



## MELHORIAS NA INSTRUMENTAÇÃO NO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DESGASTE DE FRESA DE TOPO POR EMISSÃO ACÚSTICA (EA)

Cesar Abraham Flores Cisneros

Ivan Chabu

Carlos Chien Ching Tu

Gilmar Ferreira Batalha

Laboratório de Engenharia de Fabricação – Dpt. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos  
Escola Politécnica da USP - Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508.900 S. Paulo – SP.  
[cafcisne@usp.br](mailto:cafcisne@usp.br) , [ivan.chabu@poli.usp.br](mailto:ivan.chabu@poli.usp.br), [carlcctu@usp.br](mailto:carlcctu@usp.br) , [gilmar.batalha@poli.usp.br](mailto:gilmar.batalha@poli.usp.br)

**Resumo** Os sistemas de monitoramento nos processos de fabricação permitem atualmente dentre outras funções diagnosticar e melhorar o desempenho da máquina, verificar o estado de desgaste ou quebra da ferramenta, cuidar da geometria e do acabamento superficial da peça de trabalho ou em alguns casos acompanhar dentre outros fenômenos: a formação de cavaco e o consumo de energia. Na linha do monitoramento da ferramenta (TCM), neste caso mais especificamente no Monitoramento de Desgaste de Fresa de Topo, surgem dois enfoques principais: (1) melhoramento do sensoriamento (instrumentação ou hardware), e (2) aplicação de novas técnicas de processamento da informação (software). Neste sentido, o presente trabalho busca desenvolver técnicas de instrumentação para o sistema de monitoramento. Estas são: a localização do sensor na ferramenta, a utilização de um sensor pzt na captação dos sinais de emissão acústica, a eliminação de ruídos na alimentação da eletrônica da instrumentação com o uso de um transformador rotativo (primário na máquina e secundário no eixo da fresadora), pré-amplificação do sinal logo após ser captado pelo sensor para amplificá-lo frente a ruídos introduzidos na transmissão do sinal, controle da saturação dos componentes eletrônicos nas fases de amplificação evitando a distorção do sinal. Com estes aportes na instrumentação do sistema de monitoramento, busca-se cuidar da informação contida no sinal, uma vez que a confiabilidade dos sistemas de monitoramento depende fundamentalmente da informação contida no sinal. Caso contrário termina-se se processando informação com muito ruído e distorcendo as conclusões. O trabalho relata as atividades realizadas tendo em vista a implementação de um sistema de monitoramento do desgaste em fresas de topo.

**Palavras Chaves:** *monitoramento, desgaste, fresa de topo, instrumentação, emissão acústica.*

### 1. INTRODUÇÃO

Nos processos de usinagem o monitoramento de desgaste da ferramenta é de suma importância pelos motivos seguintes: (1) permite o controle das tolerâncias dimensionais e geométricas das peças usinadas, (2) garante o acabamento superficial especificado, (3) permite determinar o momento exato da troca da ferramenta e (4) antecipa o momento da quebra da ferramenta permitindo ter maior segurança, tanto da peça, como da máquina operatriz (Byrne et al, 1995, Al-Habaibeh 2000 e Tarnq 1996). Estes motivos têm influência sobre a qualidade do trabalho, sobre a produtividade e os custos e sobre a segurança do processo de fabricação. O monitoramento de desgaste da ferramenta está associado com a medição do desgaste da ferramenta. Existem dois

procedimentos na medição do desgaste da ferramenta: a medição direta; e medição indireta. A medição direta é realizada por comparação da geometria da ferramenta nova (no início da usinagem) com a geometria da ferramenta durante a usinagem. A medição direta pode ser realizada, desde com o auxílio de uma lupa, até com o uso de um microscópio mecânico auxiliado por uma câmera de vídeo para aquisição de imagens junto com “softwares” que permitem a manipulação destas e a medição da geometria da ferramenta. Obviamente, este tipo de medição precisa da parada do processo de usinagem e da retirada da ferramenta para poder realizar a medição do desgaste. A medição indireta mede o desgaste da ferramenta por métodos indiretos. Neste caso associa-se ao fenômeno do desgaste outras variáveis físicas. No caso de usinagem, o desgaste da ferramenta está associado com a força de corte. Quando a ferramenta estiver gasta, ela precisará de mais força para poder realizar o corte do metal. Existem diferentes fenômenos físicos associados com a medição da força. O consumo da potência do motor que aciona o fuso da máquina ferramenta, as vibrações tanto da máquina como da peça de trabalho, as forças e torques que aparecem na peça e na ferramenta como consequência da usinagem, as deformações na peça e na ferramenta durante o corte. Cada um destes fenômenos físicos é medido por diferentes tipos de sensores: bobinas elétricas, acelerômetros, extensômetros e sensores cerâmicos piezo-elétricos, entre outros. Como consequência da medição indireta, obtêm-se sinais elétricos que contêm informações acerca do fenômeno da força de corte (associado ao fenômeno do desgaste da ferramenta, como comentado anteriormente). O “hardware” utilizado neste tipo de medição permite realizar a medição sem necessidade de interromper o processo de usinagem. A medição direta é mais precisa e confiável que a medição indireta, o que exige maiores cuidados ao realizar a medição indireta.

