



## ANÁLISE DA TEMPERATURA DE CORTE NO TORNEAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS CARBONO-CARBONO

### João Roberto Ferreira

Instituto de Engenharia Mecânica da EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Caixa Postal 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG, e-mail: jorofe@iem.efei.br

### João Sílvio S. Olim

Instituto de Engenharia Mecânica da EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Caixa Postal 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG, e-mail: jsilvio@efei.br

### Paulo Fernandes Silva

Instituto de Engenharia Mecânica da EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Caixa Postal 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG, e-mail: psilva@iem.efei.br

### Luiz Carlos M. Silva Jr.

Instituto de Engenharia Mecânica da EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Caixa Postal 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG, e-mail: luizcarlos@mg.sense.com.br

**Resumo:** Na última década, o uso de materiais compósitos de carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC), também conhecido como compósito carbono-carbono, teve um aumento substancial. A literatura tem dado ênfase ao estudo das propriedades desses materiais, sendo necessários maiores estudos dos processos de fabricação, entre os quais o processo de usinagem é o mais importante, pois é o processo final e envolve produtos com elevado valor agregado. Este trabalho tem o objetivo de mostrar que a usinabilidade deste material difere significativamente da usinagem convencional dos metais, principalmente quando analisada a influência da velocidade de corte na vida das ferramentas. Para tanto, um procedimento teórico-experimental foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a temperatura de corte no torneamento de compósitos CRFC, visando observar uma possível influência da oxidação da peça durante o corte. Este fenômeno ocorre no compósito CRFC em temperaturas superiores a 370°C. Para a obtenção da temperatura de corte foram utilizados um sistema de medição de temperatura e um programa computacional para a simulação através do método de diferenças finitas. Os resultados confirmam o comportamento diferenciado do compósito CRFC em relação à usinagem dos metais. No entanto, os valores de temperatura de corte obtidos mostram que não ocorre o processo de oxidação da peça, atribuindo-se então tal comportamento ao mecanismo de desgaste da ferramenta atuante no processo.

**Palavras-chave:** Compósito carbono-carbono, Usinagem, Temperatura de corte.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de materiais compósitos de carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC), também conhecido como compósito carbono-carbono, tem aumentado significativamente nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, nuclear e automotiva e também na área biomédica. A relevância no emprego desses materiais em diversas áreas da engenharia se deve às suas interessantes características e propriedades tais como elevada resistência à ablação e ao choque térmico, boa

resistência mecânica a altas temperaturas ( $T > 2000^{\circ}\text{C}$ ), baixa massa específica, elevada condutividade térmica e elétrica e inércia química em atmosferas controladas.

Deste modo, este material tem sido profundamente estudado no que diz respeito às suas características e propriedades físicas, químicas e mecânicas. No entanto, estudos referentes aos processos de fabricação pelos quais o material é transformado em produto final são de grande importância para viabilizar a sua aplicação. Dentre os processos de fabricação, o mais importante é o processo de usinagem, uma vez que é o último processo pelo qual a peça é submetida e, portanto, processa peças com elevado valor agregado.

A usinagem desses materiais é bastante complicada, devido à heterogeneidade e anisotropia estrutural do material, que provoca severa abrasão e variação das forças de corte. O processo de formação de cavaco é extremamente atípico, sendo observadas rupturas instantâneas das fibras e a fragmentação do material da matriz em uma grande quantidade de pequenos fragmentos (pó), originados de uma série de fraturas durante a usinagem. Além disso, observou-se também o desprendimento das fibras axiais sem apresentar grande aderência residual, sendo desta forma o cavaco formado basicamente por três diferentes aspectos estruturais. A primeira estrutura observada consiste de pedaços de fibras, proveniente das fibras axiais desprendidas. A segunda estrutura consiste de pequenos fragmentos provenientes da quebra das fibras orientadas em direções diferentes da direção axial. A terceira estrutura observada consiste do pó proveniente da fragmentação da matriz de carbono. Este comportamento já foi verificado em outros trabalhos com o material compósito CRFC (Komanduri, 1997 e Ferreira, 2001 (a)).

