

# ANÁLISE DA TEMPERATURA NA REGIÃO DE CONTATO ENTRE A PEÇA E A FERRAMENTA PARA O MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES DE USINAGEM DE ALTO DESEMPENHO

João Eduardo Borelli<sup>a</sup>

Celso Aparecido de França<sup>b</sup>

Gilmar Caiado Fleury Medeiros<sup>c</sup>

Adilson Gonzaga<sup>d</sup>

<sup>a,b,c,d</sup> Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Visão Computacional, 13560-970, São Carlos, SP.  
E-mail: [jborelli@peterpan.sel.eesc.sc.usp.br](mailto:jborelli@peterpan.sel.eesc.sc.usp.br), [celsofr@zipmail.com.br](mailto:celsofr@zipmail.com.br),  
[gcaiado@sel.eesc.sc.usp.br](mailto:gcaiado@sel.eesc.sc.usp.br), [adilson@sel.eesc.sc.usp.br](mailto:adilson@sel.eesc.sc.usp.br)

## Resumo

O calor gerado na região de contato entre a peça e a ferramenta é considerado um importante fator para a medida do desempenho da ferramenta de corte no processo de usinagem. Conhecendo-se a temperatura, pode-se estabelecer uma relação entre desgaste da ferramenta com as demais variáveis envolvidas no processo. Este trabalho propõe o monitoramento da temperatura utilizando um sistema de visão artificial composto por uma câmera de infravermelho, uma *frame grabber* e um microcomputador. As imagens capturadas pela câmera são processadas no microcomputador através de um programa que fornece ao usuário uma interface para tomada de decisão. Um dos módulos do programa permite a geração de histogramas e de imagens segmentadas para a análise da temperatura segundo as especificações do usuário. Um outro módulo permite a extração de características que possam ser usadas para a classificação de padrões de estados de usinagem ou de estados da ferramenta.

**Palavras chave:** monitoramento de temperatura; usinagem; imagem infravermelho.

## 1. INTRODUÇÃO

O calor gerado na região de contato entre a peça e a ferramenta de corte é um parâmetro que permite a medida do desempenho desta durante o processo de usinagem. A contínua necessidade de aumento das velocidades de corte em processos de usinagem de alto desempenho tem impulsionado pesquisas de novos materiais resistentes a altas temperaturas assim como estudos da maximização da taxa de remoção de material (D'ERRICO, 1998). A medida da temperatura durante o corte é o fator mais importante na investigação do uso de ferramentas, permitindo controlar os fatores que influenciam no uso, na vida e no desgaste das mesmas (CASTO et al, 1994). A temperatura, também, influencia a precisão da máquina e a rugosidade superficial do acabamento (AY & YANG, 1997) (KLOCKE & EISENBLÄTTER, 1997).

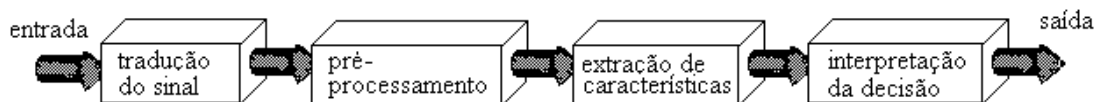
D'ERRICO(1998) propôs um sistema de controle adaptativo que funciona com retroalimentação em tempo real para monitoramento de temperaturas de corte em processos de torneamento. A temperatura de corte é estimada através da f.e.m. medida em um termopar que é inserido na ponta da ferramenta. LIN et al.(1990) desenvolveram um sistema que utilizou um pirômetro para medir temperatura da ferramenta em altas velocidades de corte e

validaram o modelo comparando com os resultados obtidos por Kato et al.(1980) que usaram o método dos pós metálicos. CASTO et al.(1994) realizaram uma abordagem múltipla para avaliação das temperaturas em ferramentas de cerâmica usando pós metálicos de temperaturas de fusão constantes e relataram as dificuldades para a implementação do método. AY et al.(1994) propuseram o uso de um conjunto de termopares extrafinos conectados na extremidade de corte da ferramenta.

Em 1997, AY & YANG (1997) usaram um sistema termográfico em sincronismo com um conjunto de termopares para analisar as variáveis durante o processo de usinagem. O sistema forneceu informações em forma de termogramas possibilitando a investigação da distribuição da temperatura nas ferramentas e como a transferência de calor pode afetar o uso, a vida e o desgaste da ferramenta. Em outra etapa foi usado um microscópio eletrônico para investigação da superfície da ferramenta.

