigeração dependem da entrada efetiva do fluido na região de corte entre a peça e o rebolo e dessa forma grandes volumes de fluido são usados.

Segundo Tasdelen *et al.* (2008), a Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), destaca-se atualmente como uma tendência dentre os métodos de lubri-refrigeração empregados nos processos de usinagem em geral, já que esse método reduz de forma significativa o volume de fluido utilizado. Tal técnica é responsável por trazer benefícios para as indústrias aumentando sua competitividade no mercado, além de trazer ótimos benefícios em aspectos ecológicos e econômicos, dispensando toda a salubridade e onerosidade envolvida com o descarte de fluidos convencionais.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada consistiu na preparação do rebolo, verificação dos parâmetros de processo, execução dos ensaios e caracterização dos materiais. Dado a relevância do condicionamento dos rebolos, cada novo ensaio era precedido da correção do perfil e exposição dos abrasivos, seguindo um procedimento padrão, cujo objetivo era manter esta condição constante.

Os parâmetros de usinagem utilizados neste ensaio são: velocidade da mesa ( $V_w$ ) de 0,032m/s que é igual a 1,92m/min, velocidade periférica do rebolo ( $V_s$ ) de 33m/s, calculada a partir da rotação do rebolo de 1800rpm. Durante os ensaios, para a comparação de diferentes profundidades de corte ( $a$ ), foram utilizadas 0,02mm, 0,07mm e 0,12mm, sendo a primeira a mais branda e a última a mais severa. Desta forma, pode-se resumir os parâmetros de usinagem pela Tabela 1.

**Tabela 1 - Parâmetros de usinagem utilizados.**

$h_{eq}$	$a$	$V_w$	$V_s$
Espessura Eq. de Corte	Profundidade de Corte	Velocidade da Peça	Velocidade do Rebolo
0,02 mm	20 $\mu$ m	0,032 m/s	33 m/s
0,07 mm	70 $\mu$ m	0,032 m/s	33 m/s
0,012 mm	120 $\mu$ m	0,032 m/s	33 m/s

A execução dos ensaios consistiu na aquisição de dados referente a 5 ciclos de retificação no corpo de prova, para quantificar a condição inicial de retificação. Após esta aquisição de dados, outro corpo de prova era retificado, sendo removidos 17 mm (16000 mm<sup>3</sup>) na sua altura, com o propósito de promover desgaste no rebolo suficiente para medir a relação G.

## 2.1. Equipamentos Utilizados

Os ensaios experimentais foram executados na retificadora plana tangencial modelo 1055E da Sulmecânica. A rugosidade foi medida utilizando-se um rugosímetro Surtronic<sup>3+</sup>, da marca Taylor Hobson, ajustado para um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm e calibrado para fazer a medição do parâmetro Ra.

Para a aplicação da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) foi utilizado o equipamento Accu-Lube, da marca ITW Chemical Products Ltda cujo funcionamento é baseado num método pulsante de fornecimento de óleo através de uma corrente de ar comprimido, permitindo o ajuste da vazão do ar comprimido e do óleo lubrificante.

Os corpos de prova com 99,8% de alumina foram manufacturados por prensagem uniaxial à 600MPa seguido de sinterização à 1600°C-2h, foi empregada a Alumina Calcinada A1000-SG, (Almatis, Inc.) com diâmetro médio equivalente de partícula de 0,4 µm, área superficial de 7,7 m<sup>2</sup>/g,  $\rho_{\text{real}}$ : 3,99 g/cm<sup>3</sup>. Assim, foram definidas as geometrias destes, com valores médios de espessura de 8mm, altura de 60mm e comprimento 120mm.

O rebolo diamantado utilizado é especificado por D 107 N 115 C50, sendo que a letra D indica o tipo de grão utilizado (diamante), 107 o tamanho do grão utilizado (107 µm), a letra N a dureza do rebolo (dureza média), o valor 115 indica o tipo de diamante e a designação C50 à concentração dos grãos, da empresa Nikon. As dimensões deste rebolo são dadas por um diâmetro de 350mm e uma espessura de 15mm.

