



CONTRIBUIÇÃO À USINAGEM DE COMPÓSITOS CARBONO-CARBONO

João Roberto Ferreira

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica
jorofe@iem.efei.br – Itajubá, MG, Brasil

Francisco Romeo Martins

Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço
martins@intervale.com.br – São José dos Campos, SP, Brasil

Nivaldo Lemos Coppini

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Fabricação
ncoppini@unimep.br – Campinas, SP, Brasil

Resumo. *Este trabalho tem como objetivo apresentar o comportamento do desgaste da ferramenta de metal duro classe ISO K10 no torneamento de um compósito carbono-carbono, onde verificar-se-á a influência da utilização de alguns meios refrigerantes tais como: gás argônio, injeção de mínimo volume de óleo e inundação com fluido de corte; no sentido de evitar o processo de oxidação do compósito. Visto que a ocorrência da oxidação do compósito em temperaturas superiores à 370°C durante o processo de usinagem traz resultados contraditórios com relação à vida da ferramenta e aos princípios dos fundamentos da usinagem. Assim, este trabalho faz uma comparação do comportamento da vida da ferramenta para várias velocidades de corte quando submetidas aos meios refrigerantes citados e com usinagem a seco. Durante os ensaios foram observados os desgastes da ferramenta nas diversas condições de refrigeração.*

Palavras-chave: *Usinagem, Compósito carbono-carbono, Vida de ferramentas, Refrigeração.*

1. INTRODUÇÃO

Desde de 1908 quando foi produzida a primeira resina fenólica, muitas outras resinas têm sido desenvolvidas: epóxies, poliésteres, poliamidas e silicones. A primeira aplicação dos compósitos plásticos reforçados foi em aeronaves em 1943, usando fibra de vidro (reforço) e poliéster (matriz) para compor a fuselagem de uma aeronave de treinamento (Bailey, 1990). Os materiais compósitos avançados são geralmente divididos em quatro grupos principais:

- Compósitos de matriz polimérica - CMP
- Compósitos de matriz metálica - CMM
- Compósitos de matriz cerâmica - CMC
- Compósitos carbono-carbono - CRFC

Os compósitos de matriz polimérica são os mais largamente usados, sendo extremamente leves em comparação com outros materiais, e estas propriedades combinadas com alta resistência e alta rigidez fazem dos CMPs materiais versáteis para aplicações estruturais. A

maioria dos CMPs são formados por resinas termofixas, as quais tornam-se rígidas quando submetidas à cura (Peters, 1992).

Os compósitos de matriz metálica (CMMs) consiste de reforços de alto desempenho em uma matriz metálica (alumínio, titânio, magnésio, cobre etc.). Os reforços podem ser na forma de partículas, whiskers ou fibras. As fibras são geralmente grafite, carbetto de silício, carbetto de boro ou óxido de alumínio. Os mais novos tipos de compósitos são os denominados de compósitos de matriz cerâmica. As cerâmicas são de difícil definição, isto é, não são nem metálica e nem orgânica, são materiais sólidos que têm ions positivos e negativos, e tipicamente exibem ligação iônica, embora algumas cerâmicas (SiC) têm ligações covalentes. Matrizes cerâmicas típicas são: carbetto de silício, óxido de alumínio, carbetto de zircônio e nitreto de silício. A principal característica dos compósitos de matriz cerâmica é sua estabilidade térmica entre 1000°C e 2000°C (Strong, 1989).

O compósito carbono-carbono (carbono reforçado com fibras de carbono – CRFC) é uma forma de compósito de matriz cerâmica, mas devido às suas características são colocados em sua própria categoria. Os compósitos CRFC têm a mais alta energia de absorção do que qualquer outro material conhecido. Eles podem ser usados com temperaturas superiores à 2000°C, sendo especialmente utilizados em freios de aeronaves, onde o calor gerado por fricção é extremamente alto, em tubeiras de motor de foguete onde o desgaste por ablação se manifesta bastante acentuado (Savage, 1993).

