



## **AValiação Prática de Monitoramento por Emissão Acústica do Desgaste de Ferramenta em Processos de Torneamento**

**João Fernando G. de Oliveira**

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

[jfgo@sc.usp.br](mailto:jfgo@sc.usp.br) – São Carlos, SP, Brasil

**Michel Z. Alves**

Eaton Ltda - Divisão Transmissões, Engenharia de Manufatura e Qualidade

[michelzalves@eaton.com](mailto:michelzalves@eaton.com) – Valinhos, SP, Brasil

**Resumo.** *Um sistema de monitoramento de desgaste de ferramentas baseado em emissão acústica foi avaliado em operação de torneamento de eixo de saída de transmissão mecânica caracterizado por geometria complexa. Verificou-se que há uma relação entre a trajetória da ferramenta e a “assinatura” do processo (tensão RMS plotada contra o tempo). Além disso, há uma forte correlação entre os desgastes de flanco e cratera da ferramenta e o sinal de EA, mas a combinação destes mais a adesão de material da peça à ferramenta determinaram pequena amplitude entre os estágios iniciais e finais de vida das ferramentas. Além disso, a influência do sistema de fixação no sinal de EA mostrou-se diversas vezes maior que a influência do desgaste. Portanto um sistema de monitoramento de desgaste baseado em emissão acústica não seria viável para a situação estudada.*

**Palavras-chave:** *monitoramento de desgaste de ferramenta; torneamento; emissão acústica.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A viabilização do conceito de manufatura enxuta, especialmente quando se considera alto volume de produção depende da redução da necessidade de intervenções do operador no processo para que este possa trabalhar de forma multifuncional - operação de diversas máquinas. Em processos de usinagem, a intervenção do operador ocorre sistematicamente em duas situações: verificação dimensional da peça e, se necessário, correção da posição da ferramenta de corte; determinação do momento de troca da ferramenta. Em máquinas ferramentas com comando numérico computadorizado (CNC) já é possível a implementação de sistemas automáticos de medição confiáveis que realimentam o CNC com o erro dimensional obtido, possibilitando que este automaticamente corrija no software a posição relativa da ferramenta. Com relação ao fim de vida da ferramenta, há uma série de trabalhos a respeito, mas poucos abordam situações reais de usinagem com peças de geometria complexa.

RYABOV et al. (1996) também afirma que um dos mais formidáveis obstáculos para a automação inteligente e controle do processo de usinagem é a presença de fenômenos que geram mudanças imprevisíveis nas condições de manufatura que a priori não podem ser modelados. Na usinagem, um destes problemas é a deterioração das ferramentas de corte.

DIEI & DORNFELD (1987) afirmam que a metodologia de monitoramento por emissão acústica (EA) é atrativa porque o sinal (onda de tensão) é gerado pelas principais atividades envolvidas na usinagem dos metais: deformação plástica, atrito, fratura de cavacos e ferramenta.

Assim, este trabalho pretende verificar a possibilidade de implementação de avaliação indireta de desgaste de ferramentas através de análise da emissão acústica (EA) gerada no processo numa situação real de usinagem de peça de geometria complexa - eixo de saída de transmissão automotiva. A operação escolhida para o monitoramento foi a primeira operação de torneamento a qual emprega duas ferramentas: uma de desbaste e uma de acabamento.

## 2. SINAL DE EA

A emissão acústica é uma onda de tensão elástica transiente que se propaga nos materiais com a mesma velocidade de uma onda acústica (velocidade do som).

Segundo PIGARI (1995), a faixa de frequência de um sinal de emissão acústica é muito alta, de 50 kHz a 1000 kHz aproximadamente. Isto está bem acima da frequência de vibrações mecânicas ou outros ruídos que estão envolvidos em um ambiente de manufatura.

Segundo POLLOCK (1989), a onda de EA primitiva gerada na fonte é basicamente uma função degrau correspondente à mudança permanente associada com o processo de geração do sinal. Sua forma é profundamente mudada durante sua propagação pelo meio e o sinal captado pelo sensor é geralmente bem diferente do pulso original. Isto não chega a ser um impedimento às aplicações de EA, uma vez que a maioria dos pesquisadores está interessada no fenômeno e não na emissão acústica gerada. Ainda, um sinal de EA é composto de diversos componentes que atingem o sensor através de diversos caminhos. A Fig. 1 ilustra este princípio, mas mostra apenas alguns dos indefinidos caminhos através dos quais ondas geradas pelo mesmo evento podem atingir o sensor.

