



ANÁLISE DAS FORÇAS E DA VIDA DA FRESA DE TOPO RETO REVESTIDA COM TiCN NA USINAGEM A SECO, COM MINIMIZAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE E COM APLICAÇÃO DE EMULSÃO

Rolf Bertrand Schroeter¹, Pablo Deivid Valle²

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica

(1) rolf@imp.ufsc.br, (2) pablo@imp.ufsc.br - Florianópolis, SC, Brasil

Cleiton Rodrigues Teixeira

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Materiais e Construção

dmcrt@super.furg.br – Rio Grande, RS, Brasil

***Resumo.** O principal objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento das forças de usinagem e da vida da ferramenta, no processo de fresamento de topo reto, com ferramentas inteiriças de metal duro de dois gumes, todas revestidas com TiCN e especificação DIN 6527L. Neste estudo foi empregada a usinagem a seco, a usinagem com emulsão e a usinagem com mínima quantidade de fluido de corte (MQFC), obtendo-se, assim, informações tecnológicas que possibilitem uma comparação entre as situações atuais de produção e a usinagem com minimização de fluido de corte. Nos experimentos foi monitorada a evolução do desgaste na face e nos flancos de cada gume da ferramenta. O material utilizado para a execução dos ensaios foi o aço SAE 1040 e as condições de usinagem selecionadas para a operação de desbaste. A avaliação dos aspectos ambientais em função da disposição do fluido de corte também será discutida, principalmente devido à tendência mundial de buscar minimizar esse impacto.*

***Palavras-chave:** Fresamento, Vida da ferramenta, Minimização de fluido*

1. INTRODUÇÃO

Apenas a otimização de ferramentas e de máquinas-ferramentas não é suficiente para que um processo de usinagem torne-se mais rentável. Para que isso ocorra, há a necessidade de se determinar parâmetros de corte e controlar o processo de maneira a resolver os problemas específicos, devido às particularidades geométricas de cada ferramenta de corte (Stemmer, 1995; König e Klocke, 1997).

Além da otimização de ferramentas, máquinas e parâmetros de corte, outra crescente tendência mundial é a preocupação das empresas quanto aos aspectos ecológicos da produção. Os processos de usinagem estão dentro deste contexto, e o uso de fluidos de corte vem sendo reavaliado. A usinagem a seco, a minimização do uso de fluidos e o desenvolvimento de produtos menos nocivos têm se tornado tema constante nas empresas e institutos de pesquisa (Teixeira, 1997). Sendo assim, com as crescentes pressões dos órgãos ambientais para reduzir o impacto da produção industrial no meio ambiente e o surgimento de leis cada vez mais

severas contra os infratores, fica evidente a importância da necessidade de minimizar os prejuízos ambientais causados pelos processos de usinagem (Sreejith e Ngoi, 2000).

Outro ponto de grande importância é a evolução dos revestimentos de ferramenta que proporcionam um aumento na vida da mesma, através da maior resistência térmica e mecânica gerada na sua superfície, porém, o custo inicial dessas ferramentas é elevado e para assegurar seus benefícios é fundamental que as condições de usinagem sejam muito bem determinadas (Gu, Barber, Tung e Gu, 1999).

2. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Neste experimento utilizaram-se cinco ferramentas de metal duro com revestimento de TiCN (D1, D2, D3, D4 e D5), com mesmas características técnicas e com especificação D2471 material K30F, conforme a norma DIN 6527L e revestidas com TiCN através do processo PVD (*physical vapour deposition*). As condições de usinagem para cada ferramenta são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições de usinagem para cada ferramenta.

Ferramenta	Fluido de Corte	v_c (m/min)	f_z (mm)	a_e (mm)	a_p (mm)	Z	D (mm)
D1	Seco	140	0,03	8	5	2	10
D2	MQFC 1	140	0,03	8	5	2	10
D3	MQFC 2	140	0,03	8	5	2	10
D4	Emulsão	140	0,03	8	5	2	10

Os parâmetros de corte foram determinados através do catálogo de recomendações do fabricante para a operação de desbaste, contudo a profundidade de corte axial (a_p) e a profundidade de corte radial (a_e) foram selecionadas de acordo com a faixa de operação da ferramenta. A ferramenta D5 permaneceu como reserva, para eventual repetição de ensaios que apresentassem problemas.

