

Retificação de cerâmica de alumina relacionada com diferentes técnicas de lubri-refrigeração: convencional e mínima quantidade de lubrificação

(Grinding of alumina ceramics with different cooling and lubrication techniques: conventional and minimum quantity of lubrication)

R. M. e Sousa¹, D. M. Iceri¹, R. S. Destro¹, M. H. Oikawa¹, E. C. Bianchi¹, P. R. de Aguiar², C. A. Fortulan³

¹Departamento de Engenharia Mecânica, ²Departamento de Engenharia Elétrica

Faculdade de Engenharia de Bauru Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube 14-01, Vargem Limpa, Bauru, SP 17033-360

³Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de S. Paulo, S. Carlos, SP
bianchi@feb.unesp.br

Resumo

Atualmente a preocupação ambiental está fazendo com que as empresas busquem diminuir os impactos ambientais por elas causados, ao mesmo tempo em que melhoram a qualidade do produto e processos de fabricação. Logo, muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas na área de usinagem para se analisar o real dano ao meio ambiente quando usados diferentes métodos de lubri-refrigeração. Este trabalho teve como objetivo analisar a qualidade da peça produzida e o desgaste do ferramental de corte de uma retificadora plana ao se usinar cerâmica de alumina com dois métodos distintos de aplicação de fluido de corte: método convencional com vazão de 458,3 mL/h e o método da mínima quantidade de lubrificação (MQL) com 100 mL/h. A partir dos resultados obtidos pode-se constatar que para os mesmos parâmetros de usinagem a técnica do MQL utilizou uma quantidade muito menor de fluido e garantiu bons resultados de desgaste diametral do rebolo. No entanto, a qualidade da peça foi bem pior para o método do MQL em relação a técnica de refrigeração convencional. Estes resultados mostraram que se utilizando formas alternativas de lubrificação para reduzir o uso do fluido de corte, são possíveis dependendo de quais fatores são mais importantes para o processo que se deseja. Nesse sentido, se o método do MQL fosse adotado pelas empresas dependentes da retificação, certamente iria trazer, de um lado, benefícios quanto a problemas de descarte e reciclagem de fluido de corte, mas por outro lado, levaria a uma menor qualidade superficial das peças.

Palavras-chave: cerâmica, retificação, fluido de corte, MQL.

Abstract

Nowadays, environmental concerns are causing companies to seek reduce the environmental impacts caused by them, while improving product quality and manufacturing processes. Therefore, much research is being developed in the machining area to examine the actual damage to the environment by utilizing different methods of lubrication and cooling. This study aimed to analyze the surface roughness of the machined part and the wear of the grinding wheel in the flat grinding of alumina ceramics with two methods of cooling-lubrication: The conventional method with a flow rate of 27.5 L/min and the method of the minimum quantity of lubrication (MQL) at 100 mL/h. With the obtained results it's possible to say that, for the same machining parameters of MQL and conventional techniques, the MQL technique used a much smaller amount of fluid and assured good results for the diametral wear of the grinding wheel. However, the superficial roughness of the piece was worse for the MQL method than the conventional cooling technique. These results showed that using alternative forms of lubrication to reduce the use of cutting fluid are possible, depending on which factors are most important to the process that is wanted. Accordingly, if the MQL technique was used, it would surely bring, on one hand, the benefits of the reduction of the problems of recycling and disposal the cutting fluid, but on the other hand, leads to a lower surface quality of the parts.

Keywords: ceramics, grinding, cutting fluid, MQL.

INTRODUÇÃO

Os processos de manufatura industriais têm avançado de tal forma a sempre visar à melhoria da qualidade do produto final aliado à diminuição de custos de produção. Do mesmo modo, a preocupação ambiental é uma realidade para as empresas que devem seguir leis e normas para garantir o bom uso dos recursos naturais e evitar danos ao meio ambiente.

A retificação é um processo utilizado para acabamento de peças onde se utiliza fluido de corte como lubrificante. Esse fluido é nocivo ao meio ambiente e o consumo energético do processo varia de acordo com os parâmetros utilizados.

Corpos cerâmicos

Durante o processo de fabricação das cerâmicas,

especialmente em sua queima, reações termicamente ativas se processam no interior da massa, promovendo a formação das fases determinantes para as características mecânicas finais do produto [1]. Um dos principais motivos das boas propriedades desse material é a presença de fases cristalinas como quartzo e mulita. O surgimento de alguns sistemas cristalinos é originário na própria queima da massa cerâmica e também no período de resfriamento desta forma, pode-se dizer que para algumas cerâmicas estas fases cristalinas podem ter mudança de fase no resfriamento com variações dimensionais significativas que acarretam na concentração de tensões, durante a usinagem modificações nas tensões matriciais podem acarretar em trincas. Se no ciclo de queima a temperatura necessária para fusão das fases cristalinas é atingida ou superada observa-se sua formação, assim como a taxa de resfriamento pode também afetar de maneira significativa a quantidade de cristais formados [2]. Um corpo cerâmico de alumina pode ter grandes valores de propriedades mecânicas, como Dureza Vickers de 12 GPa (~85 HRC), módulo de elasticidade de 300 GPa e módulo de tenacidade de $4,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ o que demonstra porque o uso desse material é grande e vem aumentando ainda mais. [1-3].

Muitos defeitos superficiais podem ter origem no processo de sinterização da cerâmica. Estes defeitos, como trincas, alta rugosidade e ranhuras, têm influência direta na diminuição da qualidade mecânica das porcelanas. O processo de retificação permite retirar essa camada defeituosa do material permitindo assim uma grande melhora em suas propriedades [4, 5]. Apesar disso, pode introduzir outros defeitos mais críticos, se não bem controlado o processo, e sendo assim, diminuir o módulo de Weibull.

Retificação de cerâmicas

O processo de retificação de corpos cerâmicos, que possuem capacidade de deformação elástica muito baixa, é caracterizado pela ocorrência de fraturas frágeis causadas por carregamento normal e endentação dos grãos abrasivos na superfície devido ao deslizamento do rebole [4, 6]. A Fig. 1 mostra um desenho esquemático do processo de retificação plana. V_w é a velocidade da mesa, a é a profundidade de corte aplicada, d_s é o valor do diâmetro do rebole, V_s representa a velocidade angular do rebole [7] e $h_{m\acute{a}x}$ é a espessura de corte na retificação.