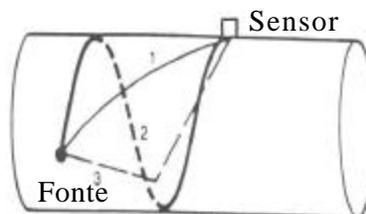


Figura 1 - Diferentes possibilidades de caminhos até o sensor para as ondas geradas por um evento (POLLOCK, 1989).

## 3. SENSOR DE EA

O sensor de EA é um dispositivo que gera um sinal elétrico quando estimulado por uma onda de emissão acústica. Ele pode ser baseado em capacitividade, interferometria ou piezoeletricidade. POLLOCK (1989) afirma que os sensores ressonantes piezoelétricos não são os que apresentam maior fidelidade com relação à resposta em frequência, mas são empregados na maioria dos experimentos em EA pela sua maior sensibilidade, bem como menor custo.

Um sensor piezoelétrico de EA é composto basicamente de um disco circular de um transdutor piezoelétrico que é colocado em uma fina base de epoxi. O diâmetro e espessura afetam a sensibilidade e a frequência característica do sensor.

Quando um sensor ressonante é excitado por um pulso, ele soa como um sino nas suas frequências naturais de oscilação. Existem sensores ressonantes em diversas frequências. Na

prática, sensores ressonantes na faixa de 150 KHz são geralmente adequados para grande maioria dos experimentos em EA.

A preamplificação do sinal dos sensores geralmente é da ordem de 100 vezes (40 dB) e inclui um filtro passa alta ou passa banda para eliminar ruído mecânico e acústico que prevalece em frequências baixas.

#### 4. FONTES DE EA NO TORNEAMENTO

Há, segundo TETI & DORNFELD (1989) três áreas de interesse no processo de usinagem com relação à geração de EA (Fig. 2):

- 1) Zona de deformação primária (zona de cisalhamento);
- 2) Zona de deformação secundária (interface cavaco ferramenta);
- 3) Zona de deformação terciária (interface peça e superfície de folga da ferramenta).

Há ainda uma quarta fonte de EA durante a usinagem de metais: a quebra dos cavacos e seu impacto na ferramenta de corte ou na peça.

Contudo, o efeito do impacto dos cavacos pode ser minimizado em processos de usinagem contínuos através do controle e direcionamento do cavaco para fora da área de usinagem.

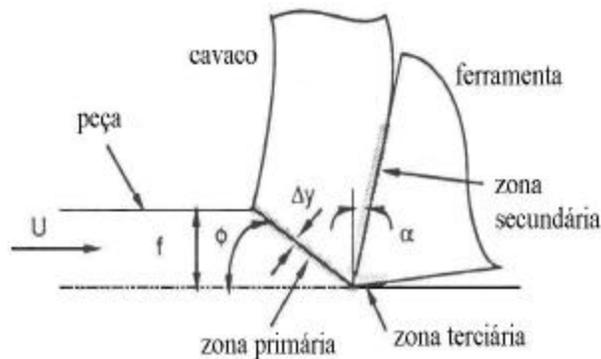


Figura 2 - Fontes de EA no torneamento (TETI & DORNFELD, 1989).

#### 5. INFLUÊNCIA DO DESGASTE NO SINAL DE EA

NAERHEIM & LAN (1988) afirmam que à medida que cresce o desgaste de flanco, a área de contato entre peça e ferramenta aumenta, fazendo com que o atrito nesta região seja maior. Isto faz crescer o sinal de EA. Também afirmam que o crescimento do desgaste de cratera faz diminuir a intensidade do sinal de EA. O desgaste de cratera aumenta o ângulo de saída efetivo da ferramenta, o que faz aumentar o ângulo de cisalhamento do cavaco. Isto diminui a tensão na zona de cisalhamento e também a intensidade de emissão acústica gerada.