Partindo de trabalhos anteriores do grupo (Santos, 1998) onde se propôs avaliar o desgaste de fresas de topo pela monitoração da corrente, este trabalho busca propor um sistema de monitoração de desgaste e alguns de seus componentes.

## 2. MONITORAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTA POR EA

O processo de usinagem é uma fonte de EA, UEHARA (1984), buscou entender a relação entre emissão acústica e os mecanismos de corte. A primeira contribuição desta pesquisa está relacionada com a instrumentação, com a colocação de sensores tanto na peça como na ferramenta. As hipóteses iniciais levantadas são confirmadas com os resultados experimentais. Estas são:

- O sinal do sensor montado na ferramenta, que mede deslizamentos do cavaco com a ferramenta e da ferramenta com a peça;
- O sinal do sensor montado na peça, que mede a deformação plástica e a ruptura, acontecidos no plano de cisalhamento, e também, o deslizamento da ferramenta com a peça (figura 1).

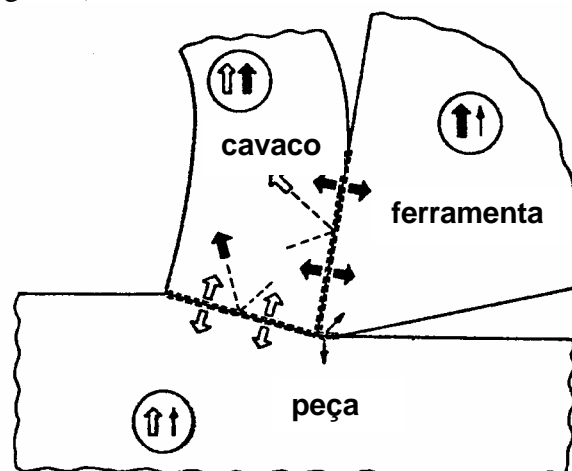


Figura 1. Geração e propagação de ondas elásticas na usinagem (Uehara 1984).

Kannetey-Asibu e Dornfeld, 1981, e Blum e Inasaki, 1990, realizaram trabalhos pioneiros na relação entre a emissão acústica e a usinagem, a tabela 1 e a figura 2 resumem sucintamente alguns de seus resultados e as conclusões obtidas na monitoração dos processos de usinagem. Eles desenvolveram uma relação teórica entre EA e o processo de usinagem por corte em metais, relacionando a energia contida no sinal de EA com a deformação plástica ocorrida no processo de corte. O estudo permite comparar em forma teórica e experimental o valor RMS do sinal com os parâmetros de usinagem. Eles realizaram testes tanto em alumínio e aço carbono SAE 1020, variando as velocidades de corte e o ângulo de saída da ferramenta. Pela definição de fonte de EA, processo que é capaz de produzir mudanças na estrutura interna do material, o trabalho de deformação plástica no processo de corte é uma fonte de EA

Tabela 1 –algumas relações entre variáveis da monitoração de usinagem, Blum e Inasaki, 1990.

