

## INFLUÊNCIA DA LUBRI-REFRIGERAÇÃO OTIMIZADA E MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO COM BOCAIS APLICADORES INOVADORES NOS ESFORÇOS DE CORTE E NA QUALIDADE DE PEÇAS DE AÇOS ENDURECIDOS

Manoel Cleber Sampaio Alves, [manoel@itapeva.unesp.br](mailto:manoel@itapeva.unesp.br)<sup>1</sup>

Eduardo Carlos Bianchi, [bianchi@feb.unesp.br](mailto:bianchi@feb.unesp.br)<sup>2</sup>

Paulo Roberto de Aguiar, [aguiarpr@feb.unesp.br](mailto:aguiarpr@feb.unesp.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNESP-Faculdade de Engenharia Industrial Madeireira, Rua Geraldo Alckmin, 519, CEP 18409-010 Itapeva-SP, Brasil.

<sup>2</sup>UNESP-Faculdade de Engenharia de Bauru-FEB, Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube, 14-01, CEP 17033-360 Bauru-SP, Brasil.

**Resumo:** É analisada a influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante (MQL), refrigeração otimizada e refrigeração convencional, com diferentes vazões e velocidade de aplicação do fluido de corte, na qualidade das peças produzidas com aços endurecidos, no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com a utilização de rebolos superabrasivos com baixa concentração de CBN. A análise da qualidade das peças foi realizada através da avaliação das variáveis de saída do processo como o comportamento da força tangencial de corte, energia específica de retificação, rugosidade, desvio de circularidade, emissão acústica, tensão residual, análise de microscopias eletrônicas de varredura e microdureza. Com a análise das formas de aplicação e das várias vazões e velocidades do fluido de corte utilizadas encontraram-se condições de lubri-refrigeração que propiciam a diminuição do volume de fluido de corte, diminuição do tempo de usinagem sem prejudicar os parâmetros geométricos, dimensionais, o acabamento superficial e a integridade superficial dos componentes. Em relação as diferentes formas de aplicação do fluido de corte notou-se o melhor desempenho da aplicação otimizada para maiores velocidades mostrando a eficiência de um novo conceito de bocal utilizado. O processo otimizado e o processo MQL foram capazes de manter a dureza superficial e a integridade superficial das peças produzidas. Exceção somente para a condição MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h que produziu trincas e retêmpera superficial. O processo de mínima quantidade de lubrificação apresentou melhor desempenho para maiores vazões de fluido de corte mostrando-se capaz de ser empregado em retificação, pois atendeu as exigências qualitativas, com a vantagem de se utilizar pouquíssimo fluido de corte (até 100ml/h). Rebolos com baixa concentração de CBN, conseqüentemente mais baratos, proporcionaram bons resultados quando associados com técnicas mais eficientes de aplicação de fluido de corte apresentando desgaste reduzido.

**Palavras-chave:** Retificação, CBN, , mínima quantidade de lubrificante (MQL), lubrificação convencional, lubrificação otimizada.

### 1. INTRODUÇÃO

A retificação confere à peça o acabamento final, minimizando as rugosidades e irregularidades superficiais através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta (rebolo) e a peça a ser retificada.

A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluir o meio ambiente. No entanto, diversos processos de usinagem, incluindo a retificação, utilizam fluidos de corte como meio de lubrificação e refrigeração da peça produzida. Nestes processos de fabricação, se a lubrificação e a refrigeração não forem satisfatórias, as elevadas temperaturas geradas podem produzir vários tipos de danos à peça produzida. Estes danos são: queima superficial, mudanças microestruturais, aparecimento de tensões residuais, erros de forma e até a deterioração da qualidade final da peça produzida (MALKIN, 1989; GUO, 1999).

Os fluidos de corte são muitas vezes descartados no meio ambiente, fato que não condiz com a situação atual levando-se em consideração o rigor das leis ambientais e devido a evolução ambiental do homem. Ainda existe o alto custo relativo aos fluidos de corte que vêm se tornando mais acentuados devido ao elevado consumo e o tratamento

desse fluido de corte no momento do descarte de forma a atender as exigências ambientais. Segundo Webster et al. (1999), grandes volumes de fluido de corte estão se tornando necessários, devido ao crescimento da produtividade das indústrias e ao crescimento da utilização do processo.

Se não bastasse, ainda existe o problema de que muitos fluidos de corte ainda trazem muitas conseqüências à saúde dos operadores das máquinas envolvidas com estes fluidos. No entanto esse problema vêm sendo diminuído através do uso de fluidos à base vegetal que trazem menos danos à saúde.

Dessa forma, a utilização em massa dos fluidos de corte tende a diminuir com o passar do tempo, tornando-se necessário pesquisas a respeito de tal assunto, visando a diminuição da participação de tais fluidos nos processos produtivos e, conseqüentemente, no meio ambiente. Para tanto, são necessárias análises mais aprofundadas das conseqüências desse tipo de alteração com relação ao estado final do componente usinado.

Segundo Webster et al. (1995), a lubrificação e a refrigeração dependem da efetiva entrada de fluido na região de corte entre a peça e a ferramenta, não havendo a necessidade de volumes elevados, considerando que parte deste não esteja penetrando na região de corte efetivamente. Porém, o tipo e o posicionamento do bocal exercem grande influência no processo de corte. Bocais de aplicação preparados de forma e evitar a turbulência apresentam um melhor efeito, pois tendem a aproximar as lâminas de fluido que se formam no interior do bocal.

Considerando estas informações, surge a importância de avaliar a qualidade das peças produzidas através do uso de métodos mais eficientes de aplicação de fluido de corte. Nesta pesquisa utilizou-se três métodos de aplicação de fluido de corte para a avaliação do desgaste das peças produzidas (método convencional, método otimizado também denominado método de Webster e método da mínima quantidade de lubrificante - MQL) utilizando novos conceitos de bocais e rebolo de CBN com baixa concentração de abrasivos.

