

Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizando a técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL) com rebolos diamantados

M. H. OIKAWA; E. C. BIANCHI, R.S. DESTRO; R.M. SOUSA; R.C. CANARIM; M.C.S. ALVES; P. R. AGUIAR

Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.
e-mail: marcos_oikawa@yahoo.com.br ; bianchi@feb.unesp.br ; rod_destro@hotmail.com ;
rogermsousa@gmail.com ; rubenscanarim@hotmail.com ; manoelcsa@yahoo.com.br ;
aguiarpr@feb.unesp.br

RESUMO

Nas últimas duas décadas, as cerâmicas avançadas têm sido exaustivamente utilizadas em aplicações na indústria devido às suas propriedades de elevada resistência ao desgaste e dureza. Entretanto, ainda se tem um alto custo agregado ao acabamento da peça. Esse acabamento geralmente 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, a redução do fluxo de fluido de corte utilizado, o que também visa atender exigências mundiais de preservação ambiental. Desta forma, este projeto pretendeu explorar a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) na retificação cilíndrica externa de mergulho em cerâmicas com rebolos diamantados. Foram utilizados dois métodos de refrigeração: o convencional e o MQL, com três avanços de corte para cada caso. Foram usados um bocal convencional e um bocal para o MQL, tendo este um uniformizador de saída do jato. Foram analisadas como variáveis de saída: a emissão acústica, relação G, aspecto da superfície via microscopia eletrônica de varredura (MEV), rugosidade e circularidade.

Assim, embora a refrigeração convencional ainda apresente os melhores resultados em comparação com a refrigeração com MQL, esta última pode atender os requisitos necessários para diversas aplicações, em especial quando utilizadas baixas espessuras equivalentes de corte (h_{eq}). Além disso, a técnica de MQL possui a vantagem de gerar um menor impacto ambiental em comparação com a lubrificação convencional, devido ao uso mínimo de fluido de corte cujo descarte é cada vez mais regulamentado e custoso.

Palavras - chaves: Cerâmicas avançadas, rebolos diamantados, retificação cilíndrica externa, MQL.

Advanced ceramics in the external cylindrical plunge grinding using the technique of minimum quantity of lubrication (MQL) with diamond wheels.

ABSTRACT

Advanced ceramics have been extensively used in applications in industry in the last two decades because of their properties of high resistance to wear and hardness. Nevertheless, the finishing process highly increases the cost of pieces and components. The finishing process is, in most cases, grinding, the only viable process that produces high quality surfaces and guarantees geometric precision. In this context, companies are seeking to optimize the grinding process by, for example, reducing the usage and flow of cutting fluid, which also helps to achieve global environmental preservation requirements. 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, surface condition by scanning electron microscopy (SEM), roughness and circularity.

Even though the conventional cooling still achieves better results in some aspects, in comparison with the MQL method, the latest is able to attend the requirements for many applications, especially with

lower feed velocities. Furthermore, the MQL method brings environmental benefits, due to its lower consumption, and thus disposal, of cutting fluids.

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

1 INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica brasileira possui grande importância nacional, respondendo por aproximadamente 1% do Produto Interno Bruto (PIB) [1]. Apesar das cerâmicas apresentarem características atrativas de dureza e resistência ao desgaste, ainda se tem um alto custo agregado relativo ao acabamento da peça, na maioria dos casos, devido ao processo de retificação na sua fase final de fabricação. Após a sinterização, a retificação é a melhor alternativa para a usinagem de materiais cerâmicos, que tem como finalidade a obtenção de superfícies de elevada qualidade superficial e precisão geométrica. Assim, mesmo a retificação sendo o processo mais viável economicamente, o acabamento de peças cerâmicas utilizando esta técnica chega a representar 50% do custo total de fabricação [2].

Como ocorre na indústria metal - mecânica, a retificação em cerâmicas é feita com a utilização de fluidos de corte. A função específica do fluido de corte no processo de retificação é 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 da máquina contra a corrosão. Entretanto, devido à atual preocupação com o deterioramento do meio ambiente, os fluidos de corte ganharam uma atenção especial, por possuir um alto poder de contaminação do meio ambiente. Visando esse problema, atualmente, vigoram 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 (MQL) vem como alternativa para as empresas que buscam uma melhor opção 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 pelo ar comprimido.

Logo, 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 à otimização do processo de retificação.

2 CERÂMICAS AVANÇADAS

O número de peças feitas com material cerâmico tem crescido gradualmente no campo da Engenharia Mecânica nos últimos tempos. Esse crescimento se deve ao uso das chamadas “Cerâmicas Avançadas”, que possuem melhores propriedades do que as cerâmicas tradicionais. O primeiro grupo possui vantagens em relação a materiais comuns de engenharia, como metais, devido principalmente a três características: elevada dureza, alta resistência ao desgaste e capacidade de operação em altas temperaturas. Alguns exemplos de utilização são em motores e turbinas de gás, que contém peças que possam suportar elevadas temperaturas (cerca de 2000° C), com alta segurança e resistência ao desgaste [3].

