

# **AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE - MQL NOS PROCESSOS DE USINAGEM**

## **Leonardo Roberto da Silva**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Coordenação do Curso Técnico em Mecânica - Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça - CEP: 30.480-000 - Belo Horizonte Minas Gerais - E-mail: lrsilva@deii.cefetmg.br

## **Eduardo Carlos Bianchi**

## **Rodrigo Eduardo Catai**

## **Ronaldo Yoshinobu Füsse**

## **Thiago Valle França**

## **Paulo Roberto Aguiar**

UNESP - Universidade Estadual Paulista - Bauru - Departamento de Engenharia Mecânica/ Elétrica Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/nº , CEP 17033-360, Bauru, E-mail: bianchi@feb.unesp.br; rcatai@feb.unesp.br; ryfusse@feb.unesp.br; thiagovf@feb.unesp.br; aguiarpr@feb.unesp.br

## **Alexandre Araújo Bezerra**

Colégio Técnico Universitário - Univ. Federal de Juiz de Fora (CTU - UFJF) - aab@ctu.ufjf.br

## **Reginaldo Teixeira Coelho**

Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (EESC - USP).  
Av. do Trabalhador São-carlense, 400 - CEP: 13566 590 - São Carlos - SP - rtcoelho@sc.usp.br.

## **Sandro Cardoso Santos**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - sandro@des.cefetmg.br

## **Wisley Falco Sales**

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - wisley@pucminas.br

**Resumo.** *Os fluidos de corte convencionais utilizados para os processos de usinagem são considerados um problema para as empresas, visto que tais substâncias podem provocar sérios danos à saúde do trabalhador e à natureza. Recentemente, os aspectos ambientais têm se tornado cada vez mais importantes dentro dos processos produtivos, somando-se aos aspectos econômicos e tecnológicos. Desta forma, esse trabalho pretende explorar o conceito da mínima quantidade de lubrificante (MQL) nos processos de usinagem. Na usinagem existem diversos parâmetros de entrada, entretanto, pouca atenção tem sido prestada à forma e quantidade de fluido de corte aplicada aos processos. O presente trabalho objetiva analisar o comportamento da técnica de MQL nos processos de retificação, torneamento, roscamento, furação e fresamento, desenvolvendo uma metodologia otimizada de aplicação de fluido através de confecção de bocais especiais, pelos quais uma quantidade mínima de lubrificante é pulverizada em um fluxo de ar comprimido. A avaliação do desempenho da técnica de MQL nos processos de usinagem consistiu na análise do comportamento de força de corte tangencial, relação G, rugosidade, número de furos roscados e desgaste de flanco. Os resultados apresentados neste trabalho, apontam ganhos tecnológicos e ecológicos nos processos de usinagem quando se utiliza MQL.*

**Palavras-chave:** Usinagem, força tangencial de corte, rugosidade, desgaste de flanco e MQL

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o consumo de energia, a poluição do ar e os resíduos industriais têm despertado especial atenção por parte das autoridades públicas. O meio ambiente tornou-se um dos assuntos mais importantes dentro do contexto da vida na atualidade, pois sua deterioração implicará em danos para a população. Motivados pela pressão dos órgãos ambientais, os parlamentos têm elaborado leis cada vez mais rigorosas no sentido de proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos. Todos esses fatores citados anteriormente, tem influenciado as indústrias, centros de pesquisas e universidades a pesquisarem processos de produção alternativos, criando tecnologia que minimizem ou evitem a produção de resíduos que agridam o meio ambiente.

Os fluidos refrigerantes para usinagem baseados em emulsão ainda são usados em grande quantidade na indústria de processamento metal-mecânica, gerando elevados custos de consumo e de descarte, além do prejuízo ambiental. A necessidade cada vez maior de uma técnica de produção não agressiva ao meio ambiente e o crescimento rápido dos custos de disposição dos fluidos de corte tem justificado a demanda por uma alternativa ao processo de usinagem com fluido. Na última década, porém, as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerante e/ou lubrificante na produção metalmeccânica. A usinagem a seco e com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) tem despertado a atenção de pesquisadores e técnicos da área de usinagem como alternativa aos fluidos tradicionais [1, 2, 3, 4, 5].

A função específica do fluido de corte no processo de usinagem é a de proporcionar lubrificação e refrigeração, que minimizem o calor produzido entre a superfície da peça e a da ferramenta. Ao se abrir mão do uso destes fluidos, a sua influência positiva na usinagem também perde o efeito, pois o fluido de corte é um importante parâmetro tecnológico na usinagem. A sua redução drástica ou até a completa eliminação, certamente poderão ocasionar aumento de temperatura nos processos, queda de rendimento da ferramenta de corte, perda de precisão dimensional e geometria das peças e variações no comportamento térmico da máquina. Quando da utilização de ferramentas abrasivas, a redução de fluido de corte pode dificultar a limpeza dos poros do rebolo, propiciando a tendência do entupimentos dos poros, desta forma, contribuindo mais fortemente para os fatores negativamente citados. A importância relativa de cada uma das funções dependerá ainda do material usinado, do tipo de ferramenta utilizada (geometria definida ou não-definida), das condições de usinagem, do acabamento superficial e da qualidade dimensional e de forma exigida [5, 6, 7].