O objetivo deste nosso trabalho é possibilitar a análise da temperatura gerada na região de contato peça-ferramenta durante as operações de torneamento de alto desempenho, e verificar sua influência no desgaste da ferramenta, permitindo identificar as melhores características a serem usadas no reconhecimento de padrões de estados de usinagem ou de estados da ferramenta. Para isso foi implementado um sistema composto de quatro módulos: aquisição da imagem, digitalização, pré-processamento e processamento. Uma câmera infravermelho, uma *frame-grabber* e o *software* desenvolvido compõem nosso sistema. O trabalho apresenta uma nova metodologia para controle de usinagem uma vez que na literatura especializada não se encontram trabalhos que relacionem reconhecimento de padrões e monitoramento de condições de usinagem através do uso de imagens de câmera infravermelho.

Como é muito difícil imitar o sistema visual humano totalmente, um sistema de máquina é projetado para tarefas específicas, tais como: reconhecimento de objetos, inspeção visual, controle de processos. A tarefa de visão da máquina pode ser dividida em quatro itens (NITZAN (1988)): tradução do sinal, pré-processamento, extração de características e interpretação (fig. 1).



**Figura 1.** Diagrama de blocos de um sistema de Visão Artificial.

Na *tradução dos sinais*, os sensores são responsáveis em transformar a energia luminosa em sinais elétricos e, a partir destes, uma cena digitalizada pode ser montada num “buffer” de memória. Como exemplo de sensores visuais temos as câmeras CCD, os fotodiodos e as câmeras de infravermelho, entre outros.

O *pré-processamento* melhora o sinal que vem do sensor, podendo ser implementado em *software* ou *hardware*. Os filtros utilizados para eliminar ruídos e os detectores de borda são exemplos de rotinas de pré-processamento.

A *extração de características* é a etapa onde as características relevantes do objeto, que melhor definam um modelo de entrada, são obtidas.

Na fase de *Interpretação* tenta-se encontrar em um banco de dados ou no banco de conhecimento, aquelas características que mais se aproximam das extraídas do objeto, para então compreender a cena e tomar uma decisão, seja ela de classificar ou de controlar um processo.

## 2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O *software* e o *hardware* envolvidos em um sistema de medida e monitoramento de temperatura devem possuir uma solução dedicada com funções específicas e com um nível de automação necessária para cumprir os seguintes requisitos: fornecer uma interface amigável com o usuário, calcular automaticamente as temperaturas em diferentes regiões do sistema e para diferentes materiais, mostrar as imagens da usinagem, mostrar as isotermas e permitir a automação na extração das características.

Para o monitoramento do desgaste da ferramenta em operação de torneamento de desbaste foram fixadas as condições de usinagem (item 2.1) e escolhidos cinco padrões de ferramenta: nova, boa, média, gasta e ferramenta no fim da vida, de maneira análoga aos trabalhos de RYABOV et al., 1996 e AY & YANG, 1997. Em seguida foram adquiridas as imagens e extraídas as características desses padrões.

O desenvolvimento do sistema está dividido em duas partes: *software* e *hardware*, detalhadas nos itens a seguir.

### 2.1 Hardware

Para aquisição das imagens da usinagem foi usada uma câmera infravermelho AGA Thermovision 720 adaptada a um sistema de acoplamento e a uma *frame grabber* (MÍROVIDEO DC30 Míro). O programa foi implementado em um microcomputador Pentium III, 450Mhz, 128 Mb de RAM. Para a aquisição de dados foi usado o *Labview* com *hardware National Instruments*.

A peça para o ensaio foi uma barra laminada de aço ABNT 1045 de 75mm de diâmetro e 600 mm de comprimento. A ferramenta usada foi um inserto Sandvik WNMG 06 04 08-PM, P15 com porta ferramenta Sandvik MWLNL2525-06. Foi utilizado um torno INDEX GU-600, comando Siemens 810D, Potência: 22 Kw, rotação máxima: 5000 rpm. Para a operação de torneamento, sub-operação de torneamento de desbaste a seco foram utilizados: profundidades de corte de 0.20 mm e 0.40 mm; avanços de 0.07 mm/r, 0.25 mm/r e 0.50 mm/r e velocidades de corte de 295 m/min, 396 m/min e 497m/min.