Embora, atualmente as informações disponíveis sobre estes compósitos visam mais as propriedades de projeto destes materiais, surgem as necessidades de estudos visando seus processos de fabricação no sentido de ampliar sua produção (Bhatnagar et. al., 1995; Ferreira et al., 2000). A usinagem é a operação final de confecção dos compósitos reforçados com fibra de carbono, visando a precisão dimensional/forma e a qualidade superficial dos componentes. Devido aos elevados custos de fabricação agregados destes materiais, e também ao longo período de obtenção em altas temperaturas, a perda ou a não conformidade da peça pode ocasionar sérios prejuízos (Coppini et al., 1995).

Os compósitos reforçados com fibra de carbono apesar de apresentarem características de materiais estruturalmente “moles” no que diz respeito a usinagem, as dificuldades aumentam com relação à sua abrasividade, estrutura heterogênea e anisotrópica, aumento do coeficiente de atrito com a temperatura e esforços de corte flutuantes, criando condições estritamente nocivas à ferramenta de corte. Durante a usinagem, a superfície do compósito fica sujeita à diversos tipos de avarias, tais como: sulcos e trincas na matriz, delaminações e extração das fibras da matriz (*fiber pull-out*), que comprometem o acabamento final da peça. O cavaco em forma de pó é altamente prejudicial ao operador e à máquina-ferramenta. Isto mostra que a usinabilidade destes materiais difere significativamente dos metais. Portanto, algumas pequenas analogias apresentadas devem ser recebidas com cautela (Komanduri, 1997). Assim, neste trabalho será analisado o comportamento do desgaste da ferramenta de metal duro em função da velocidade de corte sob as condições de corte com mínimo volume de óleo (MVO), inundação com fluido de corte, gás argônio e a seco.

2. MATERIAL COMPÓSITO CRFC

O compósito CRFC é constituído de uma pré-forma hexagonal com reforços distribuídos em quatro direções distintas (u, v, w e z) de varetas de CRFC, conforme ilustrado na Fig. 1. O processo de densificação e obtenção do compósito C/C passou por impregnação líquida com resina fenólica e piche, e por infiltração gasosa (CVD) alcançando uma densidade de 1,8 g/cm³.

O material para ensaio foi obtido de um bloco formado por compósito plástico reforçado com fibra de carbono (PRFC) e compósito CRFC, usado para fabricação de tubeiras do foguete VLS (Veículo Lançador de Satélite do IAE/CTA). Após a remoção da estrutura externa do bloco, ou seja, o invólucro metálico e a parte de compósito PRFC, obteve-se um corpo cilíndrico vazado em compósito CRFC. Para permitir a fixação do material no dispositivo foi necessário a usinagem de rebaiços nas suas duas extremidades internas, sendo feita a fixação por compressão visto que, a fragilidade do material não permitiu fixá-lo diretamente na placa do torno.

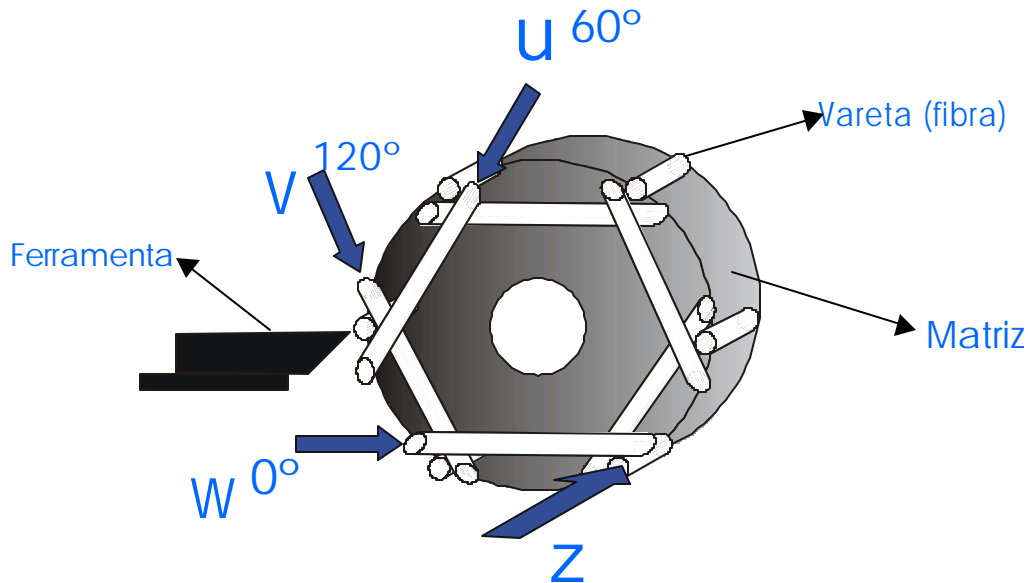


Figura 1 – Representação esquemática da pré-forma hexagonal de CRFC.