Este projeto visa avaliar o desempenho da tecnologia de mínima quantidade de lubrificante (MQL) aplicado em minúsculas taxas de fluxo, como uma alternativa ambientalmente correta para o fluido de corte utilizado largamente nos processos de usinagem. A pequena quantidade de lubrificante é pulverizada em um fluxo de ar comprimido reduzindo os efeitos indesejáveis ao fornecer lubrificação e resfriamento. A avaliação do desempenho da técnica de MQL nos processos de usinagem consistiu na análise experimental do comportamento da força de corte tangencial, relação G, rugosidade, número de furos roscados e desgaste de flanco.

### 1.1. A Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Comprovando-se a tendência de preocupação ambiental quando da utilização dos fluidos de corte nos processos de usinagem, conforme relatado por vários pesquisadores e fabricantes de máquinas-ferramenta, constata-se a grande ênfase dada à tecnologia ambiental, ou seja, a preservação do meio ambiente e a busca da conformidade com a norma ISO 14000. Por outro lado, apesar das insistentes tentativas de eliminar completamente os fluidos de corte, em muitos casos a refrigeração ainda é essencial para que se obtenham vidas econômicas de ferramentas e as qualidades superficiais requeridas. Isto é particularmente válido quando há exigência de tolerâncias estreitas e alta exatidão dimensional e de forma, ou quando se trata de usinagem de materiais críticos, de corte difícil. Isso faz da mínima quantidade de lubrificante uma alternativa interessante, porque combina a funcionalidade da refrigeração com um consumo extremamente baixo de fluidos (geralmente < 80ml/h). Estas mínimas quantidades de óleo são suficientes em muitos casos, para

reduzir o atrito da ferramenta e ainda evitar as aderências de materiais. A minimização de fluido de corte tem adquirido relevância nos últimos dez anos [3, 8, 9].

As limitações das operações a seco podem ser superadas, em muitos casos, através da introdução de sistemas de lubrificação em quantidades mínimas (*Near-Dry machining* - MQL) que agem com base no princípio de utilização total, sem resíduos, aplicando fluxos de lubrificantes de 10 até no máximo 100ml/h a uma pressão de 4,0 a 6,5 Kgf/cm<sup>2</sup>. O que importa é que, ainda assim, os cavacos sejam liberados praticamente secos, evitando custos resultantes da reciclagem do fluido de corte. Nesta tecnologia a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração principalmente pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de fluido pode ser suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características. De sua comparação com a refrigeração convencional resultam numerosas vantagens. Estas vantagens levam à previsão de que sua faixa de aplicações seja crescente, mas apesar de tudo, as variáveis de influência a serem consideradas e os efeitos sobre o resultado do processo têm sido matéria para apenas alguns poucos estudos [6, 10, 11, 12, 13, 14].

Por outro lado, comparado com a técnica convencional, MQL causa custos adicionais para pressurizar o ar e suportes tecnológicos, o quais são necessário no processo para superar as restrições tecnológicas da técnica MQL. Por exemplo, técnicas especiais para o transporte do cavaco podem ser necessárias, e talvez a produtividade seja reduzida devido ao impacto térmico nos componentes usinados. O vapor, a névoa e a fumaça de óleo gerados durante o uso da mínima quantidade de lubrificante na usinagem podem ser considerados subprodutos indesejáveis, pois contribuem para aumentar o índice de poluentes em suspensão no ar e tornou-se fator de preocupação, necessitando de um bom sistema de exaustão na máquina. Na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante o processo. Essas linhas de ar geram um barulho que geralmente ultrapassa os limites admitidos pela legislação [5]. Com o conhecimento dos custos das usinagens úmidas e os das usinagens com MQL, foi feita uma comparação de custos dos investimentos e dos custos fixos e proporcionais anuais na BMW. A confrontação dos custos totais de investimento na linha *transfer*, inclusive do equipamento para limpeza de cavacos, comprovou vantagens financeiras de 22% na usinagem com a tecnologia MQL [9].

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios foram: aço ABNT 4340 temperado e revenido (retificação); *Inconel* 718 endurecido pelo tratamento térmico de solubilização seguido de precipitação com a dureza final de 44 HRC (torneamento); ferro fundido cinzento GG25 -226 HB (roscamento); ferro fundido GH190 (furação) e aço ABNT 4140 com dureza 210 HV (fresamento).

Os ensaios de retificação foram realizados com rebolo de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com as seguintes características: (355,6 x 25,4 x 127 - FE 38A60KV). A operação de dressagem foi mantida constante para todos os ensaios, na qual utilizou-se dressador multigranular do tipo *fliese*. Os principais parâmetros de entrada [velocidade de corte do rebolo (V<sub>s</sub>), velocidade de mergulho (V<sub>f</sub>), velocidade periférica da peça (V<sub>w</sub>), profundidade de retificação (a) e o tempo de centelhamento “*spark out*” (t<sub>s</sub>)] foram selecionados mediante recomendação da literatura técnica e através da realização de ensaios preliminares. As condições de corte selecionadas após os ensaios preliminares para a realização dos testes definitivos foram: V<sub>s</sub> = 30 m/s; V<sub>f</sub> = 1 mm/min; V<sub>w</sub> = 20m/min (velocidade média); a = 0,1 mm e t<sub>s</sub> = 10s. Estes parâmetros foram mantidos constantes durante os ensaios. Na condição de refrigeração convencional, utilizou-se uma emulsão sintética com concentração de 5%. A máxima vazão fornecida pela bomba e pelo bocal original da máquina foi de 8,4 l/min.

