

MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DE USINAGEM NO FRESAMENTO DO AÇO VHSUPER COM FERRAMENTAS DE METAL DURO REVESTIDO E CERMET

José Luiz Silva Ribeiro, ribeirojls@pucminas.br¹
Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br²
Roberto Márcio de Andrade, roberto@demec.ufmg.br²
Herbert Geovane de Carvalho, herbertg@cemig.com.br³

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - Av. Dom José Gaspar, 500 - Cor. Eucarístico - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 30535-901.

²Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 31270-901.

³CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais - Av. Barbacena, 1200 - Santo Agostinho - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 30190-924.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização da técnica de medição de temperatura por radiação infravermelha pela metodologia de filmagem em vídeo com o emprego de câmaras termográficas, durante a operação de fresamento do aço ferramenta VHSuper com ferramentas de metal duro revestido e cermet. Além do material da ferramenta, a influência da velocidade de corte e do avanço por dente sobre a temperatura de usinagem também foi avaliada. Os resultados indicaram que a temperatura de usinagem aumenta com a velocidade de corte, entretanto, a técnica empregada não permitiu avaliar a influência do avanço por dente. Finalmente, observou-se que temperaturas mais elevadas foram detectadas durante o corte com a ferramenta cermet, em comparação às ferramentas de metal duro revestido.

Palavras-chave: temperatura, fresamento, termografia, aço ferramenta, cermet.

1. INTRODUÇÃO

A evolução da exatidão das técnicas de medição de temperatura de usinagem tem sido muito lenta ao longo dos anos e a determinação da distribuição de temperatura na área de contato peça-ferramenta ainda continua tecnicamente difícil. SHAW (1984) afirma que não existe nenhum método simples e confiável para medição de temperatura na interface cavaco-ferramenta. Determinar a temperatura ou a sua distribuição próxima à aresta de corte é difícil e as metodologias até agora empregadas são apenas os fundamentos dos estudos que ainda terão que ser desenvolvidos. Vários métodos têm sido utilizados para a determinação da temperatura dos processos de usinagem, mas todos, sem exceção, tem suas limitações individuais. A busca pela técnica que melhor se adapte a cada situação deve ser cuidadosamente estudada e desenvolvida. Neste sentido, o trabalho de KOMANDURI e HOU (2001) oferece uma excelente contribuição ao descrever as principais técnicas empregadas para a determinação da temperatura em processos de fabricação e aplicações tribológicas.

Na operação de fresamento, a avaliação da temperatura na interface cavaco-ferramenta é prejudicada pelo contato intermitente entre aresta de corte e peça. A definição do ponto onde a temperatura deve ser medida também necessita ser adequadamente avaliada, uma vez que se pode optar por avaliar: a temperatura da ferramenta; a temperatura da peça usinada; a temperatura do cavaco ou até mesmo a temperatura da região onde ocorre o processo de corte.

O estudo dos métodos utilizados para a avaliação de temperatura nos processos de usinagem é bastante antigo. TRENT e WRIGHT (2000) e LONGBOTTOM e LANHAM (2005) citam que F. W. Taylor foi um dos primeiros a se preocupar com os efeitos térmicos nos resultados de processos de usinagem, citando-os em seu artigo "On The Art of Cutting Metals" de 1907. Desde aquela época era sabido que, se as temperaturas de usinagem se elevam muito rapidamente, o desgaste das ferramentas aumenta e pode causar danos à peça, pois o aumento dos esforços pode influenciar no acabamento. Também se concluiu que a integridade da superfície de trabalho e a qualidade dimensional e geométrica da peça usinada são diretamente afetadas pela temperatura de corte.

Embora se pesquise muito sobre a avaliação das influências da temperatura nos processos de usinagem e as formas de se reduzir os efeitos negativos do calor nos processos de fresamento, a medição de temperatura continua tarefa

difícil, principalmente pelos processos serem dinâmicos e as arestas de corte e interfaces cavaco-ferramenta também serem praticamente inacessíveis.