Contudo, um dos aspectos mais interessantes da usinagem de compósitos CRFC foi detectado por Ferreira (1999) e refere-se ao comportamento do desgaste de flanco da ferramenta com a variação da velocidade de corte. Contrariamente ao comportamento apresentado na usinagem dos metais, observa-se que o valor do desgaste diminui com o aumento da velocidade de corte até um determinado patamar, a partir do qual se tem uma leve inversão deste comportamento. Inicialmente, tal comportamento foi atribuído à influência do processo de oxidação, que segundo Savage (1993) ocorre no material compósito CRFC em temperaturas superiores a  $370^{\circ}\text{C}$  e segundo Thomas (1993) provoca diminuição da resistência ao corte.

Este trabalho foi realizado então com o intuito de investigar a temperatura de corte e elucidar os fenômenos que ocorrem no processo. Portanto, a distribuição de temperatura na ferramenta foi determinada considerando-se para isso todos os fenômenos referentes ao processo de usinagem, bem como os princípios de transferência de calor, e com o objetivo final de otimizar os parâmetros de corte em função da temperatura na interface peça-cavaco-ferramenta.

## 2. METODOLOGIA

Sendo a análise da temperatura de corte na ponta da ferramenta muito importante para o melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo de usinagem de compósitos CRFC, a medição da temperatura de corte deve ser realizada da forma mais precisa e confiável. Como não é possível a colocação de um equipamento de medição junto à ponta da ferramenta, foram realizadas medidas de temperatura em quatro pontos da superfície de saída da ferramenta, conforme mostrado na Fig. (1).

As temperaturas indicadas nos termopares T2, T3 e T4 são usadas para estabelecer a condição de temperatura conhecida no contorno,  $T_c$ , a qual é dada pela média destas temperaturas. A temperatura indicada no termopar T1 é usada como critério de parada no programa computacional, permitindo-se assim calcular a parcela de calor gerado que vai para a ferramenta de corte.

O programa computacional foi desenvolvido com base na equação da energia em regime permanente e com geração de calor. Para a solução do problema foram estabelecidas as seguintes condições de contorno: temperatura conhecida (encosto do inserto), condição de convecção (arestas principal e secundária de corte) e condição de fluxo de calor especificado (região de corte). O sistema de equações algébricas foi obtido utilizando-se o método de diferenças finitas (relaxação) e através de um balanço de energia nos pontos nodais da malha computacional. Para a solução deste

sistema, utilizou-se o método de eliminação de Gauss, obtendo-se assim a distribuição de temperaturas na superfície de saída da ferramenta de corte e, principalmente, a temperatura de corte na ponta da ferramenta,  $T_p$ .

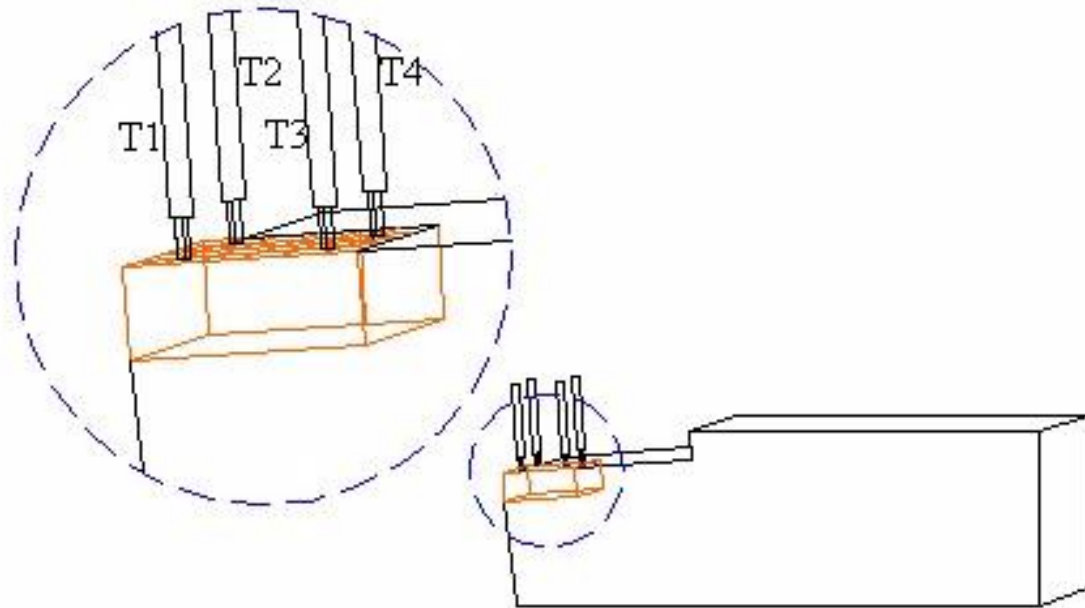


Figura 1. Posicionamento dos termopares e divisão esquemática da ferramenta.