2.1 Fluidos de corte

Os fluidos de corte empregados nos ensaios possuem as seguintes características:

- Seco - Sem introdução de fluido de corte;
- MQFC 1 - Óleo de origem vegetal com especificação IT-MICRO 4300, fornecido pela empresa I. Terstegen da Alemanha, aplicado por dois bicos injetores com uma pressão de 3 bar, a uma inclinação de 45° entre a superfície da peça e a ferramenta e vazão de 25 ml/h cada bico, totalizando 50 ml/h;
- MQFC 2 - Óleo de origem mineral com especificação MAXLU B5G725, fornecido pela empresa BARDAHL, aplicado a uma pressão de 3 bar com inclinação de 45° entre a superfície da peça e a ferramenta, através de um bico com vazão de 50 ml/h;
- Emulsão - Solução com 6% de MAXLUB RECUT 2, fornecido pela empresa BARDAHL, aplicado a uma inclinação de 45° entre a peça e a ferramenta e com uma vazão de aproximadamente 230 l/h.

Segundo Klocke e Gerschwiler (1996), quantidade mínima de fluido de corte refere-se a vazões de até 50 ml/h e onde o fluido é aplicado em forma de névoa. Vazões superiores a esse valor (50 ml/h) são consideradas aplicações reduzidas de fluido de corte.

2.2 Material ensaiado e estratégia de usinagem

O material usinado foi o aço SAE 1040 em forma de barra redonda laminada, sem tratamento e sem acabamento com diâmetro bruto de 4 polegadas (101,6 mm), fornecido pela empresa GERDAU S.A. Os detalhes da estratégia de usinagem utilizada e a geometria dos corpos de prova para desgaste da ferramenta e para aquisição das forças estão descritos em Schroeter, et. al (2000).

2.3 Equipamentos utilizados

Para realizar os experimentos utilizou-se basicamente uma fresadora CNC ROMI Polaris F400, uma plataforma piezelétrica para fresamento 9443 KISTLER com amplificador de sinais AG 5006 KISTLER, placa de aquisição de sinais, microscópio de ferramentaria Nikon Measurescope, sistema de aquisição de imagem digital, rugosímetro PERTHOMETER S8P com unidade de avanço PERTHOMETER PRK.

2.4 Planejamento experimental

Com o objetivo de sistematizar os intervalos de aquisição dos dados e garantir a repetibilidade das medições, elaborou-se um plano de trabalho para os ensaios conforme a “Tabela 2”. A primeira etapa desta planilha visa comprovar a qualidade geométrica das ferramentas, sendo feita para isto uma avaliação de algumas dimensões principais, como o ângulo de hélice e o afastamento (radial e axial) do gume em relação ao seu eixo de rotação. As dimensões verificadas não apresentaram valores fora da margem de erro.

Tabela 2. Planilha esquemática para execução do ensaio.

Etapa	Descrição
1	Verificação da qualidade geométrica da fresa
2	1° Aquisição dos dados de desgaste e força (fresa nova)
3	Usinagem para desgaste da ferramenta (115 cm ³ /gume)
4	2° Aquisição dos dados de desgaste e força
...	...
n	Repetem-se as etapas 3 e 4 até atingir-se 575 cm ³ /gume de material removido

Deste modo, tem-se 6 pontos de aquisição dos dados em intervalos constantes de 115 cm³ de material removido por gume, totalizando 575 cm³.

3. MEDIÇÃO DA FORÇA RESULTANTE MÁXIMA

Para adquirir o sinal de força utilizou-se a plataforma piezelétrica 9443 KISTLER, onde o sistema de aquisição foi ajustado para gravar 200 medições por segundo (0,2 kHz). Como critério para comparação dos esforços de usinagem em cada ponto de medição, adotou-se a média dos valores de pico da força resultante (FR) determinada pela equação 1 dentro do intervalo de usinagem estabilizada. Para a comparação entre cada condição foi utilizado o módulo desta resultante.

$$FR = \sqrt{Fx^2 + Fy^2} \quad (1)$$

Na “Figura 1” pode ser visto o comportamento da força resultante FR no plano XY, onde a frequência de variação é definida pelo trabalho dos gumes durante o corte.

