



PARÂMETROS DE USINABILIDADE DE COMPÓSITO CARBONO-CARBONO

João R. Ferreira

EFEI-Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Produção
Av. BPS,1303, Cx. Postal 50, CEP 37500-000, Itajubá, MG, Brasil, e-mail: jorofe@iem.efei.br

Francisco R. Martins

CTA-Centro Técnico Aeroespacial, IAE/AME-Divisão de Mecânica
Pr. Mal. Eduardo Gomes, 50, 12228-904, S. J. Campos-SP, e-mail: martins@intervale.com.br

Nivaldo L. Coppini

UNICAMP-Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Eng^a. de Fabricação
Cx. Postal 6122 – 13083-970, Campinas, SP, Brasil, e-mail: coppini@fem.unicamp.br

Resumo. Primeiramente, este trabalho apresenta uma introdução sobre o material compósito carbono-carbono (C/C) no que tange a sua composição, propriedades e processo de fabricação. Em seguida apresenta os resultados experimentais sobre o torneamento do compósito C/C, onde observou-se o desempenho de diversos materiais de ferramentas, tais como: metais duros, cerâmicas, nitreto de boro cúbico (PCBN) e diamante (PCD). Nos testes foram medidos e analisados os desgastes e avarias das ferramentas, as forças de corte e avanço, e a potência elétrica do motor principal da máquina. Para o metal duro, verificou-se a influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta e nos esforços de corte. Constata-se neste trabalho que o material compósito C/C é de difícil usinabilidade, sendo que somente a ferramenta de diamante (PCD) apresenta um bom desempenho. A usinagem do compósito C/C produz um cavaco em forma de pó nocivo ao operador e à máquina.

Palavras-chave: Usinagem, Compósito carbono-carbono, Ferramentas, Condições de corte

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso de materiais compósitos de carbono reforçado com fibras de carbono, também conhecido por compósito carbono-carbono (C/C), tem crescido de forma substancial, principalmente nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, e também na área biomédica e na indústria automotiva. A relevância do emprego destes materiais em várias áreas da engenharia se deve às suas interessantes características e propriedades. O compósito C/C possui elevada resistência à ablação e ao choque térmico, boa resistência mecânica em elevadas temperaturas ($T > 2000^{\circ}\text{C}$), baixa massa específica, alta condutividade térmica e elétrica, e elevada rigidez e inércia química em atmosfera controlada. Entretanto, os custos associados nas etapas de fabricação são muitos elevados, por exigir longos períodos de tempo em elevadas temperaturas (Savage, 1993).

A literatura tem dado maior ênfase em pesquisar as propriedades de projeto deste compósito, porém, em função das crescentes aplicações torna-se necessário um maior estudo do seu processo de fabricação no sentido de otimizar sua produção. A operação final de confecção do compósito C/C é a usinagem, onde garante-se a precisão dimensional/forma e a qualidade superficial dos componentes. No entanto, a não conformidade da peça leva à sérios prejuízos, devido aos elevados custos de fabricação já agregados ao produto (Komanduri, 1997). O compósito C/C é de difícil usinagem, pois apresenta uma estrutura heterogênea e anisotrópica, de elevada abrasividade, com esforços de corte flutuantes, sendo estritamente nocivos à ferramenta de corte. O acabamento final é prejudicado por diversas avarias na superfície, como sulcos e trincas na matriz e delaminações das fibras. O cavaco gerado em forma de pó é altamente prejudicial ao operador e à máquina-ferramenta (Ferreira et al., 1998).

Portanto, este trabalho tem como objetivo estudar alguns parâmetros de usinabilidade do compósito C/C, quanto à especificação da ferramenta e influências das condições de corte no processo. Em ensaios de torneamento do compósito C/C, observou-se o comportamento de diversos materiais de ferramentas, tais como: metal duro com e sem cobertura, cerâmicas, nitreto de boro cúbico, e diamante policristalino. Durante os ensaios observou-se os tipos de avarias e desgastes das ferramentas, o tipo de cavaco formado e os esforços de corte. Este trabalho mostra que a usinabilidade destes materiais difere significativamente da usinagem dos metais convencionais, sendo que, algumas pequenas analogias apresentadas devem ser recebidas com cautela.

2. O COMPÓSITO CARBONO-CARBONO

Os materiais compósitos C/C são materiais obtidos através da combinação de diferentes tipos de materiais carbonosos. Basicamente o compósito é constituído de uma matriz de carbono vinda de uma resina polimérica ou por deposição gasosa, sendo esta matriz, reforçada com fibras de carbono. O compósito C/C tem como característica combinar as vantagens do compósito plástico reforçados com fibras de carbono (PRFC) com as propriedades refratárias da matriz cerâmica de carbono (Savage, 1993).

O procedimento clássico da fabricação do compósito C/C (Fig. 1) consiste basicamente em duas operações: uma primeira da confecção de um substrato de fibra de carbono convencionalmente chamado de pré-forma; e a segunda onde se faz a densificação, ou seja a impregnação da pré-forma de fibra de carbono, com um material polimérico rico em carbono. Existe uma terceira operação que é a grafitização, usada em aplicações especiais onde se deseja obter propriedades específicas para o compósito. A segunda operação, de densificação é muito trabalhosa, pois consiste em vários ciclos de deposição de carbono no compósito, que leva vários dias da peça em elevadas temperaturas (McAllister, 1987).