Para a execução dos ensaios de torneamento, foi desenvolvido um dispositivo porta-ferramentas que tem por finalidade assegurar o cumprimento das condições especificadas para o processo e dar suporte aos termopares que fornecem a temperatura de quatro pontos na superfície de saída da ferramenta. O dispositivo porta-ferramentas construído pode ser visto na Fig. (2), onde é possível notar também que o dispositivo posiciona cinco termopares na superfície inferior do inserto com o intuito de futuramente se promover uma análise tridimensional do problema.



Figura 2. Foto do dispositivo porta ferramentas projetado para medir a temperatura.

O dispositivo foi construído de forma que os ângulos principais da ferramenta são: ângulo de posição das arestas principal e secundária de corte ( $\chi_r = 75^\circ$  e  $\chi_r' = 15^\circ$ ), ângulo de cunha ( $\beta = 90^\circ$ ), ângulo de saída medido no corte ortogonal ( $\gamma = -4^\circ$ ), ângulo de inclinação ( $\lambda_s = -4^\circ$ ) e ângulo de

saída medido no plano ortogonal ( $\gamma_0 = -6^\circ$ ). Além disso, o sistema de fixação da ferramenta foi projetado de modo que fosse facilitada a troca do inserto entre um corte e outro sem prejudicar o sistema de medição de temperatura, dando especial atenção ao posicionamento dos termopares e às condições de contato termopar-inserto.

Para testar o funcionamento do dispositivo porta-ferramentas e do sistema de medição, foi necessária a realização de alguns testes, para os quais foi feita a seleção de um material que apresentasse condições de corte o mais próximo possível das apresentadas pelo compósito CRFC. Sendo assim, foram usados três corpos de prova de ferro fundido cinzento, pois este material apresenta boa usinagem a seco e produz cavaco quebradiço, com aspecto semelhante ao cavaco do compósito CRFC. A finalidade de se ensaiar três corpos de prova é verificar a repetitividade dos resultados. Sendo assim, eles foram ensaiados com as mesmas condições de corte, sendo observados os resultados dos três ensaios e comparados quanto a sua repetitividade.

Confirmada a confiabilidade e a repetitividade dos resultados, foram então realizados os ensaios com o compósito CRFC. Tais ensaios foram executados utilizando quatro ferramentas de diferentes classes de metal duro, sendo elas:

- metal duro ISO K10 sem cobertura (Sandvik H1P);
- metal duro ISO K15 com cobertura de TiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sandvik GC3015);
- metal duro ISO P15 com cobertura de TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiN (Sandvik GC4015);
- metal duro ISO P10 sem cobertura (Sandvik S1P).

Todos os insertos utilizados tinham geometria ISO SNGN120408 (Sandvik). Além disso, baseado nos estudos de Ferreira et al (2001(b)), nos quais foi mostrado que não se recomenda o uso de fluido refrigerante no torneamento de compósitos CRFC, não se utilizou fluido refrigerante em nenhum dos ensaios deste trabalho.

Para o inserto de metal duro H1P utilizou-se sete diferentes valores de velocidade de corte, abrangendo uma grande faixa de valores e procurando reproduzir o ensaio realizado por Ferreira (1999) para estudo da temperatura de corte. As condições de corte utilizadas neste ensaio podem ser observadas na Tab. (1).

Tabela 1. – Condições de corte para os ensaios com o compósito CRFC, utilizando inserto de metal duro H1P.

Ensaio	Profundidade de corte $a_p$ (mm)	Avanço $f$ (mm/volta)	Velocidade de corte $V_c$ (m/min)	Comprimento de corte $L_c$ (m)
1	1,0	0,1	112,6	1155
2	1,0	0,1	189,0	1165
3	1,0	0,1	279,9	1215
4	1,0	0,1	391,1	1205
5	1,0	0,1	465,6	1195
6	1,0	0,1	654,2	1185
7	1,0	0,1	900,8	1175

De maneira análoga aos ensaios realizados com o inserto de metal duro H1P, conduziu-se o procedimento experimental para os ensaios com os outros insertos. Para esses casos, utilizou-se quatro diferentes velocidades de corte para cada inserto. As condições de corte para os ensaios com os insertos de metal duro GC3015, GC4015 e S1P, podem ser vistas nas Tabs. (2), (3) e (4), respectivamente.