3. MÁQUINA, FERRAMENTA, EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS

Os ensaios foram realizados em um torno tipo universal marca Romi modelo S520, potência 7,6 KW e rotação máxima 1200 rpm na Divisão de Mecânica (AME/IAE/CTA). Na operação de torneamento do compósito CRFC utilizou-se a ferramenta de metal duro classe ISO K10 sem cobertura – (H1P/Sandvik); com geometria: Inserto ISO SNGN 120408 e porta-ferramenta para usinagem externa com os seguintes ângulos de posicionamento: $\chi_r=75^\circ$; $\alpha_o=-6^\circ$; $\lambda_s=-6^\circ$.

Para observação dos desgastes e avarias das ferramentas utilizou-se em primeira análise uma lupa (aumento 8x), em seguida os desgastes foram observados em microscópio ótico e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para remoção do pó gerado durante os ensaios, utilizou-se um aspirador industrial de sucção com filtro seco. Para proteção do operador/pesquisador utilizou-se luvas, máscaras, macacão impermeável, etc. Para aquisição de dados dos esforços de corte, utilizou-se um microcomputador com placa de aquisição e software (Sistema 4000 Measurements Group). Em cada aquisição foram coletados dados com espaçamento de 5 segundos durante a extensão de cada usinagem realizada. A Fig. 2 apresenta o esquema do banco utilizado nos ensaios.

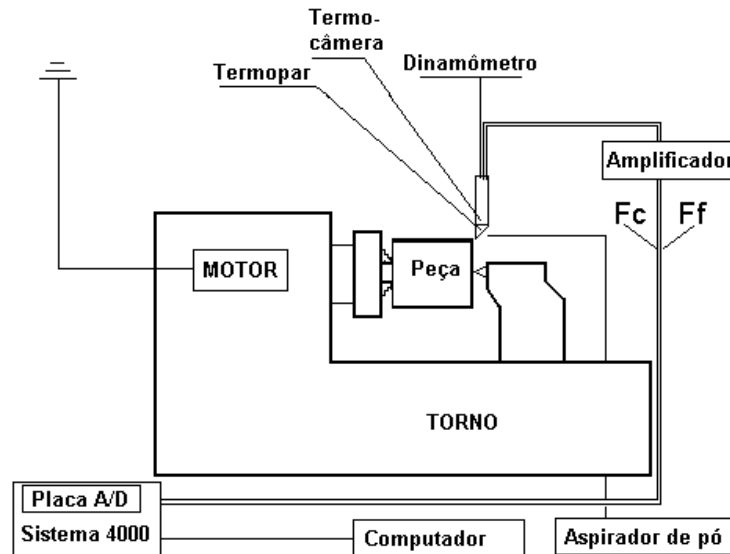


Figura 2 – Ilustração esquemática para aquisição de dados durante a usinagem.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Primeiramente, ensaiou-se o compósito CRFC nas seguintes condições de corte: $V_c = 80; 120; 200; 350$ e 600 m/min ; $f = 0,1 \text{ mm/v}$; $a_p = 1,0 \text{ mm}$; com usinagem à seco. Devido aos resultados contraditórios do comportamento desgaste da ferramenta de metal duro em função da velocidade de corte, decidiu-se pela realização de novos ensaios no sentido de comprovar esta tendência. Com o objetivo de tentar esclarecer a tendência da evolução do desgaste de flanco da ferramenta de metal duro durante os ensaios anteriores, optou-se pela utilização de meios refrigerantes com o intuito de diminuir a temperatura de corte e conseqüentemente amenizar ou eliminar a ocorrência de um provável processo de oxidação do compósito CRFC. Neste sentido utilizou-se os seguintes meios refrigerantes:

- 1) Mínimo volume de óleo – vazão 60 ml/h ;
- 2) Inundação - óleo solúvel;
- 3) Gás Argônio – atmosfera protetora.