Atualmente, o desenvolvimento de técnicas de tecelagem de fibras de carbono aliado ao das técnicas de impregnação, tem proporcionado compósitos C/C de alto desempenho. Os compósitos podem ser uni (1D), bi (2D), ou multidirecionais ($\geq 3D$), adequados à diferentes tipos de aplicações. As pré-formas de fibras de carbono são os responsáveis que dão as características de direcionalidade ao compósito. As propriedades térmicas, mecânicas, e físicas do compósito podem ser controladas e apropriadas em função do projeto do substrato, que envolve a seleção e orientação das fibras, fração volumétrica das fibras, espaçamento entre fibras, e densidade do substrato. A seleção da matriz e o processo de obtenção também tem forte influência nas propriedades do compósito C/C (Levy Neto et al., 1995).

O processo de impregnação/densificação mais comumente utilizado na obtenção de compósito C/C, é geralmente conduzido sob pressão próxima da atmosférica ou baixa pressão, e envolve mais de 10 ciclos em muitos casos. A pré-forma de fibras de carbono é impregnada

sob vácuo, e em alguns casos é aplicada pressão para garantir a penetração do material impregnante na estrutura. Após a impregnação, o compósito é carbonizado em atmosfera de nitrogênio em temperaturas de 650-1100°C. Dependendo das especificações de projeto, o material é então tratado termicamente acima de 2600°C (grafitização), em atmosfera de argônio. Este ciclo de densificação é repetido várias vezes até que a densidade do compósito atinja o valor máximo limitado pelo processo (McAllister, 1987).

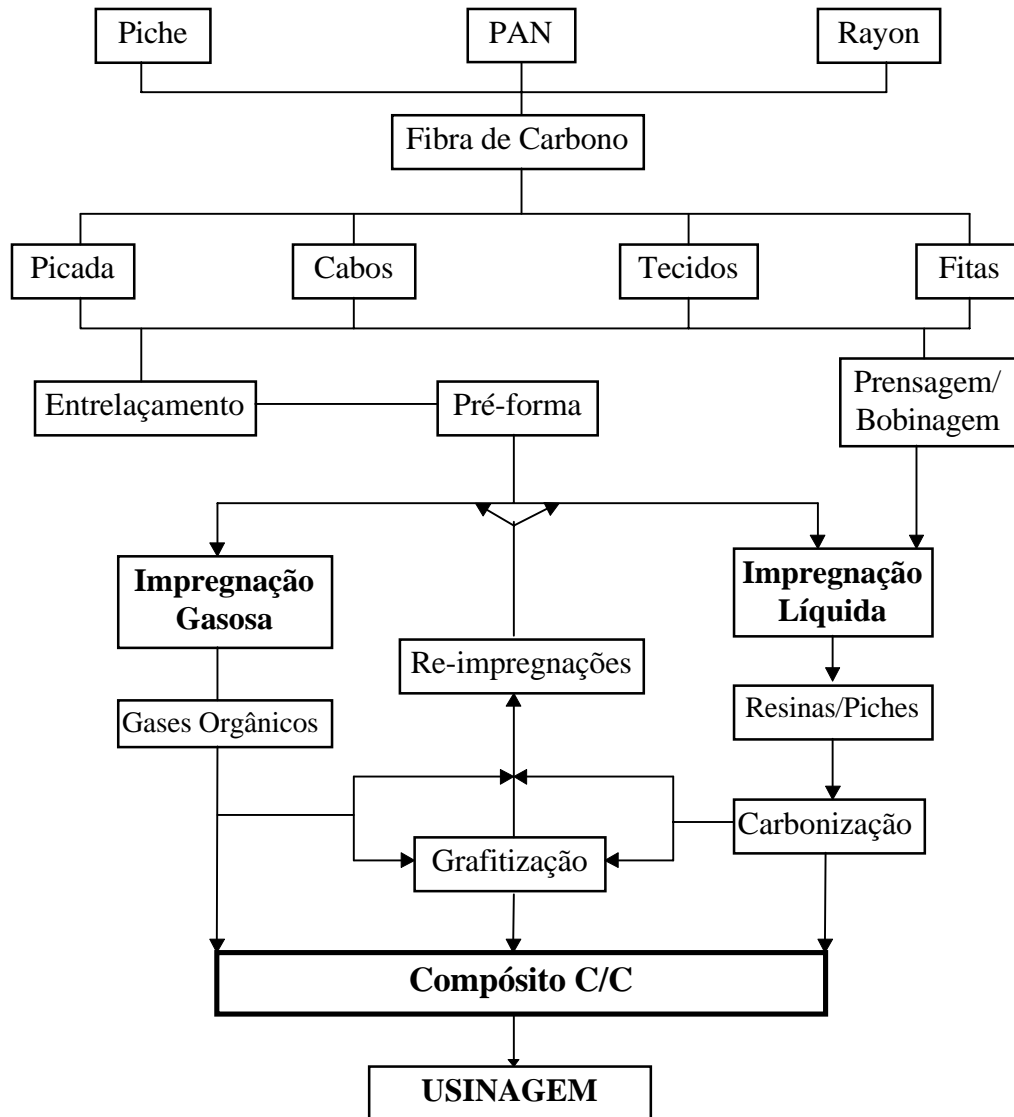


Figura 1- Esquema das diferentes rotas de processamentos para obtenção de compósito C/C.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Corpo de Prova