A “Figura 2” mostra a evolução da força resultante máxima para os 5 ensaios, sendo que o eixo da abscissa corresponde ao volume de material retirado por gume da ferramenta. Este parâmetro foi empregado com o propósito de facilitar outras comparações entre ferramentas com número de gumes diferente da utilizada neste experimento.

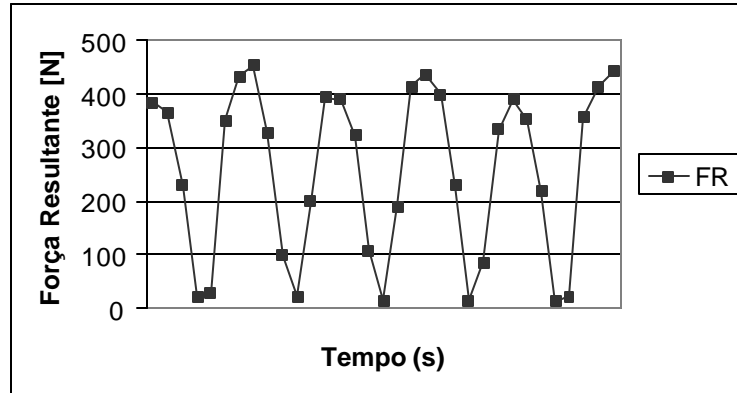


Figura 1. Comportamento da força resultante.

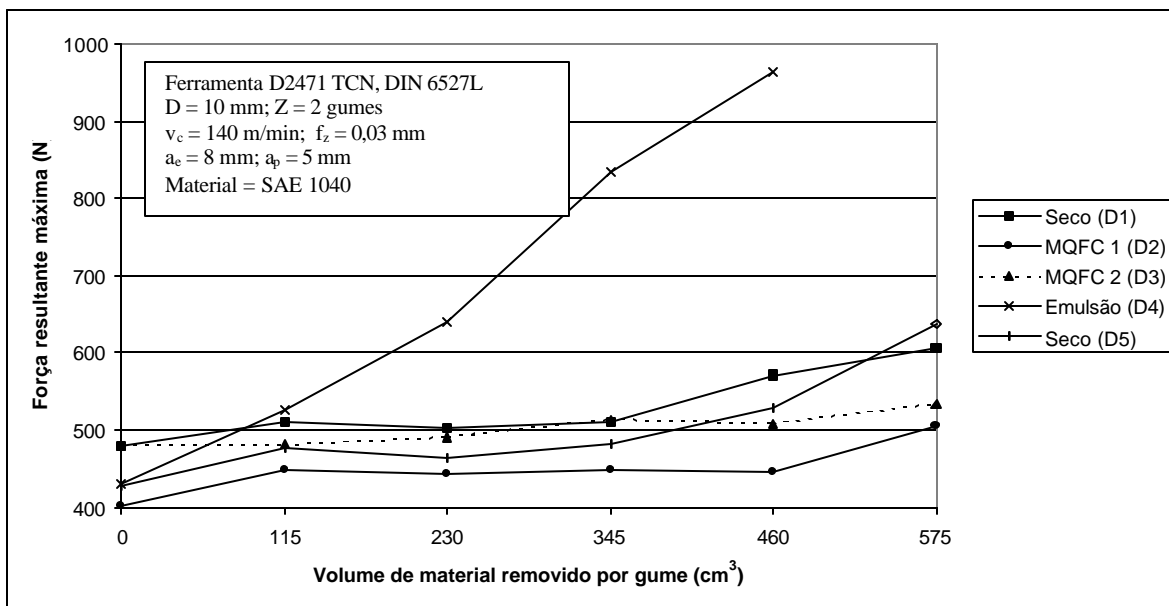


Figura 2. Comportamento da força resultante máxima nos diversos tipos de fluido.

Conforme comentado no item 2, a ferramenta D5 foi utilizada para repetir o ensaio a seco com o objetivo de ratificar os dados obtidos com a fresa D1. Esta escolha teve como motivação o fato de que a usinagem sem fluido de corte é a ideal com relação ao ponto de vista ecológico.