Nesta pesquisa utilizou-se fluidos de corte de baixo impacto ambiental e à saúde. Através da qualidade obtida das peças retificadas com esses fluidos poderá haver uma utilização maior de fluidos com essas mesmas características, contribuindo significativamente para o processo e para a sociedade.

Destaca-se ainda neste trabalho a inovação quanto à utilização de novos conceitos quanto às formas de lubrificação no processo de retificação que poderão ser estendidos a outros processos que também utilizam fluidos de corte. As formas de lubri-refrigeração utilizadas (convencional, mínima quantidade de lubrificação e otimizada) buscaram atender condições reais de serem aplicadas no meio industrial através da usinagem de grandes regiões. Para isso foi necessário o estudo e a confecção de bocais de aplicação de fluido apropriados utilizando novos formatos de aplicadores até então não disponíveis comercialmente.

Também buscou-se inovar na quantidade de material abrasivo presente no rebolo. Um dos motivos que prejudica uma maior expansão do consumo de rebolos de CBN está no valor do mesmo que é muito maior que rebolos convencionais, que é dependente da quantidade de grãos de CBN presentes. Nesta pesquisa utilizou-se um rebolo de CBN com concentração de 15% de grãos abrasivos em volume, buscando uma alternativa mais econômica para fabricação de peças retificadas.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade de peças retificadas através de três formas de aplicação de fluido de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 usando 2 diferentes tipos de fluidos de corte que proporcionam menores danos ambientais e à saúde e uma ferramenta superabrasiva de CBN com baixa concentração de abrasivos. As três formas de lubri-refrigeração utilizadas foram: mínima quantidade de refrigeração (MQL), lubri-refrigeração otimizada (MO) e lubri-refrigeração convencional (MC), utilizando novos conceitos de bocais que buscam criar condições possíveis de serem empregadas no meio industrial. Busca-se encontrar o compromisso entre qualidade, custo e meio ambiente quando aplicados sistemas de lubri-refrigeração mais eficientes através de bocais inovadores capazes de serem usados industrialmente. A influência na qualidade foi avaliada através da análise da rugosidade, do desvio de circularidade, da força tangencial de corte, da emissão acústica, da tensão residual gerada, da análise de microscopias e da microdureza dos corpos de prova ensaiados.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa utilizaram-se três formas distintas de aplicação de fluido de corte, onde foram usados o método convencional (MC) com 2 bocais circulares, o método de mínima quantidade de lubrificante (MQL) com um bocal devidamente preparado para este tipo de aplicação e o método otimizado (MO) com um bocal especialmente desenvolvido de forma a abranger toda a superfície a ser retificada.

Utilizou-se uma retificadora cilíndrica da marca SULMECÂNICA, modelo RUAP 515 H-CNC equipada com um comando numérico computadorizado CNC da marca Fagor. Foram retificadas 50 peças, sendo 15 mediante a aplicação de MQL, 25 com lubri-refrigeração otimizada, 5 peças foram retificadas sob a condição convencional e 5 sob a condição a seco (sem lubri-refrigeração).

Corpos de prova: O material utilizado na confecção desses corpos de prova foi o aço ABNT 4340, temperado e revenido. Esse aço é muito utilizado na fabricação de peças que exigem boa combinação de resistência e tenacidade, com valores relativamente uniformes em toda a seção.

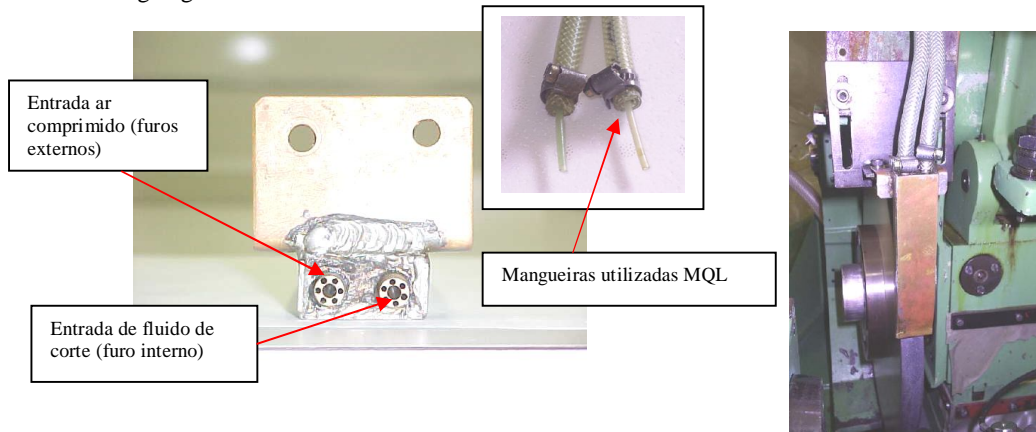
Fluidos de Corte utilizados: Óleo emulsionável de base vegetal (a base de ésteres sintéticos), com especificação DMS 3200 F-1 Lote 0193/06-S do fabricante Shell do Brasil S.A. usado para aplicação pelo método convencional e

pela técnica otimizada. Usou-se uma concentração de 5% e pH 9. O fluido de corte utilizado para o MQL foi o Accu-Lube LB 1000 Lote 39540 do fabricante ITW Chemical Products Ltda. O controle microbiológico do fluido de corte foi realizado com bactericida ADEP 30 à base de Triazina.