Variáveis de saída (linhas) <i>As setas indicam o efeito do aumento das variáveis de entrada (colunas) sobre as variáveis de saída (linhas)</i>	Variáveis de entrada (colunas)– <i>Um AUMENTO na magnitude dos Parâmetros de corte provoca</i>				
	Velocidade de corte	Taxa de avanço	Largura do cavaco	Ângulo de saída	Desgaste de flanco
Modo de emissão acústica	↗	↘	↗	↘	↗
Potência consumida no contato peça ferramenta	↗	↗	↗	↗	↗
Potência consumida no plano de cisalhamento	↗	↗	↗	↘	↗
Força de corte	↘	↗	↗	↘	↗
Força de avanço	↘	↗	↗	↘	↗
Ângulo de cisalhamento	↗	↗	→	↗	→
Magnitude do plano de cisalhamento	↘	↗	↗	↘	→
Deformação por cisalhamento	↘	↘	→	↘	→
Taxa de deformação por cisalhamento	↗	↘	→	↗	→
Ângulo de atrito	↗	↘	→	↗	↘
Força de atrito	↘	↗	↗	↘	↗
Comprimento de contato peça-cavaco	→	↗	→	↗	↘
Área de contato peça – ferramenta	↘	↗	↗	↗	↘
Velocidade do cavaco	↗	→	→	↗	→
Velocidade de cisalhamento	↗	→	→	↘	→

Na liberação de energia de deformação aplicada são produzidas ondas elásticas no material, que causam deslocamentos na superfície que podem ser adquiridas como sinal de EA. Relacionando as razões de trabalho das zonas primária e secundária (figura 2) como fontes de EA, a relação entre o sinal emitido e os parâmetros de usinagem é dada pela expressão seguinte:

$$RMS = C_4 \operatorname{sen} g \left[ t_k b_1 U \left( \frac{\cos g}{\operatorname{sen} f \cos(f-g)} \right) \gamma_1 + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\operatorname{sen} f}{\cos(f-g)} \right] \quad (1)$$

onde:  $b_1$  e  $t_1$ , são respectivamente a largura e a espessura do material na zona primária;  $\tau_k$ , é a tensão de cisalhamento do material;  $\gamma$  e  $\phi$ , são respectivamente os ângulos de saída e o de corte da ferramenta; e  $U$ , é a velocidade de corte.  $l_1$  é a distância onde ocorre deformação (zona de aderência);  $l$  é a distância total (zona de aderência e de deslizamento com atrito).

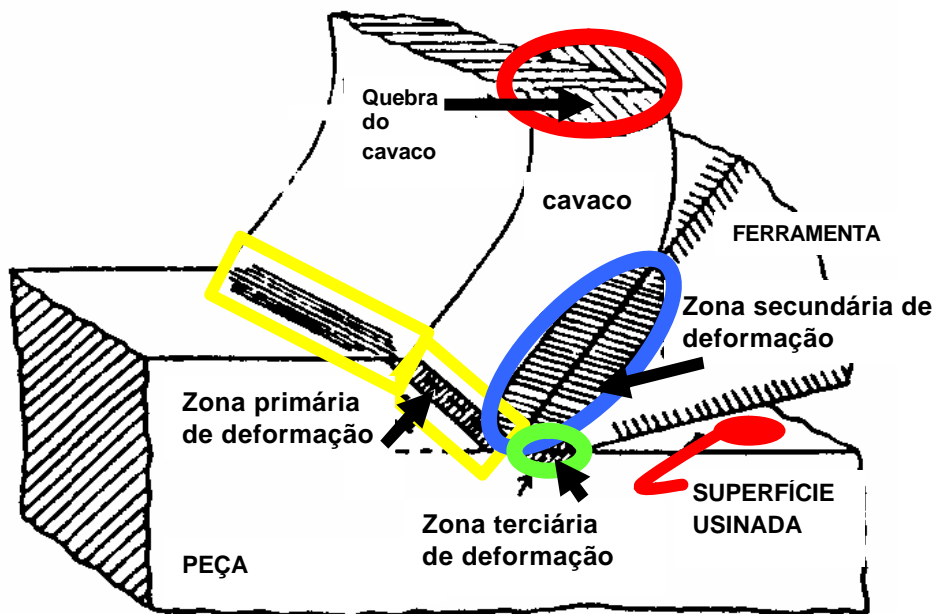


Figura 2. Deformações nas Zonas de Corte. Conforme Blum e Inasaki, 1990.

### 3. SINAIS DE EA VERSUS MONITORAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTA

Neste tipo de monitoramento, existem na atualidade, duas linhas de pesquisa: (1) uma primeira que visa o melhoramento do “sensoriamento”, e (2) uma segunda que aproveita o melhor da informação contida no sinal, através de técnicas de processamento de sinais, para saber do estado da ferramenta. A linha de pesquisa do sensoriamento tem por objetivo garantir a boa qualidade da informação contida no sinal e que é de interesse fundamental para o posterior processamento do sinal e garantir a veracidade dos resultados obtidos. Estão relacionadas ao sensoriamento as seguintes linhas de pesquisa: sobre o tipo de sensores a serem utilizados, sobre a localização destes no ambiente de trabalho, o multi – sensoriamento ou a aplicação de diferentes tipos de sensores atuando em forma simultânea, a identificação dos ruídos e a eliminação deles procurando não contaminar o sinal a ser processado, cuidados nos projetos da eletrônica do acondicionador do sinal considerando o tempo de resposta destes e o nível de saturação para evitar distorção do sinal.