O material compósito C/C utilizado nos ensaios de torneamento deste trabalho foi uma garganta de tubeira do veículo lançador de satélite brasileiro (VLS/CTA). Pela tubeira passam os gases quentes provenientes da queima do propelente sólido do foguete. Este compósito é constituído de uma pré-forma hexagonal com reforços em quatro direções (u, v, w, e z) de varetas de C/C, conforme ilustra a Fig. 2. O processo de densificação do compósito C/C

passou pelos processos de impregnação líquida com resina fenólica e piche, e por infiltração gasosa (CVD), alcançando uma densidade de $1,8 \text{ g/cm}^3$. A Fig. 3 mostra as dimensões do corpo de prova do compósito C/C.

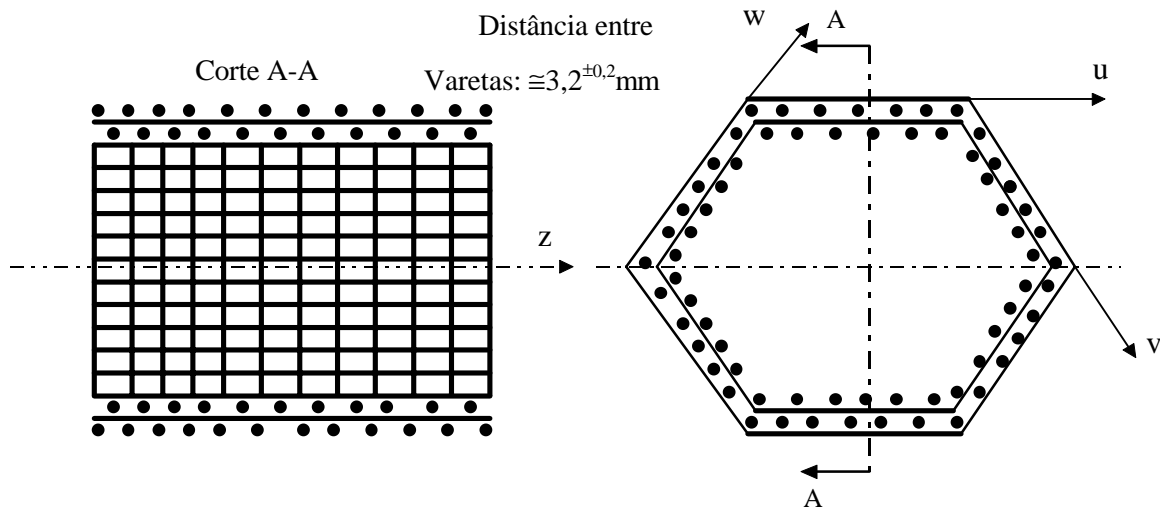


Figura 2- Representação esquemática da pré-forma hexagonal do compósito C/C.

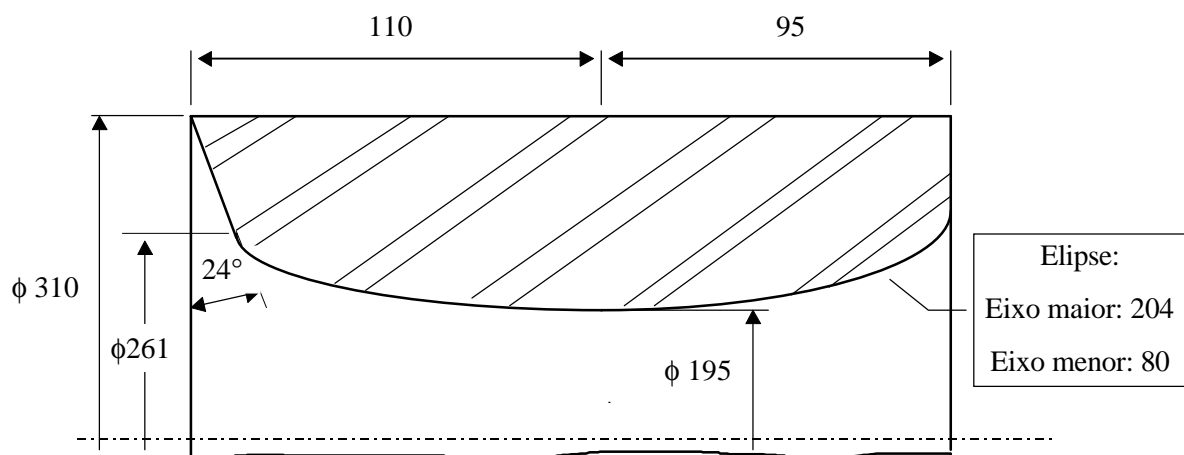


Figura 3- Dimensões do corpo de prova de compósito C/C.

3.2 Máquinas, Ferramentas, Equipamentos, e Instrumentos

Os ensaios foram realizados em um torno CNC, marca ROMI, modelo Cosmos 30, de 22 KW de potência, e 3000 rpm de rotação máxima. Para as medidas das forças de corte e avanço utilizou-se um dinamômetro com extensômetros elétricos, com cabeça intercambiável, de dois canais. Para medição da corrente elétrica utilizou-se um sensor de efeito Hall na entrada do motor principal da máquina. Um redutor de tensão transformou a tensão de alimentação da máquina na relação de 1:100. Os dados foram aquisitados por um sistema de aquisição de sinais conforme esquema da Fig. 4.