Ferramenta de corte: Os ensaios foram realizados com rebolo de superabrasivos de CBN (nitreto de boro cúbico) fabricado com ligante vitrificado e concentração de 15% de volume de CBN com as seguintes características: 350 x 20 - 5 x 127 - SNB151Q12VR2 - lote 7936, com granulometria fina do tipo duro com estrutura aberta.

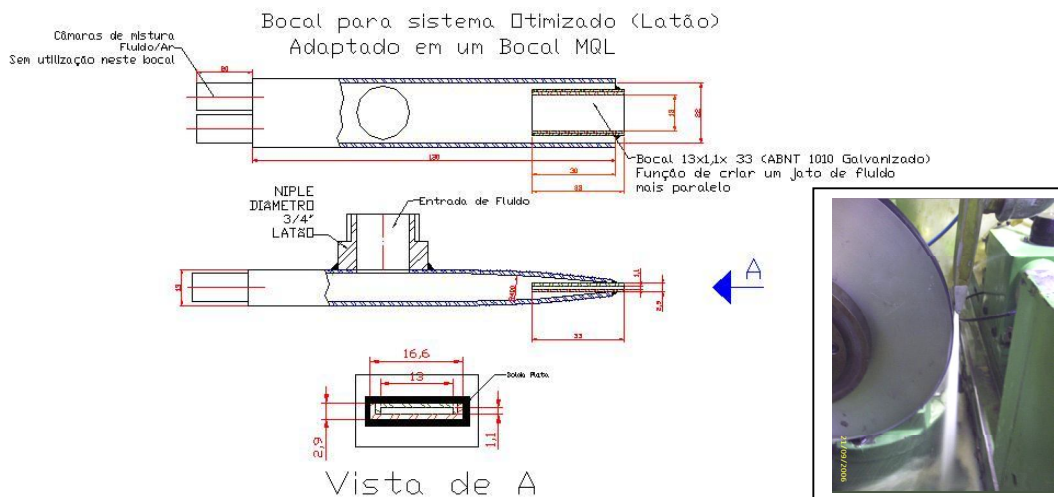
A lubri-refrigeração convencional: é caracterizada pela aplicação do fluido de corte a baixa pressão, baixa velocidade e com uma alta vazão. O bocal utilizado neste sistema de lubri-refrigeração é composto por dois bicos difusores, cada um com 6,3 mm de diâmetro para a saída do fluido.

O sistema de mínima quantidade de lubrificação MQL: Caracterizado pela aspersão de fluido de corte e ar comprimido. É composto basicamente de compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador e bocal projetado para a utilização de MQL na retificação (Fig. 1). O equipamento de mínima quantidade de lubrificante permite uma fina regulagem do volume de lubrificante/ar.



**Figura 1. Vista da parte traseira do bocal MQL mostrando os orifícios de entrada de ar comprimido e fluido de corte e vista do bocal utilizado na experimentação com MQL instalado na Retificadora mostrando a ligação de ar comprimido..**

Sistema otimizado: Caracterizado por alta vazão e alta pressão do fluido de corte. Foi composto basicamente por um bocal otimizado construído a partir de um bocal MQL. Foi introduzido na saída do bocal um tubo retangular fabricado com chapa aço ABNT 1010 galvanizada cujo formato foi conseguido através da fabricação de dois perfis “U” encaixados um ao outro. Posteriormente este tubo retangular formado por dois perfis “U” foi soldado à saída do bocal. A Figura 2. apresenta o desenho do bocal otimizado fabricado e utilizado.



**Figura 2. Projeto do bocal Otimizado construído e vista do jato formado.**

As condições de usinagem utilizadas nos ensaios foram: Velocidade de mergulho ( $V_f$ ) de 1 mm/min; Velocidade de corte ( $V_s$ ) de 30 m/s; Rotação da peça ( $\omega_w$ ) de 204 rpm; Penetração do rebolo na peça ( $a$ ) de 0,1 mm; Tempo de centelhamento ( $t_s$ ) igual a 8 segundos; Largura de retificação de 12 mm; Ciclos de retificação igual a 100; Espessura de

corde equivalente máxima ( $h_{eq}$ ) de 0,065  $\mu\text{m}$ ; Espessura de corte equivalente mínima ( $h_{eq}$ ) de 0,047  $\mu\text{m}$ ; dressador tipo fleese conglomerado.

Nas Tab. (1), (2) e (3) são apresentadas respectivamente as condições de velocidades e vazões de saída do fluido de corte na condição otimizada, MQL e convencional. Cabe ressaltar que a concentração do fluido de corte utilizado na técnica otimizada e convencional foi mantida constante em 5%.

**Tabela 1. Velocidades e vazões utilizadas na aplicação com a técnica otimizada.**

Condição	Vazão total de fluido de corte (l/min)	Velocidade de saída do fluido de corte, $V_i$ (m/s)
Otimizada 30m/s	26,3	30
Otimizada 27m/s	23,7	27
Otimizada 25m/s	21,9	25
Otimizada 20m/s	17,5	20
Otimizada 15m/s	13,2	15

**Tabela 2. Vazões utilizadas na aplicação MQL.**

Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	Vazão total de fluido de corte (l/min)	Velocidade de saída do ar comprimido $V_p$ (m/s)
MQL 40ml/h	0,00067	30
MQL 60ml/h	0,00100	30
MQL 80ml/h	0,00133	30

**Tabela 3. Vazões e velocidades utilizadas na aplicação convencional.**

Aplicação convencional	Vazão total de fluido de corte, (l/min)	Velocidade de saída do fluido de corte, $V_p$ (m/s)
Convencional	20	5,3

Aquisição da força tangencial de corte: a força tangencial de corte  $F_{tc}$  foi medida pela determinação da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, com o monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica, provenientes deste motor elétrico.