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. Os cerâmicos são formados a partir de ligações covalentes, ligações iônicas e combinações de ambos. A relação entre ligações covalentes e iônicas varia de 4:6 (Al_2O_3 e cerâmicas oxidadas) a 9:1 (SiC e cerâmicas 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 tipicamente possuem alta dureza, rigidez e alta temperatura de fusão [4].

Como a estrutura cristalina da cerâmica é menos simétrica que a estrutura dos metais, mesmo o aumento de temperatura, próximo ao ponto de fusão não resulta na ativação de mais do que dois ou três sistemas de deslizamento de discordâncias. Assim, há pouca deformação plástica e a elevada dureza persiste mesmo em altas temperaturas, ao contrário dos metais [5].

Um fato em comum entre as diferentes cerâmicas é que a última camada de elétrons desses materiais está completa. Dessa forma, por causa da ausência de elétrons livres, esses materiais são pouco reativos e bons isolantes elétricos. Uma visão mais geral das cerâmicas oxidadas e não-oxidadas com suas características físicas e mecânicas pode ser vista na tabela 1 [3]:

Tabela 1: Características físicas e mecânicas de algumas cerâmicas avançadas [3].

	Densidade gcm^{-3}	Dureza Vickers (<i>HV</i>)	Módulo de Elasticidade <i>E</i> (<i>GPa</i>)	Resistência a Fratura $K_{Ic}, (MP\sqrt{m})$	Resistência a Flexão (<i>MPa</i>)	Condutividade Térmica (<i>Wmk^{-1}</i>)	Resistência Mecânica (<i>MPa</i>)
Al ₂ O ₃	3,8...4,2	16,5	344	4	304	25	36.10 ⁻⁵
ZrO ₂	5,9	13	206	5	980	28	42.10 ⁻⁵
SiC	3,1...3,2	25	392	3,6	490	59	70.10 ⁻⁵
B ₄ C	2,5	26	300	7,5	700	29	40.10 ⁻⁵
SiN ₄	3,2	15	294	6	588	30	69.10 ⁻⁵
SiN ₄	2,5	17	345	6	750	17	21,5.10 ⁻⁵
C45	7,8	-	210	120		50	60.10 ⁻⁵

De acordo com a análise da tabela 1, pode-se notar que as densidades das cerâmicas possuem valores bastante inferiores aos dos aços. Assim, as distâncias interatômicas são grandes e a densidade dos elétrons é pequena. Ligações covalentes precisam de uma grande energia de ligação ($1,1 \times 10^{-17} \text{ Jatom}^{-1}$), que é cerca de 1000 vezes maior que as ligações metálicas ($1,5 \times 10^{-20} \text{ Jatom}^{-1}$). Em muitas estruturas, a densidade dos deslocamentos é pequena e sua mobilidade prejudicada, aumentando assim, os valores de dureza (*HV*). A alta rigidez é indicada pelo valor do módulo de Young, mas é mais perceptível se o quociente *E/HV* é comparado entre as cerâmicas e os aços. No caso de um material altamente dúctil, o valor *E/HV* é alto, cerca de 250, diferente do caso de um material altamente frágil, que varia em torno de 20. A resistência à fratura K_{Ic} , ou a resistência à fratura em flexão, é baixa comparada com metais, devido à rigidez e fragilidade. Além disso, como as cerâmicas em geral são frágeis, estas não podem suportar as grandes tensões internas induzidas por expansões térmicas [4].

3 A CERÂMICA E O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Durante o processo de sinterização, há um “encolhimento” do material que não pode ser evitado. Consequentemente é necessário um processo de manufatura do material melhor elaborado a fim de se obter a forma geométrica e a precisão dimensional necessária para o componente [4].

A retificação é a mais favorável operação de acabamento dos materiais cerâmicos [6]. Pelas características destes, é evidente que o processo de remoção no material (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 é retirado gerando trincas, separação e remoção do material [3].

A formação de trincas é baseada no modelo de indentação, que consiste em se utilizar uma esfera de pequeno diâmetro como indentador. As seis fases de formação das trincas podem ser observadas na Figura 1 [7]:

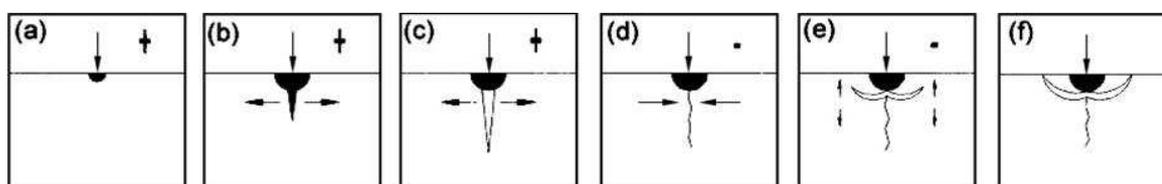


Figura 1: Estágios de formação das trincas através da indentação [7].