As ferramentas utilizadas estão descritas a seguir:

- Metal duro classe ISO K10 sem cobertura - (H1P/Sandvik);
- Metal duro classe ISO K15 com cobertura de TiC e Al_2O_3 - (GC3015/Sandvik);
- Metal duro classe ISO P15 com cobertura de Ti(C,N), Al_2O_3 , e TiN - (GC 415/Sandvik);
- Cerâmica mista (Al_2O_3 +TiC) - (CC650/Sandvik);
- Cerâmica reforçada com whiskers de carbeto de silício (Al_2O_3 + SiC_w) - (CC670-Sandvik)

- Nitreto de boro cúbico (PCBN) - (Borazon 8100/General Electric);
- Diamante policristalino (PCD) - (Compax 1600/General Electric).
As ferramentas ensaiadas apresentam as seguintes geometrias:
- Inserto ISO SNGN 120408 (metal duro, PCBN, PCD)
- Inserto ISO SNGN 120408 T01020 (cerâmica mista, cerâmica reforçada com whiskers)
- Porta-ferramenta: BT25 CSRNR 254012-IC ($\chi_r=75^\circ$, $\gamma_0=-6^\circ$, $\lambda_s=-4^\circ$) - (BTS/Sandvik)

3.3 Condições de Corte

Na primeira etapa foram realizados ensaios com sete diferentes materiais de ferramentas: metal duro K10 sem cobertura, K15 e P15 com cobertura, cerâmica mista, cerâmica reforçada com whiskers de SiC, PCBN, e PCD. As condições de corte foram: velocidade de corte $V_c=310$ m/min, avanço $f=0,12$ mm/v, e profundidade de usinagem $a_p=1$ mm. Durante os ensaios observou-se os desgastes das ferramentas, as forças de corte (F_c) e avanço (F_f), a potência elétrica consumida pela máquina e o tipo de cavaco formado. Os valores obtidos da potência elétrica foram utilizados para comprovar a medida dos baixos valores da força de corte.

Na segunda etapa de testes verificou-se a influência da velocidade de corte no desgaste das ferramentas de metal duro K10. As velocidades de corte ensaiadas foram: $V_c=150, 200, 250, 310, 500, 650,$ e 800 m/min, para $f=0,12$ mm/v e $a_p=1$ mm constantes.

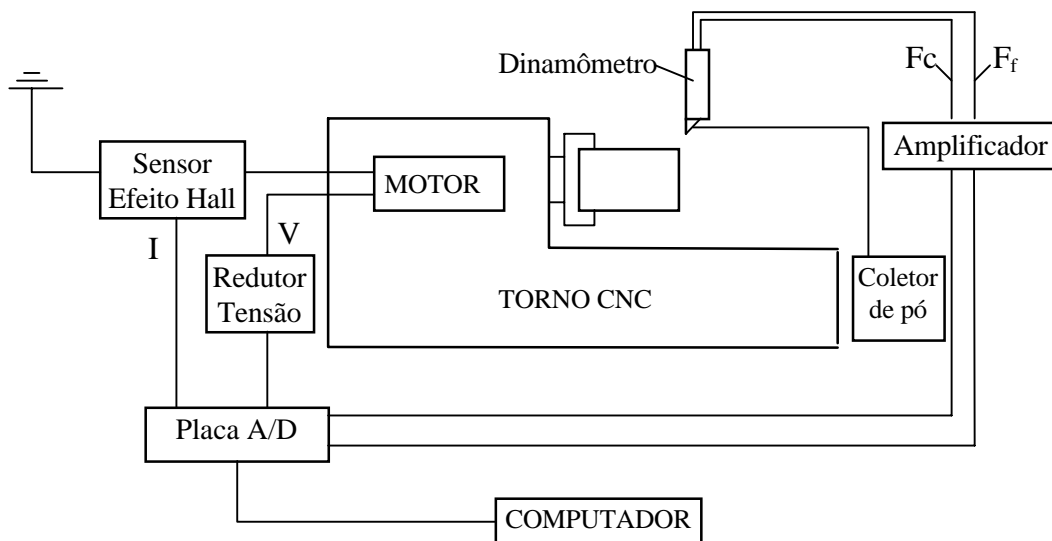


Figura 4- Esquema do sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Comportamento das Ferramentas

A Figura 5 mostra o comportamento dos diferentes materiais de ferramentas ensaiados no torneamento do compósito C/C. A cerâmica reforçada com whiskers de SiC apresentou o maior desgaste de flanco VB_c , medido na superfície secundária de folga conforme a norma ISO 3685 (1993), entre todas as ferramentas testadas. Este fato ocorreu provavelmente devido à uma afinidade do carbeto de silício da ferramenta com o material da peça, também por degradação termo-mecânica da cerâmica, e em função da elevada abrasividade do compósito C/C (Masuda et al., 1993). Os metais duros recobertos apresentaram desempenho similares, e

melhores resultados em relação ao metal duro sem cobertura. A camada de recobrimento neste caso trouxe uma melhora nos resultados, protegendo o substrato do metal duro contra a ação abrasiva do material compósito. O nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) apresentou desempenho similar ao da cerâmica mista. Explica-se este fato devido o PCBN utilizado apresentar uma fase cerâmica (TiC), e conseqüentemente um comportamento análogo à cerâmica mista (Al_2O_3+TiC). De outro modo, o diamante policristalino (PCD) mostrou ser a melhor ferramenta para usinar o compósito C/C, apresentando o menor desgaste entre todas ferramentas testadas (Ferreira et al., 1998).