Nas operações de usinagem, a maior parte da energia despendida com o processo é transformada em calor devido à deformação plástica da superfície da peça e devido ao atrito da ferramenta tanto com a peça quanto desta com o cavaco. Somente 1 a 3% desta energia é convertida em outros meios (como energia elástica), não sendo transformados em calor. Este calor gerado é dissipado para a peça que está sendo usinada, para o meio ambiente, para a ferramenta de corte e, a maior parte, transferida para o cavaco (TRENT e WRIGHT, 2000).

O aquecimento da zona de corte traz, como resultado, a redução da resistência ao cisalhamento do material, facilitando o corte. Entretanto é costumeiro que ocorram problemas dimensionais devido à dilatação térmica e a promoção de transformações de fase nas regiões subsuperficiais, alterando suas propriedades mecânicas.

Pode-se afirmar que existem três principais fatores responsáveis pela elevação da temperatura durante o processo: o calor gerado na zona primária de cisalhamento, o calor gerado na zona secundária de cisalhamento e o calor gerado na interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. NG et al. (1999) estimam que a taxa de deformação plástica na zona primária situa-se entre 10^3 e 10^4 s⁻¹, dependendo da velocidade de corte.

Para o processo de dissipação há o calor perdido por dissipação no cavaco, o calor dissipado para a peça, o calor perdido para o meio ambiente (fluidos de corte ou ar) e o calor dissipado pela ferramenta de corte, como uma natural equação de balanço energético. O calor transmitido à ferramenta é, dentre os citados, o mais preocupante, uma vez que, embora se estime que este represente somente um percentual estimado em no mínimo 5 e no máximo 20% do total do calor gerado, o aumento de temperatura na ferramenta é considerável, podendo comprometer significativamente a resistência da mesma (YOUNG, 1996; LONGBOTTOM e LANHAM, 2005). Esses autores citam ainda que o calor transferido para o cavaco varia entre 75 a 90% do calor gerado e o restante é absorvido pela peça. Como o calor é um fator primordial no resultado da vida da ferramenta as faixas de velocidade de corte e de avanço devem ser cuidadosamente definidas.

Os métodos mais comumente utilizados na avaliação de temperatura se baseiam nas propriedades de condução ou de radiação do calor. No segundo caso, objeto de interesse no presente trabalho, a variação no comprimento das ondas de radiação infravermelha é usada para determinação da temperatura. LONGBOTTOM e LANHAM (2005) citam que os pirômetros ou termômetros ópticos podem ser usados para medir o calor irradiado diretamente do ponto de contato peça-ferramenta ou por meio da utilização de cabos de fibra óptica que passem ou pela ferramenta ou pelo corpo de prova cuja temperatura se deseja medir.

Dentre as vantagens no uso de sensores infravermelhos pode-se citar que eles não mantêm contato com o objeto cuja temperatura se deseja medir, têm respostas rápidas nas variações bruscas de temperatura e apresentam facilmente a medição efetuada sem interferir na distribuição de calor. Como o espaço ao redor do ponto de contato peça-ferramenta é restrito e os gradientes térmicos sofrem variações bruscas, este se torna um dos métodos mais precisos de medição de temperatura. A calibração do nível de emissividade correto é relativamente simples.

Por outro lado, cavacos e fumos oriundos do processo de corte podem interferir no processo de medição de temperatura, entretanto, é possível utilizar um pirômetro com duas faixas de comprimento de onda diferentes, com frequências próximas da luz infravermelha, o que soluciona este problema. A utilização de fluido de corte, entretanto, impede a utilização deste método.

As câmaras de captação de radiação infravermelha e os escâneres de linha são equipamentos que ganharam importância com a possibilidade do tratamento das imagens geradas, podendo produzir mapas das linhas isotérmicas da área estudada. Por meio da utilização de programas computacionais pode-se visualizar, captar, gravar e imprimir as zonas de transiência de temperatura da região medida, com utilização de diferentes cores para melhor ilustrar o comportamento dos fluxos térmicos.

Uma câmara de infravermelho também pode fornecer bons resultados realçando a variação de calor durante o processo de corte. É importante que seja feita uma adequada calibração da emissividade da câmara pois, uma calibração incorreta pode fazer com que a temperatura lida seja muito mais alta ou muito mais baixa do que a temperatura real. Usa-se pintar de preto o objeto a ser avaliado de forma que este padrão de emissividade conhecido possa permitir os ajustes iniciais necessários.