Pode-se observar no gráfico acima que o ensaio com emulsão apresenta uma variação acentuada na força resultante máxima quando comparado com os demais, o que ocorre principalmente devido ao desgaste prematuro do gume da ferramenta. Este desgaste é ocasionado pelo gradiente térmico gerado na zona de corte através do fenômeno de fadiga térmica, assim como pelos choques de entrada e saída do gume na peça. A flutuação das cargas de compressão e tração em cada gume da fresa juntamente com o efeito do gradiente térmico (aquecimento e resfriamento brusco da ferramenta) provocam o aparecimento de

micro-trincas, lascamentos e pequenas quebras do gume, que desta forma levam ao fim de vida precoce da ferramenta (Gu, Barber, Tung e Gu, 1999; Diniz e Filho, 1999).

4. MEDIÇÃO DO DESGASTE

Para a quantificação do desgaste ocorrido em cada região da ferramenta, foi empregada a metodologia de medição proposta por Schroeter e Teixeira (2000), na qual registram-se os defeitos ocorridos na face, no flanco principal e no flanco secundário da ferramenta através de uma câmera CCD em intervalos pré-determinados, conforme o planejamento do experimento. Estas imagens são arquivadas e posteriormente analisadas através de um *software* adequado para a medição dos respectivos desgastes.

Pode-se observar, através das imagens registradas, que o desgaste no flanco secundário em todas as ferramentas é desprezível, enquanto que o flanco principal e a face das ferramentas apresentaram defeitos bastante significativos. A “Figura 3” mostra o comportamento da marca de desgaste máxima no flanco principal ($VB_{máx}$) para todas as condições ensaiadas, e a figura 4 mostra a marca de desgaste máxima na face das ferramentas ($KB_{máx}$). Como critério na avaliação dos desgastes, adotou-se o gume que apresenta a maior marca de desgaste em cada ponto de medição como o valor representativo para o desgaste da fresa.

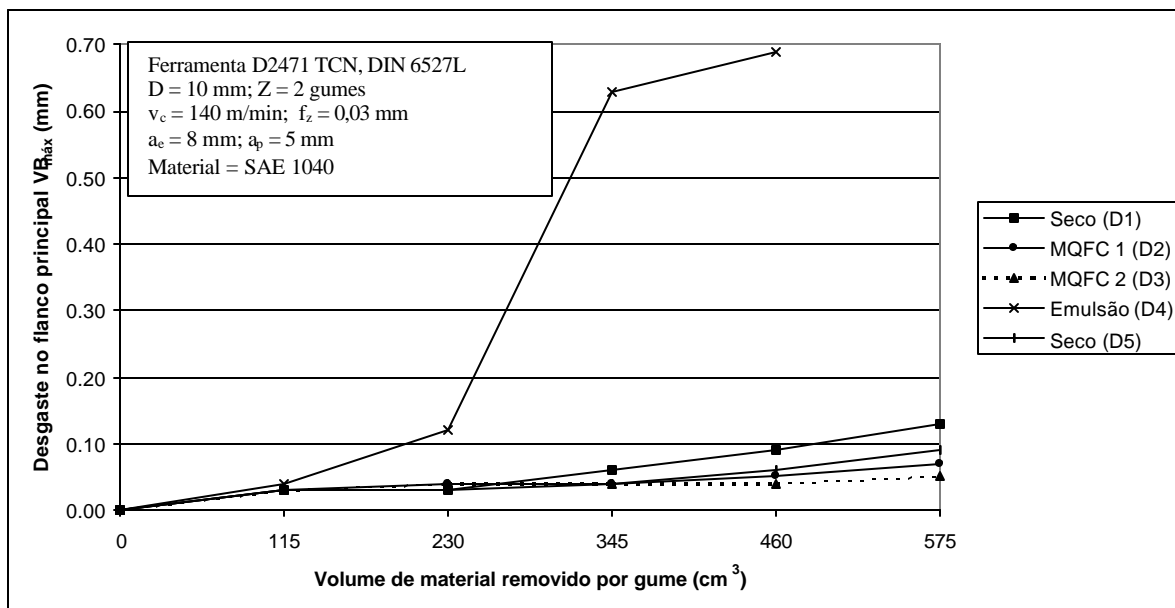


Figura 3. Evolução da marca de desgaste no flanco principal ($VB_{máx}$).