#### 4. SENSORIAMENTO

As frequências do sinal de EA estão na faixa dos 100 kHz até 1 MHz. Nos processos de monitoramento de desgaste de ferramenta são usados cerâmicos PZT que detectam deslocamentos superficiais. Em geral são usados pzt de formato cilíndrico, os quais são do tipo ressonantes, com frequência de ressonância em torno de 300 kHz. Isto implica que o sinal de EA detectado pelo sensor é amplificado nas frequências próximas dos 300 kHz e atenuado no resto das outras frequências; logo no processamento do sinal estamos processando informação diferente à da fonte de EA (usinagem ou corte do metal). Um avanço no sensoriamento seria a utilização de sensores não ressonantes (de banda larga, na faixa de 100 kHz a 1 MHz), que não modifica a informação contida no sinal nessa faixa de frequências, Hamstad, 1997. No acondicionamento do sinal (pré-amplificação, filtragem e amplificação), Jemielniak, 2001, deve-se tomar em consideração, os seguintes cuidados: a relação entre a amplitude do sinal original, o valor da pré-amplificação e características do FET para não saturá-lo. No caso de acontecer saturação do componente, o sinal sofre distorção (figura 3).

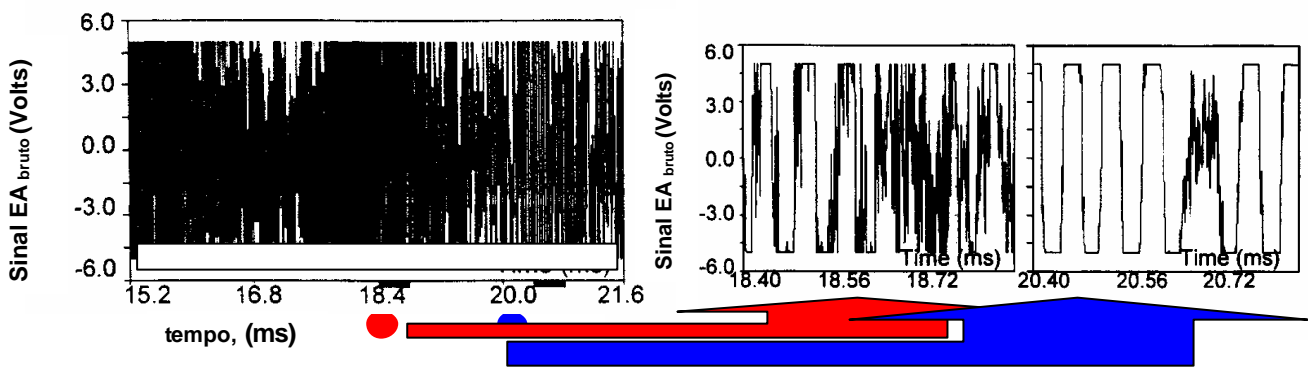


Figura 3. Saturação do FET, sinal de EA distorcido. Conforme Jemielniak, 2001

#### 5. RUÍDOS

Existem diferentes ruídos que aparecem no sinal e que devem ser eliminados, atenuados ou identificados. O ruído mecânico (vibrações das partes da máquina) e que aparece nas frequências abaixo dos 100 kHz, é o que apresenta maior amplitude, Jemielniak, 2001. Nesse sentido, a filtragem do sinal (no “hardware”, implementação de um filtro passa alta) deve realizar-se antes de qualquer amplificação (para não fortalecer este tipo de ruído). Ruídos eletromagnéticos com frequências acima de 1 MHz são eliminados pela implementação de um filtro passa baixa como mostrado na figura 4.