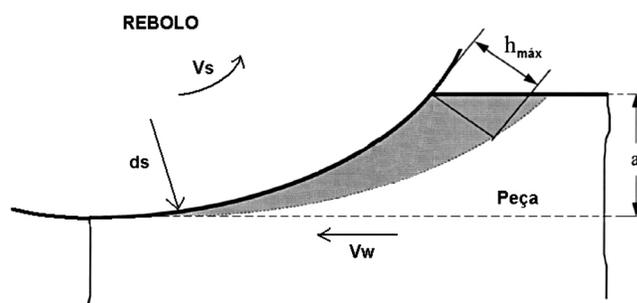


Figura 1: Esquema do processo de retificação plana.
[Figure 1: Schematic of the process of grinding flat.]

Tensão residual

Durante a retificação, forças locais são impostas na superfície devido à endentação dos grãos abrasivos do rebole na superfície da peça. Por isso é possível observar formação de ranhuras profundas com formação de picos e vales e fina camada de tensão residual [4]. A camada comprimida de tensão pode ser um facilitador de falhas dependendo do seu valor, quando submetido a esforços elevados, ou quando seu valor excede limiar da resistência do material [8]. Quando essa compressão é aplicada na superfície da peça usinada, pode-se obter aumento nas propriedades mecânicas do material, dificultar a propagação das trincas e retardar seu surgimento especialmente na pequena camada abaixo da superfície [9]. Utilizando diferentes profundidades de corte na retificação de cerâmicas avançadas a variação do valor de tensão encontrado na fina camada foi calculada. Dependendo dos parâmetros utilizados, pode-se ter uma variação de 1,85 GPa a 2,50 GPa de compressão adicionada na superfície sendo os maiores valores localizados na zona de saída do grão abrasivo [8]. A resistência mecânica do material alumina foi testada experimentalmente. Este material apresentava valor de resistência mecânica de 269 MPa (com variação de 18 MPa) e após o processo de retificação houve um aumento para 323 MPa (com variação de 30 MPa). Mas quando aplicado valores muito grandes de profundidade pode-se obter até redução no valor de resistência [9, 10]. Um aumento de 92 MPa na resistência mecânica de um corpo cerâmico após retificação com rebole diamantado e profundidade de $10 \mu\text{m}$. Segundo os autores, cerca de 40 MPa do aumento foi devido a tensão residual aplicada e 50 MPa tem relação direta com a remoção das trincas superficiais que existiam na peça e prejudicavam suas propriedades [12].

A resistência à flexão da peça cerâmica tem relação direta com rugosidade final após o processo de retificação. Ao se usar rebolos com grãos finos para retificar nitrato de silício, obteve-se bons valores de rugosidade, logo módulo de resistência à flexão foi melhorado. Além disso, defeitos superficiais podem facilitar a fratura de corpos cerâmicos e um processo de usinagem que retire boa parte dessas imperfeições melhora muito as qualidades do material [4].

Trincas

A presença de trincas microscópicas em um corpo cerâmico pode diminuir drasticamente suas propriedades reduzindo a resistência mecânica da peça em mais de 50% [5]. Existem três tipos básicos de trincas que podem ocorrer por endentação: trincas Hertzian, trincas radiais e trincas laterais [6]. O surgimento de cada uma depende da carga aplicada. As do tipo Hertzian são trincas cônicas que surgem por endentação de grãos esféricos e contribuem para danos subsuperficiais assim como as trincas radiais que são semicirculares perpendiculares à superfície e se formam devido à endentação afiada. Já as trincas laterais ocorrem paralelamente à superfície da cerâmica e são geradas devido

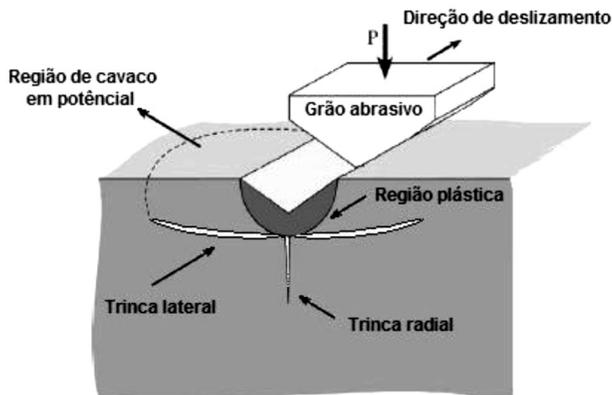


Figura 2: Trincas laterais e radiais formadas por ação da endentação do grão abrasivo.

[Figure 2: Lateral and radial crack formed by action of the indentation of the abrasive grain.]

à endentação afiada e, por terem essa geometria, ajudam a remoção do material. A Fig. 2 mostra um esboço da formação e localização das trincas radiais e laterais. Analisando a figura, é possível observar que as trincas laterais favorecem a formação de região potencial para cavaco.

Ao redor das micro-trincas pode-se constatar um aumento do valor de tensão residual de compressão aumentando resistência nessa área e desviando as trincas dessa região. Logo, a região das trincas não representa o caminho mais frágil do corpo cerâmico e sim que a resistência ao redor dessa área é maior que do resto da peça [5]. As trincas laterais têm grande papel na remoção do material assim como sua microestrutura. Ao retificar corpos cerâmicos de 12,8 GPa (de granulação fina) e 12,0 GPa (de granulação grossa) foi verificado grande diferença no sistema de remoção [3]. Para a granulação fina, a propagação e interação das trincas formaram um sistema facilitando remoção de grande seção de material maior que o tamanho dos grãos. Porém, quando se retificou cerâmicas de maior granulometria, a remoção foi associada com arranque individual dos grãos apresentando apenas micro-trincas na superfície final. Portanto para corpos com maior tamanho de grão pode-se observar diminuição de danos superficiais na retificação. Com baixo valor de $h_{\text{máx}}$ aplicado (0,15 mm), foi constatado que o impacto dos grãos com a superfície é menor e apresenta baixa formação de trincas tanto normais como laterais exigindo uma força de corte mais alta [7]. Porém quando usado valor maior de $h_{\text{máx}}$ (0,25 mm) a força tangencial foi menor que a encontrada com 0,15 mm devido ao surgimento de mais trincas laterais que facilitaram a remoção do material.