Com base nos resultados obtidos nestes ensaios, observou-se que na faixa da velocidade de corte ($V_c \approx 350 \text{ m/min}$), onde ocorreu menor desgaste de flanco da ferramenta de metal duro, poderia estar acontecendo um processo de oxidação, o qual ocorre com o compósito CRFC quando submetido a temperaturas superiores à 370°C (Savage, 1993; Thomas, 1993). Desta forma optou-se pela realização de um ensaio com óleo solúvel abundante em outras duas condições de velocidade de corte: (i) $V_c = 80 \text{ m/min}$ e (ii) $V_c = 600 \text{ m/min}$. Estes ensaios tiveram como objetivo verificar uma possível mudança de comportamento do desgaste e tentar correlacioná-la com a ocorrência ou não do fenômeno de oxidação durante a usinagem. Todos os ensaios foram replicados pelo uma vez e apresentaram boa repetitividade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Forma do cavaco – Tipo de desgaste

Os compósitos CRFC por sua natureza heterogênea e anisotrópica causam problemas na usinagem. Durante o corte, a aresta da ferramenta tende a deformar o material de trabalho e

consequentemente cisalha-o na forma de cavaco. A intensidade de deformação e cisalhamento do material nas proximidades do corte depende do tipo da fibra e da matriz do compósito. Durante a deformação, as fibras comportam-se de maneira diferente, dependendo de sua capacidade de resistir às tensões de dobramento. Estas características, tais como: saliências, delaminação e heterogeneidade na composição física do material, aumentam os problemas de usinabilidade. No corte do compósito CRFC são frequentes as rupturas instantâneas das fibras com quebras do material da matriz. Neste trabalho, durante a usinagem uma grande quantidade de pequenos cavacos foram produzidos, os quais eram pequenos fragmentos formados por uma série de fraturas. Observou-se que as fibras de carbono desprendiam-se do compósito sem muita aderência residual com a matriz. O material usinado resultante da matriz transformou-se em pó e o restante do material formou pequenos cavacos gerados pela ruptura das fibras. O cavaco gerado na usinagem foi abrasivo e altamente condutor elétrico, portanto é de fundamental importância a sua coleta junto à região de corte para que não polua a máquina e o ambiente de trabalho (Ferreira et al., 2000).

Analisando as arestas da ferramenta após o corte, verificou-se que os desgastes de flanco foram provocados por um excessivo processo de fricção das fibras sobre as superfícies principal e secundária de folga da ferramenta, que combinados com esforços pulsantes e temperaturas elevadas, submeteram-á um processo excessivo de fadiga, degradação térmica e abrasão, conforme mostra a Fig. 3. As trincas ilustradas identificam o processo de fadiga (trincas horizontais) e degradação térmica (trincas verticais), as quais a ferramenta foi submetida. A fadiga mecânica da ferramenta pode estar relacionada à heterogeneidade do material, a qual incide pulsações sobre a aresta e a região em contato com a peça. Outro fator que poderia incluir fadiga mecânica no processo de usinagem seria a possibilidade do suporte da ferramenta (dinamômetro) ser excitado a um processo pulsativo até a sua frequência natural, mas avaliando os baixos níveis de esforços observados na usinagem do compósito CRFC e o grau de rigidez acrescentado ao dimensionamento do dinamômetro, a probabilidade desta ocorrência seria muito pequena.