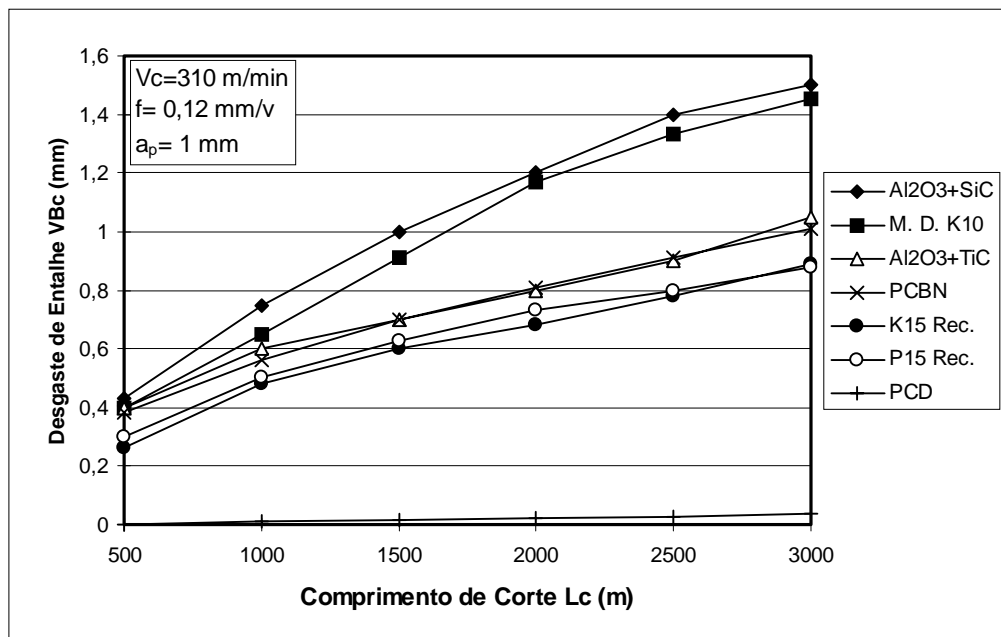


Figura 5- Desgaste das ferramentas em função do comprimento de corte.

4.2 Influência da Velocidade de Corte

A Figura 6 mostra a influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta de metal duro K10 sem cobertura. Observa-se que acontece um fenômeno completamente inverso ao que ocorre na usinagem convencional dos metais. Neste caso o desgaste da ferramenta VBc decresce com o aumento da velocidade de corte de $V_c = 150$ m/min para $V_c = 500$ m/min, e volta crescer no intervalo de $V_c = 500$ m/min a $V_c = 800$ m/min. Explica-se este fato, pois como visto anteriormente, o compósito C/C apresenta a propriedade de oxidar-se em atmosfera não controlada em temperaturas acima de $370^\circ C$ (Savage, 1993). Como no processo de usinagem do compósito as temperaturas de corte podem ultrapassar este valor (Santhanakrishnan et al., 1993), pode-se esperar que ocorreu durante o corte um processo de oxidação do material da peça. Pois, se quantificarmos a quantidade de calor gerado ($Q = F_c \times V_c$), em função da energia consumida nas condições de corte utilizadas nos ensaios, verifica-se que a temperatura na ponta da ferramenta pode superar a temperatura de oxidação do compósito C/C. Sendo que, o fluxo de calor gerado na usinagem não é distribuído de maneira uniforme na seção do cavaco e assim, onde há maior concentração deste são criados pontos quentes no contato ferramenta-peça.

A medida que a velocidade de corte cresce tem-se maior temperatura de corte e um processo de oxidação mais intenso, que provoca uma diminuição da resistência da peça ao corte (Savage, 1993), facilitando a usinagem e provocando menor desgaste à ferramenta. No entanto, em velocidades de corte altas ($V_c > 500$ m/min) têm-se provavelmente uma alteração

deste fenômeno, pois o aumento do volume de oxidação na região de corte pode não acompanhar na mesma proporção, a taxa de crescimento da velocidade de corte. Assim, acima da velocidade de corte de 500 m/min, tem-se uma alteração do comportamento do desgaste da ferramenta, vide Fig. 6.