O fluido de corte utilizado na condição convencional foi um óleo solúvel sintético da marca Mobil. O fabricante recomenda trabalhar com concentração entre 4% a 6% e pH entre 8,5 – 9,5. Na condição de mínima lubrificação foi testado o Accu-Lube LB-1000 da empresa ITW Chemical Products Ltda, sem diluição.

## 2.2. Bocais para aplicação de fluido de corte

Utilizou-se nesta pesquisa dois métodos distintos de lubri-refrigeração, sendo que em cada um deles empregou-se um bocal distinto. O método de lubri-refrigeração convencional (Figura 2), caracterizado pela aplicação de fluido de corte a alta vazão e baixa pressão. Este bocal trabalhou com vazão de 27,5 l/min., pressão inferior a 0,2 kgf/cm<sup>2</sup> e velocidade do fluido de corte de 3 m/s.



Figura 2 – Visualização da retificação através de lubri-refrigeração com bocal convencional.

Para a execução da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) foi utilizado um bocal específico que permitia melhor eficácia de lubrificação na zona de corte. A vazão de ar foi determinada considerando uma pressão de 8kgf/cm<sup>2</sup> e a velocidade do ar comprimido também igual à velocidade periférica do rebolo (Webster *et al.* - 1995). A vazão de ar

utilizada foi de 26,6 m<sup>3</sup>/h (450 l/min.). A vazão de óleo determinada em ensaio preliminar foi de 80 ml/h (0,0013 l/min.). O bocal é representado na Figura 3.

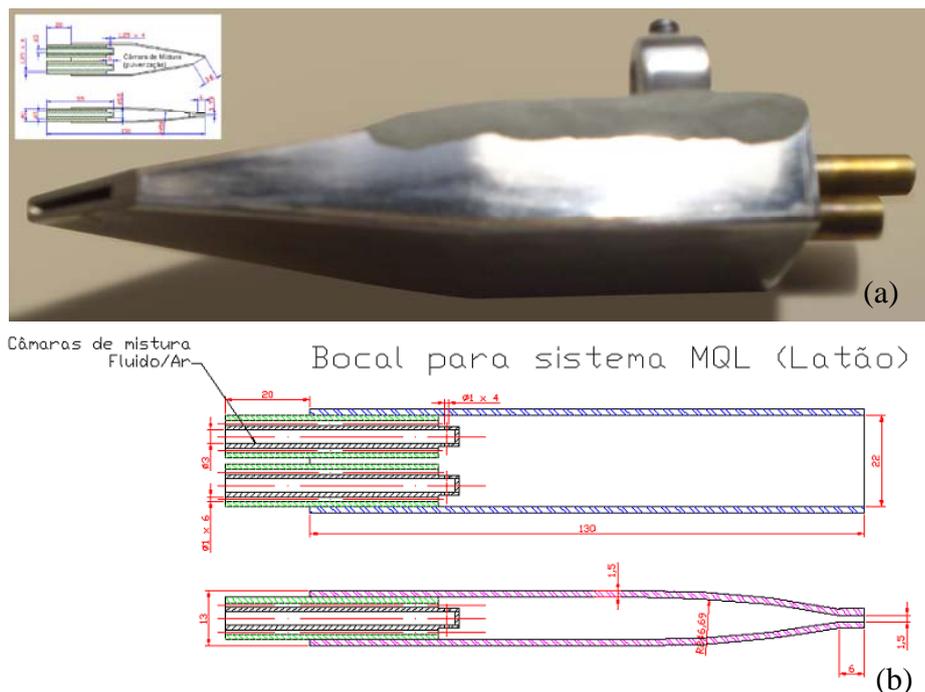


Figura 3 – Foto do bocal utilizado para MQL (a) e detalhe mostrado (b).