O sinal de emissão acústica (EA): foi monitorado em tempo real, pelo seu valor médio quadrático (RMS ou *Root Mean Square*), utilizando um aparelho marca Sensis, modelo BM12. Parâmetros utilizados: Ganho de sinal: 3dB; redução de ruído: 30 dB; ganho de entrada: 3 dB; e constante de tempo: 1ms.

Rugosidade: Para a medição da rugosidade média das peças, representado pelo parâmetro  $R_a$ , utilizou-se um aparelho da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+. A medição foi realizada na direção perpendicular à superfície de retificação. O comprimento de medição (cut-off) utilizado foi de 0,8 mm e o filtro foi o 2CR-fase corrigida. O raio da ponta do diamante do medidor de rugosidade foi de 0,2  $\mu\text{m}$ .

Desvios de circularidade: foram medidos com um equipamento medidor de circularidade TALYROND 31C, da Taylor Hobson através do software TR31 instalado em um microcomputador acoplado ao medidor de circularidade (circularímetro).

Tensão residual: os equipamentos utilizados para a obtenção da tensão residual foram um Difrátômetro modelo D5000 da marca Siemens, com tubos de raios X com alvo de cobalto e um Difrátômetro Rigaku, Modelo DMAX-2000 com tubos de raios X com alvo de Cromo. Utilizou-se o método de múltipla exposição ( $\sin^2\psi$ ), por meio da difração de raios-X.

Microscopias eletrônicas de varredura (MEV): utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura da marca ZEISS, modelo DSM 960, utilizando-se a técnica dos elétrons espalhados, que permite a visualização com maior facilidade do relevo das estruturas na superfície analisada. Utilizou-se uma ampliação de 2000 vezes.

Microdureza: foi utilizado o microdurômetro da marca BUEHLER, modelo 1600-6300 utilizando uma carga de 200g com aplicação de 40s.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Força Tangencial de Corte

A Figura (3) apresenta a média das forças tangenciais de corte máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas permitindo avaliar e comparar os métodos entre si.

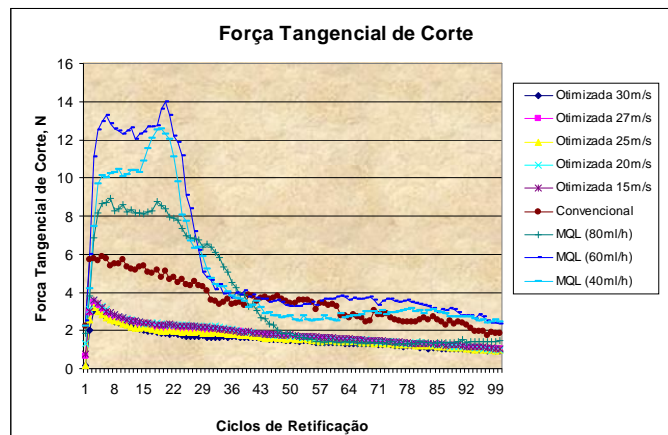


Figura 3. Análise das formas de aplicação de fluido de corte nas forças tangenciais de corte.

A análise da Figura (3) permite observar que as forças de corte envolvidas nos processos de MQL foram bem superiores que para o sistema convencional e sistema otimizado.

O sistema otimizado mostrou-se capaz de lubrificar de forma muito eficiente, fazendo que com isso o desgaste do rebolo seja diminuído aumentando sua vida. As altas velocidades envolvidas nos processos otimizados favoreceram uma melhor entrada de lubrificante na zona de contato peça e rebolo diminuindo a parcela de esforço gasto entre atrito da peça com a ferramenta.

O sistema convencional apresentou-se como um sistema intermediário entre sistemas otimizados e MQL com relação às forças de corte. Tanto no sistema otimizado quanto no convencional a perda aparente da afiação foi muito sutil durante os 100 ciclos de usinagem ( próximo ao 25º ciclo para lubri-refrigeração otimizada). Com este raciocínio, pode-se observar uma menor necessidade de dressagens quando aplicando essas técnicas quando comparadas com MQL.

Com relação à variação da vazão de fluido de corte de 40, 60 e 80ml/h para a condição de MQL, notou-se uma diminuição da força de corte com o aumento da vazão do fluido. A condição que apresentou o melhor desempenho com relação a lubri-refrigeração convencional foi com vazão de 80ml/h favorecendo a lubrificação na interface rebolo-peça.

Para os ensaios envolvendo lubri-refrigeração otimizada obtiveram-se melhores resultados que para a lubri-refrigeração convencional e MQL, sendo a lubri-refrigeração otimizada com velocidade de saída de fluido de corte igual a 30m/s a condição com menores forças tangenciais de corte.

A técnica otimizada apresentou as menores forças tangenciais de corte comparado aos sistemas convencional e MQL. No entanto os valores de força obtidos estão dentro de valores aceitáveis para processos de retificação.

#### 4.2. Emissão Acústica

Devido ao baixo custo e do tamanho dos sensores atuais para a obtenção da emissão acústica gerada durante processos de usinagem essa técnica deve começar a ser usada com mais frequência pelas indústrias.

A Figura (4) apresenta a média das emissões acústicas máximas das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas, permitindo avaliar e comparar os métodos entre si.