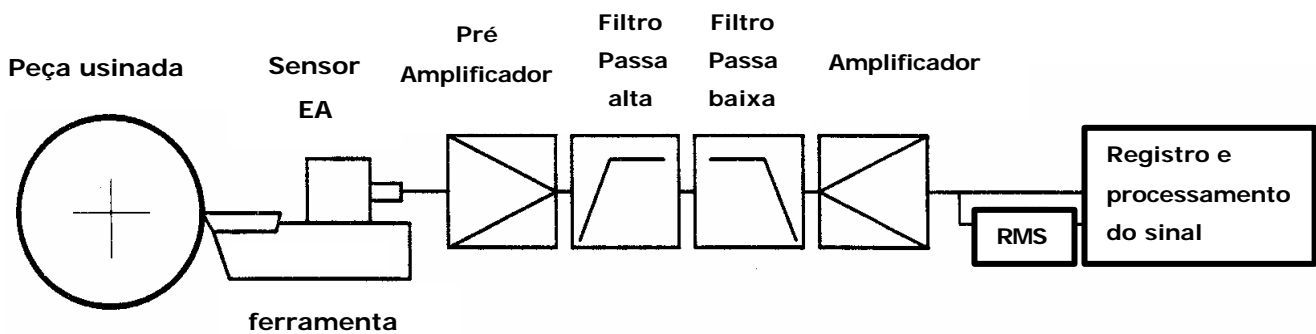


Figura 4. Cadeia da instrumentação de um sinal de EA em usinagem, conforme Jemielniak,2001.

## 6. SISTEMA DE AQUISIÇÃO PROPOSTO

É proposto por este trabalho um sistema de aquisição de emissão acústica via sensores piezo-elétricos instalados no porta - ferramentas. Este esquema está apresentado na figura 5. Como solução para o monitoramento em tempo real do desgaste em ferramentas de fresamento de topo foi projetado um sistema composto por:

- **Subsistema Girante ou Porta - Ferramentas**

- Elementos sensores (polimérico piezo-eletrônico – PVDF – e cerâmico comercial PZT5AT);
- Amplificação e filtragem do sinal elétrico (filtro passa - baixa);
- Acionamento dos LEDs (diodo foto-emissor: transdutor de sinal elétrico em óptico);
- Fonte de alimentação (bobina secundária contida no porta - ferramentas).

- **Subsistema Fixo ou Estacionário**

- Captador óptico (disco de acrílico transparente em forma de elipse, cujas bordas são espelhadas. As propriedades ópticas e geométricas do captador permitem concentrar os raios luminosos emitidos radialmente pelo eixo rotativo num único foco, onde é colocado o transdutor do sinal óptico em elétrico);
- Transdutor do sinal óptico em elétrico;
- Amplificação do sinal elétrico (o sinal elétrico modulado passa por um circuito amplificados e filtro passa - alta, a finalidade do filtro é eliminar ruído de baixa frequência proveniente de fontes luminosas ambientes);
- Fonte de alimentação (estabilizador de 5V, capacitor e bobina primária do transformador rotativo alimentado com tensão de rede).

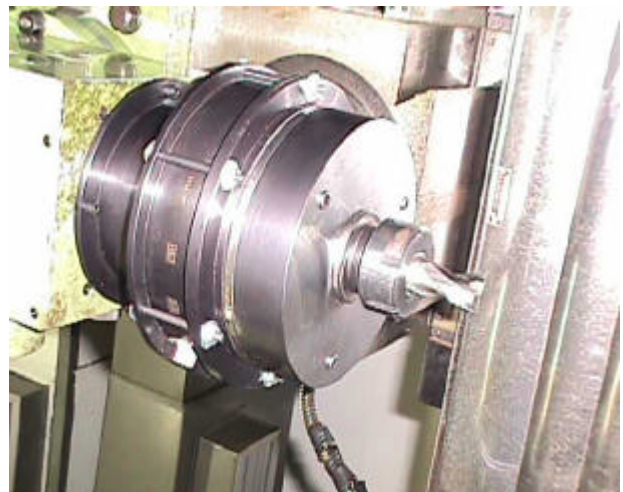
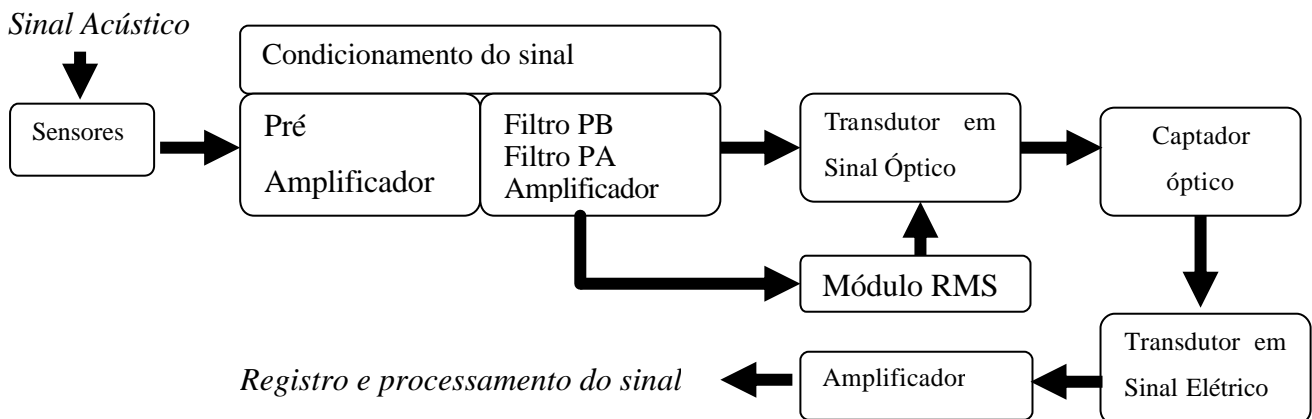