### 2.3. Dressagem do rebolo

Com o objetivo de minimizar as interferências oriundas das operações de preparação do rebolo, foi padronizado o procedimento para perfilamento e avivamento do rebolo. O rebolo foi perfilado através de uma ponta dressadora diamantada multiponto e avivado com um bastão de óxido de alumínio branco com grana 320 mesh. Cada ensaio foi precedido da dressagem do rebolo, verificando assim, a cada processo uma nova face de corte para o rebolo.



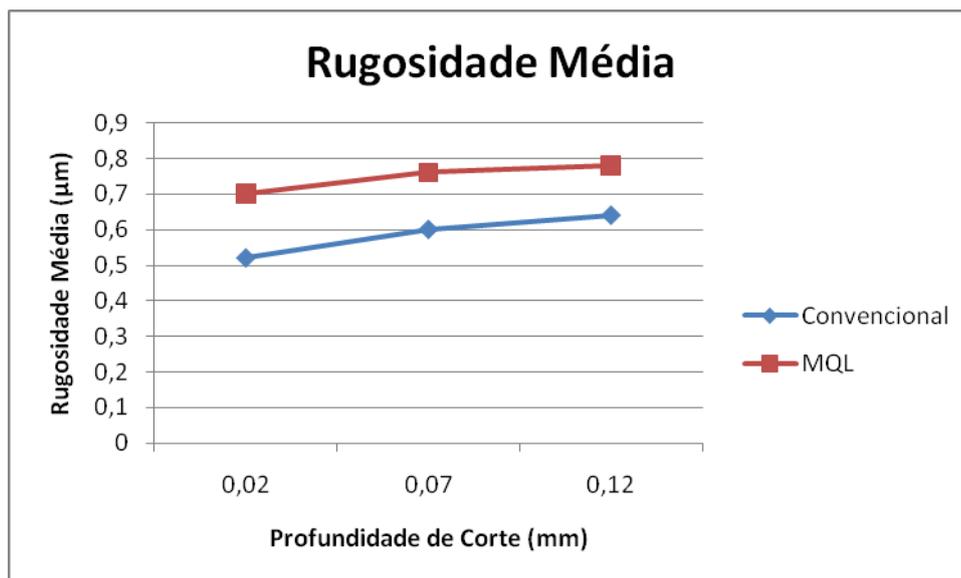
Figura 4 – Operação de perfilamento do rebolo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados os valores adquiridos para rugosidade da superfície do corpo de prova após os ensaios, o desgaste diametral do rebolo e a relação G.

#### 3.1. Rugosidade

Os valores de rugosidade obtidos com o método de lubri-refrigeração de mínima quantidade de lubrificação foram maiores que os obtidos com o método convencional (Figura 5). Devido ao modo de remoção frágil e a porosidade intrínseca dos materiais cerâmicos, as medições de rugosidade normalmente apresentam um considerável desvio padrão. Além disso, apesar do rebolo ter sido balanceado dinamicamente, alguma vibração e a própria rigidez da máquina pode ter contribuído para esta variação de rugosidade.



**Figura 5 – Gráfico referente à rugosidade média das peças nas diferentes profundidades de corte com diferentes métodos de lubri-refrigeração.**

A tendência de melhor acabamento nos ensaios com lubri-refrigeração convencional pode ser explicada por uma lubrificação mais eficaz na região de corte. Essa lubrificação, no entanto, não refletiu na redução das forças de corte, pois a ação de lubrificação abundante foi localizada na região central do corpo de prova. Cabe ressaltar que todas as medições de rugosidade foram feitas ao longo de todo corpo de prova, medindo-se sempre perpendicularmente ao sentido de corte efetuado pelo rebolo.

#### 3.2. Desgaste Diametral do Rebolo

O valor de desgaste do rebolo mostrou que, em comparação com o método de lubrificação convencional, o método de mínima quantidade de lubrificação (MQL) apresenta um menor desgaste diametral. O desgaste diametral é representado pela Figura 6.