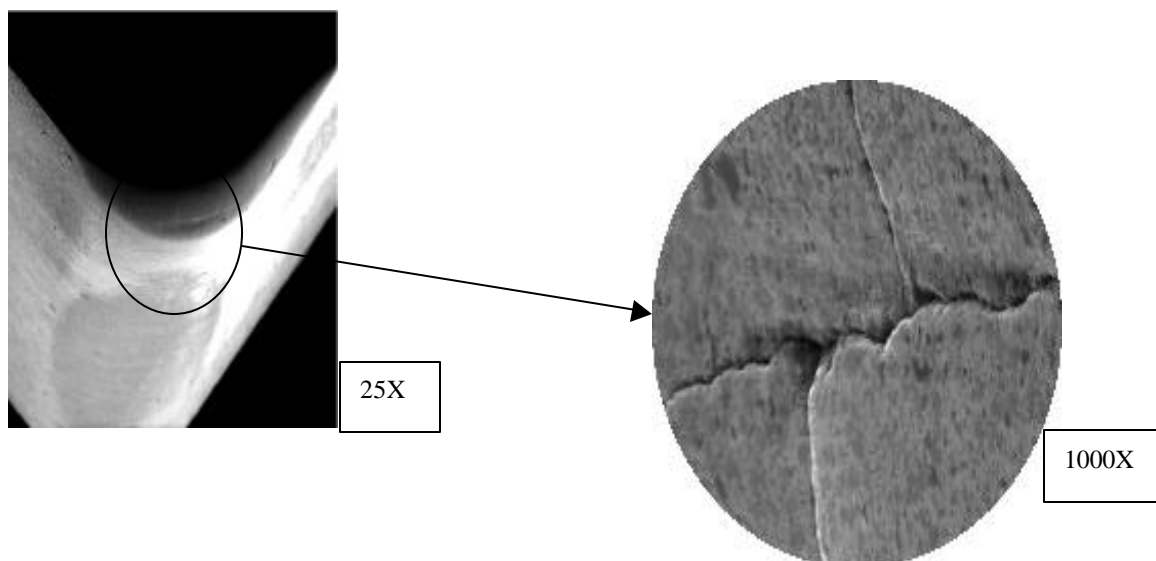


Figura 3 - Aresta apresentando desgaste e trincas por fadiga térmica e mecânica.

5.2 Ensaio para verificação do processo oxidativo do compósito CRFC

Durante o processo de usinagem, o atrito ferramenta/peça desenvolve geração de calor provocando danos à ferramenta e consequentemente influenciando no seu desempenho. Na usinagem do material compósito CRFC, verificou-se que o desgaste da ferramenta foi

influenciado pela elevação da temperatura, provocado pelas características abrasivas do compósito e pela variação da velocidade de corte. Segundo Savage (1993) existe a possibilidade de estar ocorrendo o fenômeno de oxidação durante a usinagem do compósito CRFC ao atingir temperatura acima de 370°C. Então, surgiu a necessidade de constatar durante os ensaios experimentais de usinagem do compósito CRFC, a ocorrência ou não de oxidação com influência direta no comportamento do desgaste da ferramenta.

Nos ensaios adotou-se três alternativas utilizando meios refrigerantes e de proteção, objetivando esclarecer ou evidenciar a existência do processo oxidativo do compósito CRFC durante a usinagem. Optou-se, então, pela realização dos seguintes tipos de ensaios:

- Injeção de mínimo volume;
- Inundação com fluido de corte;
- Injeção de gás argônio (Atmosfera protetora).

A utilização de fluido de corte sobre a aresta de corte foi aplicada procurando manter o sistema ferramenta/peça em regime de baixa temperatura ($< 370^{\circ}\text{C}$), para evitar o processo oxidativo. Durante a usinagem de peças derivadas de materiais compósitos em geral não é usado nenhum tipo de refrigerante, ou seja, estas operações devem sempre ser realizadas a seco. Este procedimento compromete as condições superficiais do material para as atividades posteriores, no entanto, como apenas uma alternativa envolvendo um ensaio experimental, onde há necessidade de manter baixa a temperatura na aresta de corte, tal procedimento tornou-se pertinente. A Fig. 4 apresenta o comportamento do desgaste VBc com a aplicação de meios refrigerantes alternativos e atmosfera protetora para uma primeira avaliação.