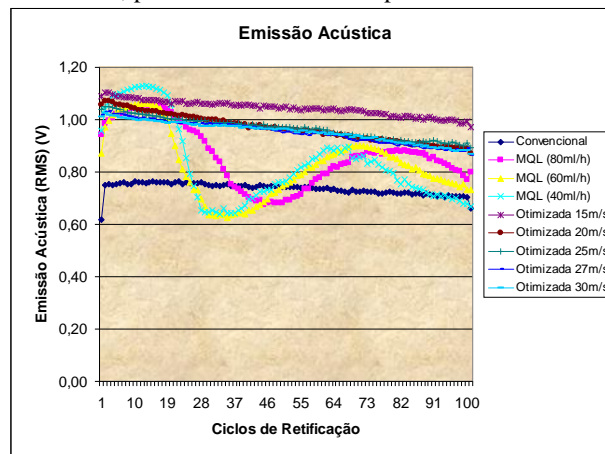


Figura 4. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na emissão acústica

A comparação entre as condições de usinagem com a técnica da MQL, otimizada e a lubri-refrigeração convencional, percebe-se que o comportamento da lubri-refrigeração convencional foi mais constante que a técnica da MQL e obtiveram-se os menores valores de emissão acústica.

Nos ensaios envolvendo MQL percebe-se ainda que após o vigésimo ciclo de retificação as emissões acústicas mínimas estão próximas dos níveis da emissão em vazio. Não é possível observar diferenças significativas nas emissões mínimas em função da vazão de fluido de corte utilizado em cada condição MQL utilizada.

Para lubri-refrigeração otimizada e convencional as emissões acústicas apresentaram-se mais constantes, sem muitas variações, mostrando que estas formas de lubrificação foram capazes de manter a afiação do rebolo durante todos os ciclos de retificação.

Segundo Inasaki (1990), existe uma relação entre a energia específica de retificação e os valores de emissão acústica, uma vez que tiveram a tendência de serem minimizadas com o aumento das velocidades de aplicação do fluido de corte.

Segundo estudos realizados por Junior (1996) onde comparou-se sinais de EA e as forças de corte em processo de retificação interna, a emissão acústica durante os ensaios aumentava com as forças de corte, provando que os sinais de EA podem ser utilizados para monitoramento dos valores de forças obtidos ao longo do processo.

### 4.3. Rugosidade

A importância da análise desta variável deve-se ao fato de que o acabamento superficial afeta de forma significativa a resistência dos componentes fabricados quando são submetidos a trabalhos onde são exigidos esforços de fadiga. A rugosidade de uma peça ainda está diretamente ligada à lubrificação e depende principalmente do tamanho do grão abrasivo presente no rebolo, condições de dressagem, taxa de remoção de material, tempo de centelhamento e condições de lubri-refrigeração (MALKIN, 1989).

A Figura (5) apresenta as médias das rugosidades das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas.

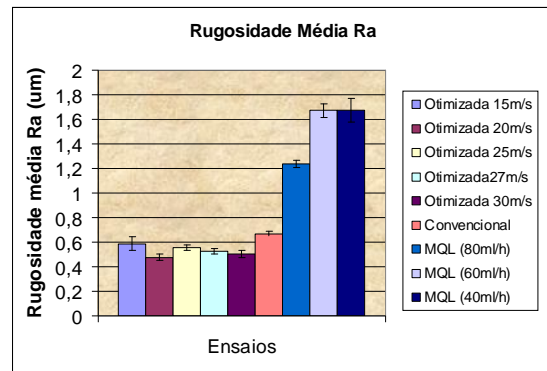


Figura 5. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na rugosidade

Analisando-se os resultados obtidos observa-se de uma maneira geral que os valores de rugosidade foram menores para lubri-refrigeração otimizada, seguida pela lubri-refrigeração convencional e por último a técnica de MQL. Os menores valores para a utilização da MQL são quando utilizada vazão do lubrificante igual a 80ml/h, comprovando-se assim que a maior quantidade de fluido possibilitou menores valores de rugosidade devido a maior lubrificação alcançada.

A lubri-refrigeração convencional apresentou valores menores de rugosidade que a técnica de MQL, porém os valores obtidos com a vazão do lubrificante igual a 80ml/h são valores de rugosidade abaixo de grande parte de aplicações industriais.

A melhor situação otimizada (velocidade de fluido de 20m/s) em relação à rugosidade Ra média da peça ficou 71,7% menor que a melhor condição MQL (Q=80ml/h) e 47% menor que a condição convencional de aplicação de fluido de corte.

Os menores valores para a utilização do método otimizado foram obtidos para maiores velocidades de fluido de corte, comprovando-se assim que a maior quantidade de fluido possibilitou menores valores de rugosidade devido a maior lubrificação alcançada. Maiores velocidades do fluido de corte permitem a expulsão do cavaco mais rapidamente, colaborando para o melhor acabamento. As diferenças de rugosidade entre as formas otimizadas são pequenas, mas apresentam uma tendência de melhor qualidade para maiores velocidades de aplicação de fluido de corte. Resultado observado também por Alves (2005).

Segundo Bianchi et al (2001), condições que geram menores forças de tangenciais de corte geram também menores rugosidades. Fato observado também nesta pesquisa.

#### 4.4. Desvio de Circularidade

A Figura (6) apresenta os resultados do desvio de circularidade das cinco repetições realizadas para cada uma das condições de MQL, MO e MC utilizadas.

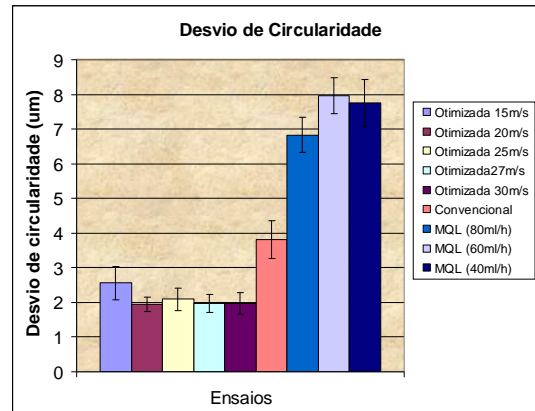


Figura 6. Análise das formas de aplicação de fluido de corte nos desvios de circularidade.