No roscamento foram usados dois tipos de machos métricos M8, os quais se distinguiam pelo tipo de revestimento: um com TiAlN e outro com TiCN. Tais revestimentos possuem no máximo 5 µm de espessura aplicados pelo processo de PVD. São machos de corte longos com haste reforçada e com rosca ISO métrica grossa com passo de 1,25 mm, três canais retos, ponta helicoidal, formato

da entrada tipo B (3,5 a 5 filetes de rosca), ângulo de entrada igual a  $8^\circ$  e ajuste 6H. O critério de fim de vida adotado foi o calibre tampão de rosca P.N.P M8 x 1,25 - 6H da *Neomatic*. Caso as roscas fossem aprovadas usinava-se mais uma carreira de furos e assim sucessivamente até o limite pré-definido de 408 furos roscados. Este número foi determinado em função da disponibilidade de material de corpo de prova.

As ferramentas utilizadas nos ensaios de torneamento conforme indicação do fabricante foram os insertos de cerâmica reforçada com *whiskers* CC670 ( $Al_2O_3 + SiC_w$  - contendo 25% SiC) e cerâmica mista CC650 ( $Al_2O_3 + 28\%TiC$ ) nos formatos: quadrado (SNGN 120408), redondo (RNGN 120400) e triangular (TNGN 160408). A geometria dos conjuntos porta-ferramentas proporcionaram os seguintes ângulos: ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) de  $-6^\circ$  e ângulo de folga ( $\alpha_o$ ) de  $6^\circ$ . As ferramentas incorporam um chanfro em T de 0,1mm x  $20^\circ$  na aresta de corte. As condições de corte selecionadas para a realização dos testes no torneamento foram:  $V_c = 500\text{m/min}$ ;  $f = 0,10\text{mm/rev}$ . e  $a_p = 0,35\text{mm}$ , sob condição a seco e com mínima quantidade de lubrificante (MQL).

No processo de furação foram utilizadas brocas de aço-rápido de diâmetro de 10mm não revestidas e revestidas com TiN, TiCN, WC/C sobre TiAlN e revestimento multicamadas de TiN e TiAlN. As condições de corte adotadas foram:  $V_c = 35\text{m/min}$ ;  $f = 0,25\text{mm/rev}$ ; furos passantes com relação comprimento/diâmetro de 4,5.

As ferramentas utilizadas nos experimentos no fresamento foram de metal duro revestidas de nitreto de titânio (TiN). Nesta avaliação, mediu-se o desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bm\acute{a}x}$ ). O critério de fim de vida da ferramenta foi de 0,2mm de desgaste de flanco máximo. Foram mantidos fixos os parâmetros de corte nos seguintes valores:  $V_c = 250\text{m/min}$ ;  $f_z = 0,1\text{mm/rev}$  e  $a_p = 1\text{mm}$

O equipamento utilizado para o controle da mínima quantidade de lubrificante (MQL) em todos os processos foi o *Accu-lube*, fornecido pela empresa *ITW Chemical Products* Ltda, o qual usa sistema pulsante de fornecimento de óleo e permite a regulação da vazão de ar comprimido e lubrificante de maneiras separadas. A confecção do bocal na retificação permitiu uma velocidade do ar comprimido aproximadamente igual à velocidade periférica do rebolo (30m/s) com a vazão de lubrificante de 60ml/h (LB 1000). Tal velocidade é necessária, de forma que a mistura (lubrificante + o ar comprimido) penetre na região de contato entre ferramenta e peça agindo de forma favorável à lubri-refrigeração do processo. Para se efetuar a medição com precisão da vazão de ar comprimido na qual proporcionou a velocidade citada, foi necessário à aquisição de um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro. No roscamento a vazão de óleo foi ajustada para 21 ml/h e a vazão de ar foi ajustada para 17,4 m<sup>3</sup>/h. A pressão de operação foi de aproximadamente 588,4 kPa. No torneamento utilizou-se a vazão de lubrificante de 15ml/h e do ar de 9m<sup>3</sup>/h. Na furação a vazão do lubrificante foi de 50ml/h e no fresamento utilizou-se as seguintes vazões: 50; 100;150 e 200ml/h com a névoa injetada pelo centro da ferramenta.

Para a medição da força tangencial de corte na retificação optou-se, pela determinação, em tempo real, das mesmas através da rotação ( $n$ ) do rebolo e da potência elétrica ( $P_c$ ) consumida pelo motor de acionamento da ferramenta abrasiva, durante o corte. Para tanto, utilizou-se um circuito condicionador de sinais, o qual permitem a aquisição e transformação dos valores de corrente elétrica, tensão elétrica e rotação do motor em sinais de tensão elétrica compatíveis, para serem enviados a uma placa de aquisição de dados A/D. O software de interface entre a placa e computador foi o *LabView* 6. É importante ressaltar que a força tangencial de corte efetiva foi calculada através da subtração da força tangencial em vazio.

