

CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE USINAGEM

Vitor Tomaz Guimarães Naves¹

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia.
vitortomaz@gmail.com

Nelis Evangelista Luiz²

SIN Sistema de Implante
nelislui@ufu.mecanica.br

Álison Rocha Machado³

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia.
alissonm@mecanica.ufu.br

Noelio Oliveira Dantas⁴

Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia.
Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia.
noelio@ufu.br

Resumo: *Existe um grande interesse em pesquisar a influência da temperatura em processos de usinagem porque que muitas vezes influência diretamente na vida útil das ferramentas de corte bem como no acabamento final das peças usinadas, sendo alvo de interesse de muitas empresas envolvidas com projetos de fabricação. O presente trabalho descreve os detalhes construtivos, o método de calibração e a utilização de um termopar ferramenta-peça para medição da temperatura média de corte, no processo de torneamento, o sistema foi testado durante a usinagem de um aço de livre-corte com ferramenta de aço-rápido. Verificou-se a influência do forno na calibração (histerese do forno de indução), por fim é apresentada a curva de calibração do termopar construído.*

Palavras-chave: método do termopar ferramenta-peça, usinagem de aços de livre corte, temperatura de corte.

1. INTRODUÇÃO

Em usinagem praticamente toda a energia consumida é dissipada por meio de calor. Apenas uma pequena porcentagem que varia de 1 a 3% não é convertida em energia térmica. Parte desta pequena porção fica retida no sistema como energia elástica, e outra parte está associada à geração de novas superfícies (peça e cavaco) segundo Machado e da Silva (2004).

A temperatura desenvolvida durante a usinagem é um parâmetro que depende, em maior ou menor escala, dos parâmetros metalúrgicos do material da peça. Por este motivo, alguns pesquisadores utilizam a temperatura de usinagem como critério de avaliação da usinabilidade (Trent, 1991).

A Figura 1 representa as três zonas distintas, onde o calor pode ser gerado em usinagem.

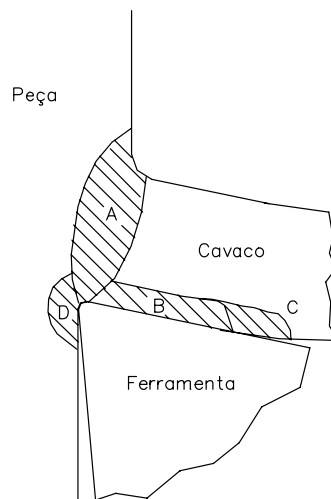


Figura 1 - Zonas de geração de calor em usinagem. Machado e da Silva (2004)

São elas:

- zona de cisalhamento primário, zona A da Figura 1.
- zona de cisalhamento secundário, zonas B e C da Figura 1.
- zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, zona D da Figura 1.

A maior parte do “calor gerado” é dissipado pelo cavaco, uma pequena porcentagem é dissipada pela peça e uma outra para o meio ambiente. A outra parte vai para ferramenta cortante, que é a utilizada para desbastar o material. Apesar de este último representar apenas pequenos percentuais (8 a 10%), o aumento da temperatura associado com este calor é significativo, podendo chegar, em certos casos, a 1100 °C, o que compromete, fortemente, a resistência da ferramenta. Logo influenciará na vida útil da ferramenta segundo Machado e da Silva (2004).

A equação de balanço energético para a distribuição de temperatura na região de corte é dada pela Equação (1).

$$Q_z + Q_{a_1} + Q_{a_2} = Q_c + Q_p + Q_{ma} + Q_f \quad (1)$$

onde :

Q_z = calor gerado na zona de cisalhamento primário.

Q_{a_1} = calor gerado na zona de cisalhamento secundário.

Q_{a_2} = calor gerado na zona de interface peça-superfície de folga da ferramenta.

Q_c = calor dissipado pelo cavaco.

Q_p = calor dissipado pela peça.

Q_{ma} = calor dissipado pelo meio ambiente.

Q_f = calor dissipado pela ferramenta de corte.

