

## DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NA SUPERFÍCIE DE SAÍDA DA FERRAMENTA DE CORTE NO TORNEAMENTO DE COMPÓSITOS CARBONO-CARBONO

### João Roberto Ferreira

Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CP 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG  
[jorofe@iem.efei.br](mailto:jorofe@iem.efei.br)

### Paulo Fernandes Silva

MCT – Laboratório Nacional de Astrofísica, Rua Estados Unidos, 154, CEP 37500-000, Itajubá-MG  
[jorofe@iem.efei.br](mailto:jorofe@iem.efei.br)

### João Silvio S. Olim

Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CP 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG  
[jsilvio@efei.br](mailto:jsilvio@efei.br)

### Luiz Carlos M. Silva Junior

Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CP 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG  
[luizcarlos@mg.sense.com.br](mailto:luizcarlos@mg.sense.com.br)

**Resumo.** Existe uma crescente aplicação dos materiais compósitos reforçados com fibra de carbono (CRFC) também conhecido como compósito carbono-carbono (C/C), principalmente na indústria aeroespacial, aeronáutica, automotiva e na área biomédica. Isto se deve as propriedades destes materiais, ou seja, elevada resistência à abrasão e ao choque térmico, boa resistência mecânica em elevadas temperaturas ( $T > 2000^{\circ}\text{C}$ ), baixa massa específica, alta condutividade térmica e elétrica, elevada rigidez e inércia química em atmosfera controlada. Atualmente, ainda há uma escassez de informações no que diz respeito ao seu processo de fabricação, visto que as peças obtidas deste material requerem um acabamento final de usinagem, pois a sua não conformidade pode levar a serio prejuízos em face do elevado valor já agregado ao produto. Devido à sua estrutura heterogênea e anisotrópica, este material é de difícil usinagem, pois apresenta elevada abrasividade e esforços de corte flutuantes, sendo estes fatores extremamente nocivos à vida útil da ferramenta de corte. Outro fator agravante durante a usinagem desse material é a formação do cavaco em pó, altamente nocivo ao operador e à máquina-ferramenta. Este trabalho tem como objetivo apresentar alguns parâmetros de usinabilidade, como o comportamento da temperatura de corte na ponta da ferramenta durante o torneamento do compósito C/C. Para um caso específico da ferramenta de metal duro, será verificada a influência da velocidade de corte na temperatura de corte e no processo de oxidação do compósito, uma vez que esta oxidação ocorre a temperaturas superiores a  $370^{\circ}\text{C}$ , o que traz resultados contraditórios com relação à vida da ferramenta e aos fundamentos da usinagem. Para a obtenção da temperatura de corte na ponta da ferramenta foi utilizado um sistema de medição de temperaturas em outros pontos da mesma e um programa computacional para simular numericamente a distribuição de temperaturas na superfície de saída da ferramenta, através do método de diferenças finitas. Os resultados confirmam o comportamento diferenciado do material compósito 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 utilizada no processo.

**Palavras chave:** usinagem, compósito carbono-carbono, distribuição de temperaturas.

### 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. Esta tendência de aumento do emprego desses materiais em diversas áreas da engenharia se deve às suas 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°C e segundo Thomas (1993) provoca diminuição da resistência ao corte.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise experimental do comportamento e das influências da temperatura de corte no torneamento de materiais compósitos (CRFC). Além disso, também é realizada neste trabalho, uma análise teórica com o objetivo de determinar a distribuição de temperaturas na superfície de saída da ferramenta de corte.

## 2. Análise experimental

Para analisar o comportamento da temperatura de corte na superfície de saída da ferramenta, foram utilizados quatro termopares simetricamente distribuídos, conforme mostra a Fig. (1).