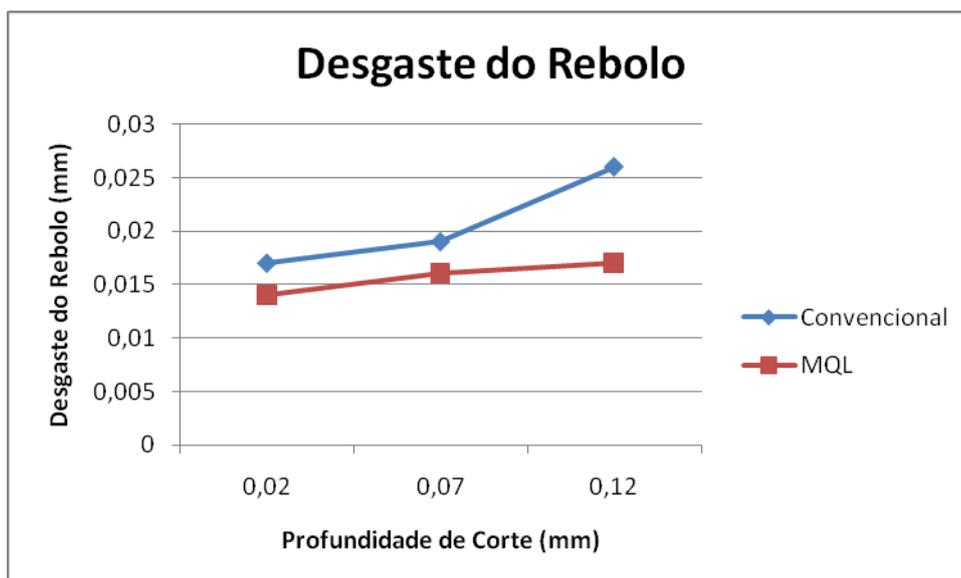


Figura 6 – Dados obtidos para desgaste diametral do rebolo.

### 3.3. Relação G

O desempenho de um rebolo pode ser avaliado através da relação G, definido como sendo a relação entre volume de material removido  $Z_w$  e volume de rebolo gasto  $Z_s$ , mostrado na equação (1):

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (1)$$

Os ensaios realizados com o método convencional apresentaram uma menor relação G que os ensaios utilizados realizados no método MQL, verificando-se também a influência da profundidade de corte. O gráfico que mostra a relação G está representado na Figura 7.

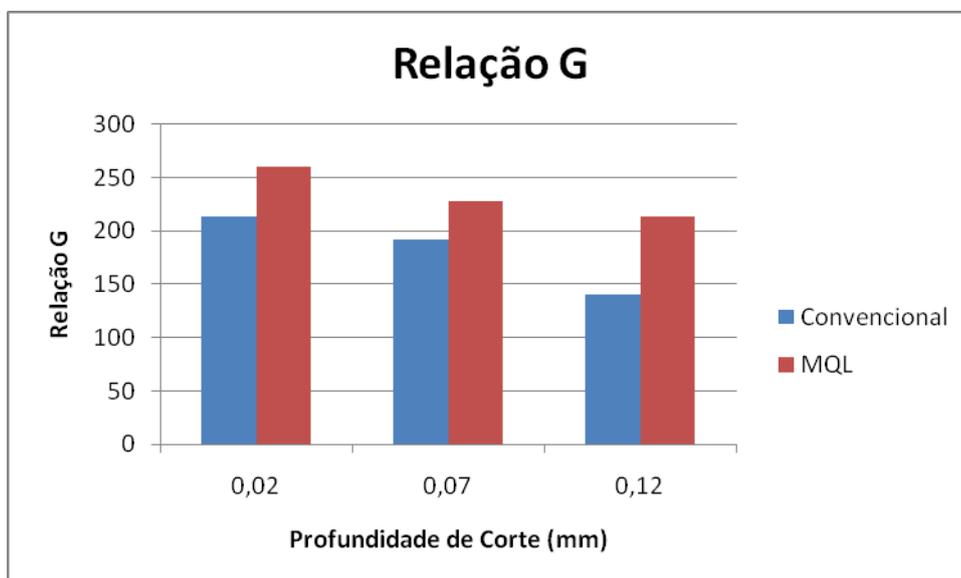


Figura 7 – Gráfico com os dados da relação G.