O calor gerado durante a execução de um determinado processo pode muitas vezes, trazer danos ou benefícios para o processo de usinagem. Sabe-se que a existência das altas temperaturas durante o processo de usinagem acelera os mecanismos de desgaste termicamente ativados e, também, promove a redução do limite de escoamento das ferramentas de corte. Por outro lado, o calor gerado nos planos de cisalhamento vai reduzir a resistência do material da peça favorecendo a formação do cavaco.

Vários métodos, práticos e analíticos, vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de determinar esta temperatura, mas, devido às dificuldades impostas pelo processo, nenhum deles é universalmente aceito (Machado e da Silva, 2004). O sistema do termopar ferramenta-peça é considerado um dos mais eficientes, pois monitora a temperatura da interface. Entretanto, a calibração correta de um sistema de temperatura é de grande importância para a obtenção de

resultados coerentes ao fenômeno de geração de calor em regiões de cisalhamento nos processos de usinagem.

Para a medição da temperatura de corte na usinagem deve-se ter o conhecimento de todas as condições dinâmicas a que o processo estará submetido, o que poderá trazer dificuldades durante o momento da medição. Sabe-se que a interface cavaco-ferramenta é praticamente inacessível, e por isso os processos de medição de temperatura tornam-se um tanto imprecisos. Existem várias técnicas e métodos, práticos e analíticos, desenvolvidos com o intuito de determinar a temperatura ali, mas há uma grande dificuldade para se chegar àquela região, e, portanto, nenhum deles é universalmente aceito (Machado e da Silva, 2004).

Entre os métodos práticos utilizados para se determinar a temperatura de usinagem, podem-se destacar os seguintes: termopar ferramenta-peça, irradiação térmica, termopares implantados, vernizes termosensíveis, técnicas metalográficas, pós-químicos, medição utilizando o filme PVD, que são bem descritos por Machado e da Silva (2004).

O método do termopar ferramenta-peça, mede a temperatura média da interface cavaco-ferramenta por meio de um fenômeno físico conhecido como efeito “Seebeck” (Borchardt & Gomes, 1979). Segundo este efeito a presença de dois materiais diferentes conectados em um circuito, conforme representado na Figura 2, com suas extremidades submetidas a temperaturas diferentes, gera-se no circuito uma força eletromotriz, cuja a grandeza dependerá dos materiais e da diferença de temperatura entre as juntas (Borchardt & Gomes, 1979).

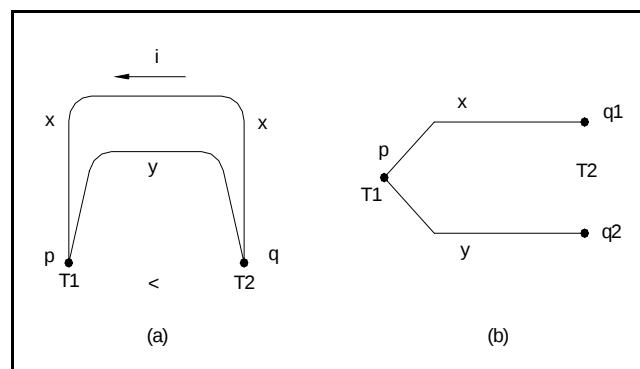


Figura 2 – Princípio dos termopares, onde p é a junta quente, q a junta fria, x o primeiro material e y o segundo (a) Corrente termoelétrica (b) Circuito termoelétrico onde a junção q foi aberta (Borchardt & Gomes, 1979)

A partir do conhecimento do efeito “Seebeck” são confeccionados termopares para a medição da temperatura de usinagem, onde o material da peça e o material da ferramenta são os constituintes do termopar. Como, durante a usinagem, a superfície inferior do cavaco escoa sobre a superfície da ferramenta e segundo Trent (1991) existe uma zona de total aderência entre a ferramenta e o cavaco, assim, existirá uma junção (junta quente) caracterizando, assim, um termopar. Vale ressaltar que, para a utilização deste método, dois requisitos devem ser satisfeitos, isto é, ambos os materiais (ferramenta e peça) devem ser condutores e deve-se isolar a peça e a ferramenta eletricamente. No LEPU há um dispositivo que permite captar o sinal elétrico do circuito ferramenta-peça desenvolvido e detalhado por Fernandes (1992).