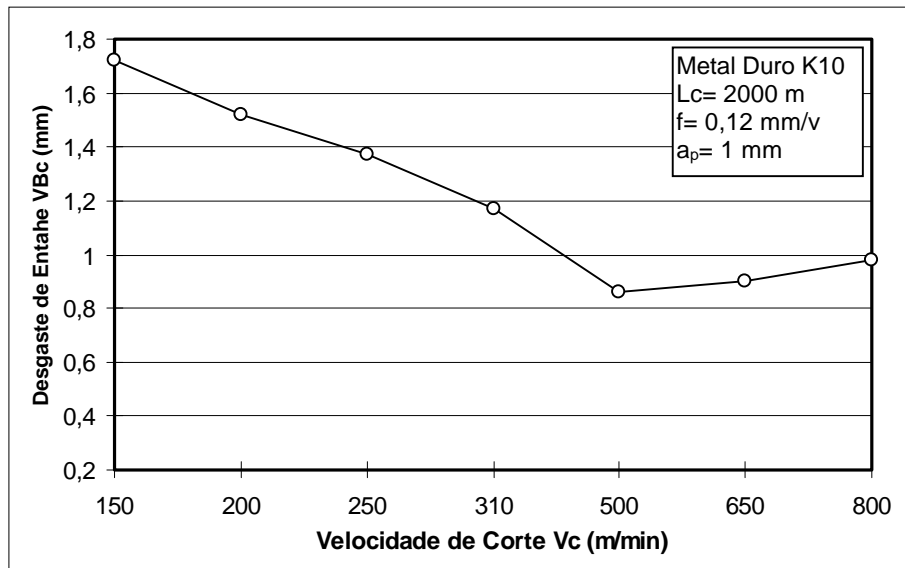


Figura 6- Desgaste da ferramenta de metal duro em função da velocidade de corte.

4.3 Avarias e Desgastes

A Figura 7 mostra os tipos de desgastes sofrido pela ferramenta de metal duro no torneamento do compósito C/C, onde observa-se que ocorre um pequeno desgaste de cratera na superfície de saída próximo à aresta principal de corte, com dimensões bem reduzidas comparado ao intenso desgaste na superfície secundária de folga. A elevada heterogeneidade deste material, com a presença de várias varetas de C/C nas direções \underline{u} , \underline{v} , e \underline{w} da pré-forma (Fig. 2), geram vários sulcos na ferramenta, na direção perpendicular à aresta secundária de corte, zona de intenso atrito ferramenta/peça, caracterizando a ocorrência dos mecanismos de desgastes por aderência/arrastamento e abrasão mecânica. Sendo que, o espaçamento entre estes sulcos aumentam com a taxa de avanço da ferramenta. Durante a usinagem, a ferramenta fica sujeita à esforços cíclicos e variações bruscas de temperaturas. Pois, quando se trabalha em altas velocidades de corte ($V_c > 500$ m/min), a degradação termo-mecânica se torna mais intensa, com formação de várias trincas de maneira mais efetiva na superfície principal de folga, em direções paralelas e perpendiculares à aresta de corte, conforme mostradas na Fig. 8.

4.4 Esforços de Corte

Para todos os ensaios de torneamento com o compósito C/C as forças de usinagem foram relativamente baixas ($F_c < 50$ N). A Fig. 9 mostra a evolução das forças de corte e avanço com o comprimento de corte usinado pela ferramenta de metal duro K10. A força de corte apresenta uma tendência de crescimento e depois cai para valores de $L_c > 1300$ m. Este fato pode ser explicado pelo aumento do desgaste de cratera. De outro modo, justifica-se os valores tão baixos das forças pelo fato do compósito C/C apresentar baixa resistência ao cisalhamento e ser extremamente frágil (deformação à ruptura $\epsilon \cong 0,5\%$), sofrendo inúmeras rupturas durante o processo de corte. O cavaco formado durante o processo de usinagem praticamente não sofre deformação plástica, apresentado-se efetivamente na forma de um

“pó”, ou seja o material compósito C/C não oferece grande resistência ao corte, confirmando os resultados obtidos por Masuda et al. (1993). Assim, os valores absolutos das forças de usinagem não chegam a ser um parâmetro de restrição para o torneamento do compósito C/C.

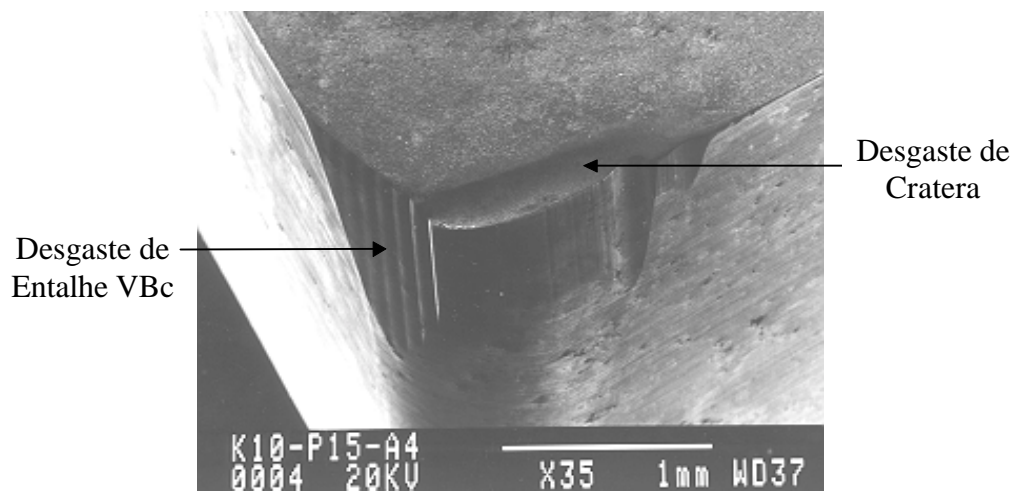


Figura 7- Desgaste da ferramenta de metal duro K10 sem cobertura. VBc= 1,3 mm KT=80 μ m, Lc= 2250 m, Vc= 310 m/min, f=0,12 mm/v, ap= 1 mm.