Figura 5 Fluxograma e ilustração do sistema proposto e construído para aquisição do sinal de EA.

No caso da montagem do sensor na parte móvel da máquina, a eletrônica para o acionamento do sinal deve acompanhar o sensor. Esta deve ser alimentada por uma tensão contínua. Diferentes alternativas para a alimentação da eletrônica já foram propostas. Alimentação por escovas, bateria, gerador (que aproveita o giro da ferramenta como forma de energia mecânica) e o transformador rotativo. Das alternativas anteriores, tanto a alimentação por escovas como a do transformador rotativo, aproveitam a energia da rede para alimentar a eletrônica (essas são duas saídas práticas para solucionar o problema da alimentação). Alimentações por escova geram ruídos devido ao contato irregular das escovas com o anel da parte girante. Esses ruídos são transmitidos ao sinal, contaminando o conteúdo da informação. Neste sentido, o transformador rotativo já foi proposto como alternativa de alimentação com tensão da rede (C.A.) por não ocasionar ruídos que distorcem o sinal, ZABLER E. 1994 e Smith et al. 1998.

### 6.1. Projeto e desenvolvimento do transformador rotativo (TR)

O projeto de TR proposto para o monitoramento de desgaste de fresa de topo consiste em uma bobina primária montada na estrutura da máquina (parte fixa) e de uma bobina secundária montada no porta-ferramenta que a sua vez está montado no fuso da máquina (parte girante). (Decker, 1998; Dull, 1975; Ras, 1997 e Wildi 1997). O TR proposto está apresentado na figura 6.

- 1 - transformador rotativo
- 2 - retentor labiríntico
- 3 - disco para fixação do núcleo do secundário
- 4 - porca de fixação
- 5 - retentor
- 6 - retentor
- 7 - retentor
- 8 - retentor

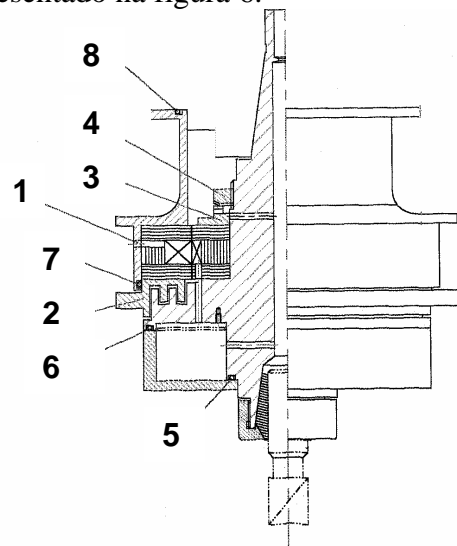


Figura 6. Porta - ferramenta instrumentado.