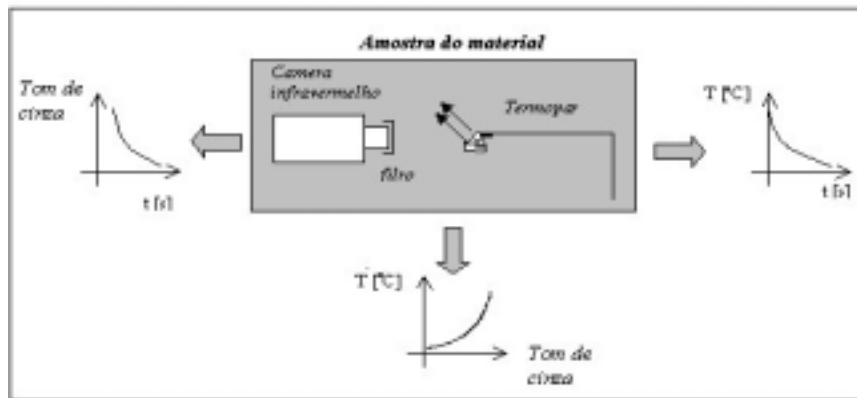
A câmera infravermelho foi fixada a uma distância de 300 mm da ferramenta, em seguida foram estabelecidas as condições de usinagem. Foi também utilizado um filtro de densidade neutra para evitar a saturação da câmera.

#### 2.1.1 Calibração da câmera de infravermelho

Para a medida da temperatura através da radiação infravermelho é necessário considerar parâmetros como a emissividade do objeto, a distância do objeto até a câmera, umidade relativa, temperatura atmosférica, temperatura refletida pelo ambiente (AY & YANG, 1997) assim como características da superfície do objeto (SOLOMAN, 1998).

Mantendo-se fixos os mesmos parâmetros em que se encontravam a câmera, a peça, a ferramenta e o cavaco durante a usinagem, aqueceu-se amostras de materiais retiradas imediatamente após o processo de usinagem e traçou-se suas respectivas curvas de temperatura de resfriamento em função do tempo. Para a medida da temperatura foi usado um termopar conectado à amostra e ligado a um sistema de aquisição de dados. A câmera de infravermelho foi usada para captar as imagens do resfriamento das amostras. Tais imagens foram posteriormente digitalizadas fornecendo imagens em tons de cinza pelo mesmo tempo de resfriamento das amostras. Através do processamento quadro a quadro destas imagens por intermédio de um programa desenvolvido, foi possível traçar as curvas de tons de cinza em função da temperatura para cada amostra. Eliminando-se a variável tempo, obteve-se como

resultado os gráficos relacionando tons de cinza com as respectivas temperaturas. Estes gráficos foram usados para traçar a curvas de calibração da câmera para cada amostra. Para que a faixa de temperatura dos materiais durante o processo de usinagem não saturasse os tons de cinza das imagens capturadas pela câmera, foi usado um conjunto de filtros de densidade neutra inseridos na extremidade da objetiva da câmera infravermelho durante as filmagens (figura 2). O número de filtros foi determinado experimentalmente.



**Figura 2** - Calibração da câmera de infravermelho.

Os dados da curva de calibração foram então usados para inicializar as variáveis do *software* possibilitando ao usuário segmentar regiões de interesse, medir temperaturas e traçar isotermas da ferramenta, peça, cavaco, de maneira mais precisa.

O termopar foi inserido em um orifício de 0.20 mm, previamente feito por processo de eletro-erosão na ponta da ferramenta de corte. O termopar ao aquecer gera uma tensão proporcional à temperatura.

## 2.2 Software

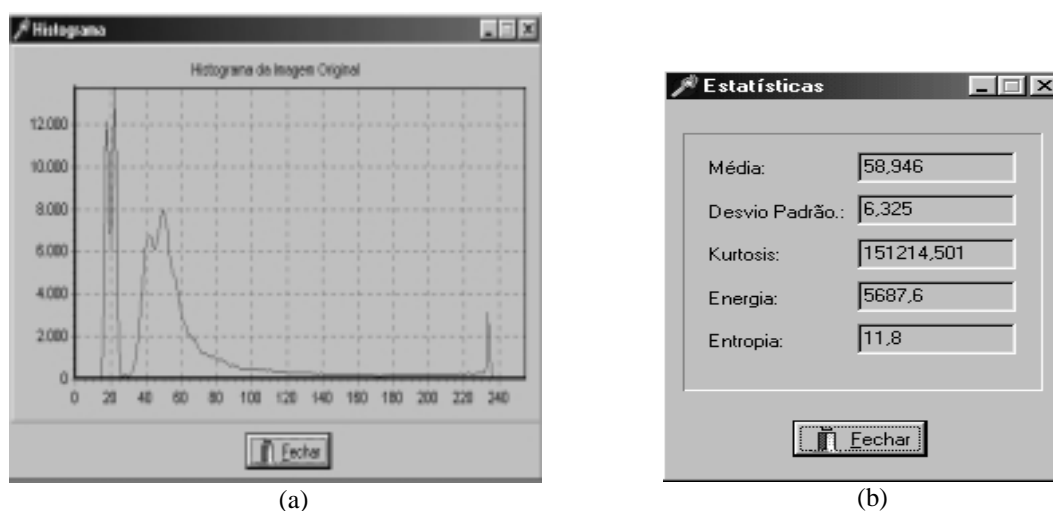
A interface para tomada de decisões foi desenvolvida em Delphi 4 (figura 3).