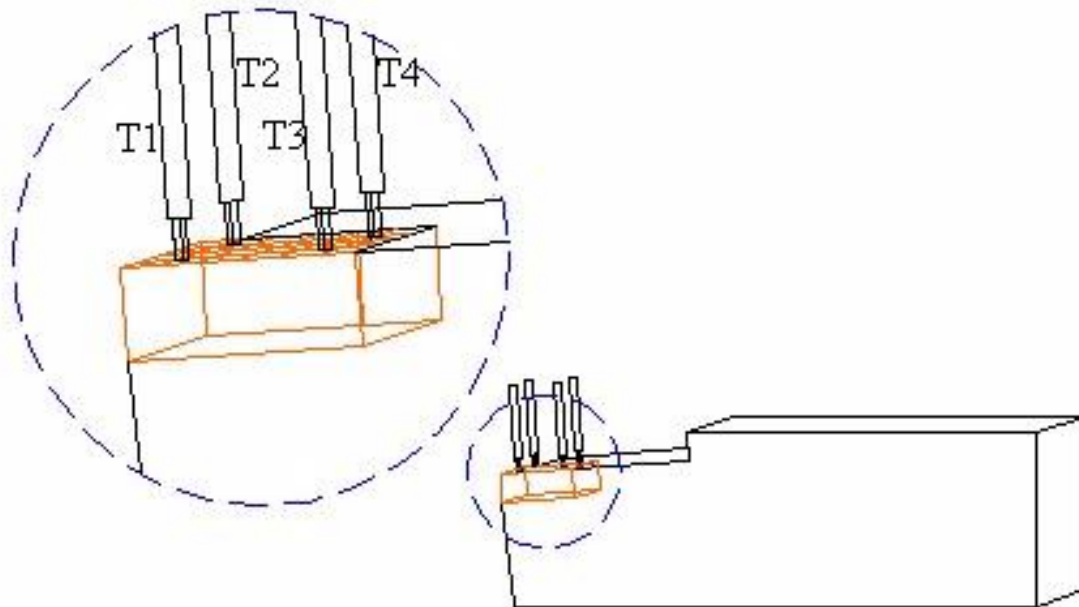


Figura 1. Posicionamento dos termopares na superfície de saída.

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 colocados na superfície de saída do inserto. Os termopares utilizados são do tipo K, bitola 24 AWG com faixa de operação de -90 °C a 1370 °C e com precisão de 0.25%. 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.

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 folga ( $\alpha_0 = 6^\circ$ ), 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.

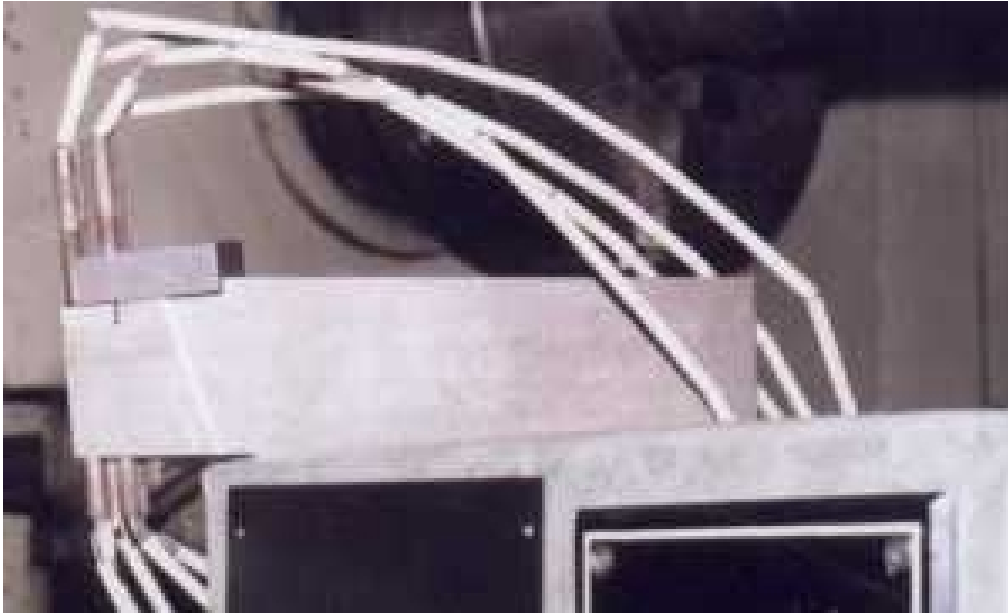


Figura 2. Foto do dispositivo porta ferramentas projetado e sistema de medição das temperaturas.

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;
- metal duro ISO K15 com cobertura de TiC e  $Al_2O_3$ ;
- metal duro ISO P15 com cobertura de TiCN,  $Al_2O_3$  e TiN;
- metal duro ISO P10 sem cobertura.

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 a ferramenta de metal duro ISO K10 sem recobrimento 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 ISO K10 sem cobertura.

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 ISO K10 sem cobertura, 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 ISO K15 com cobertura, ISO P15 com cobertura e ISO P10 sem cobertura, 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 ISO K15 com cobertura de TiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Ensaio	Profundidade de corte a <sub>p</sub> (mm)	Avanço f (mm/volta)	Velocidade de corte Vc (m/min)	Comprimento de corte Lc (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 CFRFC, utilizando inserto de metal duro ISO P15 com cobertura de TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiN.

Ensaio	Profundidade de corte a <sub>p</sub> (mm)	Avanço f (mm/volta)	Velocidade de corte Vc (m/min)	Comprimento de corte Lc (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 ISO P10 sem cobertura.

Ensaio	Profundidade de corte a <sub>p</sub> (mm)	Avanço f (mm/volta)	Velocidade de corte Vc (m/min)	Comprimento de corte Lc (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 utilizando a ferramenta de metal duro ISO K10.

### 3. Análise teórica

Na análise teórica (Chen et. al., 1997 e Tieu et. al., 1998) é considerado que a ferramenta de corte é homogênea, isotrópica e que a condutividade térmica k é constante, k = 100 W/m<sup>0</sup>C.

Para determinar a distribuição de temperaturas T(x,y) na superfície de saída da ferramenta de corte é utilizada a equação de condução de calor bidimensional em regime permanente com o termo de geração de energia q.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q}{k} = 0 \tag{1}$$

A solução numérica da Eq. (1) é obtida no domínio de solução mostrado na Fig. (3), utilizando-se simultaneamente as seguintes condições de contorno: condição de fluxo de calor especificado, condição de convecção e condição de temperatura conhecida.