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

devido às tensões laterais (Fig. 1e). 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. 1f).

O modelo das trincas induzidas em função da indentação é apresentado na figura 2 [7].

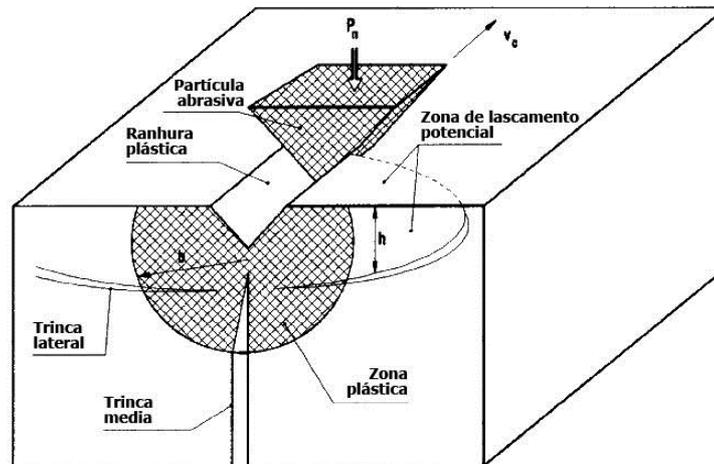


Figura 2: Zona plástica e formação das trincas médias/radiais e laterais devido ao riscamento por um grão abrasivo [7].

É preciso estar atento às taxas de avanços na remoção de material, pois os movimentos dos grãos abrasivos provocam um lascamento adicional que proporcionam um aumento na remoção de material, conforme apresentado na figura 3 [3].

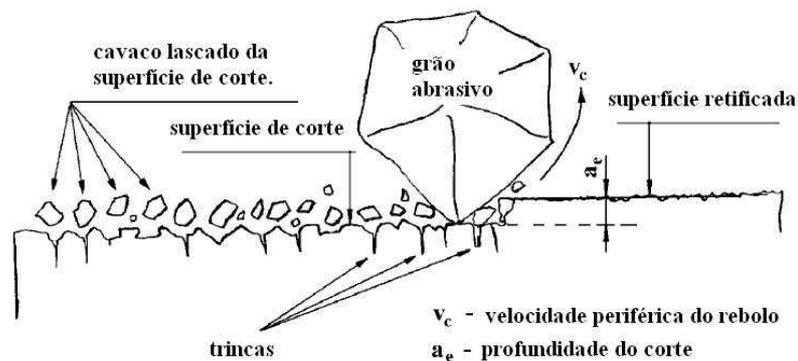


Figura 3: Modelo de formação do cavaco na retificação em cerâmicas [3].

O mecanismo de remoção de material na retificação de cerâmicas depende da magnitude dos impactos e da densidade de defeitos tais como falhas, trincas e o tamanho do campo tensionado. Quando a região, onde é aplicada a tensão, é menor que o tamanho do defeito, o material é removido principalmente por deformação plástica. Caso contrário, o modo frágil é predominante [4].

4 O REBOLO DIAMANTADO

Rebolo é a ferramenta de corte utilizada no processo de retificação. Tal ferramenta é composta basicamente de grãos abrasivos de elevada dureza que efetuam o corte, presos a uma matriz aglomerante de um material menos duro e com porosidade entre os grãos que alojam os cavacos gerados até que saiam da região de corte [8].

O desempenho e as propriedades dos rebolos são dependentes dos seguintes fatores: material do grão abrasivo bem como o seu tamanho, material aglomerante, propriedades do abrasivo, do aglomerante e da porosidade (espaço vazio entre os grãos abrasivos no aglomerante).

A durabilidade do diamante é uma consequência de uma particular coincidência de uma alta condutividade térmica (cerca de 2 a 6 vezes maior que a do cobre), e um baixo coeficiente de expansão térmico [9].

O diamante, como uma forma metaestável do grafite à pressões normais, tende a transformar-se em grafite a temperaturas relativamente baixas: 700°C no ar e 1500°C em meio a uma atmosfera inerte. Sendo o diamante formado por carbono, interações com o ferro são esperadas. A afinidade química entre o carbono e o aço de baixo carbono pode facilitar um desgaste químico, que leva a formação de componentes específicos, como o Fe₃C, que por sua vez tende a causar um desgaste prematuro dos grãos de diamante. Deste modo, o diamante não é utilizado em operações de retificação de aços, ficando sua principal aplicação em processos de manufatura de cerâmicas [9].

5 ESPESSURA EQUIVALENTE DE CORTE (h_{eq})

A espessura teórica de material removido pelo rebolo, numa volta completa, denomina-se de espessura equivalente de corte h_{eq} . É um parâmetro que permite quantificar uma condição de usinagem, sendo ainda definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material Q_w' e a velocidade de corte [10]. Desta forma, a espessura equivalente de corte para o processo de retificação cilíndrica externa pode ser representada pela Equação 1 [11].