#### 6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia aplicada envolve a aquisição do sinal de EA através de sensor piezoelétrico fixado na torre do torno. Foram utilizados insertos com graus crescentes de desgaste obtidos previamente na usinagem de eixo de saída de transmissões de veículos automotivos. Esta peça foi escolhida em função dos seguintes aspectos:

- 1) Forjado obtido por processo de forjamento a frio e portanto com menores variações dimensionais se comparado com aqueles obtidos por forjamento convencional. Isto propicia

uma maior homogeneidade na formação do cavaco e portanto na emissão acústica relacionada a este processo;

2) Geometria complexa da peça a ser gerada na operação de torneamento (Fig. 3). Assim, a operação escolhida foi a primeira operação após o faceamento e centragem;

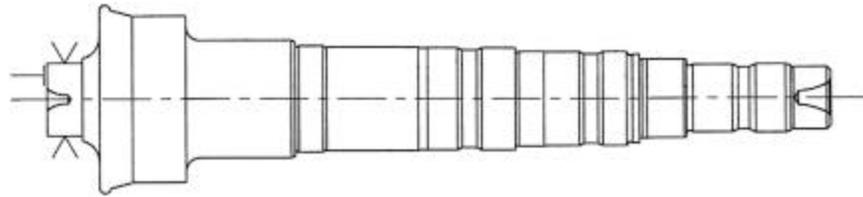


Figura 3 - Eixo principal após primeira operação de torneamento.

3) Utilização, na operação escolhida, de apenas duas ferramentas: uma de desbaste e outra de acabamento.

As condições de usinagem foram as seguintes:

a) Material da peça: SAE 8620;

b) Torno: Index modelo GU 600;

c) Fixação: placa autocentrante e ponto rotativo;

d) Parâmetros de usinagem:

*Desbaste:* Velocidade de corte: 300 m/min (cte); Avanço: 1º passe: 0,33 mm/rot; 2º passe: 0,25 mm/rot; Profundidade de corte: de 1,5 a 2,5 mm;

*Acabamento:* Rotação: 2500 rpm (cte); Avanço: 0,25 mm/rot; Profundidade de corte: de 0,1 a 0,3 mm.

e) Insertos e suportes:

*Desbaste:* Suporte MTJNL 2525, Inseto TNMG 160408;

*Acabamento:* Suporte PDJNL 2525, Inseto DNMG 110404;

Ambos insertos de classe TP 200 (Seco) com cobertura do tipo CVD de Ti (C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN e substrato sinterizado de WC.

Verificou-se inicialmente o quanto o sinal de EA era representativo do processo através de correlação gráfica entre valores da aquisição plotados em voltagem RMS por tempo e trajetória da ferramenta (Fig. 4).

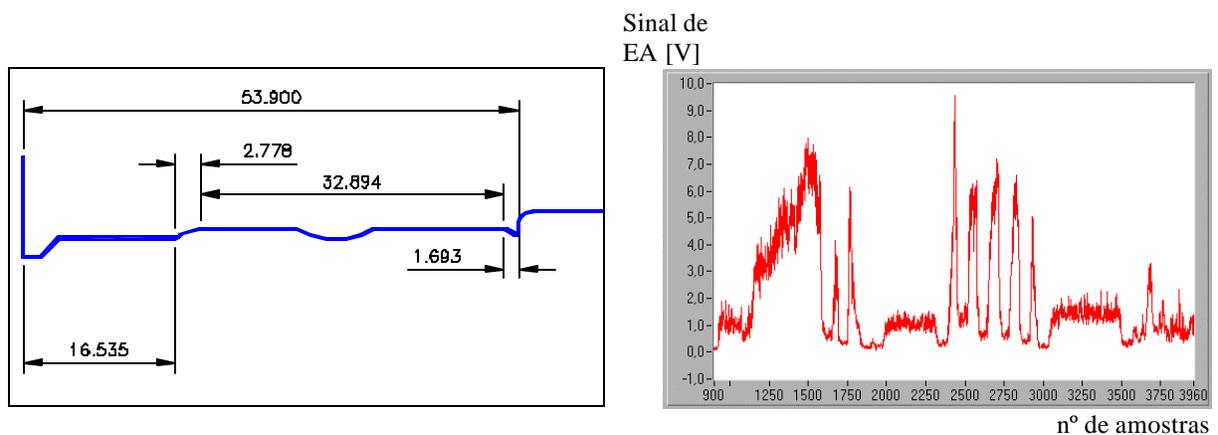


Figura 4 - Trecho da usinagem de desbaste e respectivo sinal de EA

Observou-se que o sinal de EA tem um comportamento linear em regiões de trajetória de ferramenta linear e um comportamento aleatório em regiões de trajetória de ferramenta não linear.

A seguir, procedeu-se a comparação entre as aquisições para cada ferramenta com o objetivo de se analisar o comportamento do sinal com o desgaste nas duas situações: desbaste e acabamento. Observou-se que há tendências definidas somente nas regiões de trajetória linear. Vale também ressaltar que os valores absolutos (RMS) do sinal de EA no acabamento são aproximadamente seis vezes menores que no desbaste, o que provavelmente decorre do menor esforço de corte envolvido na operação de acabamento. Além disso, a influência dos desgastes coincide com as previstas por NAERHEIM & LAN (1988).