**Figura 3.** Interface para tomada de decisões. A imagem registra o momento da quebra da ferramenta com precisão de 1/60 segundos.

As funções do programa são direcionadas para cumprir os requisitos do sistema de monitoramento e análise da distribuição de calor durante o processo e também para definição dos padrões para o monitoramento.

Do lado esquerdo do formulário principal da figura 3 aparece a janela que contém a imagem original da câmera de infravermelho já digitalizada. O lado direito mostra a imagem processada através de um filtro, segundo a especificação do usuário. O cursor “valor” abaixo e à esquerda regula o tom de cinza desejado de “0”(preto) a “255”(branco), o que corresponde ao traçado de isoterma em torno do valor de temperatura e amplitude “ $\Delta$ ” previamente escolhidos. Os processamentos são realizados sobre o histograma da imagem. Um exemplo de histograma é mostrado na figura 4(a), sendo que na figura 4(b) temos as características extraídas deste histograma



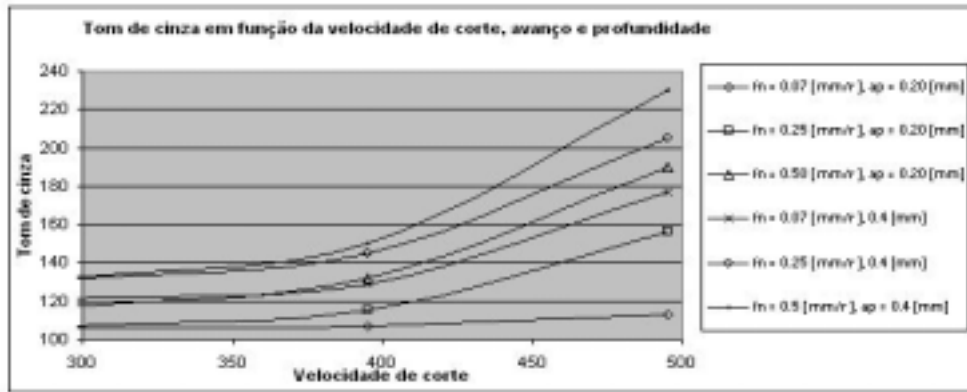
**Figura 4** – (a) Histograma de uma imagem, b) Características extraídas do histograma.

Através da calibração da câmera de infravermelho é possível configurar o *software* com os valores de limiar (*threshold*) para faixas de tons de cinza correspondentes às temperaturas de interesse do usuário assim como a escolha de níveis para as isoterma.

### 3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A luminosidade dos pixels ou tons de cinza apresentados nas imagens, como a da figura 3, são proporcionais à energia emitida pelo espectro infravermelho e, segundo a equação de Stefan-Boltzman, essa energia varia com a quarta potência da temperatura. De acordo com BER (1972), BER (1973), SHAW (1994) a temperatura varia com a velocidade de corte. Segundo a equação apresentada por D'ERRICO (1998), a qualidade de acabamento, performance e vida da ferramenta variam com a temperatura. Podemos então concluir que a luminosidade do pixel varia com velocidade de corte e pode ser considerado como um importante parâmetro para verificar a performance, qualidade de acabamento e vida da ferramenta.

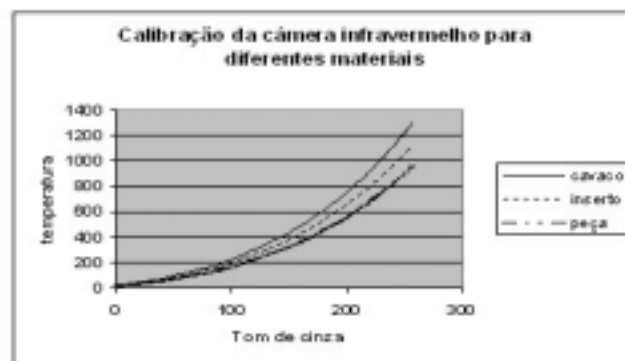
O gráfico da figura 5 mostra a variação dos tons de cinza em função da velocidade de corte.