Tabela 2. Condições de corte para os ensaios com o compósito CRFC, utilizando inserto de metal duro GC3015.

Ensaio	Profundidade de corte $a_p$ (mm)	Avanço $f$ (mm/volta)	Velocidade de corte $V_c$ (m/min)	Comprimento de corte $L_c$ (m)
1	1,0	0,1	107,9	881
2	1,0	0,1	213,9	874
3	1,0	0,1	424,1	866
4	1,0	0,1	595,5	858

Tabela 3. Condições de corte para os ensaios com o compósito CFRC, utilizando inserto de metal duro GC4015.

Ensaio	Profundidade de corte $a_p$ (mm)	Avanço $f$ (mm/volta)	Velocidade de corte $V_c$ (m/min)	Comprimento de corte $L_c$ (m)
1	1,0	0,1	104,1	819
2	1,0	0,1	206,4	812
3	1,0	0,1	409,0	804
4	1,0	0,1	574,1	797

Tabela 4. Condições de corte para os ensaios com o compósito CRFC, utilizando inserto de metal duro S1P.

Ensaio	Profundidade de corte $a_p$ (mm)	Avanço $f$ (mm/volta)	Velocidade de corte $V_c$ (m/min)	Comprimento de corte $L_c$ (m)
1	1,0	0,1	111,7	983
2	1,0	0,1	221,5	974
3	1,0	0,1	439,2	966
4	1,0	0,1	616,8	958

Esses últimos ensaios foram realizados com o intuito de verificar a influência do material da ferramenta e dos recobrimentos nos fenômenos decorrentes do processo, possibilitando a comparação quantitativa e qualitativa dos resultados com os obtidos nos ensaios com o inserto de metal duro H1P.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais das medidas de temperatura nos termopares na usinagem do compósito CRFC com o inserto de metal duro H1P são apresentados na Fig. (3), a qual mostra a evolução da temperatura de regime de cada termopar em função da variação da velocidade de corte. Pode-se observar na Fig. (3) que as temperaturas indicadas pelos termopares apresentam valores crescentes com o aumento da velocidade de corte e que estão coerentes com o posicionamento dos termopares na superfície de saída do inserto.

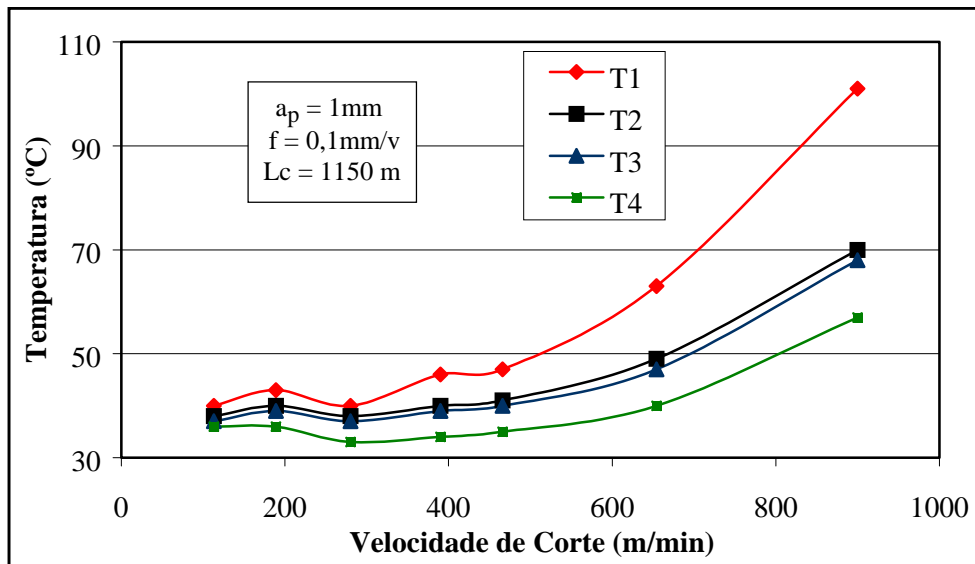


Figura 3. Comportamento da temperatura de regime em cada um dos termopares em função da variação da velocidade de corte, para os ensaios utilizando insertos de metal duro HIP.

A Figura (4) apresenta a distribuição de temperaturas (isotermas) na superfície de saída do inserto de metal duro HIP, no ensaio com o maior valor de velocidade de corte, obtida através do procedimento numérico.