O desempenho do rebolo pode ser avaliado através da relação  $G$ , definida como sendo a relação entre volume de metal removido  $Z_w$  (mm<sup>3</sup>) e volume de rebolo gasto  $Z_s$  (mm<sup>3</sup>). Como o volume de material removido era constante para cada ensaio, a determinação da relação  $G$  era direta, ou seja, o comportamento dessa variável de saída foi analisado na forma de desgaste diametral do rebolo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultados a seguir, referem-se às melhores condições de corte e de lubri-refrigeração encontradas nos ensaios dos diversos processos de usinagem para os parâmetros avaliados.

#### 3.1. Retificação

##### 3.1.1. Medição da Força Tangencial de Corte

A Figura 1 representa a comparação dos valores de força tangencial de corte com rebolo de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) na condição convencional (8,4 l/min) e com a utilização da técnica de MQL. Os valores foram obtidos após 03 etapas de 30 ciclos, sendo cada ciclo de  $100\mu m$ . É importante ressaltar que cada ponto existente nos gráficos correspondem à uma média aritmética dos pontos máximos obtidos nas três repetibilidades de ensaios efetuados.

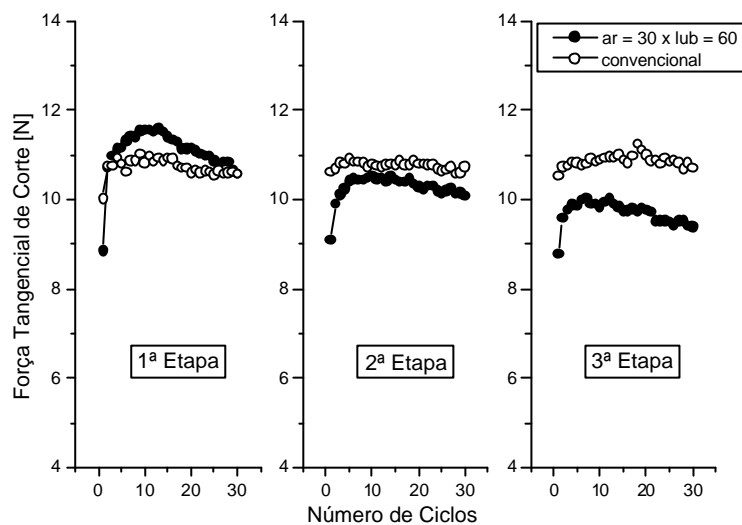


Figura 1. Medição da força tangencial de corte durante 90 ciclos com rebolo de  $Al_2O_3$  ( $V_s = 30m/s$ ;  $V_f = 1mm/min$ ;  $a = 100\mu m$ ;  $V_{ar} = 30m/s$  e  $V_{lubrif.} = 60ml/h$ )

De uma maneira geral, os resultados referentes à utilização da técnica MQL proporcionaram menores valores de força tangencial de corte quando comparados com o sistema convencional de aplicação de fluido de corte no processo de retificação. Esse comportamento observado permite afirmar que o sistema de MQL pôde penetrar na região de contato entre o rebolo e a peça de maneira eficiente. O lubrificante empregado na técnica de MQL, através de sua excelente propriedade lubrificante, permitiu que a capacidade de corte das arestas do rebolo de óxido de alumínio permanecessem afiadas por um período mais longo de trabalho. A introdução, dentro da região de corte, de um lubrificante efetivo, reduz a quantidade de calor gerada através do atrito pela diminuição do contato rebolo-peça, não havendo necessidade de volumes elevados de fluido. Além disso, com a lubrificação eficiente, o cavaco possui um melhor deslizamento na face da ferramenta diminuindo a geração do consumo de energia. A velocidade com que o fluido penetra na região de corte é suma importância. Quando a velocidade do fluido é igual ou superior a velocidade periférica do rebolo, o fluido tende a penetrar na região de corte com a mesma velocidade do grão abrasivo.

Os valores de força tangencial de corte quando da utilização de MQL diminuem no decorrer dos ensaios, provavelmente pela presença de lubrificante na periferia do rebolo ocasionado melhor deslizamento do grão entre a ferramenta e a peça. Por outro lado, a velocidade periférica da peça é reduzida, uma vez que a rotação da mesma foi mantida constante, proporcionado menor valor de força tangencial de corte. A condição convencional apresentou uma certa estabilização da força tangencial de corte, possivelmente pela perda de capacidade de remoção de material.

### 3.1.2. Rugosidade e Desgaste Diametral do Rebolo

A Figura 2 representa a comparação dos valores médios da rugosidade ( $R_a$ ) e do desgaste diametral ( $\mu\text{m}$ ) com rebolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na condição convencional (8,4 l/min) e com a utilização da técnica de MQL. Os valores foram obtidos após 03 etapas de 30 ciclos, sendo cada ciclo de  $100\mu\text{m}$ . Os ensaios foram realizados utilizando-se 15mm da largura do rebolo. Desta forma, o restante não utilizado no ensaio serviu-se de referência para a medição da perda diametral.