Quanto maior as profundidades de corte têm uma menor relação G. Este resultado indica que o mecanismo predominante de desgaste foi o microdesgaste por abrasão e que as forças atuantes na retificação não foram suficientes para provocar microfratura e remoção de grãos abrasivos.

## 4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que a retificação com o uso do método de lubri-refrigeração por MQL apresentou uma elevada rugosidade, e em contrapartida um baixo desgaste do rebolo, o que proporciona uma elevada relação G. Em processos que visam melhor qualidade superficial, deve-se fazer uma análise antes de utilizar este método.

Além disso, verifica-se que o método de lubrificação convencional exibe uma baixa rugosidade e um desgaste diametral maior que no método MQL, mas mesmo assim é uma boa alternativa para o uso na retificação. Contudo, este método utiliza uma grande quantidade de fluido de corte que é de difícil descarte posteriormente.

Pode-se concluir também que a profundidade de corte teve influência relevante nas variáveis de saída. A rugosidade aumentou diretamente com profundidade de corte, enquanto a relação G apresentou relação inversa.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, ao Programa Institucional de Bolsistas de Iniciação Científica (PIBIC) por conceder uma bolsa de apoio o que possibilitou a realização deste trabalho, bem como, um auxílio ao ampliamto dos conceitos da bolsista em questão.

Agradeço, também, ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pelo apoio, confiança e constante incentivo. Expresso minha profunda gratidão e apreço não somente pelos conhecimentos compartilhados, mas pelas lições de vida e exemplo de caráter.

Ao meu co-orientador, o Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar pelas valiosas conversas, troca de informações e apoio durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan, do Departamento de Engenharia do Campus da USP de São Carlos, pela valiosa ajuda com os corpos, que sem eles não seria possível a realização do trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Campus de Bauru por gentilmente ceder o Laboratório de Usinagem por Abrasão para a execução dos ensaios. Ao corpo docente da Faculdade de Ciências da UNESP, Campus de Bauru.

Um agradecimento especial ao aluno de Iniciação Científica Daniel Schuller, que estive presentes em todos os ensaios, pelo esforço, dedicação e indispensável auxílio na preparação e execução dos ensaios.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que tornaram este projeto possível, que me apoiaram e colaboraram para a realização deste projeto.

Agradeço especialmente a Deus por ter me concedido saúde, disposição e capacidade para a realização desta pesquisa científica.