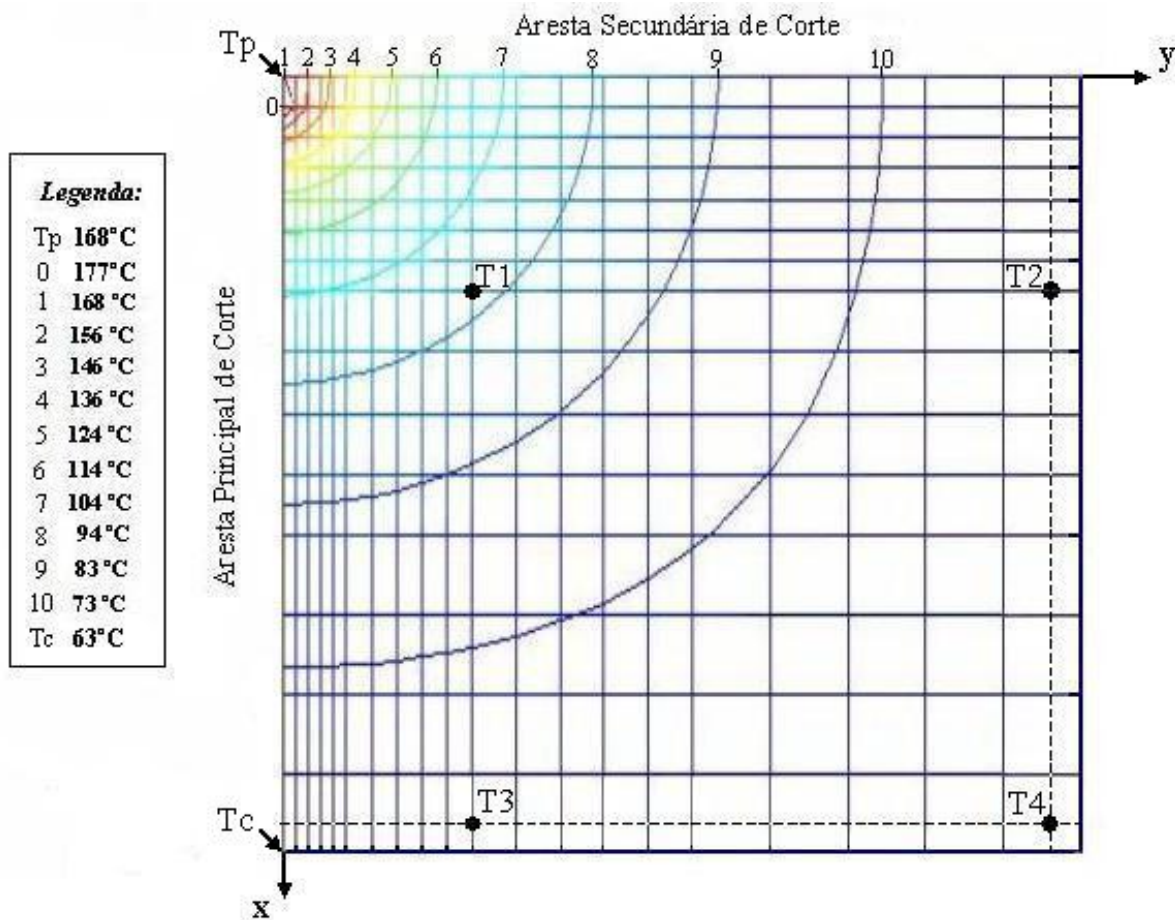


Figura 4. Distribuição de temperatura na superfície de saída do inserto de metal duro HIP, no torneamento do compósito CRFC ( $a_p=1,0\text{mm}$ ,  $f=0,1\text{mm/volta}$ ,  $V_c=900,8\text{m/min}$ ,  $L_c = 1175\text{m}$ ).

Pode-se observar na Fig. (4) que a temperatura na ponta da ferramenta de corte ( $T_p$ ) é da ordem de  $168^\circ\text{C}$ , e que as temperaturas mais elevadas (da ordem de  $177^\circ\text{C}$ ) estão localizadas na seção de corte da ferramenta.

A Figura (5) apresenta o comportamento da temperatura na ponta da ferramenta em função da velocidade de corte, para os quatro insertos utilizados.