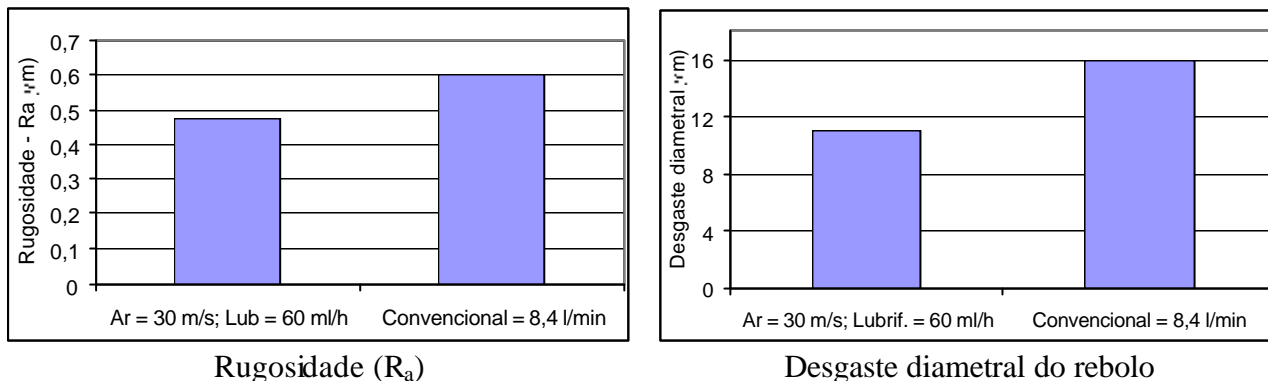


Figura 2. Resultado da rugosidade e do desgaste diametral utilizando rebolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  após 90 ciclos ( $V_s = 30\text{m/s}$ ;  $V_f = 1\text{mm/min}$ ;  $a = 100\mu\text{m}$  e  $t_s = 10\text{s}$ )

Analisando-se os resultados para a aplicação com fluido de corte convencional e com a técnica de MQL, pode-se verificar novamente que aplicação do fluido de corte com MQL apresentou um desempenho superior quando comparado ao método convencional de aplicação de fluido de corte, possivelmente pela maior eficiência de penetração do mesmo na região de corte. O aumento do poder lubrificante do fluido resulta numa diminuição da rugosidade e do desgaste do rebolo, pela redução do atrito grão-peça e do atrito cavaco-ligante, permitindo que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo ao ligante ocasionando menor desgaste da ferramenta. Verifica-se que o maior desgaste foi observado para a condição convencional devido ao menor poder lubrificante do fluido de corte com emulsão. Por outro lado, a técnica de MQL apresentou melhor desempenho quanto à capacidade de manutenção da afiação dos grãos abrasivos durante o processo de corte devido à excelente propriedade de lubricidade do lubrificante empregado.

### 3.2. Torneamento do Inconel 718 Usando Alta Velocidade de Corte

#### 3.2.1. Rugosidade

A Figura 3 mostra a influência das geometrias nos valores médios da rugosidade ( $R_a$ ) com ferramentas cerâmicas (CC650 e CC670) na condição a seco e com a utilização da técnica de MQL.

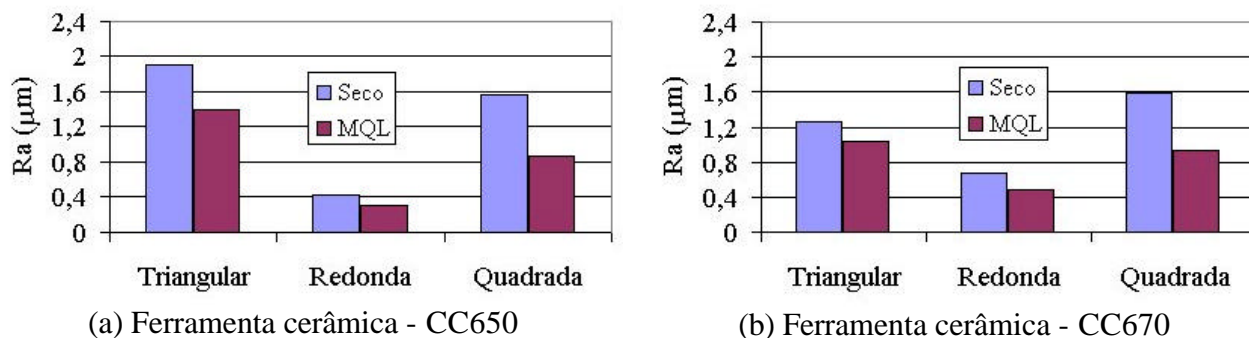


Figura 3. Rugosidade ( $R_a$ ) utilizando ferramentas cerâmicas ( $V_c = 500\text{m/min}$ ;  $f = 0,10\text{mm/rev.}$ ;  $a_p = 0,35\text{mm}$  e  $V_{\text{lubrif.}} = 15\text{ml/h}$ )