Analisando-se os resultados de circularidade obtidos pode-se observar que de um modo geral que para cada condição usando técnica otimizada os valores não apresentaram diferenças significativas. No entanto a técnica otimizada apresentou resultados melhores que a convencional e a técnica MQL.

A quantidade de fluido de corte na técnica MQL mostrou-se de fundamental importância no desvio de circularidade.

A condição otimizada com velocidade de fluido de 30m/s foi a que apresentou o menor desvio de circularidade comparada a todas as outras condições e todas as outras técnicas. O desvio de circularidade médio para esta condição foi de 2µm sendo 70,5 % menor que a melhor condição MQL obtida com vazão de 80ml/h.

O valor máximo do erro de circularidade obtido foi 7,9 µm para a condição de MQL com vazão do lubrificante igual a 60ml/h.

Quanto às relações de velocidades utilizadas para a lubri-refrigeração otimizada, nota-se que há uma tendência da circularidade melhorar mediante o aumento da velocidade de aplicação do fluido de corte na aplicação otimizada.

Outro fato relevante deve-se, segundo Kohli et al (1995), a alta condutibilidade térmica dos grãos de CBN que permite uma menor partição da energia gerada para a peça, facilitando desta maneira o controle dimensional desta e assegurando a integridade superficial do componente usinado.

Todos os valores dos desvios de circularidade apresentados estão dentro dos limites aceitáveis segundo Agostinho et al. (1997), entre 5 e 10 µm.

#### 4.5. Microdureza

A Figura (7) apresenta os resultados de microdureza Vickers médios para as condições de MQL, MO e MC utilizadas. É apresentado também o valor de microdureza vickers médio para ensaio de queima e peça somente torneada.

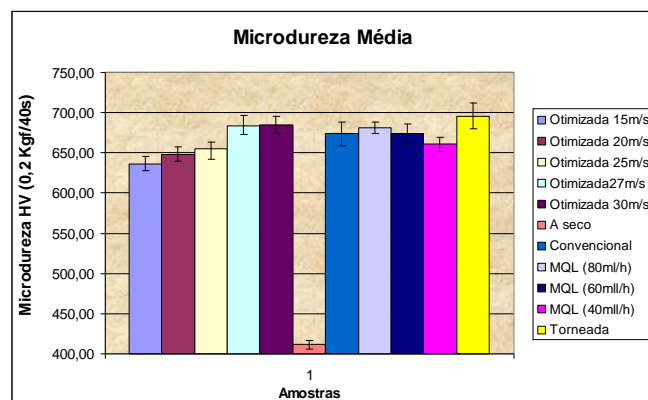


Figura 7. Microdureza Vickers médias para as condições de MQL, MO e MC, ensaio com queima e peça somente torneada.

A maior variação média de dureza em relação à peça original (torneada) foi encontrado para a condição MQL com vazão fluido de 40ml/s, sendo que está apresentou dureza 5,1% menor, em média, que a peça torneada. Essa é a pior (menor dureza) condição em relação à variável de saída microdureza Vickers para a condição MQL. A melhor condição para as condições MQL foi conseguida com a vazão de 80ml/h que apresentou uma dureza 2,15 % menor que para a peça somente torneada.

A análise da microdurezas obtidas para a técnica otimizada, MQL e convencional permite concluir que, por mais eficiente que seja o método utilizado de lubri-refrigeração, existe uma pequena perda de dureza superficial. Conclui-se ainda que a maior vazão de fluido de corte (80ml/h) para técnicas MQL são capazes de proporcionar uma menor perda de dureza. No entanto, uma técnica não se mostrou mais eficiente que a outra em termos gerais.

A microdureza Vickers para a melhor condição otimizada foi praticamente a mesma a melhor condição MQL, com uma diferença menor que 1%.

#### 4.6. Tensão Residual

A Figura (8) apresenta os resultados de tensão residual médias para as condições de MQL, MO e MC utilizadas. É apresentado também o valor de tensão residual médio para ensaio de queima e peça somente torneada.

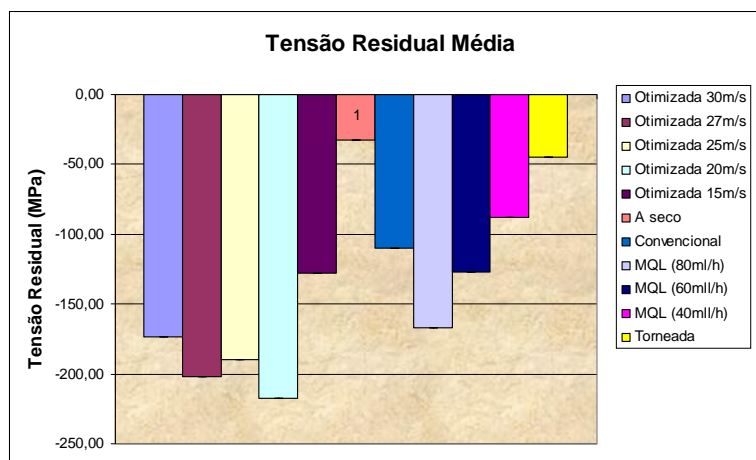


Figura 8. Análise das formas de aplicação de fluido de corte na tensão residual.

Analisando-se a Figura (8) tem-se que as tensões verificadas foram compressivas. Fato comprovado por Brinksmeier et al. (1982) quando usando rebolos de CBN. A maior condutividade térmica do CBN possibilita que uma menor partição da temperatura dirija-se a peça diminuindo os efeitos térmicos.