## 6. REFERÊNCIAS

- Cambiella, A., Benito J. M., Pazos C., Cooa J., Hern'andez A., Fernandez J. E., 2007, "Formulation of emulsifiable cutting fluids and extreme pressure behavior", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 184, p.139-145.
- Barsoum, M.W., 2003, "Fundamentals of Ceramics", New York, Taylor & Francis Group, Cap. 1, 11.
- Diniz, A.E.; Marcondes, F.C.; Coppini, N.L., 2003, "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", São Paulo, Artbeller Editora.
- Dutta, D., Banerjee, S., Sujit, G., 2008, "Development of a simple technique for improving the efficacy of fluid flow through the grinding zone", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 197, p.306-313.
- 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, p. 1696-1705
- Jahanmir, S.; Xu, H.K.; Ives, L.K., 1999, "Mechanisms of material removal in abrasive machining of ceramics.", In: Jahanmir, S.; Ramulu, M.; Koshy, P." *Machining of Ceramics and Composites*", Marcel Dekker, Cap.2.
- Liao T. W., Tang F., Qu J., Blau P. J., 2008, "Grinding wheel condition monitoring with boosted minimum distance classifiers.", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, p.217-232.
- Malkin, S., 1989, *Grinding Technology: "Theory and Applications of Machining with Abrasives,"* 1ª edição, Chichester, Ellis Horwood Limited.
- Marinescu, I.; Pruteanu., 1998, M. "Deformation and fracture of ceramics materials." In: Marinescu, I.; Tönshoff, H.K.; Inasaki, I. "Handbook of Ceramic Grinding and Polishing", New Jersey. Noyes Publications, Cap.2.
- Nguyen A. T., Butler D. L., 2007, "Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterization", *Journal of Materials Processing Technology*.
- Pricken, W., 1999, "Dressing of vitrified bond wheels with CVDRESS and MONODRESS", *Industrial Diamond Review*, vol. 59, p.225-231.
- Rao, V., Agarwal, S., 2005, "A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, p.609-616.
- Ramesh, K., Yeo, S. H., Gowri, S., Zhou L., 2001, "Experimental evaluation of Super High-Speed Grinding of Advanced Ceramics", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, p.87-92.
- Sokovic M., Mijanovic K., 2001, "Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 109, p.181-189.
- Stemmer, C. E., 1992, "Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos." Editora da UFSC, Florianópolis, 314 p.

Tasdelen B., Thordenberg H., Olofsson D. "An experimental investigation on contact length during minimum quantity lubrication (MQL) machining.", Journal of Materials Processing Technology, vol. 203, 2008, p.221-231.  
Webster, J.A., "Selection of coolant type and application technique in grinding.", Supergrind, University of Connecticut, EUA, p.205-220, 1995.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

# MINIMUM QUANTITY OF LUBRIFICATION (MQL) - AN ALTERNATIVE TO THE CERAMIC FLAT GRINDING TO SOCIOECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br<sup>1</sup>  
Daiane Miekio Iceri, ra712035@feb.unesp.br<sup>1</sup>  
Rogério Melo e Sousa, ra611352@feb.unesp.br<sup>1</sup>  
Rodrigo Santana Destro, ra611263@feb.unesp.br<sup>1</sup>  
Marcos Hiroshi Oikawa, ra611328@feb.unesp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", UNESP – Campus de Bauru  
Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01 17033-360 Bauru - SP PABX: (14) 3103-6000

**Resumo:** Requiring a high surface quality and searching for new effective materials, the combination of ceramic and grinding has been giving good results, due to advantages that material has on the other: ability to operate at high temperatures, has high hardness, lower density than steel and its high resistance to wear. However, there are some difficulties in handling the ceramic, due to some of its physical properties and therefore it must be machined with a diamond wheel. Moreover, they can cause great risks damaging the environment and health of of the machining operators.

In such machining process the cutting fluids are needed. It's used in most cases, in large quantity. They have an important role during the grinding, like: the lubricating (reducing friction between the tool and the workpiece), and as a cooling in the contact zone, a longer life of the tool, chip removal and protection of metal parts against rust. But fluids have serious social and environmental problems, then, are seeking for new types and means of implementing them, which may give good results.

Use of the Minimum Quantity of Lubrication (MQL) came as a great solution to replace the conventional method, because this is not a lubrication system completely dry, but reduces a significant amount of fluid. Thus bringing some benefits to the environmental and socioeconomical issues.

Thus, this work study the replacement of the conventional method for MQL, observing the process data for the two methods, such as cutting force, vibration, acoustic emission, roughness and grinding wheel wear, represented by the ratio G, and that in such a study is a main focus the last two parameters. It was observed that the MQL method obtained an advantage over the loss on the wheel, having a G for about 20% higher than conventional lubrication. However, the surface finish was of lower quality, resulting in a roughness of about 30% higher with an average of 0.75mm. Therefore, taking into account the difficulty of disposal of cutting fluid and its significant environmental damage, the MQL can be a great alternative to be used in machining processes.

**Palavras-chave:** Grinding, Ceramic, MQL.

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