Relação G

O desempenho de um rebolo é associado a um parâmetro denominado relação G, definido como sendo a relação entre o volume de material removido “ Z_w ” e o correspondente volume de rebolo gasto na operação “ Z_s ”, ambos em mm^3 . Assim, a relação G pode ser expressa como [12]:

$$G = Z_w / Z_s \quad (\text{A})$$

sendo

$$Z_s = (\pi/4) [350^2 - (350 - D)^2] \cdot 8 \quad (\text{B})$$

Nesta relação, 350 é o diâmetro do rebolo em mm , 8 é a largura do corpo de prova em mm e D é o desgaste do rebolo, também em mm . Essa relação pode ter influência direta da temperatura na região retificada. Quando a temperatura é alta (alto atrito entre rebolo e peça seguida de baixa refrigeração) o desgaste superficial da ferramenta é acentuado e pode ter muita influência na rugosidade final da peça [13, 14]. Ao retificar nitrato de silício com rebolo de carbeto de silício (SiC), constatou-se que a remoção do material foi prejudicada devido a não haver grande diferença de dureza entre rebolo e peça [13]. Com isso, forças de retificação medidas foram muito grandes, gerando maior desgaste, diminuindo valor da relação G. Contudo, quando se aumentou taxa de remoção a relação G aumentou, pois para grandes profundidades de corte a forças de retificação foram altas e, como cerâmicas são materiais frágeis, a formação de trincas laterais e conseqüentemente a remoção do material é facilitada. Nessa condição o corpo também apresentou baixos sinais de vibração, que tem relação direta no aumento da rugosidade [15].

Ao se retificar nitrato de silício utilizando alto valor de $h_{\text{máx}}$ (0,25 mm) obteve-se relação G de 768 [7]. Esse valor foi devido ao grande impacto dos grãos abrasivos do rebolo com a superfície frágil da cerâmica fazendo surgir muitas trincas laterais o que facilitou a remoção do material. Conseqüentemente, para baixos valores de $h_{\text{máx}}$ (0,15 mm) relação foi cerca de 69% menor, chegando em apenas 237. Um processo que apresente baixa relação G provavelmente possui baixa lubrificação da zona de interação entre a peça e o rebolo gerando alta fricção. Com a utilização de fluidos com grande quantidade de óleo lubrificante pode-se reduzir desgaste e logo aumentam relação [14].

Parâmetros de usinagem

Uma velocidade de rebolo muito usada para retificação plana é de aproximadamente 40 m/s, mas esse parâmetro não apresenta grande relação com rugosidade final da peça [13]. Alumina foi retificada com rebolo diamantado à velocidade convencional (40 m/s) e a alta velocidade (160 m/s) [16]. Quando se aumentou taxa de remoção do material de 6,25 mm^3/s para 16,6 mm^3/s obteve-se um acréscimo de 90% no valor da força normal específica (de 7 N/mm para 13,3 N/mm). Para força tangencial, aumentando a mesma taxa, observou-se um aumento de 117% na força (de 2,0 a 4,33 N/mm). Porém, quando analisado a qualidade do acabamento final, tanto para velocidade convencional como para alta velocidade foram obtidos bons valores. Utilizando-se profundidades de corte maiores que 20 μm na retificação de alumina, falhas provenientes da fabricação foram removidas melhorando suas propriedades [9]. Porém, muitas falhas

foram encontradas na superfície devido ao aumento da força de contato. Com isso, módulo de Weibull e resistência mecânica são prejudicados, pois se formam muitas trincas liberando tensão residual. Foi constatado que na retificação de cerâmicas a energia dissipada tem relação direta com tamanho da região de contato e velocidade da mesa utilizada (V_w) [17]. Como o contato entre rebolo e peça é praticamente constante durante o processo, velocidade da mesa tem maior influência na dissipação de energia assim como profundidade de corte.

Fluido de corte

Na retificação, a fricção entre os grãos abrasivos do rebolo com a peça produz uma zona localizada de calor. O aquecimento na zona retificada pode causar maior desgaste ao rebolo, danificar a peça e inviabilizar o processo. Logo, a temperatura dessa região é controlada usualmente pela aplicação do fluido de corte (emulsão de óleo e água) [18]. Outra função do fluido de corte é a lubrificação da zona de contato do rebolo e peça. Um sistema bem lubrificado faz com que o gasto do rebolo seja menor, qualidade superficial da peça seja melhorada e se reduza o gasto com troca de ferramentas. [14]. Os melhores lubrificantes são os óleos integrais, porém são extremamente nocivos à saúde do trabalhador. Então, os lubrificantes mais usados são emulsões sintéticas que podem ser recicladas e garantem boa qualidade de refrigeração e lubrificação [14, 20]. O pH de fluidos de corte deve estar entre 9 e 11 e pode ser controlado através da quantidade de emulsionante. Uma variação nesse valor pode favorecer crescimento de bactérias, problemas para o operador e queda no desempenho do fluido [21]. A temperatura gerada no processo de retificação tem relação direta com os parâmetros utilizados no processo [17]. O atrito entre o rebolo e a peça na retificação faz com que calor seja gerado aquecendo todo o sistema. De acordo com que se aumenta a energia transmitida há um acréscimo de temperatura que depende do tipo de cerâmica utilizado. Porém os corpos de porcelana apresentam boa resistência a quente, logo com aumento de temperatura pode-se verificar formação de fase vítrea e redução das fraturas no processo de retificação [17]. A fim de determinar a dissipação de energia em forma de calor para a peça, retificou-se nitrato de silício a 30 m/s com rebolo diamantado [22]. Para profundidade de corte de 38 μm e utilizando-se emulsão de 5% de óleo à taxa de 30 mL/s foi constatado que 16% da energia utilizada para o processo foi transferida para a peça em forma de calor. Entretanto, quando realizado retificação a seco para profundidade de 25 μm notou-se um aumento na energia específica de corte e a energia dissipada para a peça como calor foi de 59%, mostrando assim a influência do poder de resfriamento do refrigerante.