Como discutido na seção anterior, os fenômenos ocorridos no fresamento com emulsão ocasionam um desgaste acelerado da ferramenta e este fato pode ser claramente identificado na “Figura 3”. Por outro lado os demais experimentos apresentaram um comportamento muito próximo, o que dificulta uma análise mais detalhada. Outra característica interessante verificada nestes ensaios, é que o desgaste de flanco máximo apresenta-se na maioria das vezes próximo à interface peça/ferramenta. Apenas no experimento com emulsão é que o $VB_{máx}$ localiza-se na ponta da fresa “Fig. 5”. Esta alteração pode ser compreendida através do fenômeno da fadiga térmica. O fato de a refrigeração da região de corte ser mais intensa na interface peça/ferramenta do que no interior do corte faz com que próximo à ponta da ferramenta as temperaturas sejam maiores, causando assim um choque térmico maior.

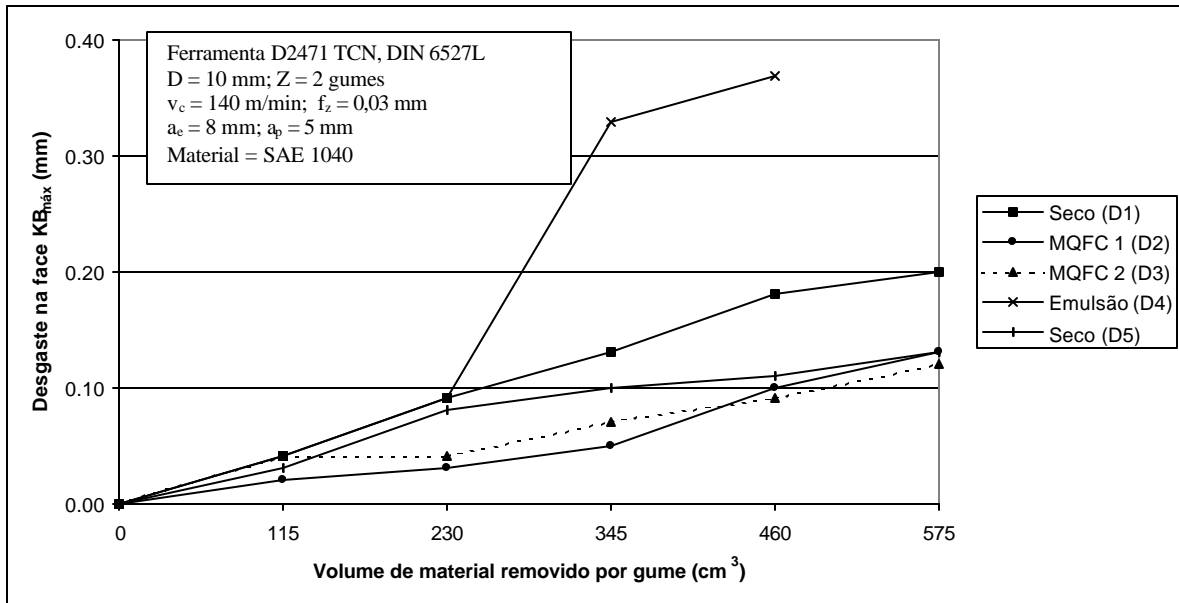


Figura 4. Evolução da marca de desgaste na face ($KB_{máx}$).

O desgaste na face da ferramenta segue a mesma tendência do desgaste no flanco, no qual o ensaio com emulsão apresentou o maior valor para $VB_{máx}$. Avaliando a evolução das curvas D1 e D5, ambas sem fluido de corte, observa-se uma variação no desgaste da face ($KB_{máx}$), isto pode ser atribuído a vários fatores como ferramenta defeituosa e desbalanceamento dos gumes quando posicionado no porta-ferramenta, entre outros.