Para se obter a relação entre a força eletromotriz gerada e a temperatura da junta se faz necessário calibrar o sistema de termopar. A calibração é feita para cada par de materiais e em faixas de temperaturas a que estes materiais estarão submetidos. Em posse da curva de calibração o próximo passo para se determinar a temperatura de usinagem é fazer uma relação o sinal de gerado durante o processo de usinagem e a curva de calibração. Esta relação se faz pelo fato de correlacionar a temperatura de usinagem e a milivoltagem gerada. Um equipamento apropriado é capaz de obter os pontos de tensão (força eletromotriz) durante a usinagem.

2. METODOLOGIA PARA A CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR

Para a calibração do sistema criou-se um termopar confeccionado por duas hastes, uma do material da peça e outra do material da ferramenta. Neste caso, o material da peça foi um aço de corte-fácil, normalmente utilizado na fabricação de peça de pequenas dimensões, com baixas resistências mecânicas, em tornos automáticos na produção seriada. O material das ferramentas foi aço-rápido AISI M2. A Figura 3 mostra o termopar com a fiação adequada para a calibração.

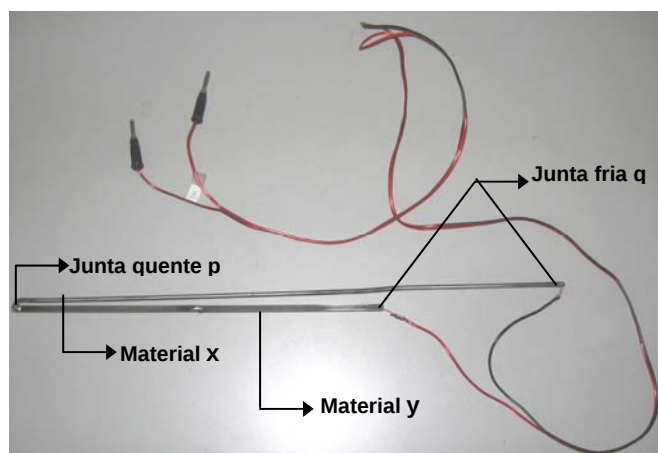


Figura 3 – Foto do sistema de termopar construído para a calibração

O próximo passo foi levar o termopar a um forno e aquecê-lo a temperaturas próximas aquelas obtidas durante a usinagem. Um forno de aquecimento por indução, do LNMIS (Laboratório de Novos Materiais Isolantes e Semicondutores) da Universidade Federal de Uberlândia, foi utilizado para fornecer calor à junta quente.

As características deste forno era a facilidade que ele possui de chegar a temperaturas acima de 1000°C. Através de um sistema elétrico e por uma fonte de tensão, aplicou-se uma corrente em uma determinada resistência que circundava todo o tubo externo do forno. Logo pelo efeito Joule o aquecimento se dava à medida que a tensão iria aumentando e consequentemente a intensidade da corrente também se elevava.

O forno apresentava um grau de inércia elevado, ou seja, tanto para o aquecimento como para o resfriamento era necessário um tempo de estabilização da temperatura, até que atingisse um regime permanente muito grande. Isto implicava que para obter uma determinada faixa de temperatura eram necessárias várias horas para que ocorresse a estabilização.

A temperatura interna do forno foi fornecida por um outro termopar, ferro-constantan, já previamente calibrado, para medir a temperatura próxima à junta quente.

À medida que a temperatura da junta quente entrasse em regime permanente era feita a leitura, em um multímetro com precisão de um milésimo. O período de estabilização da temperatura e leitura das diferentes milivoltagem ocorria em intervalos de 12 horas para cada faixa de 100°C. Variou-se de 100 a 1100°C a faixa de temperatura do forno. Sabe-se que a temperatura média de usinagem, para aplicações industriais, está em uma faixa de 200°C a 900°C dependendo das condições de corte (Trent, 1991), porém foi de interesse ampliar ou extrapolar esta faixa. Foram monitoradas temperaturas superiores a 1100°C, faixa em que foi observado que a resistência mecânica do material da peça já estava sendo comprometida.