Observando-se os resultados apresentados na condição sem fluido, é possível perceber que a ferramenta cerâmica redonda CC650 obteve-se o menor valor de  $R_a$  ( $0,42\mu\text{m}$ ) seguida da ferramenta cerâmica redonda CC670 ( $0,67\mu\text{m}$ ). A ferramenta cerâmica triangular (CC650) apresentou pior desempenho em relação as demais geometrias de ferramentas cerâmicas sob condição de corte sem fluido e com MQL. Resultados satisfatórios na qualidade superficial são encontrados através da aplicação da técnica de MQL, nos quais os valores da rugosidade média ficaram na faixa de  $0,30\mu\text{m}$  para a ferramenta cerâmica CC650 e  $0,48\mu\text{m}$  para a ferramenta cerâmica CC670, ambas de geometria redonda. Os valores alcançados de rugosidade com MQL são comparáveis ao processo de retificação. A técnica de MQL proporciona uma melhoria na rugosidade de 30% nas ferramentas cerâmicas redondas em relação à condição sem fluido. As demais geometrias também obtiveram ganhos na redução do parâmetro  $R_a$  com a utilização da técnica de MQL, confirmando os efeitos significativos de refrigeração e lubrificação. Melhoria da qualidade superficial foi também alcançada por Dörr & Sahn<sup>(9)</sup>, utilizando a tecnologia HSM e MQL no processo de fresamento de aço austenítico de níquel cromo com vazão de 20ml/h de lubrificante.

### 3.3. Roscamento Utilizando Alta Velocidade de Corte

A Figura 4 apresenta o número de furos roscados obtidos por cada ensaio. Observa-se que a 30 m/min, velocidade de corte convencional e no mesmo patamar da empregada pela indústria, todos os ensaios atingiram o valor limite de furos pré-estabelecidos de 408 dentro do critério de fim de vida adotado. No dobro da velocidade de corte, a 60 m/min, a aplicação da técnica de MQL nos ensaios proporcionou maior vida do macho de corte do que nos ensaios que foram realizados a seco, ou seja, sem fluido de corte.

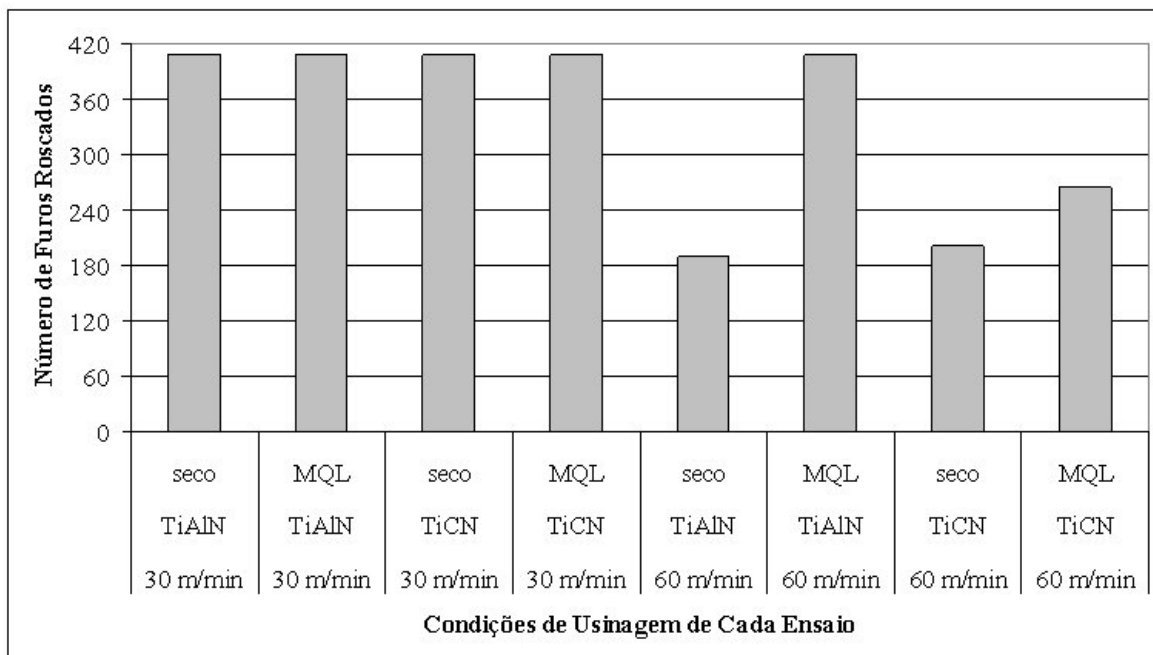


Figura 4. Número de furos roscados obtidos por cada ensaio

O efeito negativo do aumento da velocidade de corte sobre o número de furos roscados é proveniente do aumento da taxa de deformação plástica do material do corpo de prova. Esta deformação plástica provoca ao mesmo tempo um aumento de resistência, por encruamento, e um amolecimento térmico na zona de cisalhamento primária e na zona de fluxo, em função da elevação da temperatura do material usinado. Esta elevação da temperatura propicia o surgimento da adesão e juntamente com a abrasão, causada por partículas duras do material como a esteadita, reduziram significativamente a vida dos machos de corte.

### 3.4. Furação

A Figura 5 mostra os valores de vida das brocas de aço-rápido no corte a seco e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante. Com base nesses resultados, pode-se verificar que a aplicação de MQL foi responsável pelo aumento da vida das ferramentas em todos os grupos de revestimentos estudados.