**Figura 5.** Tom de cinza em função da velocidade de corte.

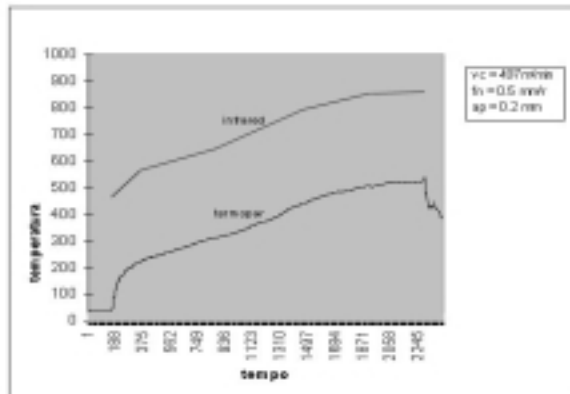
As temperaturas de usinagem aumentam com o aumento da velocidade de corte, mas também aumentam em proporções secundárias com o aumento do avanço e profundidade.

Os resultados da calibração da câmera de infravermelho são mostrados na figura 6. As diferentes curvas de calibração da câmera para os diferentes materiais (cavaco, inserto, peça) apresentadas já eram esperadas, pois diferentes materiais possuem propriedades e atributos diferentes, conforme descrito em AY & YANG (1997) e SOLOMAN (1998).



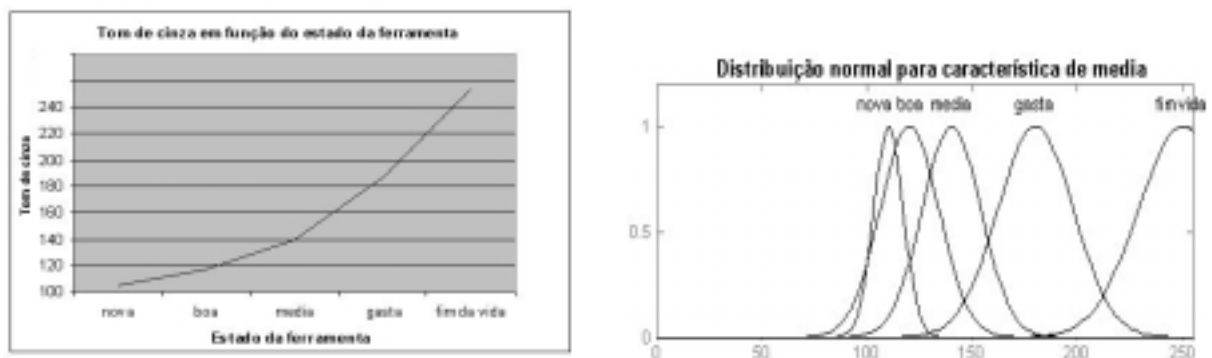
**Figura 6.** Calibração da câmera de infravermelho para diferentes materiais.

A figura 7 mostra a comparação das medidas fornecidas pelo termopar e pelo sistema desenvolvido para uma determinada condição de usinagem. A diferença de níveis entre as duas curvas é devido a natureza das medidas: o termopar mede a temperatura no interior da ferramenta e o software registra e converte a temperatura no ponto de contato peça-ferramenta. Além disso, devem ser considerados erros acumulados na calibração, resistência térmica na superfície de contato entre a ferramenta e o termopar (LIN et al, 1990), distância do termopar até a fonte de calor e erros do sistema de aquisição. As temperaturas no ponto de contato peça-ferramenta assemelham-se aos resultados obtidos por AY & YANG (1997) usando-se ferramentas novas. Muitos dos sinais captados pelo termopar foram descartados, pois além de serem instáveis, apresentavam vários tipos de ruídos. Os resultados mostrados na figura 7 para a propagação do calor no interior do material da ferramenta estão de acordo com os resultados apresentados por AY & YANG (1997) para a propagação do calor e aumento da temperatura no interior do material da peça.