No acabamento, da condição inicial para a de maior desgaste da ferramenta, há uma variação média do sinal de -20% (-0,13 V), considerando-se os valores médios das aquisições; -19% (-0,19 V), considerando-se os valores máximos e -12% (-0,05 V), considerando-se os valores mínimos. Pôde-se verificar também que o desgaste de flanco cresceu de maneira aproximadamente linear desde 20 até 140 peças usinadas; já o desgaste de cratera só se pronuncia de maneira mais acentuada a partir de 100 peças usinadas. Isto explica o decréscimo do valor RMS do sinal observado na Fig. 5. A Fig. 6 mostra o desgaste de cratera no inserto de acabamento com 140 peças usinadas. A remoção da camada de cobertura da ferramenta - que ocorre devido às altas temperaturas geradas pela alta velocidade de corte utilizada - diminui sua resistência ao desgaste e portanto possibilita a formação do desgaste de cratera.

No desbaste, da condição inicial para a de maior desgaste da ferramenta, há uma variação média de -4% (-0,21V), considerando-se os valores médios das aquisições, 6% (0,40V), considerando-se os valores máximos e -3% (-0,12V), considerando-se os valores mínimos. Pôde-se verificar também que o desgaste de flanco cresceu de maneira aproximadamente linear desde 20 até 140 peças usinadas; já o desgaste de cratera se pronuncia de maneira acentuada a partir de 40 peças usinadas e cresce linearmente até o último ponto analisado. O comportamento do sinal de EA observado na Fig. 7 indica que inicialmente o desgaste de cratera prevalece sobre o de flanco, de maneira a determinar um decréscimo do sinal de EA; a seguir, inicia-se a adesão de material da peça na ferramenta que age de maneira a diminuir o ângulo de saída efetivo e, portanto, aumentar o sinal; com 140 peças usinadas, a adesão é parcialmente removida (devido ao atrito com a peça) e o sinal apresenta novamente um decréscimo. A adesão ocorreu principalmente no ponto onde houve o acentuado desgaste de cratera e portanto remoção da camada de cobertura (Fig. 8). A porosidade do substrato da ferramenta e a alta velocidade de corte utilizada propiciam este fenômeno.

A última análise realizada foi a influência da pressão do contra-ponto no sinal gerado na operação de acabamento. Três valores de pressão foram avaliados: 30 bar (condição normal de trabalho), 15 bar e 5 bar. Observou-se que há um significativo aumento do valor RMS do sinal com a diminuição da pressão no contra-ponto (Fig. 7). Da condição normal de trabalho para a de menor pressão, há uma variação média de 84% (1,01 V), considerando-se os valores médios das aquisições, 96% (1,89 V), considerando-se os valores máximos e 88% (0,67 V), considerando-se os valores mínimos.