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

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 [13]. O 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 (consequentemente com velocidade de corte mais elevada) a fim de se melhorar a rugosidade, aumentar a vida útil do rebolo e diminuir os esforços de corte [12].

6 RELAÇÃO G

O desempenho de um rebolo pode também ser avaliado através da relação G, definida como sendo a relação entre volume de metal removido Z_W pelo volume de rebolo gasto Z_S [4]. A equação 2 apresenta a determinação numérica do valor de relação G.

$$G = \frac{Z_W}{Z_S} \quad (2)$$

Essa variável caracteriza o desgaste do rebolo sob determinada condição de usinagem. Analisando a Equação 2, nota-se que quanto maior for o desgaste do rebolo, menor será a relação G. Assim, o rebolo permanece agressivo durante o processo de retificação, devido à perda excessiva de grãos abrasivos da superfície de corte da ferramenta; consequentemente, o custo do rebolo é aumentado pela necessidade de se repor o rebolo com maior antecedência. Quando o desgaste do rebolo for menor que no caso anterior, a relação G será alta, porém a agressividade da superfície de corte diminuirá progressivamente durante o processo de usinagem; assim, torna-se necessário afiar periodicamente o rebolo, mas o consumo do mesmo é menor.

7 EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica é definida como uma onda elástica transiente gerada pela rápida liberação de energia a partir de uma determinada fonte, que pode ser de dentro do material, quando esta é submetida a um estado de stress. Esta liberação de energia está associada a uma abrupta redistribuição de tensões internas e, como resultado, uma onda de tensão é propagada através do material [13].

A deformação plástica é uma forte fonte de energia de emissão acústica, sendo este o motivo do grande potencial da monitoração por emissão acústica nos processos de manufatura em que ocorre deformação no material. Outras possíveis fontes são a fratura (devido à geração de novas superfícies pela liberação de energia elástica, provocada pela propagação de microtrincas) e o atrito (devido à deformação plástica ou mesmo fratura decorrente da interação entre as superfícies da ferramenta e a peça) [14].

A emissão acústica (EA) é considerada como um excelente método para caracterizar a atividade de remoção do material, fornecendo a condição da ferramenta e qualidade da peça naquele instante. As ondas associadas à emissão acústica podem ser detectadas por um sensor de EA (transdutor pizoelétrico), que seja montado em uma posição perto da região de corte [15].

8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é utilizada na caracterização de superfícies fraturadas, para investigar a estrutura superficial, detectar falhas e poros abertos. Um feixe de elétrons com cerca de 0,01 µm de diâmetro varre a superfície linearmente e o impacto dos elétrons primários provoca a emissão de elétrons secundários da amostra. Estes elétrons secundários são detectados e formam uma imagem, onde as regiões mais profundas irradiam menos e as mais elevadas irradiam mais elétrons. A resolução deste microscópio é limitada, geralmente, a 0,01 µm. [5]

A análise da microestrutura do material da peça usinada pode revelar danos térmicos ocorridos durante o processo de retificação, além de trincas e outros danos que podem comprometer, de forma significativa, a integridade superficial das peças retificadas.

9 CIRCULARIDADE

A circularidade de uma peça é a condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada. Este erro é quantificado pela diferença dos raios entre os diâmetros dos dois círculos concêntricos. A medição mais adequada de circularidade é feita por aparelhos especiais de medida de circularidade utilizados em metrologia.

10 RUGOSIDADE

Quanto à qualidade da topografia da superfície, a rugosidade do material pode ser definida como o desvio da superfície geométrica ideal. Os sistemas mais comuns de medição da rugosidade são o analisador de contato mecânico e os sistemas ópticos [5]. O parâmetro de rugosidade média (Ra) é o mais utilizado (adotado pela ABNT no Brasil) e é definido como uma média aritmética dos valores absolutos dos desvios de altura da rugosidade medida para um comprimento medido.

11 A TÉCNICA DA MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO (MQL)

A técnica de MQL 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 em água [16].

Os sistemas de MQL 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 do reservatório. Estes sistemas apresentam um fluxo volumétrico de refrigerante entre 0,5 a 10 l/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 MQL 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 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 [7, 17, 18].

A figura 4 apresenta, esquematicamente, um sistema de MQL baseado no princípio de pressão (que será usado neste trabalho); porém, representado para a usinagem com uma ferramenta de geometria definida [16].

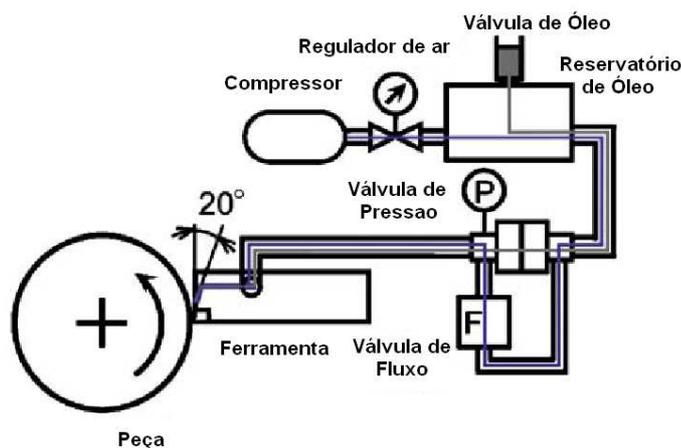


Figura 4. Modelo esquemático de um Sistema de MQL por pressão para uma ferramenta de geometria definida [16].