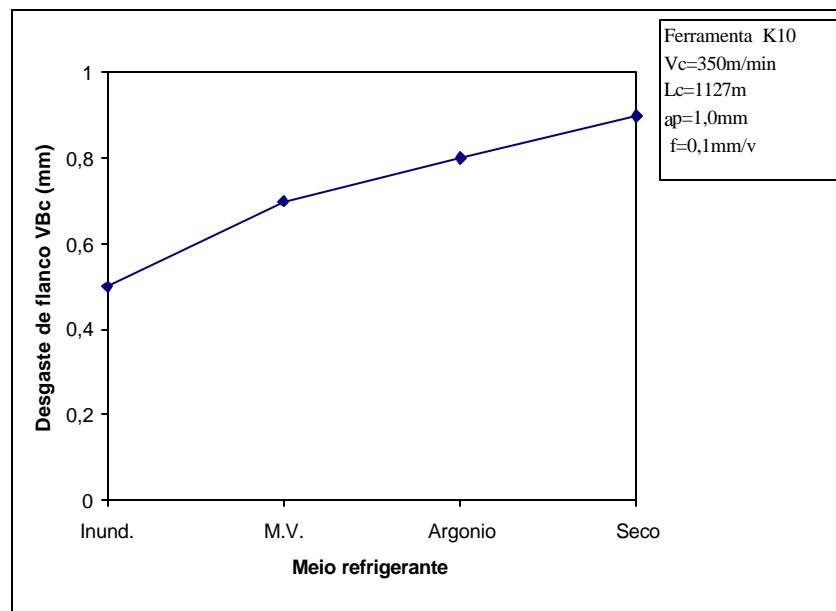


Figura 4 - Comportamento do desgaste de flanco x meios refrigerantes.

Analisando os resultados obtidos nas três atividades distintas mais a usinagem a seco, observou-se o comportamento do desgaste da ferramenta de metal duro classe ISO K10. A influência dos meios refrigerantes aplicados sobre a aresta de corte apresentaram-se indistintamente como efeito refrigerante, porque quando comparados com os ensaios de usinagem a seco ocorreu uma redução na intensidade do desgaste de flanco das arestas ensaiadas, mas o processo que mostrou-se mais eficiente do ponto de vista de reduzir o desgaste foi a inundação por fluido de corte, onde a queda de temperatura foi mais significativa. Vale ressaltar que todos os ensaios foram replicados pelo menos uma vez.

Considerando assim a possibilidade de manter a temperatura na região de corte em valores inferiores à 370°C, através do uso de inundação com óleo solúvel, optou-se pela realização do ensaio variando-se a velocidade de corte em três níveis diferentes ($V_c=88, 350$ e 628 m/min). Estes ensaios tiveram como objetivo apresentar o comportamento do desgaste de flanco após neutralizar os efeitos da oxidação. A Fig. 5 mostra uma comparação dos resultados obtidos do ensaio da usinagem do compósito CRFC com inundação por óleo solúvel e com corte a seco. Para a condição de corte a seco observou-se uma redução do desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade de corte. Este fato pode ser explicado por um possível processo de oxidação do compósito CRFC. Em contra partida, para a condição com fluido de corte, verificou-se que o desgaste da ferramenta de metal duro cresceu à medida que a velocidade de corte aumentou de 88 m/min para 628 m/min. Isto mostra que o desgaste de flanco da ferramenta esteve associado ao aumento da velocidade de corte. Desta forma pode-se constatar que a temperatura na região de corte provavelmente não atingiu níveis próximos a 370°C , e conseqüentemente o desgaste da ferramenta mostrou-se crescente, visto que durante todo o ensaio não ocorreu, em nenhum momento, sinais de redução ou inversão do comportamento do desgaste em relação à velocidade de corte.