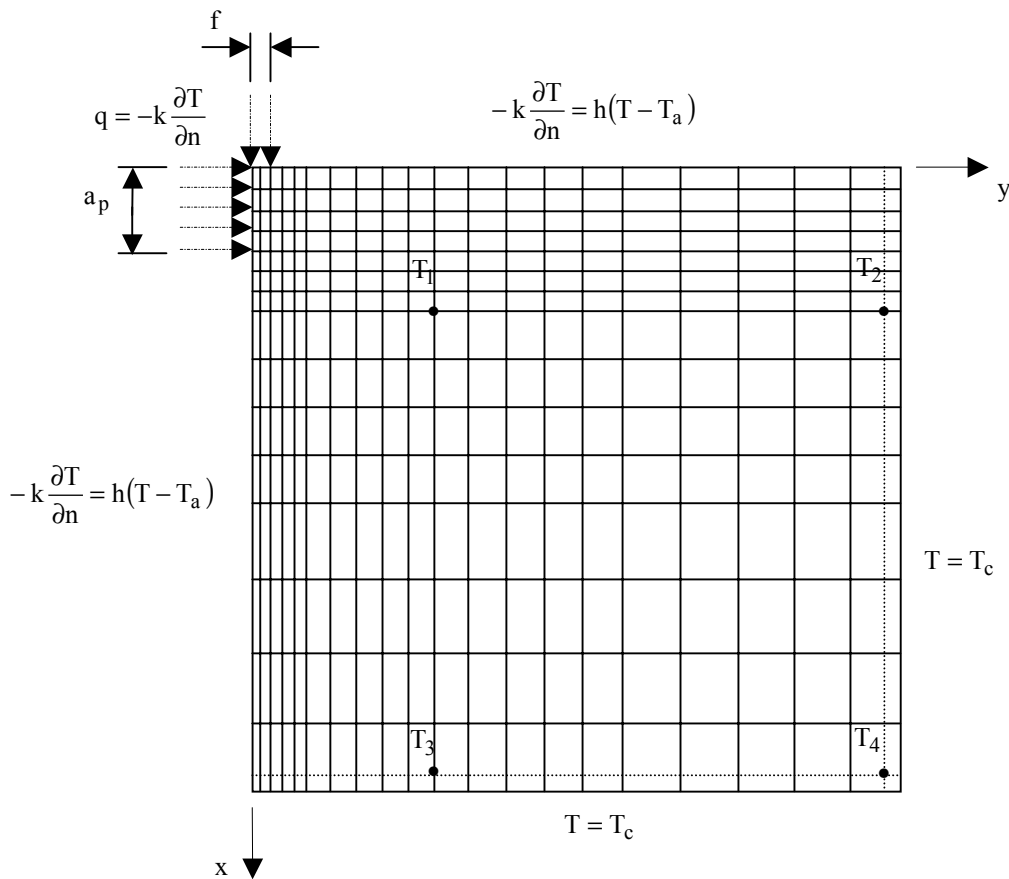


Figura 3. Domínio de solução e condições de contorno.

A condição de fluxo de calor especificado é estabelecida na região de corte e é determinada em função do calor gerado na operação de torneamento. Sendo que somente uma parcela deste calor vai para a ferramenta. Esta parcela é determinada computacionalmente através de um procedimento iterativo, em função da temperatura de regime indicada no termopar T1, a qual é utilizada como critério de parada no programa computacional.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \tag{2}$$

Onde  $n$  é a direção normal ao contorno.

A condição de convecção natural é estabelecida nas arestas principal e secundarias a menos da região efetiva de corte (condição de fluxo de calor especificado).

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a) \tag{3}$$

Onde  $h = 5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  é o coeficiente de convecção e  $T_a$  é a temperatura ambiente.

A condição de temperatura conhecida  $T_c$  é estabelecida em função do valor médio das temperaturas de regime indicadas nos termopares T2, T3 e T4.

A solução numérica deste problema foi obtida utilizando-se o método de diferenças finitas e fazendo-se um balanço de energia nos pontos nodais da malha computacional (16X21) mostrada na Fig. (3), a qual é uma malha seletiva de forma que esta seja mais refinada nas regiões com maiores gradientes de temperatura. O sistema de equações algébricas resultante deste procedimento foi resolvido utilizando-se o método de eliminação de Gauss; obtendo-se assim a distribuição de temperaturas na superfície de saída da ferramenta e, principalmente, a temperatura de corte na ponta da ferramenta  $T_p$ . Para tal, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem FORTRAN.

#### 4. Resultados e discussões

A primeira análise dos resultados experimentais foi realizada no sentido de verificar o comportamento transiente das temperaturas indicadas nos termopares T1, T2, T3 e T4.