Métodos de lubri-refrigeração

Existem três tipos básicos de refrigeração: convencional, otimizada e mínima quantidade de lubrificante (MQL). A

técnica convencional consiste em aplicação do fluido de corte a alta vazão e baixa velocidade. A otimizada utiliza vazão menor que na convencional, mas a velocidade de aplicação é feita com o mesmo valor da velocidade periférica do rebolo e a técnica de MQL consiste em aplicação de pouca quantidade de óleo lubrificante com ar comprimido diretamente na região de usinagem [19, 23]. Quando se usa técnica convencional um dos problemas na aplicação do fluido é vencer a barreira turbulenta de ar formada na zona retificada que prejudica o resfriamento, pois ela faz com que o fluido desvie e a vazão penetrante na região de contato seja muito pequena [18, 24]. Um novo tipo de bocal para aplicação de fluido foi proposto para retificação cilíndrica onde a zona retificada ficou envolvida com fluxo de fluido de corte [18]. Com isso, constatou-se que ao invés de ar entrar na região de turbulência, o fluido preencheu esse espaço e melhorou muito a taxa de lubrificação cerca de duas vezes com relação à convencional. Com a refrigeração otimizada, o fluido é aplicado com velocidade igual à do rebolo. Dessa forma, o líquido lançado na zona retificada consegue quebrar a barreira turbulenta de ar realizando uma melhor retirada de calor e lubrificação na interação dos grãos abrasivos [20, 24]. O uso de fluidos de corte é um problema para o meio ambiente e para o trabalhador. Deste modo, muitos trabalhos são desenvolvidos para buscar técnicas menos nocivas, como por exemplo, a técnica de MQL. Essa técnica proporciona uma boa lubrificação e resfriamento para retificação, dependendo dos parâmetros utilizados, reduzindo assim o desgaste do rebolo e garantindo boa qualidade superficial [14, 19]. Pasta de grafite, que é um excelente lubrificante sólido, na retificação cilíndrica de aço 1030. Os autores puderam verificar uma redução na energia específica de corte assim como na força tangencial desenvolvida para a usinagem [25]. Com isso, houve uma clara redução na fricção entre peça e rebolo e conseqüentemente bons resultados de rugosidade e relação G.

MATERIAIS E MÉTODOS

Retificadora: foi realizada a análise das variáveis de saída, sendo elas, potência da máquina, sinais de vibração, desgaste do rebolo e rugosidade bem como a compilação de dados que permitiu a confecção deste trabalho. Os ensaios experimentais foram executados na retificadora plana tangencial Sulmecânica 1055E.

Procedimentos pré-ensaio: os procedimentos realizados sejam antes, durante, ou após cada ensaio foram os mesmos tanto para os ensaios da técnica convencional lubri-refrigeração, quanto para a técnica de MQL. Logo, os procedimentos aqui e a seguir relatados foram realizados para todos os ensaios. A seguir é listada a relação dos procedimentos gerais seguidos no início de cada ensaio: liga-se o rebolo que permanece funcionando por cerca de quinze minutos, para que a máquina sofra a dilatação normal, não comprometendo os dados dos ensaios; liga-se o fluido de corte, no caso do método convencional, fazendo com que este

circule pelo sistema; em seguida, mede-se a concentração deste, utilizando um refratômetro da marca ATAGO, modelo N-50E. A concentração utilizada para os ensaios com técnica convencional e otimizada foi de cerca 5% de concentração do fluido; dressagem do rebolo, utilizando os dressadores descritos. Durante este procedimento, busca-se obter uma superfície homogênea, e renovar os grãos abrasivos. O valor médio de cada descida durante a dressagem foi $1 \mu\text{m}$; normalização da superfície da peça retificando uma pequena camada superficial até que o rebolo toque toda a superfície no movimento da mesa, zerando assim o marcador do fuso de profundidade.

Procedimentos durante o ensaio: uma vez iniciado os ensaios, os procedimentos a seguir foram seguidos: realizar a descida do rebolo (com fluido na vazão adequada) através do fuso de profundidade, conforme a espessura equivalente de corte do ensaio (20, 70 ou $120 \mu\text{m}$), a cada passada da peça pelo rebolo, sempre no movimento de encontro destes dois (movimento de avanço). Cada indicação no fuso de profundidade corresponde a $0,01 \text{ mm}$, ou $10 \mu\text{m}$; verificação dos dados coletados em tempo real pelo computador, utilizando o programa LabView 8.0®; essa verificação visual foi útil para detecção de problemas durante o ensaio, já que alterações anormais tornam-se visíveis no comportamento das variáveis, o qual é praticamente constante.

Procedimentos pós-ensaio

Corpos de prova: os corpos de prova foram produzidos por prensagem e sinterização com dimensões de $117 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ e consistiram de barras retangulares de uma alumina comercial, composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos fundentes como SiO_2 , CaO e MgO . Este material apresentou densidade aparente $3,701 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$.

Rebolo: o rebolo diamantado utilizado, da Nikkon Ferramentas Diamantadas, D 107 N 115 C50, sendo que a letra D indica o tipo de grão utilizado (diamante), 107 o tamanho do grão utilizado ($107 \mu\text{m}$), a letra N a dureza do rebolo (dureza média), o valor 115 indica o tipo de diamante e a designação C50 a concentração dos grãos.

Técnicas de refrigeração: utilizou-se nesta pesquisa dois métodos distintos de lubri-refrigeração, sendo que em cada um deles empregou-se um bocal distinto.

Convencional: o método de lubri-refrigeração convencional, caracterizado pela aplicação de fluido de corte de alta vazão e baixa pressão, foi realizado através de um bocal de seção retangular de dimensões $49 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ e área seccional 147 mm^2 , Fig. 3. Este bocal trabalhou com vazão $27,5 \text{ L/min}$, pressão inferior a $0,2 \text{ kgf/cm}^2$ e velocidade do fluido de corte 3 m/s .

Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL): o sistema de MQL é composto basicamente por: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador e bocal. O equipamento de mínima quantidade de lubrificação permite uma fina regulagem do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha. Nesta pesquisa, utilizou-se o aparelho Accu-Lube 79053D. O fluido

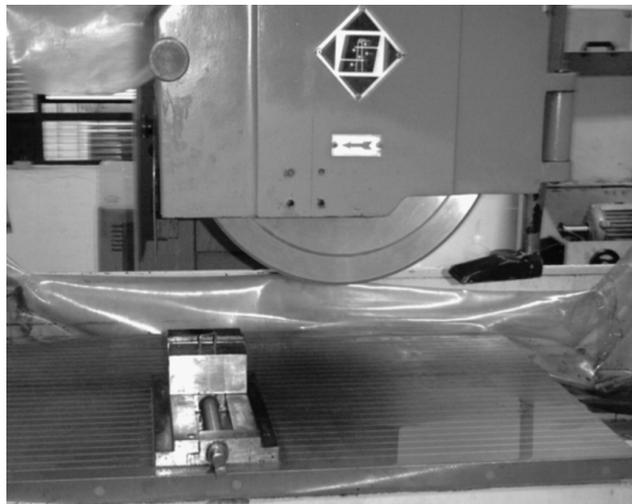


Figura 3: Setup da bancada para ensaio utilizando bocal para técnica de lubrificação convencional.

[Figure 3: Setup of the test bench using the conventional technique nozzle.]

de corte foi Accu-Lube LB 1000 ITW Chemical Products Ltd., que é um óleo vegetal biodegradável com aditivos de extrema pressão, para operações severas, e antioxidantes. A medição da vazão de ar comprimido foi realizada por meio de um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro do tipo turbina. Este medidor de vazão foi conectado a uma rede de ar vinda de um compressor, fornecendo a leitura digital da vazão em m^3/h . A vazão ideal encontrada foi de $26,6 \text{ m}^3/\text{h}$ (450 L/min). A vazão de óleo determinada em ensaio preliminar foi de 100 mL/h ($0,0017 \text{ L/min}$). As medições de vazões do óleo foram feitas acoplando-se uma proveta graduada no orifício de saída do bocal. O controle das vazões do óleo e do ar foi feito por registros de agulha existentes no interior do equipamento utilizado. O bocal utilizado para aplicação da técnica de mínima quantidade de lubrificante foi confeccionado, Fig. 4. A Fig. 5 mostra a parte

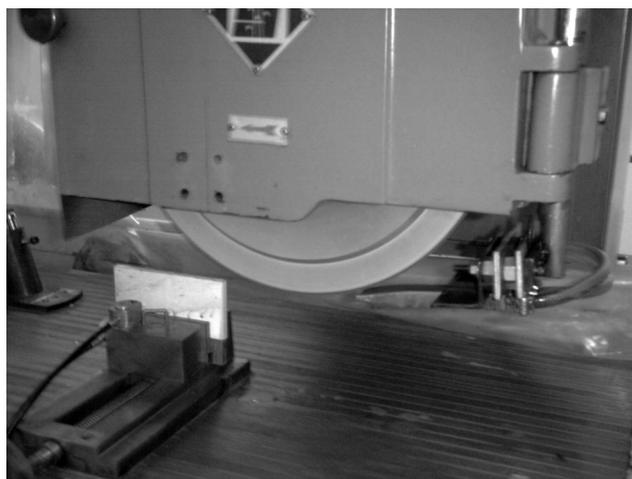


Figura 4: Setup da bancada para ensaio utilizando bocal para mínima quantidade de lubrificante.

[Figure 4: Setup of the test bench using minimum amount of lubricant nozzle.]

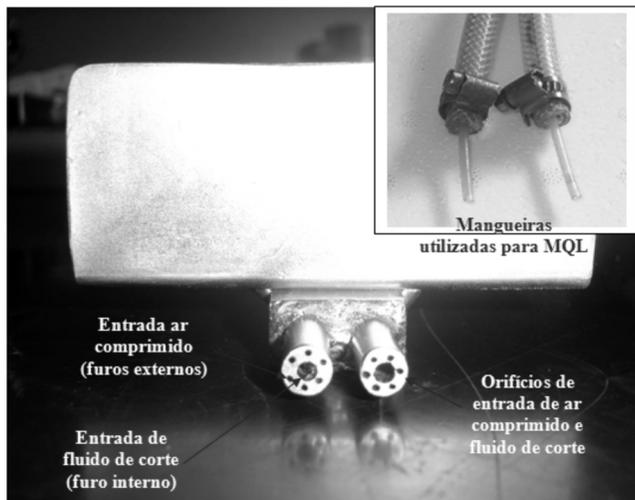


Figura 5: Vista traseira do bocal utilizado no MQL.
[Figure 5: Rear view of the nozzle used in MQL.]

posterior do bocal, onde é possível verificar um furo maior no centro, circundado por diversos furos menores. Pode-se perceber, fazendo a verificação adequada da mangueira do equipamento de MQL, que esta é dupla, possuindo assim uma mangueira externa e outra interna. Desta forma, sabe-se que pela parte interior haverá apenas óleo lubrificante e pela parte posterior, passará apenas ar comprimido, ocorrendo a mistura dentro da região do bocal. Para a correta aplicação do método, a mangueira interna foi conectada ao furo maior do bocal, ficando a mangueira externa presa aos furos menores.

Na Fig. 6 é possível verificar que neste bocal há uma câmara interna na qual ocorre mistura do ar comprimido com o fluido de corte evitando turbulências. A saída do bocal tem o formato retangular. A vazão da técnica de MQL utilizada neste trabalho foi de cerca de 100 mL/h. A calibração desta vazão foi feita com um recipiente graduado e um cronômetro. No recipiente foram feitos dois orifícios nos quais se introduziram as mangueiras internas do sistema de MQL, pois é por estas que o fluido é liberado. Dessa forma, o fluxo de ar da mangueira externa não prejudicaria a medição da vazão. Assim, com o sistema ligado, media-se quanto tempo este levava para encher 10 mL do recipiente graduado. A partir de uma regra de proporção matemática simples determinou-se quanto tempo deveria ser levado neste enchimento. A calibração foi manual e foi feita nos reguladores de fluxo de óleo do aparelho de MQL, até que

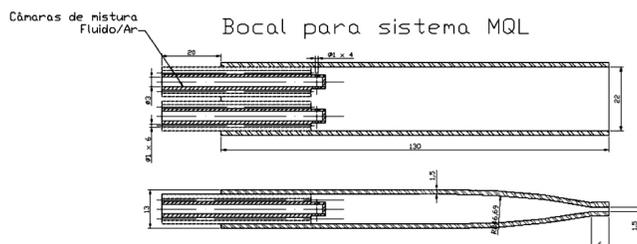


Figura 6: Desenho do bocal de MQL.
[Figure 6: Design of the MQL nozzle.]

fosse obtido um valor bem próximo da vazão estipulada.