Heisel [17] relata que o fato de que os sistemas de MQL requerem um espaço físico 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.

12 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MQL

Existem muitas vantagens da utilização do 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 [4, 18].

Heisel [17] relata que, no caso da retificação, uma das vantagens da MQL é que não surgem as tensões residuais causadas por grandes gradientes de temperaturas, sendo isso especialmente importante no caso de materiais de corte frágeis.

Há várias vantagens devido à 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. Há 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 [19].

Young [20] cita a mínima quantidade de lubrificação como uma das alternativas de um processo mais limpo e menos prejudicial ao 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 [21] 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.

13 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 SiO_2 , CaO e MgO . A densidade aparente deste material é de $3,7 \text{ g/cm}^3$.

O rebolo utilizado foi do tipo diamantado, pois as peças a serem usinadas são de cerâmica [9]. O rebolo utilizado foi o 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 para refrigeração convencional foi uma emulsão de 5 % em água do óleo semi-sintético ROCOL 4847 Ultracut 370. Este fluido de corte possui na sua composição: anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocitivos não iônicos, alcanolomidas, entre outros. Entretanto, o fluido foi complementado com um antiespumante também da ROCOL, de especificação Ultragurd AF(S) e um bactericida.

O equipamento para a aplicação da MQL é o baseado no princípio de pressão, no qual o refrigerante é bombeado através de uma tubulação distinta da do ar comprimido [17]. Somente no bocal este refrigerante é misturado ao fluxo de ar e, então, direcionado a interface de contato peça-ferramenta. 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 regulação 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.

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 medição da rugosidade das peças foi obtida através de um dos sistemas mais usados atualmente, o sistema mecânico [5], através de um rugosímetro Surtronic 3+ da marca Taylor Hobson, que fez a medição direta do parâmetro Ra.

As análises de microestrutura (através da 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. Isso foi feito por meio da medição do relevo da impressão do perfil do rebolo desgastado em um corpo de prova devidamente preparado para tal fim. Nesse método foi utilizado 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, 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 h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3} foram: $h_{eq1}=0,0707\mu\text{m}$, $h_{eq2}=0,094\mu\text{m}$ e $h_{eq3}=0,118\mu\text{m}$.

14 RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 e rugosidade.

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

14.1 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.

As influências do tipo de refrigeração e da espessura equivalente de corte estão representadas na figura 5:

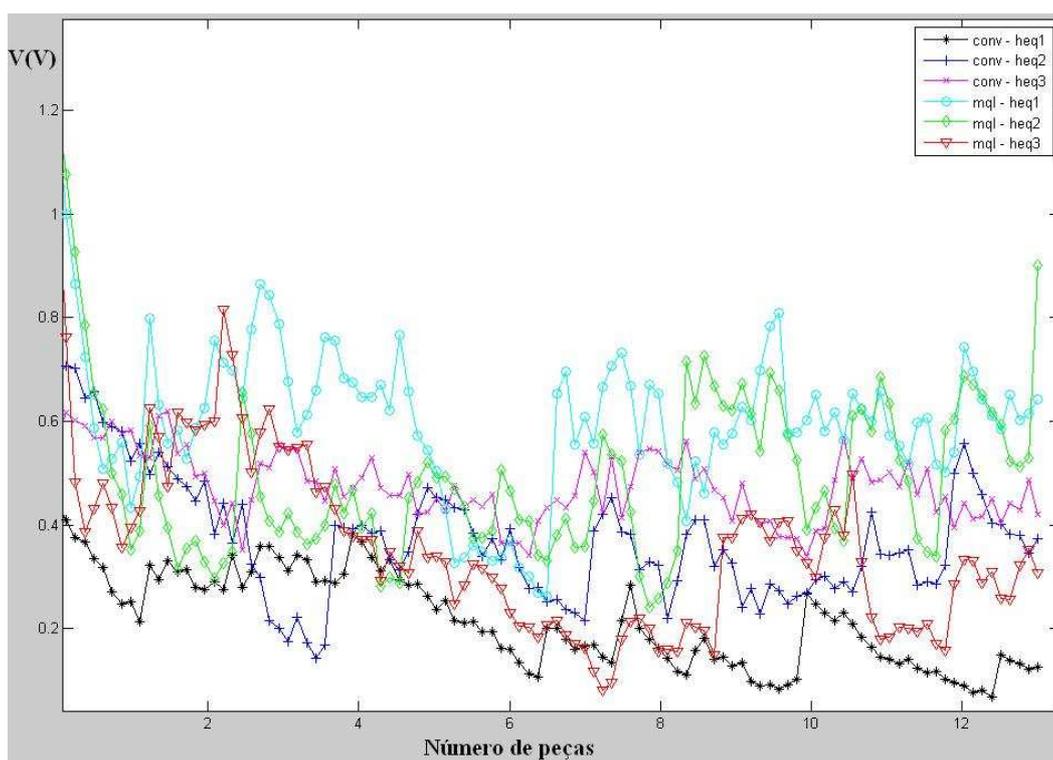


Figura 5: Emissão Acústica

Analisando-se a figura 5, 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 h_{eq1} (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 h_{eq1} .