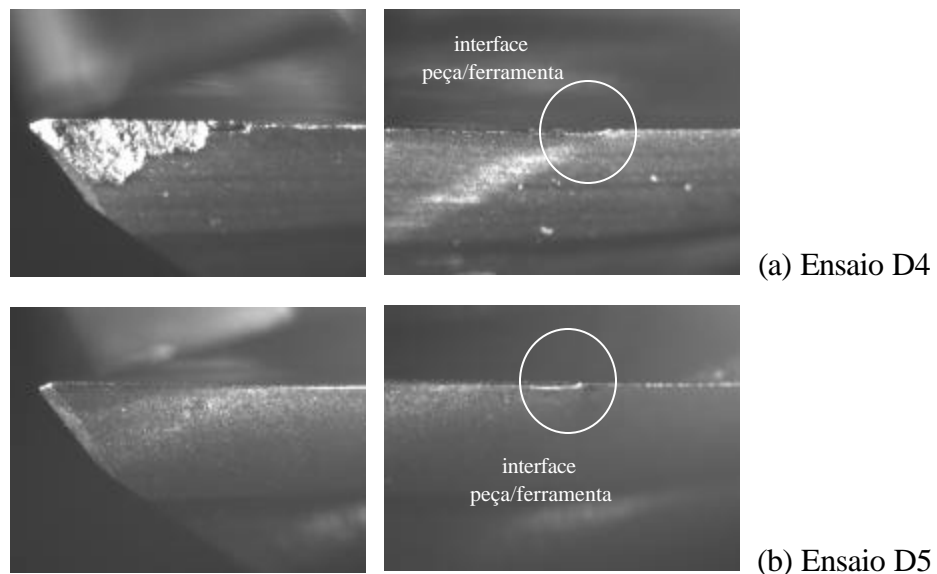


Figura 5. Desgaste no flanco após 460 cm^3 de material removido por gume (ampliação 36X).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através de uma análise do comportamento das forças discutidas na seção 3, observa-se que a utilização de emulsão como fluido de corte é extremamente prejudicial ao desempenho da ferramenta. Sendo assim, no processo de fresamento com fresas de metal duro revestido o uso de emulsão deve ser eliminado. Outro aspecto importante é a leve tendência para uma melhor performance do processo quando utiliza-se MQFC 1 ou MQFC 2 como fluido de

corte. Basicamente isto ocorre devido ao poder lubrificante dos fluidos, a redução da resistência ao cisalhamento do material usinado e a refrigeração da região de corte. Neste contexto o óleo mineral apresenta características superiores ao óleo vegetal, contudo este benefício deve ser cuidadosamente avaliado em relação ao custo/benefício de sua aplicação.

Observando a “Figura 2” conclui-se que a potência de máquina requerida na execução de cada experimento é maior no ensaio com emulsão como fluido de corte (ferramenta D4), pois a potência é diretamente proporcional à força de corte (Stemmer, 1995), para uma mesma velocidade de corte. Isto implica também diretamente no acréscimo dos custos da produção e por sua vez reforça a tese de que neste caso emulsão é prejudicial ao processo de fresamento.

Nas “Figuras 3 e 4” algumas particularidades são perceptíveis. A primeira refere-se ao rápido desgaste tanto na face quanto no flanco da fresa no ensaio com emulsão, o que ocorre principalmente devido ao mecanismo de desgaste fadiga térmica, reforçando assim o argumento para evitar a utilização deste tipo de fluido no processo de fresamento. A segunda característica é referente aos níveis de desgaste da ferramenta nos ensaios com MQFC e a seco. Nestes ensaios, observa-se que tanto na face como no flanco da fresa o valor da marca de desgaste é bastante próximo, contudo na maioria da literatura disponível apenas o desgaste no flanco da ferramenta é apresentado e discutido. Logo, uma maior atenção às formas e mecanismos de desgastes ocorridos na face da fresa deve ser avaliada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar deste trabalho ter características específicas inerentes ao processo, material e ferramenta, é possível estabelecer algumas considerações importantes que contribuem de um modo mais genérico ao tema estudado. Desta maneira, algumas conclusões podem ser apresentadas.

O processo de usinagem a seco é a condição ideal de trabalho do ponto de vista ecológico, contudo neste experimento o comportamento da ferramenta de metal duro no fresamento a seco mostra que a marca de desgaste na face e no flanco da ferramenta cresce de maneira suave em função do volume usinado, o que mostra a possibilidade de fresamento sem fluido como uma alternativa bastante promissora.

A utilização de emulsão como fluido de corte é bastante difundida no meio produtivo, porém pode-se observar neste experimento que a vida da ferramenta é bastante curta devido à alta taxa de refrigeração, que ocasiona severos choques térmicos nos gumes de corte.