Neste trabalho serão duas câmeras termográficas para determinação da temperatura durante a operação de fresamento frontal discordante a seco do aço ferramenta VHSUPER temperado e revenido (dureza média de 46,6 HRc). Pretende-se avaliar a influência do material da ferramenta (duas classes de metal duro revestido e classe de cermet) e dos parâmetros velocidade de corte e avanço por dente sobre a temperatura de usinagem.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o corpo de prova foi utilizado a aço ferramenta Villares VHSUPER (propriedades e aplicações similares aos aços ABNT H13 e DIN 1.2367) com dimensões de 262 x 242 x 86 mm. Foram escolhidas três classes de pastilhas aplicáveis aos trabalhos de fresamento de aços alta-liga: uma classe de cermet (CT530) e as outras duas de metal duro com revestimento PVD de TiCN + TiN (GC1025) e TiN + TiCN + Al₂O₃ (GC4040) respectivamente. As ferramentas foram fornecidas pela Sandvik Coromant.

Os testes foram executados no centro de usinagem com potência de 9 kW e rotação máxima de 7500 rpm, equipado com comando numérico Siemens 810D. Para as medições de temperatura foram utilizados os seguintes equipamentos:

câmara termográfica ThermaCAM™ P20, Fig. (1a); câmara termográfica Agema, Fig. (1b); gravador de vídeo Sony Video Walkman GV-S50 NTSC e termo-higrômetro Minipa MT-241.

A câmara termográfica Agema, Fig. (1b), geradora das imagens gravadas, cujo levantamento posterior permitiu a elaboração dos gráficos, foi posicionada a 1,2 m de altura acima do piso, sobre um tripé, em alinhamento com o percurso do corpo de prova sob a fresa e a 1 m de distância da região de corte, vide Fig. (2), de forma a abranger o modelo usinado, a região de corte e a ferramenta em ação de corte. A câmara termográfica ThermaCAM™ P20, Fig. (1a), foi operada sobre o ombro do operador, que permaneceu de pé, ao lado da primeira câmara, permitindo comparações posteriores com os dados levantados pela primeira.



Figura 1 – (a) câmara termográfica ThermaCAM™ P20 e (b) câmara termográfica Agema.

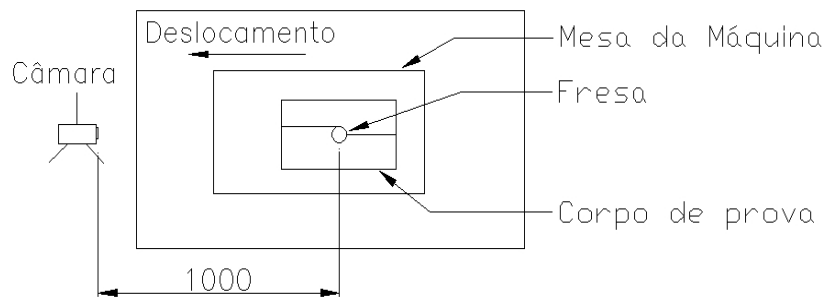


Figura 2 – Vista superior do sistema de medição de temperatura.

Na câmara termográfica Agema, Fig. (1b), a emissividade foi ajustada para 0,75 pois a variação do acabamento das fontes (fresa, peça, pastilhas e cavaco) tornava impossível determinar este valor com exatidão. A câmara foi conectada ao gravador de vídeo, possibilitando a captação da evolução da temperatura durante cada ensaio, desde o contato da ferramenta com a peça até a sua saída ao final de um passe, com leituras efetuadas a cada segundo.

De posse deste vídeo foi elaborado um minucioso levantamento de todos os valores de temperatura máxima encontrados, de forma a serem calculados a média e o desvio padrão para a confecção de gráficos. Observa-se na Fig. (3) que a temperatura máxima da região definida por uma circunferência é apresentada em graus Celsius no canto superior direito e a data, horário da gravação, emissividade ajustada e a ampliação da imagem, na parte inferior.