#### 4.7. Análise Microestrutural

A integridade superficial de uma peça é um fator de extrema importância, no entanto danos causados à superfície de um material podem afetá-la significativamente, causando degradação de propriedades relativas à resistência ao desgaste, à corrosão, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça. A integridade superficial de uma peça é afetada principalmente pela temperatura oriunda do processo de retificação, podendo causar danos térmicos na peça (ALVES, 2005).

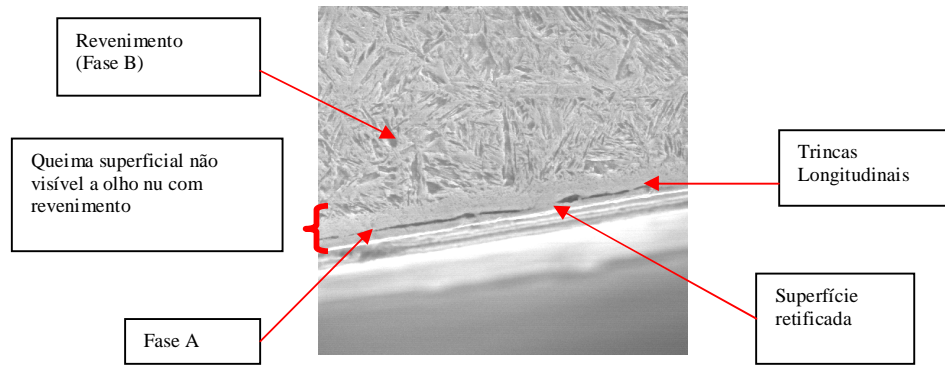
A lubri-refrigeração convencional foi capaz de lubrificar e refrigerar a peça de forma eficiente não permitindo a ocorrência de danos na peça produzida. O mesmo ocorreu para a lubri-refrigeração otimizada. Além disso, o tempo de contato dos grãos abrasivos e o tempo de resfriamento são muito pequenos, não favorecendo as diferenças significativas na subsuperfície.

Para as condições MQL com 80ml/h e 60ml/h respectivamente não ocorreram alterações subsuperficiais significativas na microestrutura com o emprego da técnica MQL.

A microscopia apresentada na Figura (9) refere-se à condição MQL com 40ml/h. Nestas condições foi possível perceber sinais de alterações subsuperficiais significativas na microestrutura como trincas e queima superficial.

Através da análise da microestrutura pode-se afirmar que as diversas condições testadas para as técnicas otimizada e convencional de lubri-refrigeração, demonstraram resultados satisfatórios, ou seja, sem alterações significativas da microestrutura após a retificação, não apresentando possíveis danos à superfície da peça, melhorando assim propriedades da peça, como resistência à corrosão e a abrasão e maiores resistências à fadiga. Exceção somente para a situação onde a vazão de fluido de corte foi de 40ml/h na técnica MQL onde houve a presença de trincas e revenimento, no entanto sem queima visual.





**Figura 9. Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL com vazão de fluido de corte de 40ml/h (ampliação de 2.000 vezes).**

## 5. CONCLUSÕES

- A análise geral dos resultados indica que a técnica da MQL demonstrou ser viável como uma alternativa para a substituição da lubri-refrigeração convencional dependendo do grau de precisão desejado ao componente, proporcionando ganhos ecológicos e econômicos.

- Através dos resultados da força tangencial de corte e emissão acústica conclui-se que a utilização do sistema MQL com velocidade de saída do ar comprimido de 30 m/s, rebolo de CBN com 15% de material abrasivo, velocidade de corte de 30m/s, deve ser utilizada para uma espessura equivalente de corte (heq) máxima de aproximadamente 0,060µm. Como a espessura equivalente depende do diâmetro da peça, da velocidade de mergulho e da velocidade de corte, estes parâmetros devem ser ajustados de forma que o rebolo tenha capacidade de corte (menor remoção por grão abrasivo) e o sistema MQL seja capaz de remover os cavacos dos poros do rebolo.

- A técnica otimizada demonstra ser fundamental para se obter peças mais precisas comparada às outras técnicas utilizadas, sendo desta forma uma opção de obter peças com maior qualidade sem fazer mudanças de rebolos, fluidos de corte, condições de dressagem e corte.

- Maiores vazões e maiores velocidades de aplicação de fluido de corte proporcionaram melhores resultados para o material usinado como menores rugosidades e menores desvios de circularidade;

- Nota-se a possibilidade de utilização de rebolos de CBN com menores quantidades de abrasivos associados a formas mais eficientes de aplicação de fluido de corte, sem prejudicar as propriedades dos componentes usinados, contribuindo para a redução de custos do processo de retificação.

- Fluidos de corte menos agressivos ao meio ambiente e à saúde humana, como os fluidos utilizados neste trabalho, mostraram-se capazes de serem utilizados em processos de retificação sem prejudicar a qualidade das peças produzidas contribuindo para uma diminuição dos prejuízos à saúde e à natureza.

- Analisando a integridade superficial das peças retificadas com a técnica da MQL, com relação à microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microdureza, verificou-se que não ocorreram alterações das propriedades do material para todas as condições otimizadas e condição convencional, devido à eficiência da lubrificação alcançada;

- Para a técnica MQL, quando utilizando vazões de 80ml/h e 60ml/h não foram percebidos defeitos térmicos. Para a condição MQL com vazão de 40ml/h notou-se o aparecimento de trincas e revenimento devido principalmente à menor lubrificação proporcionada aumentando a geração de calor devido ao atrito grão e peça.

- Todas as variáveis analisadas sofreram redução significativa com a aplicação da técnica otimizada, devido à boa lubri-refrigeração proporcionada pela técnica e devido à eficiência proporcionada pelo modelo de bocal inovador utilizado;

- As condições utilizadas para a técnica de MQL com relação à vazão do fluido e velocidade do ar comprimido não apresentaram dispersão de névoa, possibilitando a boa visualização do processo de retificação por parte do operador e favorecendo a usinagem ambientalmente correta.