Isto ocorre pela pequena influência da espessura equivalente de corte na técnica de refrigeração com MQL causada por outra variável mais significativa no processo como, por exemplo, a dissipação térmica da região de corte. Considerando 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 feito 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.

14.2 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 sua largura total, cuja medida 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 6 são apresentados os valores da relação G, ilustrando a influência da espessura equivalente de corte com o tipo de lubri-refrigeração empregada nos resultados desta variável de saída.

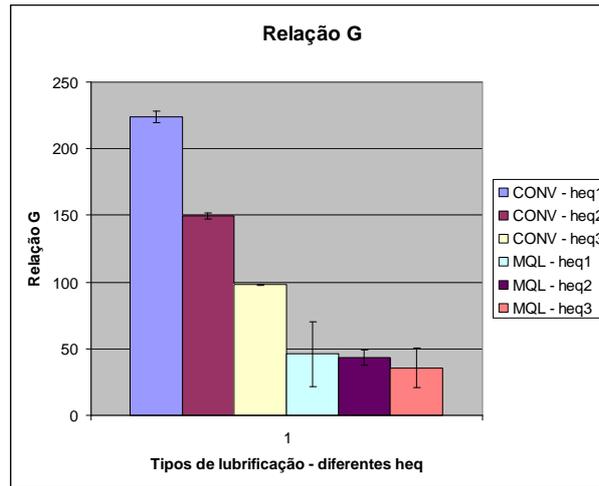


Figura 6: Desgaste diametral do rebolo diamantado.

É possível notar que os maiores valores obtidos para a relação G foram para a refrigeração convencional, comparado com a técnica do MQL. Isto ocorre pela 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, conseqüentemente na relação G. Pode-se ainda observar que quanto maior a espessura equivalente de corte, maior o desgaste do rebolo, conseqüentemente, menor é a relação G. Este resultado já era esperado porque quanto maior o valor de espessura equivalente de corte, maior é a taxa de remoção de material e maior o esforço (força de corte) necessário na sua remoção.

Para a técnica do MQL a espessura equivalente de corte não influenciou efetivamente na relação G, ou seja, em qualquer condição de usinagem ensaiada sempre houve a deteriorização da superfície de corte do rebolo, o que propicia maior desgaste do rebolo e 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.

14.3 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 7 representa os resultados obtidos em microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as condições de lubri-refrigeração convencional. As espessuras equivalentes de corte das amostras observadas foram respectivamente de h_{eq1} , h_{eq2} , h_{eq3} , com ampliação de 1.000 vezes.

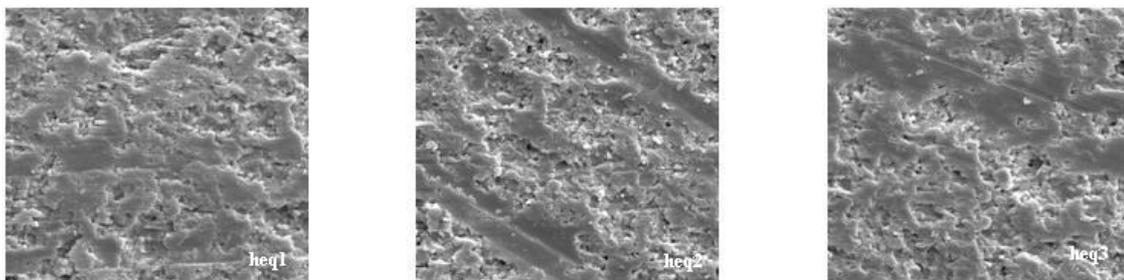


Figura 7: MEV para a refrigeração convencional para h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3}

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

A figura 8 representa os resultados obtidos em microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as condições de lubrificação com a técnica do MQL. As espessuras equivalentes de corte das amostras observadas foram respectivamente de h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3} , com ampliação de 1.000 vezes.