O emprego da quantidade mínima de fluido de corte apresentou bons resultados. Nos dois ensaios com minimização de fluido a ferramenta usinou o volume planejado e o comportamento da ferramenta em relação à força e ao desgaste foi bastante próximo, contudo a usinagem utilizando óleo mineral como fluido de corte apresentou uma tendência a melhores resultados.

Outro aspecto importante referente à usinagem sem fluido de corte (usinagem ecológica), ou com a utilização de mínimas quantidades de fluido é o fato de que isto será considerado uma necessidade num futuro próximo pelas indústrias metais-mecânica, devido às leis ambientais e as preocupações com a saúde do operador. As vantagens da usinagem ecológica são várias, como não-poluição da atmosfera (ou água), diminuição da quantidade de rejeitos da produção (principalmente a disposição final do fluido de corte), sem riscos para a saúde do operador com respeito a alergias e doenças de pele. Logo, a usinagem ecológica oferece redução nos custos de produção quando bem aplicada (Sreejith e Ngoi, 2000).

Sendo assim, a proposta da utilização de mínima quantidade de fluido de corte no processo de fresamento de topo com ferramentas de metal-duro mostra-se promissora, especialmente em situações em que o fluido é indispensável, porém estudos nesta área devem ser continuamente realizados para proporcionar novas informações que possam beneficiar as indústrias de usinagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas TITEX PLUS, I. Terstegen da Alemanha, Rubens Moreira/BARDAHL e GERDAU S/A pelo material fornecido, bem como à CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

- Diniz, A. E., Filho, J. C., 1999, Influence of the relative position of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process, *Wear*, vol. 232, pp. 67-75.
- Gu, J., Barber, G., Tung, S., Gu, R., 1999, Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts, *Wear*, vol. 225-229, pp. 273-284.
- Klocke, F., Gerschwiler, K., 1996, *Usinagem a seco - Fundamentos, Limites e Perspectivas*, Aachen, Germany, pp 21.
- Klocke, F., Krieg, T., 1999, Coated tools for metal cutting – Features and applications, *Annals of the CIRP*, vol. 48/2, pp 515-525.
- König, W., Klocke, F., 1997, *Fertigungsverfahren 1, Drehen, Fräsen, Bohren*, Ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 471.
- Schroeter, R. B., Teixeira, C. R., 2000, Proposta de metodologia para medição do desgaste em ferramentas de corte de geometria definida, In: CONEM 2000 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, 7-11/8/2000, 8 p, Anais...
- Schroeter, R. B., Teixeira, C. R., Valle, P. D., 2000, Aspectos tecnológicos do processo de fresamento de topo com utilização de mínima quantidade de fluido de corte, In: CONEM 2000 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, 7-11/8/2000, 9 p, Anais...
- Sreejith, P.S., Ngoi, B. K. A., 2000, Dry machining of the future, *Journal of materials processing technology*, vol. 101, pp. 287-291.
- Stemmer, C.E., 1995, *Ferramentas de corte I*, Ed. da UFSC, Florianópolis, Brasil, pp 249.
- Teixeira, C. R., 1997, Minimização de fluido de corte no processo de usinagem com ferramenta de geometria definida, *Qualificação para Doutorado*, UFSC, Florianópolis, Brasil, pp 42.

TOOL LIFE AND CUTTING FORCES OF COATED END MILLS UNDER SMALL QUANTITY OF CUTTING FLUIDS AND DRY MACHINING

Abstract. *The main goal of this research is to evaluate the performance of hard metal tool, all of them coated with TiCN by PVD (Physical Vapour Deposition), in the process of end milling, using SAE 1040 as workpiece material. Aiming to achieve this goal, several milling experiments were carried out under same cutting conditions to roughing, however varying the cutting fluids. Basically, there were four kinds of experiments, machining without the use of any cutting fluid (dry machining), using emulsion, machining with small quantity of cutting oils not mixed with water (vegetal and mineral). The tool wear and the machining forces were measured at different stages in each tool test, so that it was possible to express the wear on the face and on the flank of each end mill as the function of machined volume, as well to cutting forces. This information is useful for production optimization.*

Keywords: *Milling, Tool life, Dry machining*