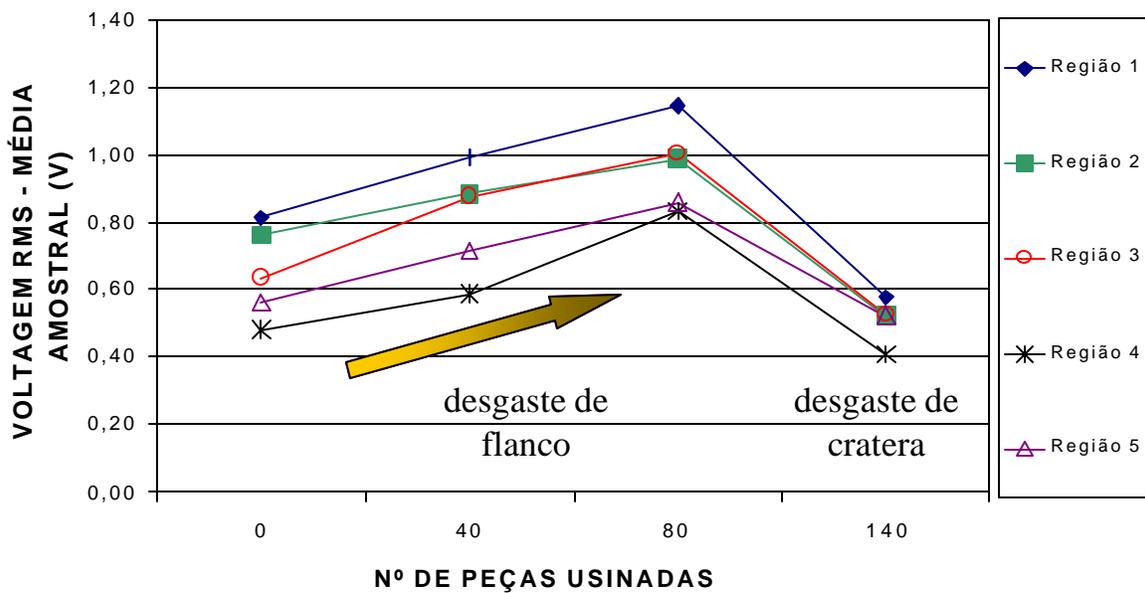


Figura 5 - Evolução do sinal de EA no acabamento em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear, considerando-se o valor médio do sinal em cada intervalo.



Figura 6 –Desgaste de cratera em ferramenta de acabamento com 140 peças usinadas.

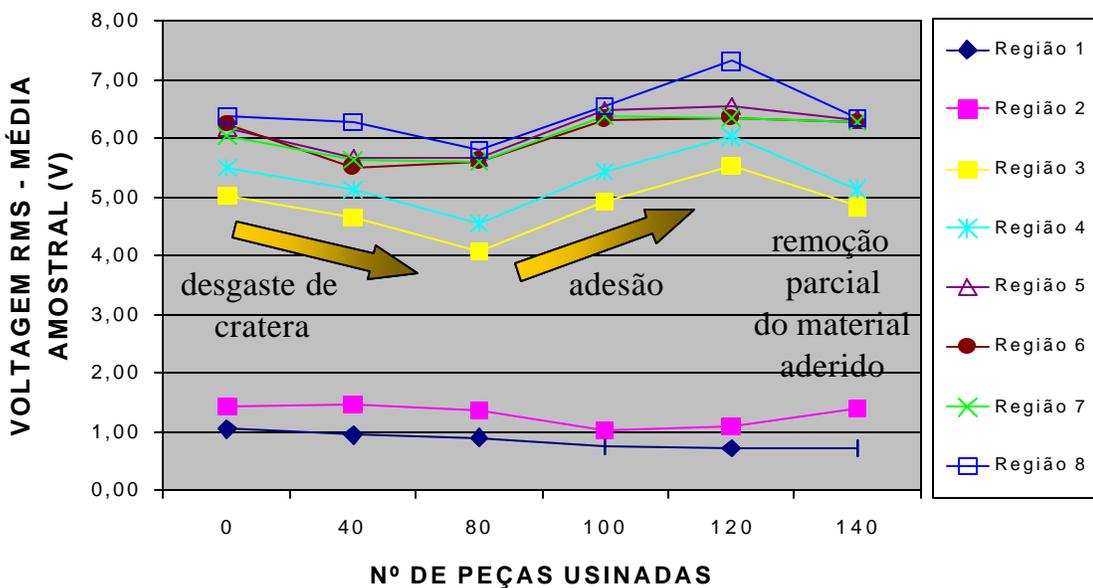


Figura 7 - Evolução do sinal de EA no desbaste em nove diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear, considerando-se o valor médio do sinal em cada intervalo.

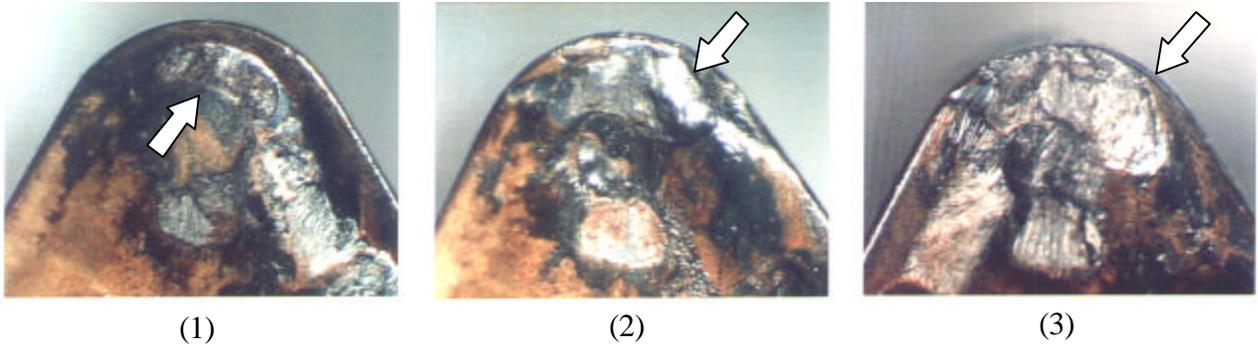


Figura 8 – Evolução do desgaste para ferramenta de desbaste:  
 (1) 80 peças usinadas e desgaste de cratera acentuado;  
 (2) 120 peças usinadas e adesão de material da peça;  
 (3) 140 peças usinadas e material aderido parcialmente removido.