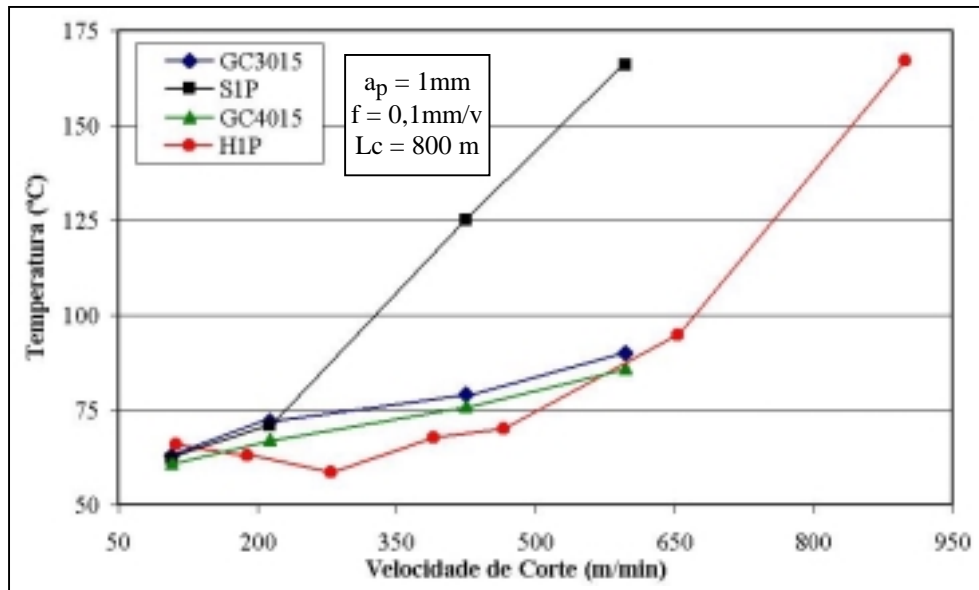


Figura 5. Comportamento da temperatura de corte na ponta da ferramenta em função da variação da velocidade de corte, para os diferentes insertos de metal duro.

Pode-se observar que a temperatura na ponta da ferramenta é crescente com o aumento da velocidade de corte, e que a taxa de variação da temperatura é menor nas ferramentas com recobrimento. Isso ocorre devido ao menor coeficiente de condutividade térmica dos recobrimentos cerâmicos ( $\text{TiC}+\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ ), presente nos insertos com cobertura.

O comportamento da temperatura, crescente com a velocidade de corte, pode ser explicado observando-se que o aumento da velocidade de corte promove um aumento da taxa de cisalhamento sofrida pelo material e do atrito cavaco-ferramenta-peça, sem alterar significativamente a área de contato cavaco ferramenta, sendo que a quase totalidade da energia gasta para cisalhar o material e vencer o atrito é convertida em calor, elevando portanto a temperatura de corte.

No entanto, vale salientar que no caso específico deste trabalho, a taxa de aumento de temperatura com a velocidade de corte é pequena, uma vez que o material ensaiado é frágil e produz cavaco de ruptura, o que faz com que a quantidade de calor gerada pela deformação e pelo cisalhamento do material seja pequena.

Outra observação importante é que as temperaturas na ponta da ferramenta e na seção de corte são bastante inferiores à temperatura de oxidação do compósito CRFC, não havendo assim influência do processo oxidativo, que só diminuiria a resistência ao corte do material em temperaturas mais elevadas ( $T > 370^\circ\text{C}$ ).

O processo de formação de cavaco apresentado pelo compósito CRFC faz com que os fenômenos ocorridos durante a usinagem devam ser tratados de maneira cuidadosa e diferenciada dos fenômenos que ocorrem na usinagem dos metais, haja visto que, devido às rupturas que ocorrem no material, não se tem claramente a formação de uma zona definida de deformação e de cisalhamento do cavaco. Além disso, o cavaco gerado durante o corte é um pó abrasivo e prejudicial à saúde das pessoas e, portanto, as condições de segurança do operador, da máquina ferramenta e do ambiente de trabalho são pontos cruciais para a viabilidade da usinagem do compósito CRFC.

A Figura (6) apresenta o comportamento do desgaste de flanco sofrido pelas ferramentas em função da variação da velocidade de corte.