Como indicado na seção anterior a bobina primária é alimentada pela tensão da rede, 110 V e 60 Hz, o que constitui uma vantagem como método para alimentar a instrumentação montada no porta-ferramenta (porta - ferramenta instrumentado). As bobinas e seus respectivos núcleos são apresentados na figura 7. Cada núcleo está formado de três módulos. Dois deles, constituídos por anéis circulares (montados a cada lado da bobina) e um de formato toroidal circular que abraça a bobina e que fica na parte central do núcleo. Esta geometria permite a construção da bobina separada do núcleo o que facilita na hora da montagem no porta-ferramenta. O material utilizado na construção do núcleo foi, chapas de aço silício. A bobina primária constituída por 295 espiras e a secundária com 62 espiras, também de fio de cobre, ambas com fio #22 AWG. A bobina secundária apresenta uma derivação central que permite ao retificar a corrente, ter duas tensões, uma positiva e outra negativa, mostradas na figura 8. O transformador tem as características: potência 10 Watts, tensão primária 110 V, corrente primária 0.61 A, frequência 60 Hz, tensão secundária 23 V, corrente secundária 0,5 A e frequência 60 Hz. No projeto foi considerada uma densidade de fluxo magnético no ferro silício ( $B_{FeSi}$ ) de  $0.6 \text{ Wb/m}^2$ . O entreferro (distância entre o núcleo do primário e do secundário) considerado foi de 0.3 mm. Este valor do entreferro alto, que implica perdas por corrente magnetizante do entreferro, contempla tanto os erros na montagem dos suportes na máquina como das chapas (anéis circulares) dos núcleos nos respectivos suportes.

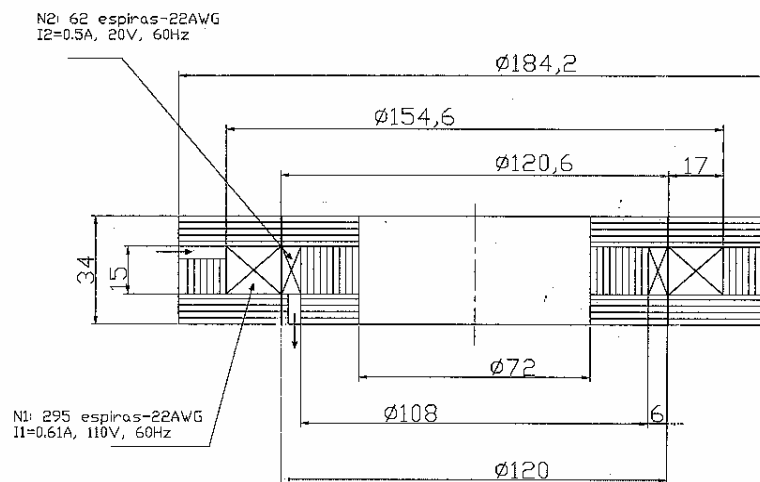


Figura 7. Geometria dos núcleos e bobinas do TR

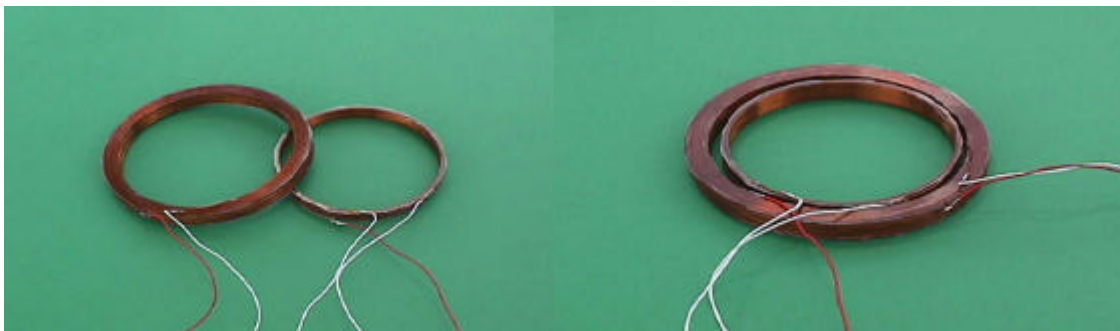


Figura 8. Bobinas primária e secundária do TR

## 7. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Considerando o sistema de monitoramento do desgaste em fresas de topo proposto, verificam-se dentro deste trabalho as seguintes conclusões:

- O Transformador Rotativo, ponto fundamental do sistema foi construído com sucesso, testado conforme os padrões da indústria e está apto e pronto para ser utilizado.
- No caso do monitoramento do desgaste de fresa de topo o TR permitiu alimentar a eletrônica da instrumentação montada no porta ferramenta, parte girante, sem introduzir ruídos no sinal. Além disto o TR é alimentado com tensão da rede, de fácil acesso em qualquer centro de usinagem.