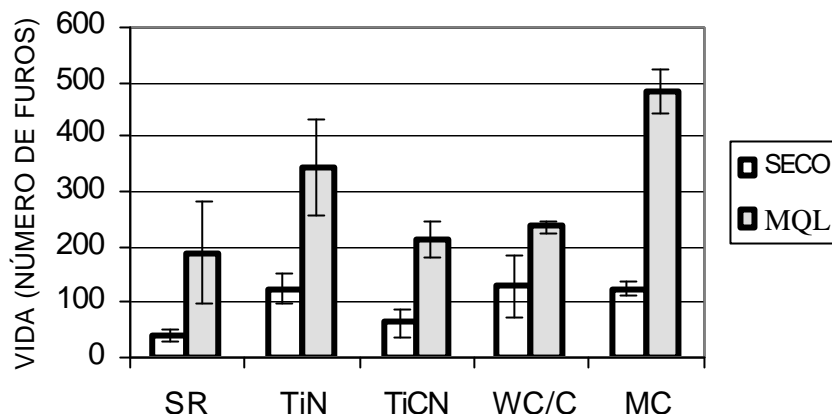


Figura 5. Desempenho das brocas de aço-rápido no corte a seco e com aplicação de MQL

Observa-se que as brocas com o revestimento de multicamadas (MC) apresentaram desempenho superior quando da utilização da técnica de MQL. Os valores médios mostram que, no corte a seco e com MQL as ferramentas revestidas com TiN, WC/C sobre o TiAlN e com revestimento de multicamadas (MC) apresentaram desempenhos superiores ao das ferramentas não revestidas com TiCN. Pode-se afirmar, portanto, que os revestimentos exercem influência significativa no desempenho das ferramentas.

### 3.5. Fresamento

Na Figura 6 mostra-se o desgaste da ferramenta de corte em relação as diferentes vazões de fluido avaliadas. O desgaste pode ser de duas formas: desgaste na superfície de saída da ferramenta, causado pelo escoamento do cavaco sobre a mesma, e desgaste de flanco causado pelo contato entre a superfície de folga da ferramenta com a superfície principal de usinagem, gerada pela aresta principal de corte na peça. Embora exista um ângulo de folga, que não permite o contato entre as superfícies de folga da ferramenta e a peça, ele é eficaz somente enquanto a aresta cortante da ferramenta apresenta o seu formato original.

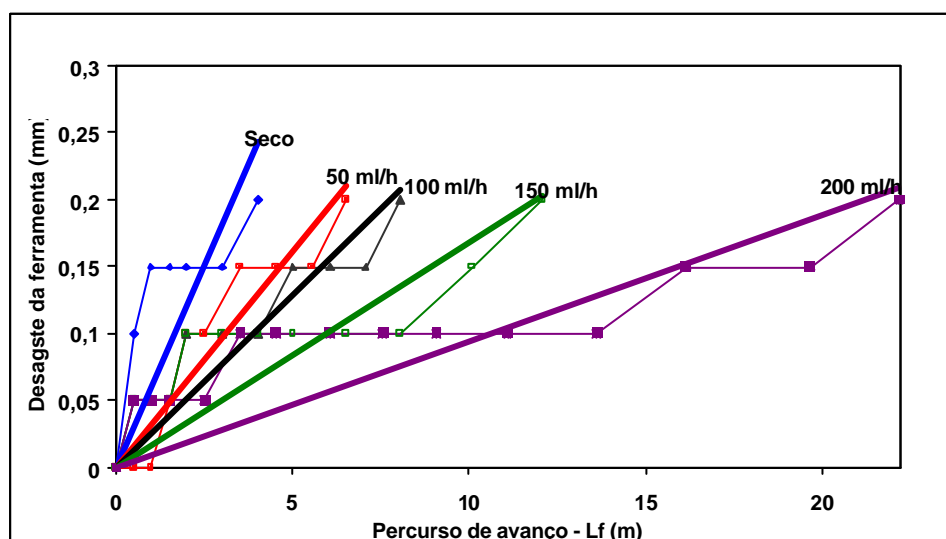


Figura 6. Desgaste da ferramenta de corte no corte a seco e com aplicação de MQL



A análise da Figura 6 mostra uma tendência de crescimento do desgaste da ferramenta para todas as vazões durante o aumento do percurso de avanço. Na usinagem a seco obteve-se o maior desgaste em um menor percurso de avanço. À medida que se aumenta a vazão do fluido, maior será o percurso de avanço, sendo que este maior percurso ocorreu na vazão de 200ml/h. Observa-se que na condição a seco a ferramenta se desgastou rapidamente e atingiu o critério de fim de vida especificado nos procedimentos experimentais, que foi o desgaste de flanco máximo de  $VB_{Bmáx} = 0,2\text{mm}$ . O fato da ocorrência de um maior percurso de avanço foi consequência do menor desgaste da ferramenta, ocasionado pela melhor lubrificação da interface peça-ferramenta proporcionando assim um melhor deslizamento da ferramenta e com isso uma redução da força de corte que por sua vez reduz a geração de calor, sendo este último um importante fator na vida da ferramenta, pois com a sua redução, os efeitos de desgaste de origem térmica ficam amenizados. É possível afirmar que as condições de molhamento da superfície de saída da ferramenta e consequentemente da formação do filme molecular de baixa tensão de cisalhamento, intensificou-se e tornou-se mais eficaz com o aumento da vazão quando da aplicação da técnica de MQL.