Segundo Fernandes (1992) a precisão requerida para o termopar será função da junta fria utilizada. Muitos autores utilizam como junta fria a temperatura ambiente. Como esta varia a cada dia, não se garante repetibilidade nos ensaios. Neste trabalho é utilizado como junta fria a água

destilada mais gelo, proveniente de água também destilada, garantindo, assim, sua constância (0°C) medida com auxílio de um termômetro, com resolução de 0.5°C , a mistura água mais gelo foi mantido em recipiente térmico.

A figura 4 mostra uma foto dos equipamentos mencionados acima utilizados para fazer a calibração do termopar.

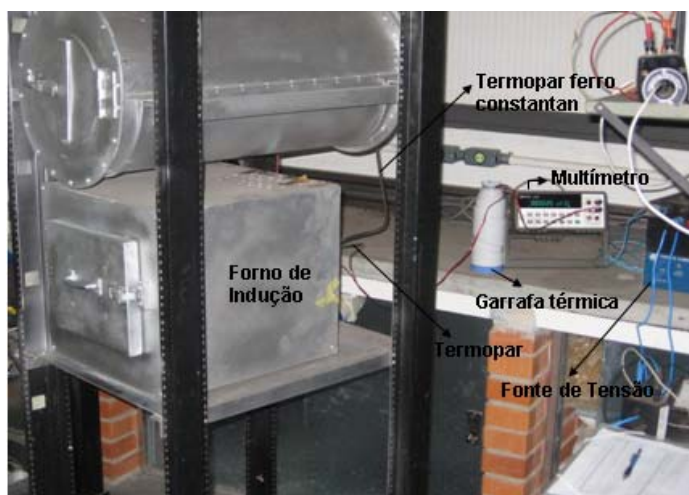


Figura 4 - Foto da montagem do sistema de calibração

A partir da descrição do equipamento mencionada anteriormente, foram coletados vários dados da temperatura interna do forno (mostrada por um termômetro) e a milivoltagem mostrada pelo multímetro. Para cada par de valores foi armazenado em uma tabela para a confecção da curva de calibração entre estes dois materiais do termopar. Para diminuir os possíveis erros de medição, o termopar foi posicionado o mais próximo do termopar ferro-constantan que era o responsável pela medição da temperatura do forno. O forno já apresentava um sistema de medição de temperatura interna previamente calibrado, o que foi muito importante para garantir a qualidade dos dados obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados da milivoltagem obtidos experimentalmente, seguidos das respectivas temperaturas, plotou-se uma curva de calibração do sistema proposto, mostrada na Figura 5. Esta curva fornece uma determinada temperatura para cada milivoltagem. Esta milivoltagem pode ser obtida experimentalmente através de um sistema de aquisição apropriado, quando se usina um determinado material. O ensaio realizado para a verificação da magnitude da temperatura gerada foi no torneamento.

As Figuras 5, 6 e 7 mostram o comportamento da temperatura encontrado durante os ensaios de usinagem a seco. Tomou-se o cuidado para evitar curto-circuito, fato comum quando o cavaco é contínuo. Observa-se que a temperatura da interface cavaco-ferramenta aumenta com o aumento da velocidade de corte, já para uma variação do avanço e da profundidade de corte o comportamento da temperatura pouco foi alterada. Um maior detalhamento sobre estes resultados será mostrado em trabalhos futuros.

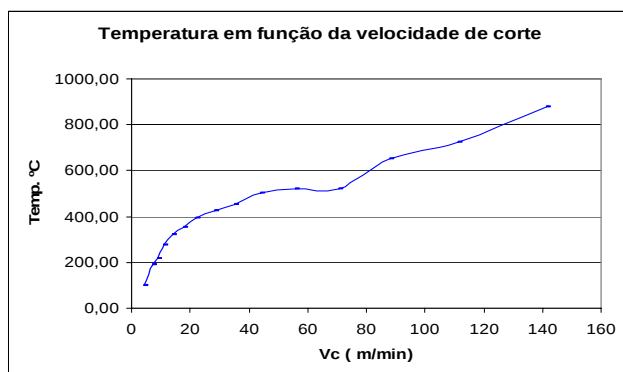


Figura 5 - Variação da Velocidade de corte m/min ($f = 0,138$ mm/ volta e $ap = 2$ mm)