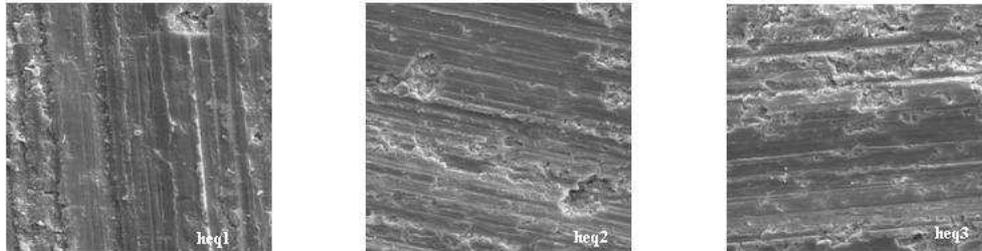


Figura 8: MEV para a refrigeração pelo MQL para h_{eq1} , h_{eq2} e h_{eq3}

Pode-se observar que, dos corpos de prova usinados utilizando a técnica do MQL, o modo de remoção dúctil do material foi o predominante. Isso proporciona ótimas condições de acabamento superficial, no que diz respeito à resistência do material, devido à presença reduzida de microtrincas que atuam como agentes concentradores de tensão. Analisando as fotografias, 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.

14.4 Circularidade

Os resultados para a circularidade foram obtidos para todos os ensaios. Assim, obteve-se uma evolução do erro de circularidade com as medições de 5 corpos de prova retificados para cada ensaio (corpos de prova 1, 4, 7, 10, 13).

A figura 9 apresenta uma evolução do erro de circularidade para todas as condições utilizadas neste experimento.

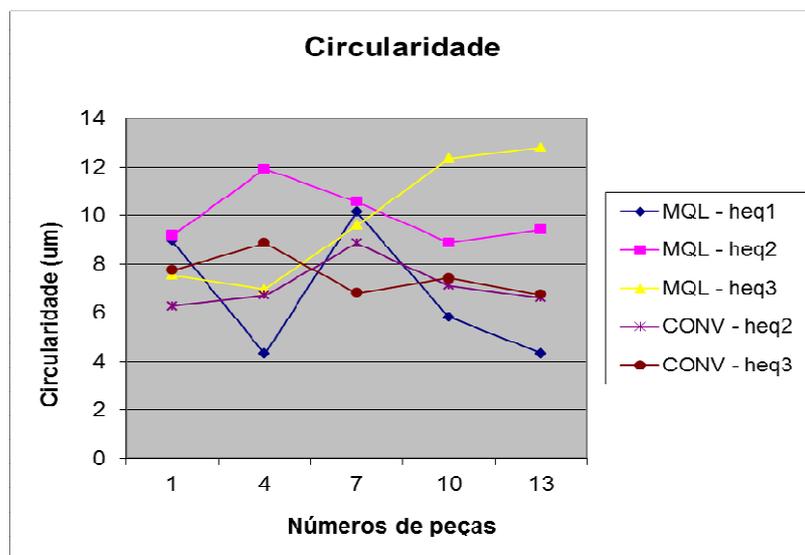


Figura 9: Evolução do erro de circularidade

Pode-se notar que somente para a condição mais severa da lubrificação com MQL, houve um aumento drástico do erro de circularidade. No entanto, houve a tendência dos resultados para a MQL serem mais elevados do que os obtidos na refrigeração convencional. Isso ocorreu devido às dificuldades de lubrificação, refrigeração e remoção do calor gerado. Em condições mais brandas de operação, a técnica da MQL não apresentou diferenças significativas de erros de circularidade, como foi observado através da análise da totalidade dos dados.

14.5 Rugosidade

A figura 10 apresenta 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 em posições diferentes, para cada um dos 3 ensaios realizados para cada condição de lubri-refrigeração, com seus respectivos desvios padrões.

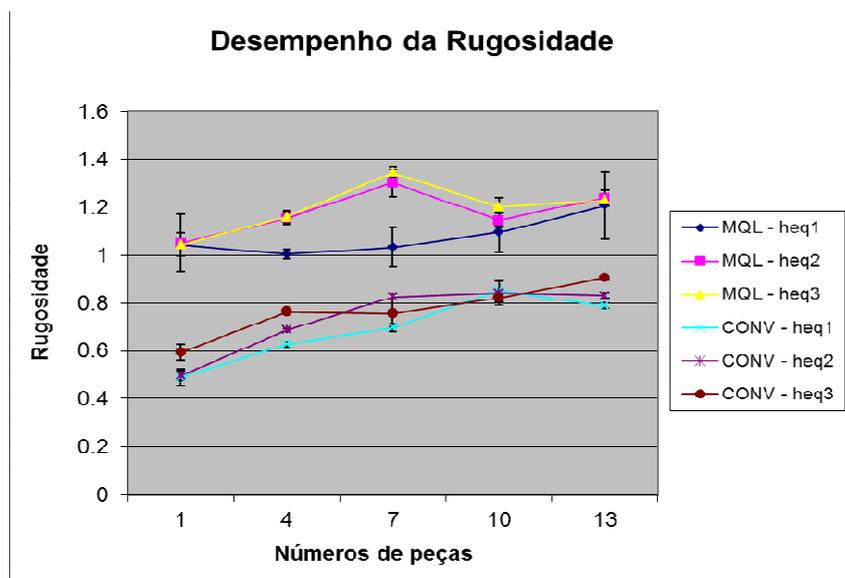


Figura10: Evolução da rugosidade ao longo dos ensaios.