## 8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, CNPq e CAPES pelas bolsas e verba PROAP.



## 9. REFERÊNCIAS

- Al-Habaibeh, A. & Gindy, N. 2000, "A new approach for systematic design of condition monitoring systems for milling processes", J. Materials Processing Technology, 107, 243-51.
- Blum, T. & Inasaki, I., 1990, "A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process", Trans. ASME – J. Engineering for Industry, v. 112, agosto 1990, p. 203-4.
- Byrne, G. et.al.; 1995. "Tool Condition Monitoring (TCM)", the Status of Research and Industrial Application. Annals of the CIRP, v. 44. 2, pp. 541-67.
- Dekker, M.;1998, "Transformer and Inductor Design Handbook", 2nd ed, New York, 1998.
- Dull, W., 1975, "Designer's Guide to Current and Power Transformers", EDN March 1975., 47-52,
- Hamstad M.A. & Fortunko C.M., 1995, "Development of practical Wideband high-fidelity acoustic emission sensors", SPIE Vol. 2456/281.
- Jemielniak K., 2001, "Some aspects of acoustic emission signal pre-processing", Journal of Materials Processing Technology, 109, 242-247.
- Kannatey-Asibu E. & Dornfeld D.A., 1981, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", Trans. ASME - J. Eng. for Industry, Vol.103, p. 330-340.
- Ras, O., 1997, "Transformadores de Potência de Medida e de Proteção", Ed. Almedina, Coimbra,
- Santos, M. T.; 1998, "Estudo do Monitoramento do Desgaste de Fresas de Topo Baseado no Emprego de Sensores", Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, Brasil.
- Smith, D. A., Smith, S. e Trustly, J. 1998, "High Performance Milling Torque Sensor", Trans. ASME – Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 120, agosto 1998, pp. 504-13.
- Uehara K. & Kanda Y., 1984, "Identification of chip Formation Mechanism through Acoustic Emission Measurements", Annals of CIRP, Vol.33, p. 71-74.
- Zabler E., Heintz F., Dukart, A. & Krott, P., 1994, "A Non Contact Strain Torque Sensor For Automotive Servo Driven Steering Systems", SAE Technical Papers Series 940629.
- Tarng, Y. S., Chen, M. C. & Liu, H. S., 1996, "Detection of Tool Failure in End Milling", Journal of Material Processing Technology, 57, pp. 55-61.
- Wildi, Th., 1997, Electrical Machines, Drives and Power Systems, 3<sup>rd</sup>. Ed., Prentice Hall, NY,

## IMPROVEMENTS ON THE INSTRUMENTATION FOR TOOL WEAR MONITORING ON END MILLING BY ACOUSTIC EMISSION

Cesar Abraham Flores Cisneros, Ivan Chabu

Carlos Chien Ching Tu , Gilmar Ferreira Batalha

Dept. of Mechatronics and Mechanical Systems Eng. - EPUSP - Av. Prof. Mello Moraes, 2231- 05508.900 S. Paulo, Brazil. [cafcisne@usp.br](mailto:cafcisne@usp.br) , [ivan.chabu@poli.usp.br](mailto:ivan.chabu@poli.usp.br) , [carlcctu@usp.br](mailto:carlcctu@usp.br) , [gilmar.batalha@poli.usp.br](mailto:gilmar.batalha@poli.usp.br)

**Abstract:** Nowadays monitoring systems for manufacturing processes could be used mainly for diagnostics and improvement on machine tool performance, verifying the wear stage or even tool failure, control of geometry and the surface quality of the work piece, as well as monitoring phenomena like chip formation and the consumed energy. The research on Tool condition monitoring (TCM), here concerned to end mill wear monitoring, has two principal focus: (1) improvements on the sensors (instrumentation and hardware) and (2) application of new techniques of information processing (software). In this sense, this work aims the development of instrumentation techniques for the monitoring systems. These are: the position of the sensor on the tool holder, the use of a pzt sensor on the capitation of the acoustic emission signals, noise elimination on the instrumentation electronic source by the use of a rotary transformation (first coil on the machine tool and the second on mill spindle), signal pre-amplifying just after received by the sensor in order to amplify it against noises introduced during the signal transmission, saturation control on the electronic components during the amplifying step avoiding signal distortions. Otherwise the systems could at end processes information with so much noise resulting in distortion of the conclusions. This paper relates the proposed system and some activities carried out to its implementation for an end mill wear monitoring system.

**Keywords:** wear, end mill, monitoring, acoustic emission