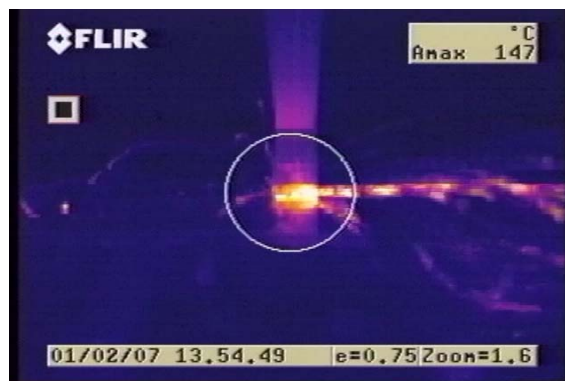


Figura 3 – Termografia obtida com a câmara Agema.

Com a câmara termográfica ThermaCAM™ P20, também foi ajustada para um valor de emissividade igual a 0,75 pelos mesmos motivos, foi possível detectar o calor na região de contato peça-ferramenta e das demais fontes ao redor, como a temperatura dos cavacos resultantes do processo. Na Fig. (4) é possível observar a temperatura na região de contato peça-ferramenta e em alguns cavacos expulsos da região de corte. Ao lado direito os padrões de cores empregados nas análises das isotérmicas geradas pelas fontes de calor.

Embora a câmara termográfica ThermaCAM™ P20 possua o recurso de gerar imagens que podem ser tratadas, gerando mapas das linhas isotérmicas da área estudada, este recurso não foi útil neste caso devido não somente à natureza dinâmica do processo de fresamento, mas também aos inúmeros parâmetros de corte que foram empregados durante os testes. A utilização de diferentes cores para melhor ilustrar o comportamento dos fluxos térmicos é melhor aproveitada quando a fonte geradora é estática ou o número de medições é pequeno.

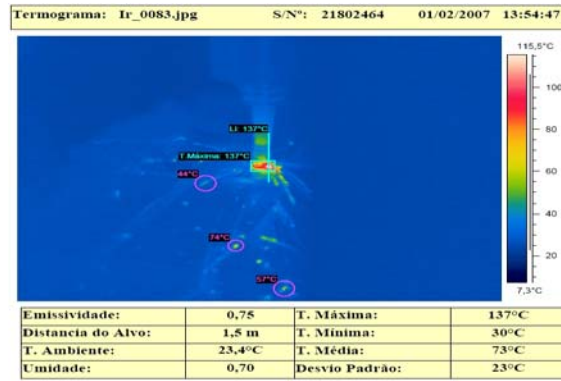


Figura 4 – Termografia obtida com a câmara ThermaCAM™ P20.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados apurados, foi possível a elaboração dos gráficos de temperatura média em função dos parâmetros de corte e ferramenta utilizada. Nas figuras a seguir estes resultados podem ser melhor avaliados. As Fig.s (5), (6) e (7) mostram a influência da velocidade de corte sobre a temperatura. Cada um dos gráficos representa os resultados dos diferentes valores de avanço empregados ($f_z = 0,10, 0,15$ e $0,20$ mm.rev⁻¹, respectivamente) para a pastilha GC1025. Observa-se que sob velocidades de corte mais baixas ($v_c = 120$ e 200 m.min⁻¹) há uma ligeira diminuição da temperatura com o aumento do avanço. No emprego do avanço mais elevado ($f_z = 0,20$ mm.rev⁻¹), entretanto, este comportamento é mais discreto, Fig. (7), com os valores de temperatura bastante próximos para as três velocidades de corte empregadas.

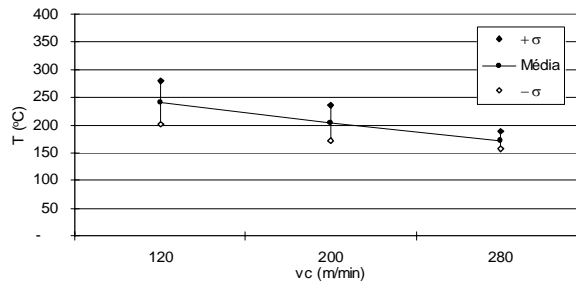


Figura 5 – Temperatura em função da velocidade de corte (GC1025 – $f_z = 0,10$ mm.rev⁻¹).