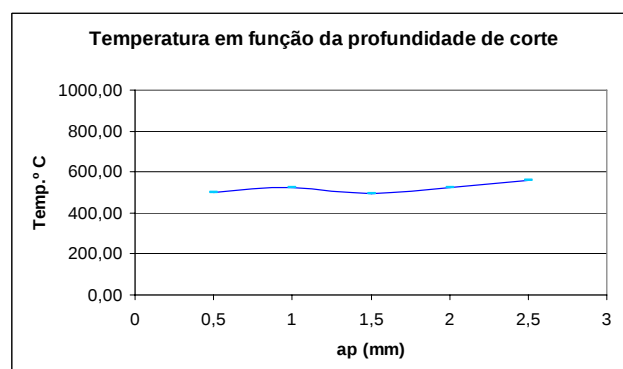


Figura 6 - Variação da Profundidade de corte mm ($V_c = 70,7$ m/min e $f = 0,138$ mm/volta)

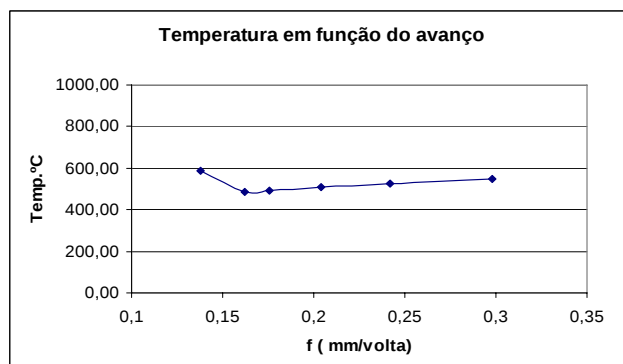


Figura 7 - Variação do Avanço mm/volta ($V_c = 70,7$ m/min $ap = 2$ mm)

Um aspecto importante, e que não pode ser desconsiderado, é a histerese do sistema, onde observou-se uma relação muito próxima da curva de calibração no aquecimento e no resfriamento. Em virtude, portanto desta aproximação de valores, resolveu-se apresentar neste trabalho apenas os valores referentes ao aquecimento. Estes valores demonstram uma característica intrínseca dos fornos à indução e concordam com a literatura (Fernandes & Machado, 1992), apesar de não ser devidamente explicada.

Curva de calibração

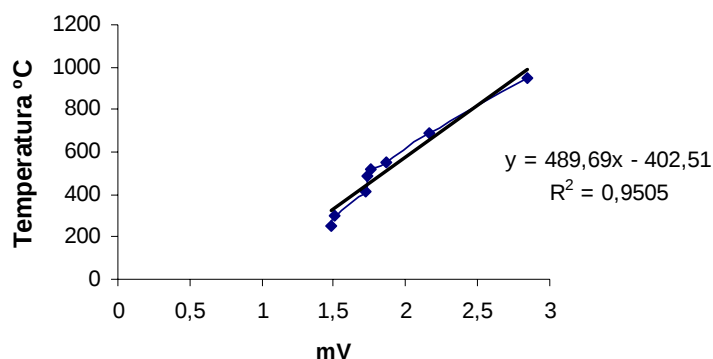


Figura 8 – Curva de calibração do termopar constituído de aço de corte-fácil e aço-rápido

De acordo com os valores monitorados, e após análise de regressão linear, obteve-se a seguinte função que relaciona a temperatura na região de corte com a voltagem monitorada (termopares), que é a curva de calibração do termopar, dado pela equação (2).

$$T = 489,69 \times (\text{mV}) - 402,51 \text{ } [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

A temperatura de usinagem é função da milivoltagem gerada durante o processo de cisalhamento do material no momento do arranque de cavaco. A faixa de temperatura deverá estar entre temperatura ambiente e 1100°C, que foi a faixa onde o termopar esteve sendo aquecido dentro do forno de indução.