A Fig. (4) mostra o transiente de temperatura para o ensaio com uma ferramenta de metal duro ISO K10 sem cobertura, para condições de corte bastante severas ( $V_c = 900,8$  m/min). Pode-se observar nesta figura que a condição de regime é atingida em 80 segundos e que os gradientes de temperatura na proximidade da interface cavaco-ferramenta de corte são obviamente maiores. Os valores de temperatura indicados pelos termopares estão coerentes com o posicionamento dos mesmos na superfície de saída do inserto. Uma evidência disto, esta relacionada aos valores quase idênticos de temperaturas indicados pelos termopares T2 e T3, pois estão localizados em uma posição quase que simétrica em relação à interface cavaco-ferramenta.

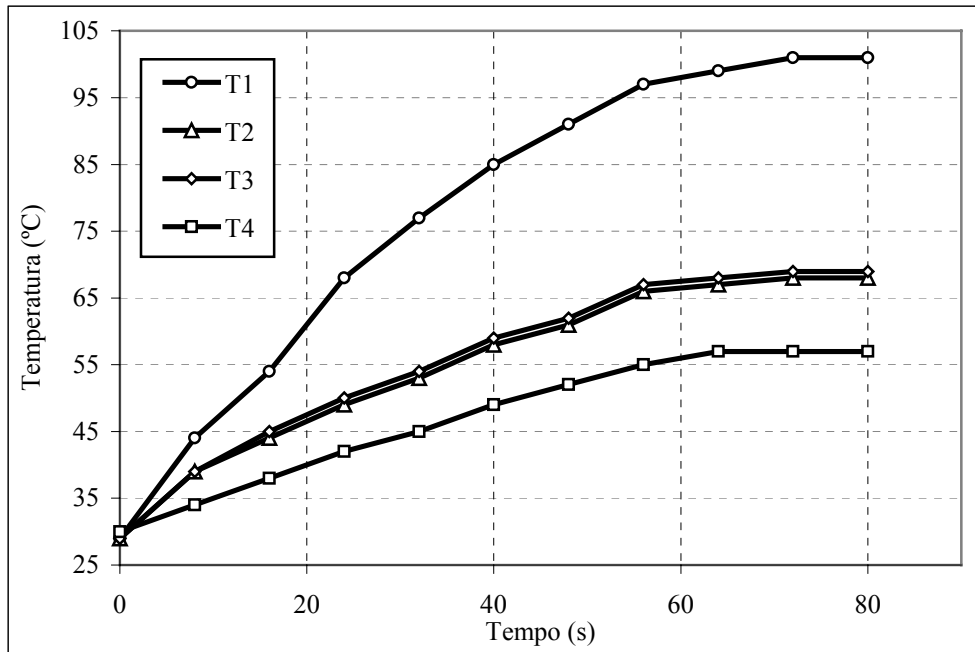


Figura 4. Transiente de temperatura em cada um dos termopares para o ensaio utilizando insertos de metal duro ISO K10 ( $a_p=1,0$ mm,  $f=0,1$ mm/volta,  $V_c=900,8$  m/min,  $L_c = 1150$  m).

A Fig. (5) mostra o transiente de temperatura para o ensaio com a mesma ferramenta de corte, em condições de corte pouco severas ( $V_c = 112,6$  m/min). Neste caso as temperaturas indicadas pelos termopares são bem menores, a condição de regime é atingida em um tempo bem maior e a distribuição de temperaturas é mais uniforme.

Pode-se concluir das Fig. (4) e (5) que a velocidade de corte tem grande influência sobre o comportamento das temperaturas na ferramenta de corte, já que os outros parâmetros foram mantidos constantes nestes ensaios.

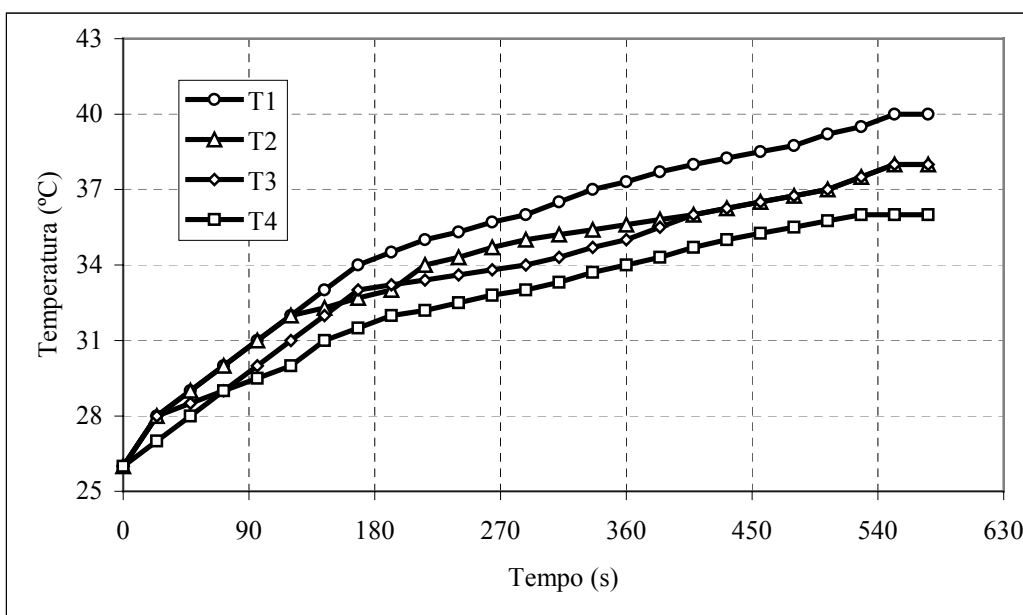


Figura 5. Transiente de temperatura em cada um dos termopares para o ensaio utilizando insertos de metal duro ISO K10 ( $a_p=1,0$ mm,  $f=0,1$ mm/volta,  $V_c=112,6$  m/min,  $L_c = 1150$  m).