Classificação dos ensaios: o trabalho consistiu em nove ensaios de retificação, sendo três com cada método de refrigeração: convencional e MQL. Cada ensaio foi precedido pela dressagem do rebolo, retificação de 16000 mm³ ou 2000 mm³/mm (3,2 mm de altura) de material, marcação do rebolo em uma peça para futura medição da relação G e medição de rugosidade superficial (repetindo esse procedimento cinco vezes a cada 3200 mm³ de material removido, ou, aproximadamente 400 mm³/mm de material). A Tabela I mostra a seqüência dos ensaios realizados.

Todos os ensaios foram realizados com velocidade de corte V_s de 35 m/s e velocidade da mesa da retificadora V_w de 2,3 m/min.

Tabela I - Delineamento dos ensaios realizados.
[Table I - Study of the realized tests.]

| Método de Refrigeração | Profundidade de corte (mm) | Ensaio |
|------------------------|----------------------------|--------|
| Convencional | 0,02 | 1 |
| | 0,07 | 2 |
| | 0,12 | 3 |
| MQL | 0,02 | 4 |
| | 0,07 | 5 |
| | 0,12 | 6 |

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Deve-se ressaltar que nesta pesquisa foram utilizados dois, dos três, tipos de lubrificação mencionados, sendo eles o método convencional e o MQL. Para análise dos resultados foram obtidos valores de desgaste do rebolo e rugosidade superficial da peça usinada.

Desgaste do rebolo: o desgaste do rebolo se deve a três fatores principais: desgaste do aglomerante, desgaste do grão abrasivo, e friabilidade dos grãos. Trata-se de uma variável de extrema importância no processo de retificação, já que quanto maior o desgaste do rebolo, menor a sua vida útil. O aumento do poder lubrificante proporcionado pelo fluido resulta na diminuição do desgaste do rebolo através da redução do atrito grão-peça e do atrito cavaco-ligante, permitindo que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo ao ligante ocasionando menor desgaste do rebolo [26].

Pela Fig. 7 pode-se notar que o desgaste diametral do rebolo na técnica de MQL foi menor em todas as profundidades de corte. Para espessura equivalente de corte de 0,02 mm, o desgaste do método convencional foi cerca de 1,3 vezes maior que o MQL na mesma condição. Para uma espessura de 0,07 mm, o MQL foi 0,84 do comportamento do método convencional, e para 0,12 mm, o convencional foi 1,5 vezes maior.

É indiscutível que quanto maior a penetração do fluido lubri-refrigerante na zona de corte, menor o desgaste por atrito entre a ferramenta e o cavaco, e melhor a remoção

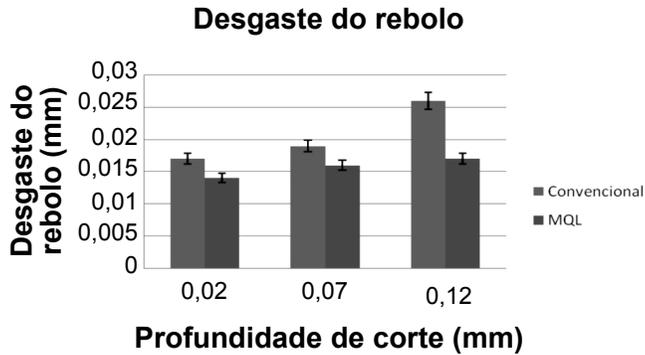


Figura 7: Dados obtidos para o desgaste do rebolo nos diferentes métodos de lubrificação.

[Figure 7: Grinding wheel wear in the different methods of lubrication.]

do calor gerado. Deve-se levar em consideração também a porosidade do rebolo, pois esta é responsável pelo alojamento do cavaco gerado, possibilitando assim melhor acesso do fluido à zona de corte, com conseqüente melhora na lubrificação, diminuindo o desgaste por atrito. Sendo assim, no MQL, partes do cavaco misturado ao óleo pulverizado alojam-se nos poros do rebolo, permitindo que uma porção do lubrificante atinja melhor a zona de corte, diminuindo o desgaste por atrito, permitindo também que o fluxo de ar remova parte do calor gerado, melhorando a refrigeração do local. Assim, mesmo que esta condição de alojamento gere na superfície usinada maior rugosidade, ela é responsável por contribuir com a diminuição do desgaste da ferramenta. No entanto, quando o cavaco gerado fica maior, como quando se aumenta a espessura equivalente de corte, os poros não são capazes de alojar esse cavaco maior, e o fluxo de ar é ineficiente em removê-lo da zona de corte. Assim, o cavaco atrapalha o corte e aumenta os esforços abrasivos da ferramenta sobre a peça, diminuindo a capacidade de lubrificação da zona de corte, danificando a superfície. Observa-se que a tendência do comportamento do método convencional é de certa forma linear com relação ao aumento da espessura equivalente de corte. O fluxo intenso de fluido remove o cavaco da zona de corte, mas não atinge esse local de forma tão eficiente como o MQL a baixas espessuras de corte.

Rugosidade superficial: a importância da análise desta variável deve-se ao fato de que o acabamento superficial afeta de forma significativa a resistência à fadiga das peças quando estas são submetidas a esforços. A rugosidade de uma peça ainda está diretamente ligada à lubrificação e depende principalmente do tamanho do grão abrasivo presente no rebolo, das condições de dressagem, e da taxa de remoção de material [26]. Assim, devido à importância da rugosidade nas peças retificadas, realizou-se neste trabalho a medição desta variável, sendo adotado o parâmetro rugosidade média (R_a). Nos gráficos a seguir, os valores de rugosidade são dados em micrometros, sendo que foram obtidos a partir da média aritmética de todos os ensaios de mesma espessura equivalente de corte, ou seja, a média de cinco valores em cada ensaio.