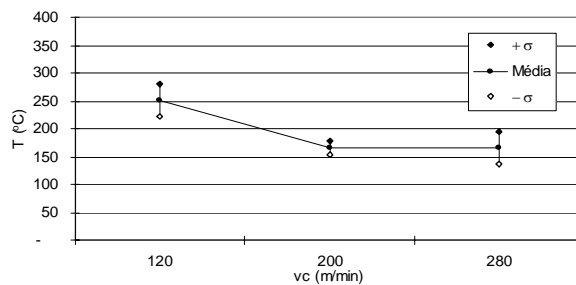


Figura 6 – Temperatura em função da velocidade de corte (GC1025 – $f_z = 0,15$ mm.rev⁻¹).

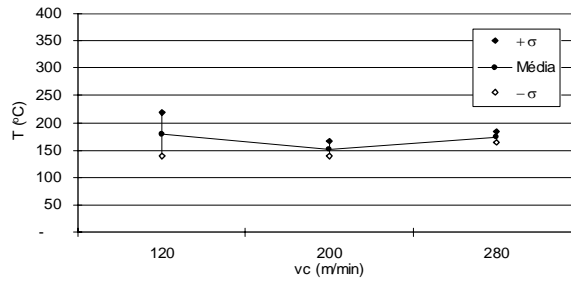


Figura 7 – Temperatura em função da velocidade de corte (GC1025 – $f_z = 0,20 \text{ mm.rev}^{-1}$).

Com a elevação dos parâmetros velocidade de corte e avanço por aresta esperar-se-ia a elevação da temperatura de fresamento. Entretanto, alguns resultados se mostraram contraditórios a esse respeito, provavelmente devido ao fato de não ser possível captar a temperatura sempre no mesmo ponto, ou seja, é possível que os termogramas tenham sido tirados em diferentes momentos ao longo do percurso efetivo de corte e, conseqüentemente, durante a remoção de espessuras de corte distintas. Dessa forma temperaturas diferentes foram registradas.

As Fig.s (8), (9) e (10) apresentam os resultados de temperatura para a ferramenta cermet (CT530). Neste caso nota-se a elevação da temperatura à medida que a velocidade aumenta, fato não observado para a ferramenta GC1025. A razão para tal comportamento reside, provavelmente, na condutividade térmica do cermet, a qual é muito inferior à do metal duro ($0,052 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$ contra $0,42 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$, conforme MACHADO e DA SILVA, 1999), fazendo com que menos calor seja conduzido para ferramenta e promovendo temperaturas mais elevadas na região de acesso da câmara infravermelha. Comparando os três gráficos, entretanto, nota-se que o método empregado não é capaz de detectar, de forma significativa, a influência do avanço sobre a temperatura de fresamento.

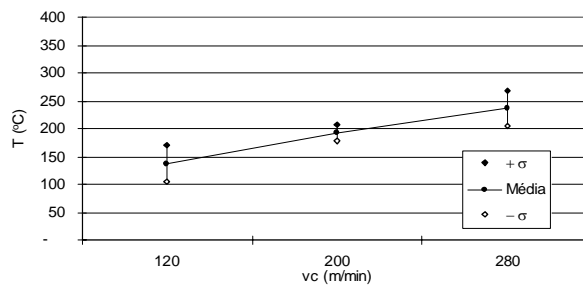


Figura 8 – Temperatura em função da velocidade de corte (CT530 – $f_z = 0,10 \text{ mm.rev}^{-1}$).

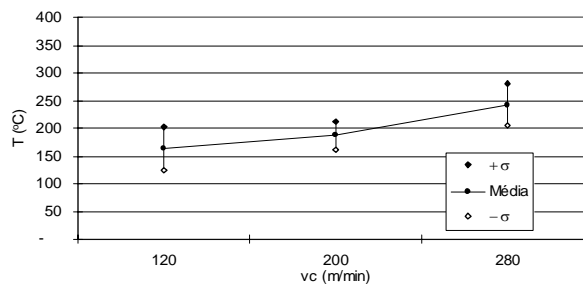


Figura 9 – Temperatura em função da velocidade de corte (CT530 – $f_z = 0,15 \text{ mm.rev}^{-1}$).