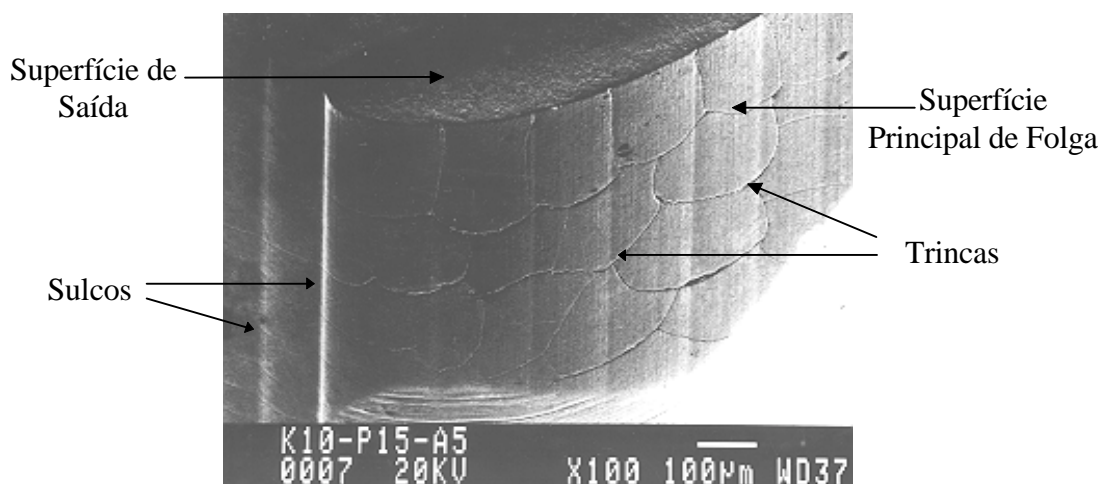


Figura 8- Avarias do M. duro K10. Vc=650 m/min, VBc=1,3 mm, Lc= 3000 m, f=0,12mm/v.

4.5 Tipo de Cavaco

O tipo de cavaco formado na usinagem de compósito C/C é um cavaco de ruptura com pouquíssima deformação. Observou-se que as fibras de carbono e a matriz sofrem fraturas frágeis durante o processo de usinagem (Fig. 10). Devido as tensões sofridas no corte, as fibras soltam da matriz de carbono em decorrência do deslizamento de suas lamelas gráficas. Assim, durante a usinagem forma-se uma nuvem de poeira preta formada pela matriz de carbono fraturada, combinada com fibras de carbono e varetas de C/C arrancadas da pré-forma. Este cavaco gerado na usinagem é abrasivo e altamente condutor elétrico, podendo provocar um curto-circuito nos componentes elétricos e avarias nas partes mecânicas. Portanto, uma instalação adequada para remoção do cavaco, e o uso de dispositivos de segurança são estritamente importantes para proteção do operador e conservação da máquina-ferramenta. A Fig. 10 mostra uma amostra do cavaco formado no torneamento do compósito C/C.

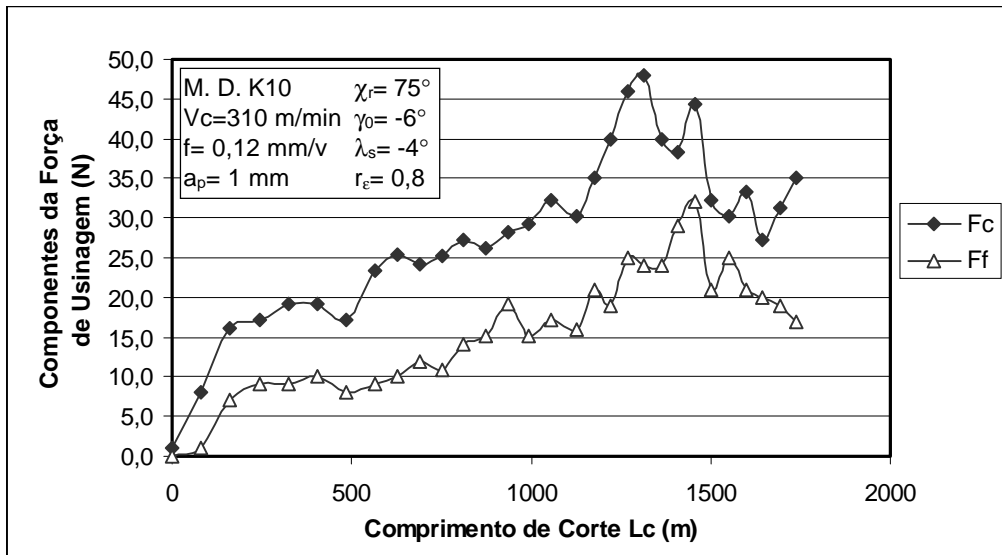


Figura 9- Forças de usinagem em função do comprimento de corte.