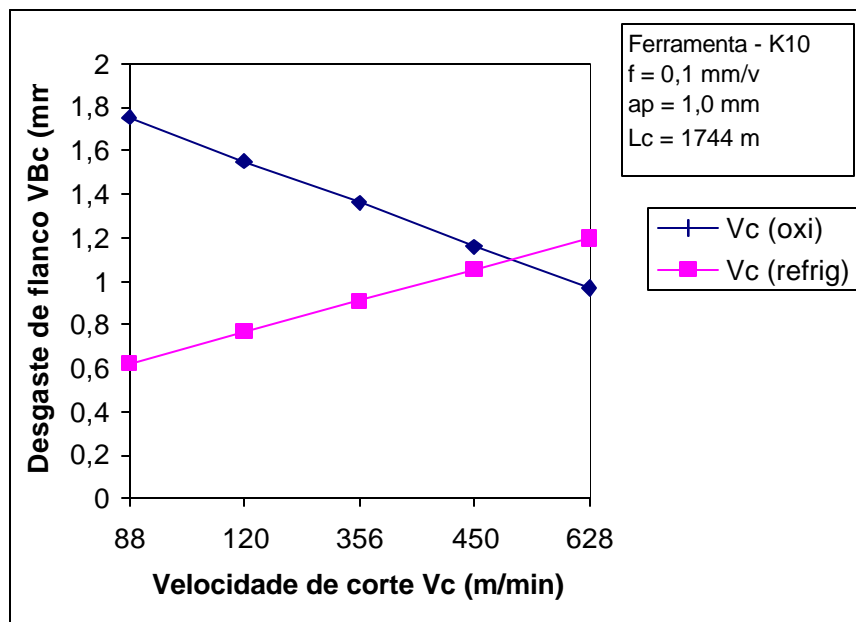


Figura 5 - Comportamento do desgaste em função da velocidade de corte com óleo solúvel; V_c (oxi) – corte a seco; V_c (Refrig) – usinagem com fluido de corte.

6. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- O surgimento de desgastes acompanhados de várias trincas, caracterizam a presença de intenso atrito gerando altas temperaturas de corte, que combinados com esforços pulsantes ocasionam fadiga térmica e mecânica da ferramenta;
- A aplicação de meios refrigerantes durante a usinagem de compósitos, mostrou-se eficiente para inibir o processo oxidativo em ensaios experimentais mas, não aplicável para usinagem de peças em compósitos que serão submetidos a colagens posteriormente;
- Na condição de corte a seco, a vida da ferramenta aumenta com a velocidade de corte contrariando os princípios da usinagem convencional dos metais;

- A usinagem do compósito CRFC com aplicação de meios refrigerantes permitiu concluir que, com o aumento da velocidade de corte com inibição da temperatura de corte, não ocorre o processo de oxidação e o comportamento do desgaste da ferramenta evolui normalmente;
- Durante a usinagem de compósitos CRFC, o cavaco em forma de pó gerado é altamente nocivo ao operador, à máquina ferramenta e ao ambiente de trabalho, portanto, equipamentos de prevenção é pré-requisito para início do processo de usinagem.

Agradecimentos

À Divisão de Mecânica (AME) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) de São José dos Campos – SP pelo fornecimento do compósito CRFC.

REFERÊNCIAS

- Bailey J. E., *Composites materials in aircraft structures*, New York, Longman Scientific & Technical, 1990.
- Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N. K., Komanduri, R., On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates. *International Journal on Machine Tools and Manufacturing*, v.35,n.5,p.701-716, 1995.
- Coppini, N. L., Ferreira J. R., Levy Neto F., Pardini, L. C., Caracterização de compósitos de C/C tendo em vista o seu processo de usinagem. *50º Congresso Anual da ABM*, SãoPedro-SP 1995, p.109-124.
- Ferreira, J. R. Martins, F. R, Coppini, N. L., Parâmetros da usinabilidade do compósito carbono-carbono, *Revista Máquinas e Metais*, nº411, 2000.
- Komanduri, R., Machining of fiber reinforced composites. *Machining Science and Technology*, v.1, n.1, p.113-152, 1997.
- Peters, M., Buhl H., *Advanced aerospace materials*, ed. H. Buhl Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- Savage, G., *Carbon/carbon composites*. London: Chapman & Hall, 1993, 389p.
- Strong, A. B., *Fundamentals of composites manufacturing materials, Methods and Applications*, Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1989.
- Thomas, C. R., *Essentials of carbon/carbon composite*. Cambridge: The Royal SocietyChemistry, 1993, 233p.

CONTRIBUTION THE CARBON-CARBON COMPOSITE MACHINING

Abstract. *This work presents the cemented carbide tool wear behavior in carbon-carbon composite turning, where will be observed the influence of several kinds of cooling: argon gas, minimum oil volume and abundant cutting fluid. The carbon-carbon composite presents a oxidation process in cutting temperature at 370 °C. This fact has influence on the results in relation the tool life when compared to the conventional metals machining. So, this work shows the carbide tool wear behavior for various cutting speeds in differents cooling conditions and dry cutting. During the tests were observed the tool wear for each cooling condition.*

Keywords: *Machining, Carbon-carbon composites, Tool life, Cooling.*