#### 4. CONCLUSÕES

Analisando os dados de experimentação nos processos de usinagem sob diversas condições de corte, pôde-se concluir:

- ❖ As análises dos resultados diversos indicam que a técnica MQL pode ser aplicada com eficiência nos processos de usinagem proporcionando ganhos ecológicos e tecnológicos;
- ❖ Os valores de  $R_a$ , do desgaste de flanco e do desgaste diametral do rebolo foram reduzidos significativamente com o emprego da técnica de MQL comprovando excelente propriedade de lubricidade;
- ❖ A técnica MQL reduziu a força tangencial de corte quando da comparação com a condição convencional;
- ❖ A força tangencial de corte foi decrescente quando se utilizou MQL, possivelmente pela presença de lubrificante na periferia do rebolo proporcionando melhor deslizamento do grão na interface peça-rebolo;
- ❖ A aplicação de MQL foi responsável pelo aumento da vida das brocas em todos os grupos de revestimentos estudados;
- ❖ A combinação de macho de corte com revestimento TiAlN e com a aplicação da técnica de MQL apresentou melhor resultado, em termos de vida da ferramenta, no HST;
- ❖ A velocidade de corte empregada pelo HST influenciou significativamente de forma negativa o número de furos roscados.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP, a FAPEMIG, a CAPES, ao IFM e ao CNPq pela disponibilização de recursos financeiros de auxílio à pesquisa e pelas bolsas concedidas.

#### 6. REFERÊNCIAS

1. SAHM, D. et al. A Produção sem refrigerante é interessante e deve ser mais conhecida. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 367, p. 38-55, ago. 1996.
2. DUNLAP, C. Should you try dry?. **Cutting Tool Engineering**, v. 49, n.1, p. 22-33, feb. 1997.
3. KLOCKE, F. et al. Clean manufacturing technologies - The competitive edge of tomorrow?. **The International Journal of Manufacturing Science & Production**, v.1, n.2, p. 77-86, 1998.
4. NOVASKI, O. et al. Usinagem sem refrigeração. **Revista Máquinas e Metais**, n.399, p.18-27, 1999.
5. MACHADO, A. R. et al. Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte. In: CONGRESSO DE USINAGEM, **Anais do Congresso 2000**, São Paulo. 2000.
6. KLOCKE, F. et al. Dry cutting. In: **Annals of the CIRP**, v. 46, n.2, 1997. p. 519-526.

7. BROCKHOFF, T. et al. Fluid minimization in cutting and grinding. **Abrasives Magazine**, p. 38-42, oct./nov. 1998.
8. SIMON, T. A. O estágio atual da tecnologia das máquinas-ferramenta. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 398, p. 88-108, fev. 1999.
9. DÖRR, J. et al. A mínima quantidade de lubrificante avaliada pelos usuários. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 418, p. 20-39, nov. 2000.
10. YOUNG, P. et al. Manufacturing and the environment. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.13, p. 488-493, 1997.
11. HEISEL, U. et al. A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte. **Revista Máquinas e Metais**, n.386, p. 22-38, fev. 1998.
12. SCHULZ, H. Trends in manufacturing technology at the threshold of the millennium. In: **4º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Inovações Tecnológicas na Manufatura para o Ano 2000**, Piracicaba, São Paulo, Unimep, 1999. ago.
13. DÖRR, J. New perspectives in dry machining. In: **4º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Inovações Tecnológicas na Manufatura para o Ano 2000**, Piracicaba, São Paulo Unimep, 1999. ago.
14. DINIZ, A. E. Minimal lubrication in the drilling process of aluminum silicon alloy. In: **3<sup>rd</sup> International Machining & Grinding Conference**, oct., 1999. p. 683-697.

## **EVALUATION OF THE TECHNIQUE OF THE MINIMAL QUANTITY OF LUBRICANT - MQL IN MACHINING PROCESSES**

**Leonardo Roberto da Silva**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Department of Mechanics - E-mail: lrsilva@deii.cefetmg.br

**Eduardo Carlos Bianchi**

**Rodrigo Eduardo Catai**

**Ronaldo Yoshinobu Fusse**

**Thiago Valle França**

**Paulo Roberto Aguiar**

UNESP - Universidade Estadual Paulista - Bauru - Department of Mechanical Engineering

E-mail:bianchi@feb.unesp.br; rcatai@feb.unesp.br; ryfusse@feb.unesp.br; Thiagovf@feb.unesp.br

***Abstract.** Conventional cutting fluids used for machining processes are considered a problem for the companies, since such substances can cause serious damages to the workers' health as well as to the nature. Recently, in addition to economic and technological factors, environmental aspects have become more important in productive processes. So, this work intends to explore the concept of the minimal quantity of lubricant (MQL) in machining processes. In machining there are several entrance parameters, however, currently little attention has been given to the form and amount of cutting fluid applied to the processes. This paper aims at the study of the behaviour of the MQL technique in grinding, turning, tapping, drilling and milling processes developing an optimised methodology of fluid application through special nozzles manufactured for this purposes. A minimal quantity of lubricant is sprayed in a compressed air flow through these nozzles. The evaluation of the performance of the MQL technique in machining processes consisted in the analysis of the behaviour tangential cutting force, G-ratio, roughness, number of thread holes and flank wear. The results presented in this work show that technological and ecological issues in machining processes can be raised when MQL is used.*

***Keywords.** Machining, tangential cutting force, roughness, flank wear and MQL*