As análises de rugosidade seguem nas figuras a seguir.

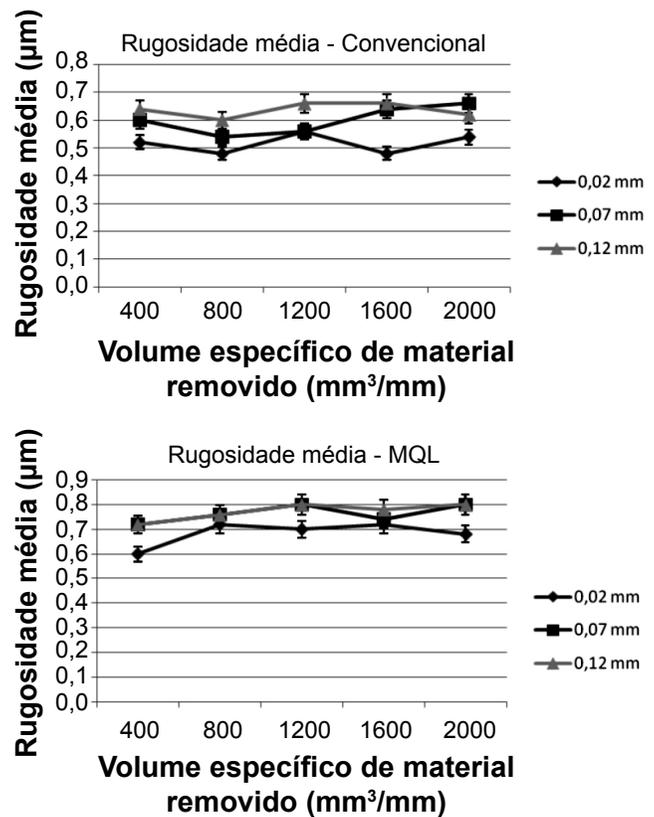


Figura 8: Dados de rugosidade superficial para os métodos convencional e MQL.

[Figure 8: Surface roughness for the conventional and MQL.]

Pode-se verificar que para baixas profundidades de corte e espessuras equivalentes de corte há uma tendência, para este método, de menores valores de rugosidade para menores profundidades de corte. À medida que estas profundidades vão aumentando a tendência é diminuir a qualidade superficial, aumentando a rugosidade. É possível ainda, verificar que, para o método MQL, a tendência de aumento de rugosidade, e, conseqüentemente, a diminuição da qualidade superficial, se dá com o aumento da profundidade de corte, de maneira semelhante ao encontrado para o método convencional. As possíveis causas para tal tendência estão relacionadas com o maior tamanho dos cavacos removidos e a maior dificuldade em retirá-los da zona de corte. A rugosidade relaciona-se também com a potência e a força de corte, pois a maior força necessária ao corte faz com que este seja feito de forma mais abrasiva, prejudicando a rugosidade das peças. Assim, as operações mais severas quanto à remoção de material, geram maiores forças de corte, necessitam de maior energia específica para remoção do material, e conseqüentemente danificam mais a superfície, prejudicando o acabamento superficial.

Verifica-se que todos os valores de rugosidade obtidos na lubri-refrigeração convencional ficaram abaixo dos valores obtidos no método de MQL. Isto pode ser explicado pelo fato de que o método convencional, com seu fluxo abundante de fluido, é capaz de retirar os cavacos da zona

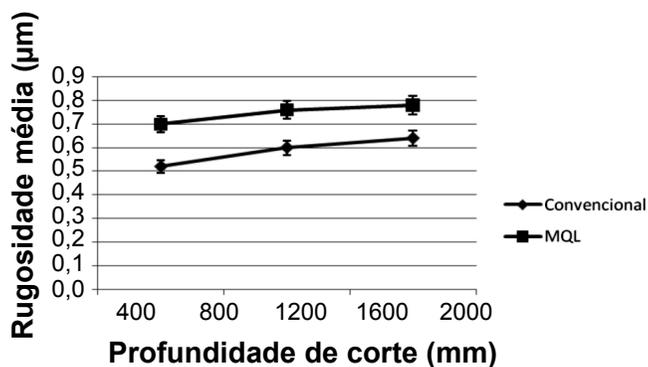


Figura 9: Comparação entre os métodos convencional e MQL através dos dados de rugosidade.

[Figure 9: Comparison between the conventional and MQL through data roughness.]

de corte, e melhorar a lubrificação da região, diminuindo o coeficiente de atrito entre ferramenta e peça. O fato de o MQL ser ineficiente nestas tarefas, como comprovado com o aumento da espessura equivalente de corte, faz com que o cavaco permaneça na zona de corte, prejudicando a remoção de material. No caso do MQL, quanto maior o cavaco gerado, maior a dificuldade em removê-lo, maiores problemas na qualidade superficial, o que é novamente comprovado com os altos valores de rugosidade. Além disso, a pequena quantidade de óleo pulverizada mistura-se aos cavacos gerados, formando uma espécie de “lama”, a qual localizada entre o rebolo e a peça, pode ocasionar riscos na superfície usinada, aumentando em grande escala os valores de rugosidade.

CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos experimentalmente utilizando dois diferentes métodos de lubri-refrigeração, o convencional e o de mínima quantidade de lubrificação (MQL), pode-se concluir para a retificação plana de cerâmica de alumina, visando principalmente a verificação da rugosidade e o gasto do ferramental de trabalho, é que a rugosidade das peças retificadas com o método convencional foi sempre menor que a apresentada pelo método MQL. Isto se dá pelo aumento da vibração no método do MQL, que faz com que a qualidade superficial diminua consideravelmente. Desta forma, verifica-se também que o desgaste do rebolo para o método convencional foi cerca de 1,3 vezes maior que o apresentado para o método do MQL nas condições de 0,02 mm e 0,07 mm de profundidade de corte, enquanto, para 0,12 mm, obteve-se um desgaste de, aproximadamente, 1,5 vezes maior para o método convencional em comparação com o método MQL. Além das conclusões acima, pode-se finalizar refletindo sobre a viabilidade do uso da técnica de MQL na retificação. Esta técnica, na retificação de cerâmicas, é viável, quando a preocupação se dá pelo ganho de produção com a maior vida do rebolo sem perda considerável da qualidade superficial. Quando a análise é feita sobre a potência necessária para o corte percebe-