Analisando-se os resultados obtidos observa-se, de uma maneira geral, que os valores de rugosidade foram menores para a lubri-refrigeração convencional do que para a técnica da MQL, que foi provocada pela melhor remoção de cavaco da zona de corte feita pela primeira. No caso da refrigeração com a técnica da MQL, é formada uma pasta (“borra”) de fluido com cavaco de difícil remoção, que mesmo o ar comprimido em altas velocidades tem dificuldade de retirar. Esse cavaco que permanece na zona de corte afeta consideravelmente os valores de rugosidade da peça.

Observa-se que quanto menor a h_{eq} , menores valores de rugosidade superficial são obtidos pela técnica de MQL. Isso comprova que uma espessura inferior de cavaco possibilita valores menores de rugosidade, devido à menor taxa de remoção do material e maior lubrificação alcançada.

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.

15 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 a 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 da MQL. Porém, os valores obtidos principalmente com o menor 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 da 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 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).

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

Dessa forma, a análise geral dos resultados indica que a técnica da MQL demonstrou ser uma alternativa viável para a substituição da lubri-refrigeração convencional. No entanto, isso só é possível 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 da MQL, deve-se fazer um levantamento específico de custo para cada caso, pois na MQL há um gasto maior de material abrasivo (rebolo). Entretanto, esse gasto pode ser compensado pela não necessidade de manutenção e descarte do fluido de corte, o que atualmente é um custo considerável em um processo de produção, devido às normas atuais de preservação ao meio ambiente.

16 AGRADECIMENTOS

Desejamos manifestar nossos agradecimentos à equipe editorial da Revista Matéria pela revisão do texto, além da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro e bolsa de iniciação científica concedidos.

17 BIBLIOGRAFIA

- [1] BUSTAMANTE, G.M., BRESSIANI, J.C., “A indústria cerâmica brasileira”, *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 3, Maio/Junho, 2000.
- [2] IRANI R.A., BAUER R.J., WARKENTIN A., “A review of cutting fluid application in the grinding process”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.45, n. 5, pp.1696–1705, 2005.
- [3] MAMALIS A. G.; KUNDRAK J., GYANI K; HORVATH M.; “On the Precision Grinding of Advanced Ceramics”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 20, pp. 255–258, 2002.
- [4] 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*, v. 17, pp.87–92, 2001.
- [5] MARINESCU, I., TÖNSHOFF, H.K., INASAKI, I., *Handbook of Ceramic Grinding and Polishing*, New Jersey. Noyes Publications, cap.2, 1998.
- [6] LIAO, T.W; SATHYANARAYANAN, G.;PLEBANI L.J.; THOMAS, M.U.; LI, K., “Characterization of grinding-induced cracks in ceramics”, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 37, n.9, pp. 1035-1050, 1995.
- [7] MALKIN S., HWANG T. W., “Grinding mechanism for ceramics”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 45, n.2, pp. 569, 1996.
- [8] MALKIN, S., *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, 1^a ed., Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.
- [9] MARINESCU, I; ROWE, W.; DIMITROV, B.; INASAKI, I., *Tribology of abrasive machining process*, Nova York, Willian Andrrew Publishing, 2004.

- [10] OLIVEIRA, J. F. G., *Análise da ação do macroefeito de dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação*, Tese de D Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, pp. 272, 1988.
- [11] GRAF, W., *Cylindrical Grinding*, Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, pp. 87, 2004.
- [12] DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., *Tecnologia da usinagem dos materiais*, 2ª ed, Artiber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, p.225-244, 2000.
- [13] RAVINDRA, H.V., SRINIVASSA, Y.G., KRISHNAMURTHY, R., *Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting*, *Wear*, v. 212, n. 1, pp. 78-84, November, 1997.
- [14] LEE, D.E., HWANG, I., VALENTE, C.M.O., OLIVEIRA, J.F.G., DORNFELD, D.A., “Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, n. 2, , pp.176–188, February, 2006.
- [15] STEPHENSON, D.J., SUN, X., ZERVOS, C., “A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, n.10, pp. 1053–1063, August, 2006.
- [16] OBIKAWA, T., KAMATA, Y., SHINOZUKA, J., “High-speed grooving with applying MQL”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, n. 14, pp.1854–1861, November, 2006.
- [17] HEISEL, U., LUTZ, M., SPATH, D., WASSMER, R., WALTER, U., “A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte”, *Revista Máquinas e Metais*, Ano XXXIV, n. 385, pp. 22-38., Fevereiro, 1998.
- [18] KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G., “Dry cutting”, *Annals of the CIRP – Manufacturing technology*, v. 46, n. 2, pp. 519-526, 1997.
- [19] ATTANASIO, A., GELFI, M., GIARDINI, C., REMINO, C., “Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear”, *Wear*, v. 260, n.3 , pp. 333–338, February, 2006.
- [20] YOUNG, P., BYRNE, G., COTTERE, M., “Manufacturing and the Environment”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 13, n.7, pp. 488-493, 1997.
- [21] 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.