Os resultados experimentais das temperaturas de regime indicadas pelos termopares T1, T2, T3 e T4 na usinagem do compósito CRFC com o inserto de metal duro ISO K10 versus a variação da velocidade de corte são apresentados na Fig. (6). Pode-se observar nesta figura que as temperaturas indicadas pelos termopares apresentam valores crescentes com o aumento da velocidade de corte e que os gradientes de temperatura na proximidade da interface cavaco-ferramenta de corte são maiores.

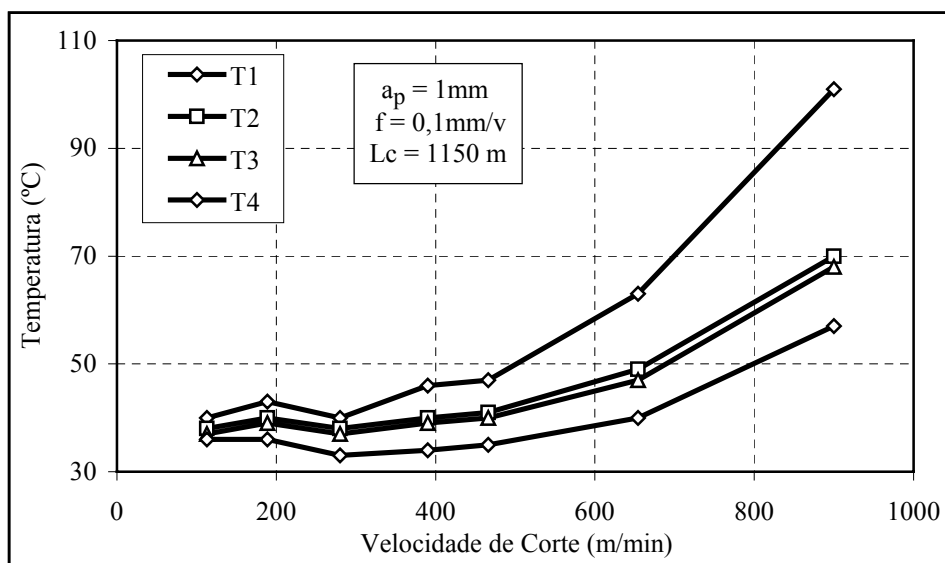


Figura 6. Comportamento da temperatura de regime em cada um dos termopares em função da variação da velocidade de corte, para os ensaios utilizando insertos ISO K10.

A Figura (7) apresenta a distribuição de temperaturas (isotermas) na superfície de saída do inserto de metal duro, ISO K10 sem cobertura, para o caso do torneamento do compósito CRFC em condições severas. Estes resultados foram obtidos através de um procedimento numérico. As condições de contorno de temperatura conhecida e de fluxo de calor conhecido, do modelo teórico foram estabelecidas com base nos resultados experimentais, indicados pelos termopares T1, T2, T3 e T4.