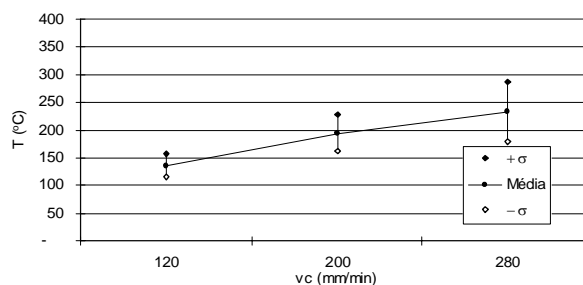


Figura 10 – Temperatura em função da velocidade de corte (CT530 – $f_z = 0,20 \text{ mm.rev}^{-1}$).

As Fig. (11), (12) e (13) mostram a influência do avanço sobre a temperatura de fresamento durante o corte com a ferramenta GC4040 (metal duro revestido com TiN + TiCN + Al₂O₃). Tem-se, neste caso, um comportamento bastante semelhante ao descrito para a ferramenta GC1025 [Fig. (5), (6) e (7)].

De um modo geral, os resultados encontrados sugerem que o substrato da ferramenta afeta a temperatura de forma mais acentuada do que o seu revestimento, pois caso contrário, a ferramenta GC4040, que possui cobertura de Al₂O₃, seria responsável por temperaturas superiores à GC1025. As altas temperaturas promovidas pelo cermet, o qual não possui revestimento, podem ser justificadas pela sua baixa condutividade térmica.

Os resultados encontrados estão coerentes com a literatura: testes realizados por DEWES et al. (1999) indicaram valores de temperatura na interface peça-ferramenta entre 198 e 301 °C (utilizando termopares implantados) durante o fresamento do aço AISI H13 (dureza média de 52 HRC) com fresa de topo esférica de metal duro revestido com TiCN e empregando velocidades de corte de zero até 200 m.min⁻¹.

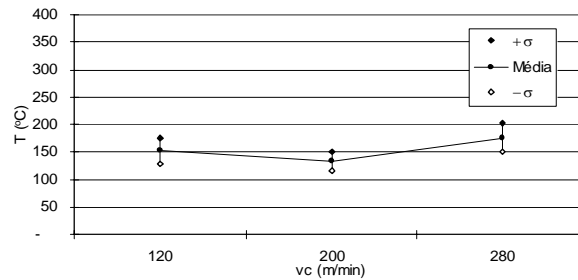


Figura 11 – Temperatura em função da velocidade de corte (GC4040 – $f_z = 0,10 \text{ mm.rev}^{-1}$).

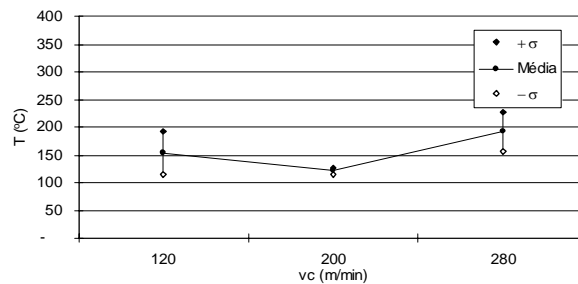


Figura 12 – Temperatura em função da velocidade de corte (GC4040 – $f_z = 0,15 \text{ mm.rev}^{-1}$).

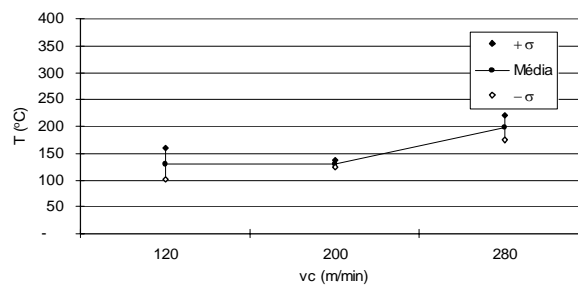


Figura 13 – Temperatura em função da velocidade de corte (GC4040 – $f_z = 0,20 \text{ mm.rev}^{-1}$).

4. CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios para a medição da temperatura de usinagem durante a operação de fresamento conclui-se que:

- A temperatura de usinagem aumenta com a velocidade de corte, entretanto, a câmara infravermelha não é capaz de detectar a elevação da temperatura com o aumento do avanço, provavelmente porque a coleta de dados é feita em diferentes momentos, isto é, para diferentes espessuras de corte.
- O substrato da ferramenta mostrou ter maior influência sobre a temperatura do que seu revestimento, ou seja, a ferramenta cermet, que possui menor condutividade térmica e não é revestida, propiciou temperaturas mais elevadas do que as ferramentas de metal duro revestidas.
- A utilização da técnica de medição de temperatura por radiação infravermelha em operações de fresamento exige a utilização de equipamentos capazes de operar a uma frequência variável e idêntica a do eixo-árvore da máquina-ferramenta, de modo a evitar que a variação da espessura de corte afete os resultados das medições.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Rede de Materiais para Usinabilidade Melhorada (REMAUSME), ao CNPq, à Villares Metals S/A, à Sandvik Coromant, à Companhia Energética de Minas Gerais e à Traterminas Tratamento Térmico Ltda.

6. REFERÊNCIAS

- Dewes, R. C., Ng, E., Chua, K. S., Newton, P. G., Aspinwall, D. K. "Temperature Measurement When High Speed Machining Hardened Mould/Die Steel". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 92-93. pp. 293-301. London: Elsevier, Artigo, 1999. 9 p.
- Komanduri, R. e Hou, Z. B. "A Review of the Experimental Techniques for the Measurement of Heat and Temperatures Generated in Some Manufacturing Processes and Tribology". London, England: *Tribology International*, Vol. 34, pp. 653 – 682. Artigo, 2001. 30 p.
- Longbottom, J. M. e Lanham, J. D. "Cutting Temperature Measurement While Machining – a Review". *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*. Emerald. Vol. 77/2. pp. 122 – 130, Group Publishing Limited. Artigo, 2005. 9 p.
- Machado, A. R. e da Silva, M. B. "Usinagem dos Metais". 4. ed. Uberlândia: Editora Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Apostila. 1999. 224 p.
- Ng, E., Aspinwall, D.K., Brazil, D. e Monaghan, J. "Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol.39. pp. 885-903. Pergamon. Artigo, 1999, 19 p.
- Shaw, M.C. "Metal Cutting Principles". Oxford, UK. Oxford University Press, 1984. 594 p.
- Trent, E. M. e Wright, P. K. "Metal Cutting". 4th ed. USA: Butterworth-Heinemann. 2000. 446 p. ISBN 0-7506-7069-X.
- Young, H-T. "Cutting Temperature Responses to Flank Wear". *Wear*. Vol. 201. pp. 117-120, Elsevier. Artigo, 1996. 4 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

TEMPERATURE MEASUREMENT DURING MILLING OF A TOOL STEEL WITH COATED CARBIDE AND CERMET INSERTS

José Luiz Silva Ribeiro, ribeirojls@pucminas.br¹
Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br²
Roberto Márcio de Andrade, roberto@demec.ufmg.br²
Herbert Geovane de Carvalho, herbertg@cemig.com.br³.

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - Av. Dom José Gaspar, 500 - Cor. Eucarístico - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 30535-901.

²Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 31270-901.

³Cemig - Companhia Energética de Minas Gerais - Av. Barbacena, 1600 - Santo Agostinho - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 30190-924.

Abstract. *The principal aim of this paper is to investigate the influence of tool material, cutting speed and feed rate per tooth on the temperature when milling a tool steel with coated carbide and cermet inserts. An infrared camera was used to measure cutting temperature. The results indicated that temperature increases with cutting speed, however, the equipment was not capable to detect an increase in temperature as feed rate is elevated, probably due to the variable chip thickness typical of milling operations. Additionally, higher temperatures were recorded using the cermet insert owing to its inferior thermal conductivity compared to the coated carbide tools.*

Keywords: *temperature, milling, infrared camera, coated carbide, cermet.*