**Figura 7.** Comparação da medida da temperatura fornecida pelo termopar no interior da ferramenta e temperatura no ponto de contato entre peça e ferramenta obtida pela câmera de infravermelho

Foram extraídas as seguintes características das imagens para cada padrão de ferramenta (nova, boa, média, gasta, fim de vida): média, variância, curtose, energia, desvio padrão, entropia. Através destas medidas é possível montar um vetor de características para controlar o processo de usinagem. O bom desempenho de um sistema de reconhecimento de padrões depende da escolha adequada de características discriminantes. A figura 8(a) mostra que a luminosidade dos pixels (temperatura) aumenta com o desgaste da ferramenta, e com base nestes dados é feita a avaliação da característica de média apresentado na figura 8(b). A comparação da distribuição normal de cada uma das características para cada estado padrão da ferramenta é usado como método de avaliação dessas características, e suas curvas devem estar o mais distante possível umas das outras. Para a característica de média, as curvas são discriminantes para os padrões de ferramentas no final da vida e de ferramentas gastas em relação às demais, mas não são discriminantes para os padrões de ferramentas novas, boas e médias entre si. Para separar estes três padrões foram escolhidas outras características como: variância, curtose, energia, desvio padrão, entropia, sendo que estas características foram suficientes para montar o vetor de características e para uma correta classificação das imagens e dos estados de ferramenta, como proposto inicialmente.



**Figura 8.** (a) Tons de cinza em função do desgaste da ferramenta a 497 m/min, (b) a distribuição normal da característica média para cada estado da ferramenta

A eficácia do sistema de medidas proposto está vinculada à eficiência de cada etapa isolada do sistema, desde a aquisição de imagens até o processamento, incluindo calibrações, aquisição de dados, entre outros aspectos.

Segundo embasamento teórico e resultados obtidos neste artigo, o monitoramento da temperatura é condição necessária para a o gerenciamento das condições de usinagem e este gerenciamento é de fundamental importância para automação. Com a apresentação desta nova metodologia, mostrou-se que os sistemas de visão artificial podem ser vistos como condição necessária para o monitoramento eficaz da temperatura, representando uma condição necessária para a automação do processo de usinagem.

## Referências Bibliográficas

- AY, H.; YANG, W.; WANG, J.A.(1994). “Dynamics of cutting tool temperatures during cutting process”, *Experimental Heat Transfer*, 7(3).
- AY, H.; YANG, W.(1997). “Heat transfer and life of metal cutting tool in turning”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Great Britain, Elsevier Science Ltd., Vol.41, no.3. pp.613-623.
- BER, A.(1972). “Relationship between thermal properties and flank wear of cemented carbide tools”, *CIRP ANNALS*, Vol.21-1, p. 21-22.
- BER, A.(1973). “The effect of abrasion and thermal properties of cemented carbide cutting tool grade on the flank wear characteristics”, *ASME Transaction Journal of Engineering for Industry*, Vol.956, august. p.794-79.
- CASTO, S.L.; VALVO, E.L.; PIACENTINI, M.; RUISI, V.F.(1994). “Cutting temperatures evaluation in ceramic tools: experimental texts, numerical analysis and SEM observation”, *CIRP ANNALS, Manufacturing Technology*, Hellweg Publishers LTD, Switzerland.
- D'ERRICO, G.E.(1998). An adaptive system for turning process control based on tool temperature feedback. *Journal of Materials Processing Technology*. 78 (1998) 43-47.
- KATO, S.; YAMAGUCHI, K.; HIRAIWA, Y. (1980). “Measurement of temperature distribution when tool using polders of constant melting point”, *ASME Journal of engineering for industry*, May, pp.123-128.
- KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G.(1997). “Dry cutting: keynote papers presented at the opening session”, *CIRP ANNALS, Manufacturing technology*, Hallway Publishers LTD, Switzerland.
- LIN, J.; CHEN, T.C.; WANG, C.I.(1990). “Development of infrared pyrometer with fiber optic for measuring cutting temperature at high speed cutting”, *ASME, PED. Monitoring and Control for Manufacturing Process*, v.44. pp.17-32
- NITZAN, D.(1988). “Three-dimensional Vision Structure for Robot Applications”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.10. no.3. May. pp. 291-309.
- RYABOV, O. (1996). “An in-process direct monitoring method for milling tool feature using laser sensor”, *Annals of CIRP, Technical Report*, Japan.
- SHAW, M.C.(1984). “Metal cutting principles”, *Oxford Science Publications Clarendon Press Oxford*.p.274-275.
- SOLOMAN, S.(1998). “Sensors handbook”, USA, McGraw-Hill. ISBN: 0-07-059630-1.