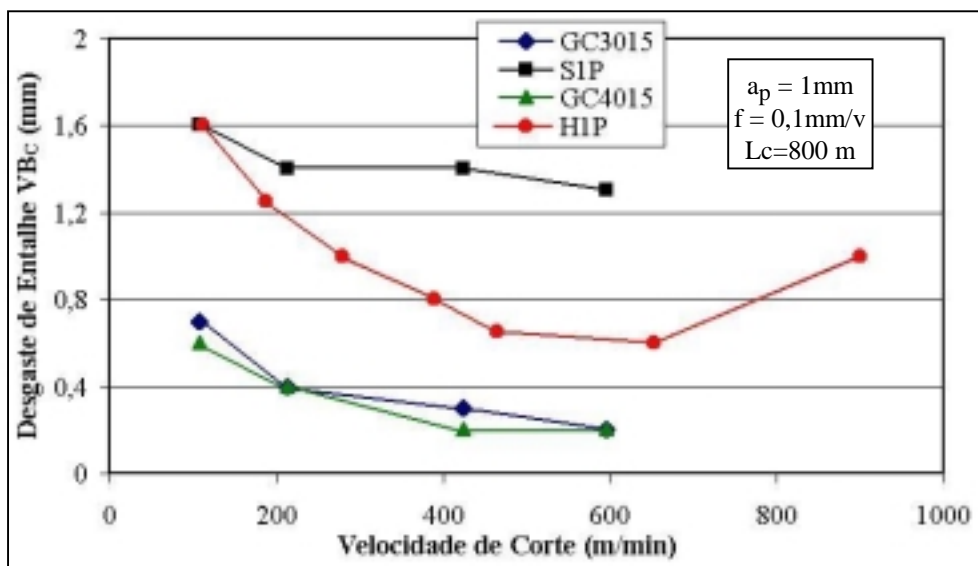


Figura 6. Comportamento do desgaste de flanco em função da variação da velocidade de corte, para os diferentes insertos de metal duro.

Os resultados referentes ao inserto de metal duro HIP confirmam o comportamento detectado por Ferreira (1999) e estudado por Martins (2000), já descrito anteriormente. Pode-se observar na Fig. (6) que o valor do desgaste decresce com o aumento da velocidade de corte até um patamar, a partir do qual tem-se a inversão deste comportamento. Percebe-se uma faixa de velocidade de corte, entre 450 e 600 m/min, onde aparentemente localiza-se um ponto de transição. No entanto, o ponto exato no qual ocorre esta inversão não pode ser identificado claramente.

Pode-se observar também na Fig. (6) que o comportamento do desgaste decresce com o aumento da velocidade de corte também nos outros insertos utilizados, e que os valores dos desgastes nas ferramentas recobertas são menores que nas sem cobertura, mostrando que o recobrimento ameniza o desgaste por apresentar maior dureza e menor coeficiente de fricção.

A figura (7) apresenta uma foto observada em um microscópio eletrônico de varredura do desgaste sofrido pelo inserto de metal duro HIP.

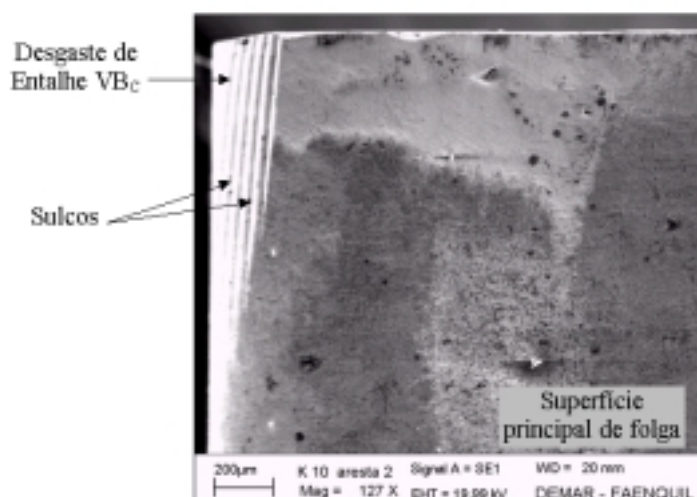


Figura 7. Desgaste observado no inserto de metal duro HIP ( $V_c = 279,9$  m/min)

Observa-se que o inserto sofreu vários desgastes na forma de sulcos paralelos à direção de corte, principalmente ocorridos em condições de menores velocidades de corte. Este fato leva-nos a considerar, em função dos baixos valores observados de temperatura de corte, que o mecanismo de



desgaste que prevalece em baixa velocidade de corte é o desgaste por aderência (“attrition”), visto que a incidência deste mecanismo nas ferramentas recobertas foi amenizada pela presença do recobrimento. Em maiores velocidades de corte este mecanismo não é tão preponderante e outros mecanismos de desgaste, como a abrasão por exemplo, passam a ser mais significativos.