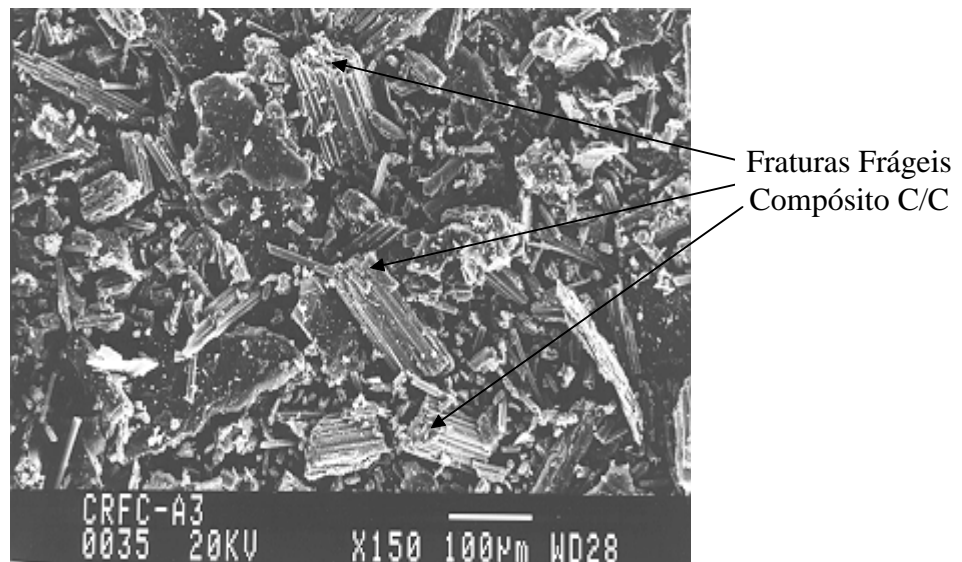


Figura 10- Amostra do cavaco formado no torneamento de compósito C/C. $V_c = 310$ m/min, $f = 0,12$ mm/v, $a_p = 1$ mm.

5.0 CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos sobre o torneamento do compósito C/C, pode-se concluir que:

- O diamante policristalino (PCD) mostrou ser a melhor ferramenta para usinar os compósito C/C, enquanto que as ferramentas cerâmicas e de PCBN não tiveram desempenhos satisfatórios;
- Os baixos valores obtidos para as forças de corte e avanço mostram que estes parâmetros não são fatores restritivos ao processo de usinagem do compósito C/C, apesar de sofrerem influência do desgaste da ferramenta;
- A queda do desgaste da ferramenta de metal duro com a velocidade de corte comportou-se de maneira atípica em relação à usinagem dos metais;

- Em função do tipo de aplicação do compósito C/C e das condições de corte, deve-se fazer um controle da atmosfera na região de corte no sentido de evitar a oxidação;
- A elevada abrasividade do compósito C/C e a disposição das varetas na pré-forma geram um desgaste em forma de sulcos na superfície secundária de folga da ferramenta;
- O cavaco gerado durante o corte é um pó abrasivo prejudicial à saúde das pessoas, portanto, as condições de segurança do operador, da máquina-ferramenta, e do ambiente de trabalho, são pontos cruciais para a viabilidade da usinagem dos compósitos RFC.

Agradecimentos

À Divisão de Mecânica (AME) do Instituto de Aeronáutica (IAE) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) de São José dos Campos-SP pelo fornecimento do Compósito C/C.

REFERÊNCIAS

- Ferreira, J. R. Coppini, N. L., Levy Neto, F., 1998, Performance of cutting tools in carbon-carbon composites machining. ICCE/5-Fifth International Conference on Composites Engineering, Las Vegas/USA, p.285-286.
- ISO 3685, 1993, Tool life testing with single-point turning tools. Switzerland, 49p.
- Komanduri, Ranga, 1997, Machining of fiber reinforced composites. *Machining Science and Technology*, v.1, n.1, p.113-152.
- Levy Neto, F., Pardini, L. C., Silva, J. L. G., 1995, Development of a tridirectional carbon fibre reinforced carbon composite for aerospace. *Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, v.XVII, n°2, p.171-180.
- Masuda, M., Kuroshima, Y., Chujo, Y., 1993, Failure of tungsten carbide-cobalt alloy tools in machining of carbon materials. *Wear*, v.169, p.135-140.
- McAllister, L. E., 1987, Multidirectionally reinforced carbon/graphite matrix composites, *Composites, Engineered Materials Handbook*, Ohio: ASM International, v.1, p.915-919.
- Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S. K., 1993, Mechanics of tool wear during machining of advanced fibrous composites. *Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials*, Gaithersburg, USA, p.489-500.
- Savage, Gary, 1993, *Carbon/carbon composites*. London: Chapman & Hall, 389p.

MACHINABILITY PARAMETERS OF CARBON-CARBON COMPOSITE

Abstract. Firstly, this work presents as introduction, some properties of Carbon Fiber Reinforced Composites (CFRC) related with its composition and fabrication process. After, this work presents experimental results, where turning tests were carried out to study the performance of different tool materials like ceramics, cemented carbide, cubic boron nitride (PCBN), and diamond (PCD) were observed. During the tests the tool wear was measured, and the machining forces, as well as the engine main motor electric power were monitored. For the cemented carbide various trials in different cutting speeds were carried out, where the influence of the cutting conditions on tool wear and machining forces was investigated. This work concluded that CFRC composite has difficult machinability and only diamond tools showed a good performance. The CFRC composite machining produce a noxious powder chip for operator and machine-tool.

Key-words: Machining, Carbon-carbon composite, Tools, Cutting Conditions.