A praticidade aliado ao baixo custo da construção do sistema termopar ferramenta-peça são algumas das grandes vantagens que este tipo de dispositivo, que visa quantificar o calor gerado em processos de usinagem, apresenta. Porém a limitação de aplicação deste sistema deve compreender velocidades de corte que gerem no máximo valores dentro do intervalo de temperatura que o mesmo fora calibrado. A metodologia da construção do sistema termopar ferramenta-peça também pode ser aplicável a outros tipos de materiais condutores dos quais se deseje investigar a temperatura de corte em processos de usinagem dos mesmos.

4. CONCLUSÕES

Com os dados da milivoltagem obtidos experimentalmente sendo estes seguidos das respectivas temperaturas, pode-se plotar uma curva de calibração do sistema proposto. Esta curva fornece uma determinada temperatura para cada milivoltagem. Esta milivoltagem pode ser obtida experimentalmente através de um sistema de aquisição apropriado, quando se usina um determinado material.

Para a comprovação da qualidade do experimento, foram feitos alguns pré-testes para analisar melhor o comportamento da temperatura. Fizeram-se diversos ensaios de usinagem no torneamento destes aços de corte e todos os resultados da temperatura estiveram dentro do esperado pela literatura, ou seja, dentre os parâmetros de corte analisados verificou-se que a velocidade de corte (V_c) exerce maior influência na temperatura de usinagem. A profundidade de corte (a_p) e o avanço (f) influem menos na temperatura. Isto ocorre, pois apesar de haver um aumento na taxa de remoção de material ocorre também um aumento do contato cavaco-ferramenta e dos planos de cisalhamento primário e secundário. Logo haverá maior dissipação de calor para a peça e para o cavaco.

O método aqui proposto demonstra ser eficiente e aplicável a outros diferentes tipos de materiais condutores de eletricidade, podendo ser utilizado para medir uma larga faixa de ensaio de usinagem bastando apenas uma nova calibração tal como fora descrita.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, à Fapemig, ao CNPq, e ao IFM pelo apoio financeiro. Ao Dr. Rosemar Batista Silva e ao Professor Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho pelo apoio técnico.

Referências Bibliográficas.

- Machado, A. R. & Silva, M. B., 2004, Usinagem dos Metais, Universidade Federal de Uberlândia.
- Fernandes, J. R. S. & Machado, A. R., 1992, Determinação da Influência do Comprimento de Contato Cavaco/Ferramenta na Temperatura de Corte, Relatório de Iniciação Científica DIRPE nº 052/92.
- Borchardt, I. G. & Gomes, A. F., 1979, Termometria Termoelétrica – Termopares, Ed. Sagra, Porto Alegre.

Vilarinho, L. O. & Machado, A. R. "Behaviour of Cutting Temperature during Machining of Gray Cast Iron Using the Tool Workpiece Thermocouple Method" Programa de Pós Grad. em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Trent, E. M., 1991, Metal Cutting, 3a edição, Butterworths, Londres.



16º POSMEC
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica



CALIBRATION OF A TOOL-WORKPIECE THERMOCOUPLE SYSTEM FOR CUTTING TEMPERATURE MEASUREMENT

Vitor Tomaz Guimarães Naves

Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia.
Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia.
vitortomaz@gmail.com

Nelis Evangelista Luiz

SIN Sistem of Implante
nelislui@ufu.mecanica.br

Álison Rocha Machado

Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia
alissonm@mecanica.ufu.br

Noelio Oliveira Dantas

Institute of Physics, Federal University of Uberlândia.
Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia.
noelio@ufu.br

Abstract: *Temperature generated during machining plays an important role in machining because it is the main reason for the rapid tool wear and consequently shortening of tool life as well it can adverse effect the surface quality of the machined component. Therefore, cutting temperature has been a topic of constant interest by worldwide manufacturing industries. This work describes constructive details, the calibration method and the application of the tool-workpiece thermocouple method to measure the mean cutting temperature during turning of free cutting steel with high speed steel Tools. The hysteresis of the induction oven where the system was calibrated was verified and considered in the linear regression of the calibration curve. The influence of parameters such as cutting speed, feed rate and depth of cut on the mean cutting temperature was studied.*

Key-words: *Tool-workpiece thermocouple technique, machining of free cutting steel, Cutting temperature.*