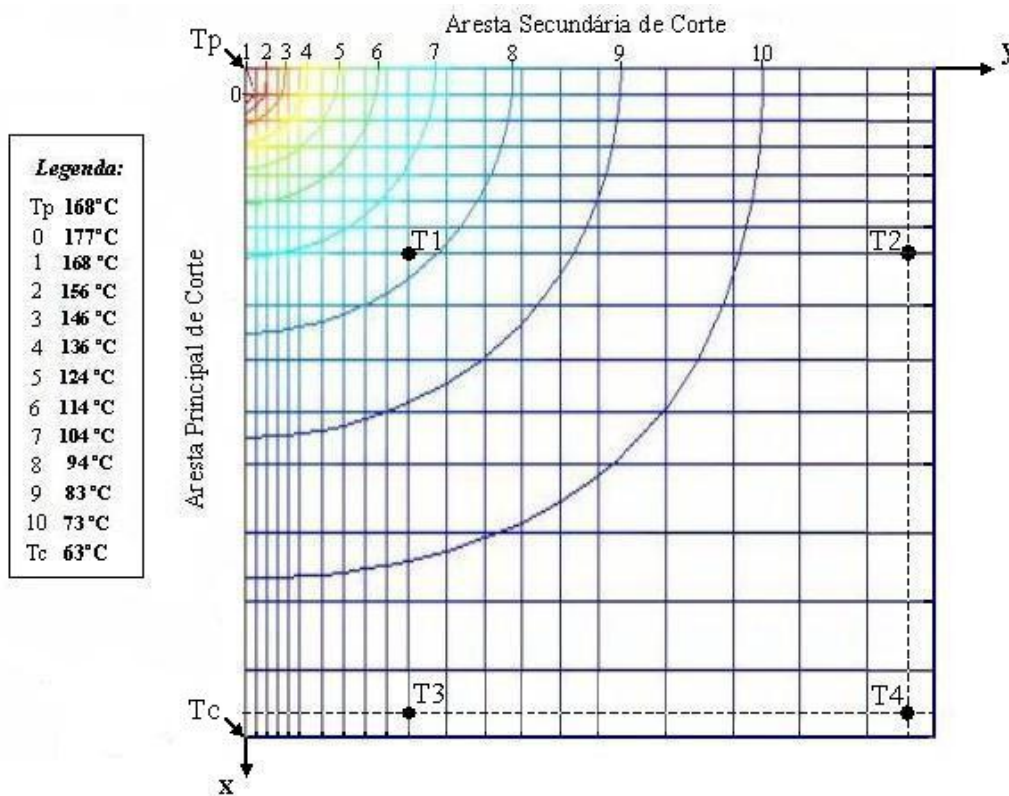


Figura 7. Distribuição de temperaturas na superfície de saída do inserto de metal duro ISO K10 sem cobertura, no torneamento do compósito CRFC ( $a_p=1,0\text{mm}$ ,  $f=0,1\text{mm/volta}$ ,  $V_c=900,8\text{ m/min}$ ,  $L_c = 1175\text{ m}$ ).

Pode-se observar na Fig. (7) 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 (8) apresenta os resultados das simulações numéricas do comportamento da temperatura de corte na ponta da ferramenta em função da velocidade de corte, para os quatros insertos utilizados no torneamento do material compósito CRFC.

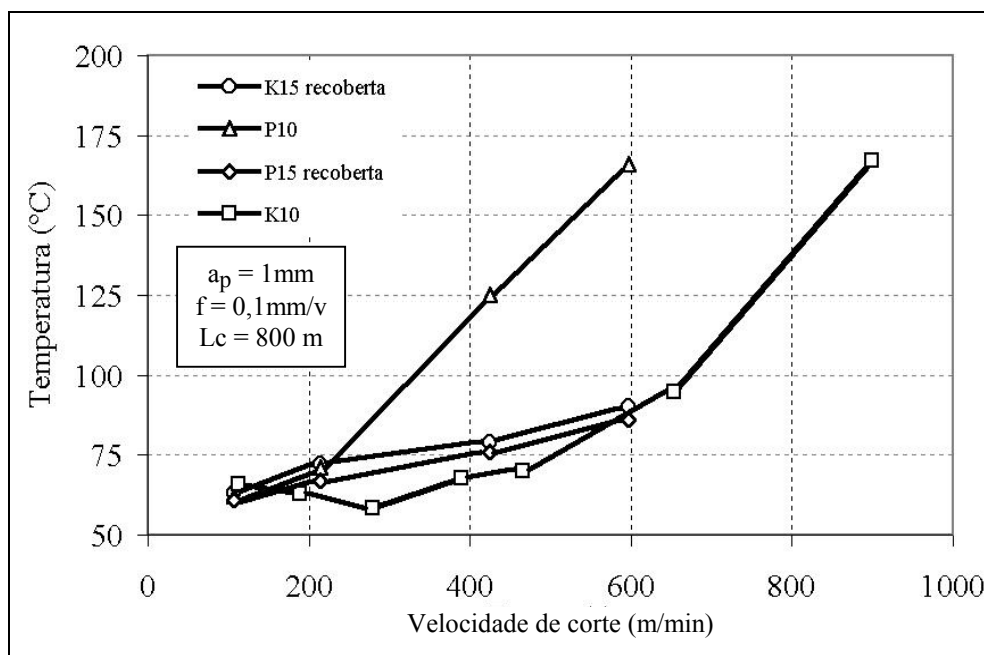


Figura 8. Comportamento da temperatura de corte na ponta da ferramenta em função da variação da velocidade de corte, para as diferentes ferramentas de metal duro.

Pode-se observar na Fig. (8) que a temperatura de corte 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 ascendente da temperatura 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 na interface 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 (9) apresenta o comportamento do desgaste de flanco em função da variação da velocidade de corte, para os quatros insertos utilizados no torneamento do material compósito CRFC.

Os resultados referentes ao inserto de metal duro ISO K10 sem cobertura confirmam o comportamento detectado por Ferreira (1999) e estudado por Martins (2000), já descrito anteriormente. Pode-se observar na Fig. (9) 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.

Pode-se observar também na Fig. (9) 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.