se que a técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) exige muito maior potência elétrica, aumentando assim, consideravelmente a energia elétrica consumida pela empresa. Enfim, deve-se ponderar os benefícios obtidos com o menor desgaste do rebolo e os prejuízos pelo aumento do consumo de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] R. P. S. Dutra, L. R. de Araujo Pontes, “Obtenção da análise de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico”, *Cerâmica* **48**, 308 (2002) 223-230.
- [2] E. Quinteiro, A. O. Boschi, F. J. S. Arantes, T. Manfredini, C. Leonelli, C. Siligardi, “Importância do controle da velocidade de resfriamento na obtenção de vidrados vitro-cristalinos”, *Ceram. Ind.* **7** (2002) 41-43.
- [3] Zong-Han Xie, R. J. Moon, M. Hoffman, P. Munroe, Yi-Bing Cheng, “Role of microstructure in the grinding and polishing of α -sialon ceramics”, *J. Eur. Ceram. Soc.* **23** (2003) 2351-2360.
- [4] Y. Zheng, J. M. Vieira, F. J. Oliveira, J. P. Davim, P. Brogueira, “Relationship between flexural strength and surface roughness for hot-pressed Si_3N_4 self-reinforced ceramics” *J. Eur. Ceram. Soc.* **20** (2000) 1345-1353.
- [5] H. Fischer, R. Weib, R. Telle, “Crack healing in alumina bioceramics”, *Dental Mater.* **24** (2008) 328-332.
- [6] T. Suratwala, L. Wong, P. Miller, M. D. Feit, J. Menapace, R. Steele, P. Davis, D. Walmer, “Sub-surface mechanical damage distribution during grinding of fused silica”, *J. Non-Cryst. Solids* **352** (2006) 5601-5617.
- [7] E. C. Bianchi, E. J. da Silva, C. E. S. Júnior, P. R. Aguiar, I. D. Valarelli, R. D. Monici, “Advanced ceramics: Evaluation of the mechanism of stock removal and ground surface quality”, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **23**, 1 (2001) 226-237.
- [8] Tze-jeer Chuang, S. Jahanmir, H. C. Tang, “Finite element simulation of straight plunge grinding for advanced ceramics”, *J. Eur. Ceram. Soc.* **23** (2003) 1723-1733.
- [9] W. H. Tuan, J. C. Kuo, “Effect of abrasive grinding on the strength and reliability of alumina”, *J. Eur. Ceram. Soc.* **18** (1998) 799-806.
- [10] W. H. Tuan, R. Z. Chen, T. C. Wang, C. H. Cheng, P. S. Kuo, “Mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ composites”, *J. Eur. Ceram. Soc.* **22** (2002) 2827-2833.
- [11] W. H. Tuan, J. C. Kuo, “Contribution of residual stress to the strength of abrasive ground alumina”, *J. Eur. Ceram. Soc.* **19** (1999) 1593-1597.
- [12] W. Konig, *Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren*, Band 1, 2nd Ed., VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, Alemanha (1980).
- [13] L. M. Xu, B. Shen, A. J. Shih, “Vitreous bond silicon cabide wheel for grinding of silicon nitrite”, *Machine Tools & Manufact.* **46** (2006) 631-639.
- [14] S. M. Alves, J. F. G. Oliveira, “Development of new cutting fluid for grinding process adjusting mechanical performance and environmental impact”, *Mater. Proc.*

Technol. **179** (2006) 185-189.

[15] W. Pereira, A. E. Diniz, "Análise da deformação por sinal de vibração", *Máquinas Metais* (2006) 200-215.

[16] L. Yin, H. Huang, K. Ramesh, T. Huang, "High speed versus conventional grinding in high removal rate machining of alumina and alumina-titania", *Machine Tools Manufact.* **45** (2005) 897-907.

[17] J. Y. Shen, W. M. Zeng, H. Huang, X. P. Xu, "Thermal aspects in the face grinding of ceramics", *Mater. Proc. Technol.* **129** (2002) 212-216.

[18] S. Banerjee, S. Ghosal, T. Dutta, "Development of a simple technique for improving the efficacy of fluid through the grinding zone", *J. Mater. Proc. Technol.* **197**, 1-3 (2008) 306-313.

[19] N. R. Dhar, M. W. Islam, S. Islam, M. A. H. Mithu, "The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel", *J. Mater. Proc. Technol.* **171**, 1 (2006) 93-99.

[20] C. N. de Souza, R. E. Catai, P. R. Aguiar, M. H. Salgado, E. C. Bianchi, "Analysis of diametrical wear of grinding wheel and roundness errors in the machining of steel VC

131", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **26**, 2 (2004) 209-212.

[21] D. N. Rao, R. R. Srikant, C. S. Rao, "Influence of emulsifier content on properties and durability of cutting fluids", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **29**, 4 (2007) 396-400.

[22] B. Zhu, C. Guo, J. E. Sunderland, S. Malkin, "Energy partition to the workpiece for grinding of ceramics", *Ann. CIRP* **44**, 1 (1995).

[23] J. A. C. Alves, U. B. Fernandes, C. E. da Silva, E. C. Bianchi, P. R. Aguiar, "MQL e aplicação otimizada de fluido na retificação cilíndrica interna de mergulho", *Máquinas Metais* (2007) 74-86.

[24] R. E. Catai, E. C. Bianchi, F. M. Zílio, I. D. Valarelli, M. C. S. Alves, L. R. Silva, P. R. Aguiar, "Global analysis of aerodynamics deflectors efficiency in the grinding process", *J. Braz. Soc. Mech. Sci.* **28** (2006) 140-145.

[25] S. Shaji, V. Radhakrishnan, "An investigation of surface grinding using graphite as lubricant", *Machine Tools Manufact.* **42** (2002) 733-740.

[26] S. Malkin, "Grinding Mechanisms", in: S. Malkin, "Grinding technology: theory and application of machining with abrasive", 1st Ed., Ellis Horwood Ltd., Chichester **5-6** (1989) 108-142.

(*Rec. 15/12/2009, Rev. 16/06/2010, Ac. 11/10/2010*)