## 4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados neste trabalho, pode-se inferir que:

- O sistema de medição de temperatura de corte desenvolvido mostrou-se eficiente, bem como a simulação numérica do processo, uma vez que possibilitou a obtenção das isotermas na superfície de saída da ferramenta.
- O comportamento do desgaste com a variação da velocidade de corte no torneamento do material compósito CRFC difere do comportamento apresentado na usinagem dos metais, sendo o valor do desgaste decrescente com o aumento da velocidade de corte até um determinado patamar, a partir do qual ocorre uma leve inversão nessa tendência.
- Os valores obtidos para a temperatura de corte indicam que não ocorreu o processo oxidativo no compósito CRFC, uma vez que os valores das temperaturas de corte ( $T < 170^\circ$ ) estão muito abaixo da temperatura de oxidação do material ( $370^\circ\text{C}$ ).
- Os elevados valores de desgastes observados em baixas velocidades de corte levam ao forte indício da predominância do desgaste por aderência.
- O uso de insertos de metal duro recoberto apresentou bom desempenho, principalmente em velocidades de corte superiores a 300 m/min.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CTA (Centro Técnico Aeroespacial) pela doação do corpo de provas, ao CNPq pelo apoio dado ao projeto por meio de uma bolsa de Mestrado e à Fapemig, pela concessão de uma bolsa de Iniciação Científica.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ferreira, J.R., 1999, “Torneamento de Materiais Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono”, Tese (Doutorado), Campinas: Faculdade de Eng. Mecânica, Unicamp, 196p.
- Ferreira, J.R., Coppini, N.L., Levy Neto, F., 2001 (a), “Characteristics of carbon-carbon composite turning” *Journal of Materials Processing Technology*, 109, p65-71.
- Ferreira, J.R., Martins, F.R., Coppini, N.L 2001 (b), “A refrigeração no torneamento do compósito carbono-carbono”, *Revista Máquinas e Metais*, 240, pp 72-91.
- Komanduri, R., 1997, “Machining of fiber reinforced composites”, *Machining Science and Technology*, v.1, n.1, pp 113-152.
- Martins, F.R., “Uma Contribuição à Usinagem do Compósito Carbono Reforçado com Fibras de Carbono”, Dissertação (Mestrado), Campinas: Faculdade de Eng. Mecânica, Unicamp, 1999, 125p.
- Savage, G. - Carbon-carbon composites. London: Chapman & Hall, 1993.
- Thomas, C.R. - Essentials of carbon/carbon composites. Cambridge: The Royal Society Chemistry, 1993.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

# ANALYSIS OF THE CUTTING TEMPERATURE IN CARBON-CARBON COMPOSITE TURNING

## **João Roberto Ferreira**

Instituto de Engenharia Mecânica da EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Caixa Postal 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG, e-mail: jorofe@iem.efei.br

## **João Sílvio S. Olim**

Instituto de Engenharia Mecânica da EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Caixa Postal 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG, e-mail: jsilvio@efei.br

## **Paulo Fernandes Silva**

Instituto de Engenharia Mecânica da EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Caixa Postal 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG, e-mail: psilva@iem.efei.br

## **Luiz Carlos M. Silva Jr.**

Instituto de Engenharia Mecânica da EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Caixa Postal 50, CEP

**Abstract:** *In the last decade, the use of carbon fiber reinforced carbon composites material (CFRC), also known as carbon-carbon composite has grown in a substantial way. The literature has been giving emphasis to the study of the properties of those materials, being necessary larger studies of the production processes, among which the machining process is the most important, because it is the final process and it involves products with high aggregate value. This work has the objective of showing that the machinability of this material differs significantly of the metals conventional machining, mainly when analyzing the cutting speed influence on tool life. For such objective, a theoretical-experimental procedure was carried out to evaluate the cutting temperature in the turning of CFRC composites, seeking to observe a possible influence of the oxidation of the piece during the process. This phenomenon occurs in the CFRC composites in temperatures above 370°C. For obtaining the cutting temperature a system of temperature measurement and a software were used for the simulation through the finite difference method. The results confirm the differentiated behavior of the CFRC composites in relation to the metals. However, the obtained values of cutting temperature show that the process of oxidation of the piece doesn't happen, attributing such behavior then to the wear mechanism of the process.*

**Keywords:** *Carbon-carbon composite, Machining, Cutting Temperature.*