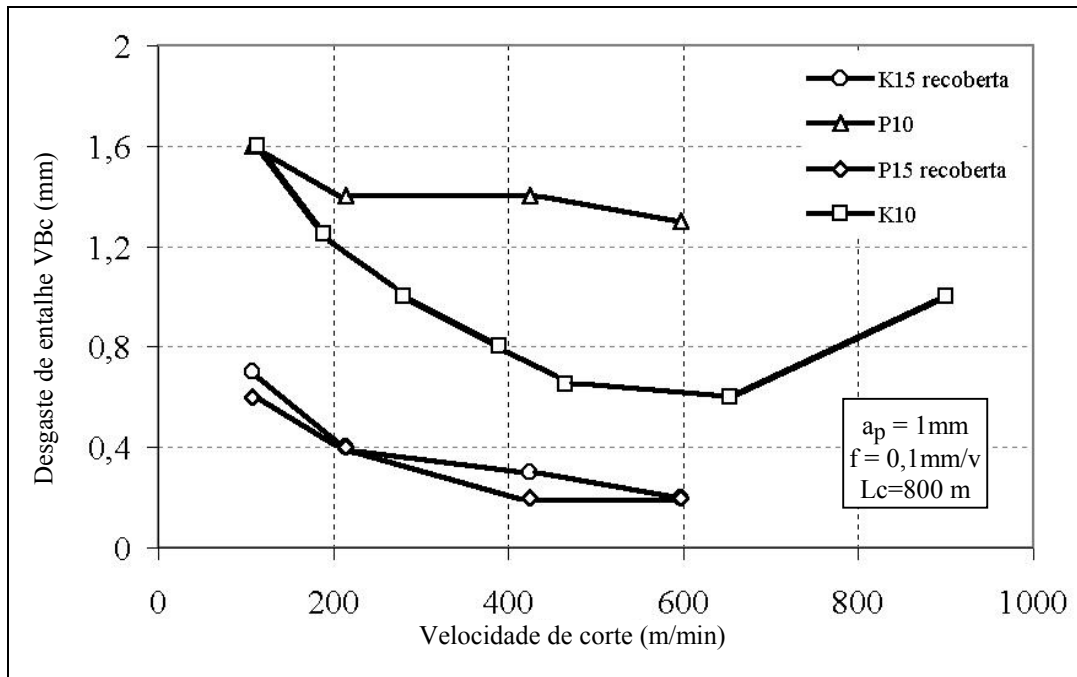


Figura 9. Comportamento do desgaste de flanco em função da variação da velocidade de corte, para as diferentes ferramentas de metal duro.

A figura (10) apresenta uma foto observada em um microscópio eletrônico de varredura do desgaste sofrido pela ferramenta de metal duro ISO K10 sem cobertura.

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 provavelmente seja 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.

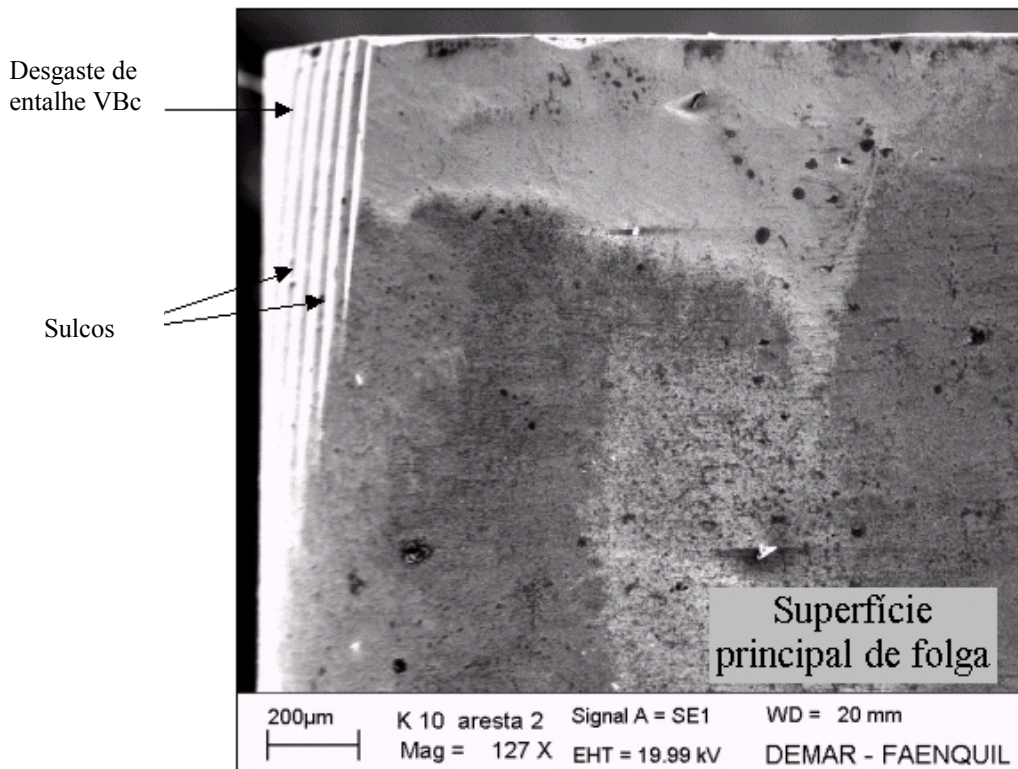


Figura 10. Desgaste observado na ferramenta de metal duro ISO K10 ( $V_c = 112,6$  m/min)