- Apesar de ter sido usado um rebolo de CBN duro de estrutura aberta e com baixa concentração de CBN (15% no volume) e de granulometria fina (entre 100 e 120 mesh), os resultados para a técnica MQL foram satisfatórios já que resultados encontrados estão dentro de limites aceitáveis para a retificação.

- Ficou demonstrado que usando velocidades do jato de corte próximas da velocidade de corte obtém-se os melhores resultados, pois nestas condições quebra-se a barreira aerodinâmica ao redor do rebolo e favorece a entrada de fluido além de proporcionar um melhor expulsão do cavaco diminuindo os efeitos deste sobre a peça. Ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados para maiores velocidades de jato em relação a velocidade de corte.

- Conclui-se a possibilidade de utilização da técnica MQL usando rebolo com baixa concentração de abrasivo (15%) em situações onde a especificação da rugosidade e circularidade não são tão apertadas como na usinagem de assentos de rolamentos em eixos, eixos e furos para engrenagens entre outras que representam grande parte das aplicações de retificação no meio industrial.

## 6. REFERÊNCIAS

- Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C. S., Lirani, J., 1997, “Tolerâncias, Ajustes, Desvios Análise de Dimensões”. 5ª.ed. Edgard Blücher Ltda.
- Alves, M. C. S., 2005, “Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada”, Dissertação de Mestrado – UNESP, Bauru, SP, Brasil.
- Bianchi, C. E., Valarelli, I. D., Aguiar, P. R., Silva, E. J., Monici, R. D., Souza, G. F., 2001, “A contribuição dos rebolos de CBN para a melhoria da competitividade e qualidade”. Revista Máquinas e Metais, Aranda Editora, Abril, p. 170-197.
- Brinksmeier, E., Cammett, J. T., König, W., Leskovar, P., Peters, J., Tönshoff, H. K., 1982, “Residual stresses – measurement and causes in machining processes.” In Annals of the CIRP, vol. 31, p. 491-510.
- Guo, C., 1999, “Energy partition and cooling during grinding”. In: 3rd International Machining & Grinding Conference, SME, October 4-7, Cincinnati, Ohio, USA, p. 1-12.
- Inasaki, I., 1990, “Monitoring and optimization of grinding process”. Annals of the CIRP, v. 40.
- Junior, J. F., 1996, “Contribuição para implementação de funções de retificação inteligente (R.I.) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica”. Tese (Doutorado) - USP, São Carlos, SP, Brasil, 138p.
- Kohli, S. P., Guo, C., Malkin, S., 1995, “Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels.” In ASME Journal of Engineering for Industry, vol. 117, p. 160-168.
- Malkin, S., 1989, “Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage.” In: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, Cap. 5 e 6, p. 108 a 171.
- Webster, J. A., 1999, “Optimizing coolant application systems for high productivity grinding”. ABRASIVES Magazine, October/November, p. 34-41.
- Webster, J., 1995, “Selection of coolant type and application technique in grinding”. Supergrind, p. 205-218.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

## INFLUENCE OF LUBRI-REFRIGERATION OPTIMIZED AND MINIMUM AMOUNT OF LUBRICATION WITH INNOVATIVE APPLICATORS IN THE FORCES OF CUT AND THE QUALITY OF GRINDING HARD STEEL

Manoel Cleber Sampaio Alves, [manoel@itapeva.unesp.br](mailto:manoel@itapeva.unesp.br)<sup>1</sup>

Eduardo Carlos Bianchi, [bianchi@feb.unesp.br](mailto:bianchi@feb.unesp.br)<sup>2</sup>

Paulo Roberto de Aguiar, [aguiarpr@feb.unesp.br](mailto:aguiarpr@feb.unesp.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNESP- Wood Industrial Engineering School, Street Geraldo Alckmin, 519, CEP 18409-010 Itapeva-SP, Brazil.

<sup>2</sup>UNESP-Bauru Engineering School-FEB, Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01 CEP 17033-360 Bauru-SP, Brazil.

**Abstract:** *The influences on surface integrity of the parts (finishing, geometrical errors, cracks, burn, microhardness) and grinding wheel (wear) have been analyzed in this research by employing the minimum quantity of lubrication (MQL), optimized and conventional cooling for hardened parts of steel and superabrasives grinding wheel in the cylindrical plunge grinding process. This study was carried out through the assessment of the process output variables such as the behavior of the tangential cutting force, specific energy, surface roughness, circularity errors, acoustic emission, residual stress, scanning electronic microscopy (SEM) and microhardness. It could be observed from the analysis on different ways of cutting fluid applications that there are cooling conditions which facilitate the decrease in cutting fluid volume, decrease in grinding time without impairing the geometrical and dimensional parameters, the surface finish and surface integrity of the parts. It could be noted the optimized application for higher velocities has presented the best performance regarding the different applications of cutting fluids. The optimized and MQL processes were able to maintain the hardness and surface integrity of the ground parts. Exception occurred only for MQL condition with flow rate of 40ml/h, which led to cracks and quench on the workpiece surface. The process of minimum quantity of lubrication, however, has showed possible to be used in the grinding process because it has satisfied the qualitative requirement a workpiece is meant to have, besides taking advantage of using a very small amount of cutting fluid (up to 100ml/h). Grinding wheels with low CBN concentration, thus cheaper, provide good results when associated with more efficient techniques of cutting fluid application which, in turn, show reduced wear.*

**Key words:** *Grinding process, CBN grinding wheel, minimum quantity of lubrication (MQL), optimized cooling, conventional cooling.*