## 5. Conclusões

O presente trabalho apresentou uma análise experimental e teórica sobre o comportamento das temperaturas de corte e do desgaste de diferentes ferramentas de corte, na usinagem de materiais compósitos; a partir dos resultados encontrados pode-se concluir que:

- O sistema de medição de temperatura de corte desenvolvido mostrou-se eficiente, pois o transiente de temperaturas teve um comportamento coerente nas condições de torneamento analisadas e as temperaturas de regime indicadas pelos termopares T1, T2, T3 e T4 também apresentaram valores coerentes;
- Através de simulações numéricas foi possível determinar a distribuição de temperaturas na superfície de saída da ferramenta, a temperatura na ponta da ferramenta de corte e a parcela de calor gerado na operação de usinagem que é conduzida para a ferramenta;
- Os valores obtidos para as temperaturas na superfície de saída da ferramenta de corte indicam que não ocorreu o processo de oxidação no compósito CRFC, uma vez que os valores das temperaturas de corte ( $T < 170^\circ$ ) estão muito abaixo da temperatura de oxidação do material ( $370^\circ\text{C}$ );
- 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 elevados valores de desgastes observados em baixas velocidades de corte levam ao forte indício da predominância do desgaste por aderência;
- O uso de ferramentas de corte de metal duro com cobertura apresentou bom desempenho, principalmente em velocidades de corte superiores a 300 m/min.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CTA (Centro Técnico Aeroespacial) pela doação do corpo de provas, à FAENQUIL (Faculdade de Engenharia Química de Lorena) pela elaboração da foto de um inserto desgastado, ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio dado ao projeto por meio de uma bolsa de Mestrado e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pela concessão de uma bolsa de Iniciação Científica.

## 7. Referências

- Chen, W.C., Tsao, C.C. and Liang, P.W., 1997, "Determination of Temperature Distributions on Rake Face of Cutting Tools Using a Remote Method", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, N2, pp 161-170.
- 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, pp 65-71.
- 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.
- Tieu, A.K., Fang, X.D. and Zhang, D., 1998, "FE Analysis of Cutting Tool Temperature Field with Adhering Layer Formation", *Wear*, 214, pp 252-258.

# TEMPERATURE DISTRIBUTION ON THE RAKE FACE OF A CUTTING TOOL DURING THE TURNING OF CARBON-CARBON COMPOSITES

**João Roberto Ferreira**

Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CP 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG  
[jorofe@iem.efei.br](mailto:jorofe@iem.efei.br)

**Paulo Fernandes Silva**

MCT – Laboratório Nacional de Astrofísica, Rua Estados Unidos, 154, CEP 37500-000, Itajubá-MG  
[jorofe@iem.efei.br](mailto:jorofe@iem.efei.br)

**João Silvio S. Olim**

Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CP 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG  
[jsilvio@efei.br](mailto:jsilvio@efei.br)

**Luiz Carlos M. Silva Junior**

Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CP 50, CEP 37500-000, Itajubá-MG  
[luizcarlos@mg.sense.com.br](mailto:luizcarlos@mg.sense.com.br)

**Abstract.** *A growing application of carbon fiber reinforced carbon composite materials (CFRC), also known as composite carbon-carbon (C/C), is taking place, mainly in the aerospace industry, aeronautics, automotive and in the area of biomedicine. This is due to the excellent properties of these materials, such as high resistance to abrasion and thermal shock, good mechanical resistance to high temperatures ( $T > 2000^{\circ}\text{C}$ ), low density, high thermal and electric conductivity, high rigidity and chemical inertia in controlled atmosphere. A paucity of information remains, relative to the production process, because the component parts of this material require a final machining finish, since its non conformity may lead to serious damages as related to the high aggregated value of the product. Due to its heterogeneous structure and anisotropy, this material is of difficult machining, because it presents high abrasion and machining cutting efforts, these factors being extremely noxious to the useful life of the cutting tool. Another aggravating factor during the machining of this material is the formation of powdered chips, highly noxious to the operator and the machine tool. The objective of this work is to present some machining parameters, such as the temperature behavior of the tool cutting edge during the turning of the composite C/C. For a specifies cemented carbide tool, it will be verified the influences of the cutting speed in the cutting temperature and in the process of oxidation of the composite, since this oxidation occurs at temperatures higher than  $370^{\circ}\text{C}$ , and this brings up some contradictory results with respect to the tool life and the fundamentals of the machining process. For evaluating the cutting temperature of the tool cutting edge a temperature measurement system was used to measure the temperatures in other points of the tool and a computational program to simulate numerically the distribution of temperatures in the tool rake face, by applying the finite differences method. The results confirm the distinct behavior of the CFRC composites machining relative to the metals. However, the obtained values of cutting temperature show that the process of oxidation of the piece does not happen, and such behavior is then attributed to the wear mechanism of the process.*

**Keywords:** *Turning process, Carbon-carbon composite, Cutting Temperature distribution.*