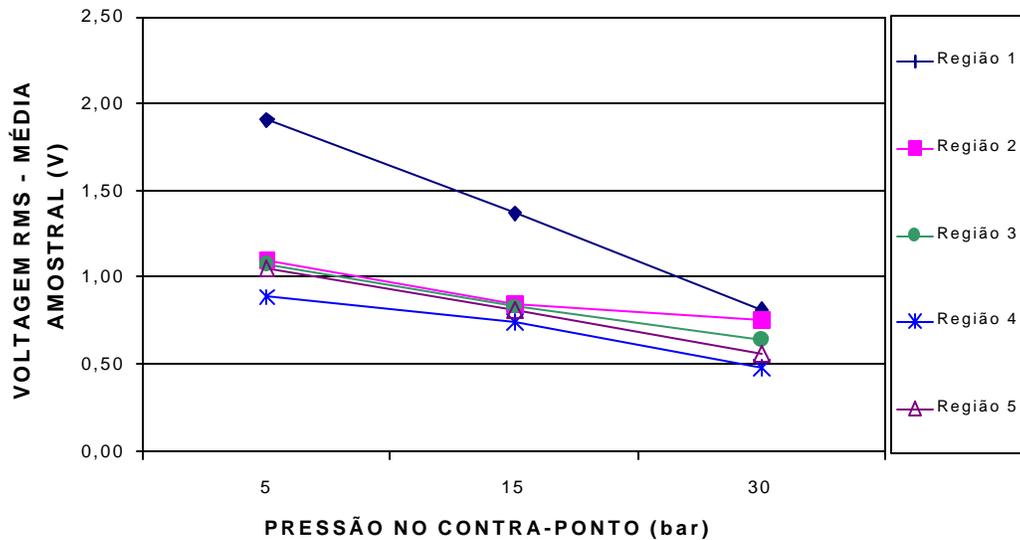


Figura 9 - Influência da pressão no contra ponto no sinal de EA em cinco diferentes regiões da peça onde a trajetória da ferramenta é linear (acabamento), considerando-se o valor médio do sinal em cada intervalo.

## 7. CONCLUSÕES

Observou-se que a emissão acústica é bastante sensível a fenômenos envolvidos no processo de torneamento. Há uma grande correlação entre o valor RMS do sinal de EA e a trajetória da ferramenta, sendo possível identificar, a partir do gráfico do valor RMS no tempo, quais as regiões que correspondem a trajetórias lineares ou não da ferramenta.

A influência dos desgastes de flanco e cratera também é relevante e bem definida, condizendo com os trabalhos já publicados sobre o assunto, ou seja, o desgaste de cratera, por aumentar o ângulo de saída efetivo da ferramenta, diminui a tensão na zona de cisalhamento e assim, a intensidade de emissão acústica gerada; o desgaste de flanco, por aumentar a área de contato entre peça e ferramenta, fazendo com que o atrito nesta região seja maior, faz crescer o sinal de EA.

Observou-se que adesão de material da peça à ferramenta contribui para um aumento na intensidade do sinal de EA, provavelmente pelo aumento do atrito entre cavaco e ferramenta e diminuição do ângulo de saída efetivo da ferramenta.

A combinação de todos estes fatores não favorece o estabelecimento de limites de controle para o monitoramento indireto do desgaste de ferramentas por EA. Nas duas situações estudadas (desbaste e acabamento), a somatória dos efeitos destes fatores contribuiu para amplitudes muito pequenas entre as condições iniciais e de fim de vida da ferramenta. Além disso, no acabamento, as pequenas amplitudes do sinal de EA também dificultam o monitoramento uma vez que este fica mais “vulnerável” a alarmes falsos devido a ruídos.

Outro fator extremamente desfavorável ao monitoramento por emissão acústica é a significativa influência da pressão no contra-ponto, determinando variações no sinal de EA de amplitude diversas vezes maior do que as geradas pelos desgastes e pelo fenômeno de adesão.

Assim, é possível afirmar que o monitoramento por emissão acústica do desgaste de ferramentas não é viável na situação estudada. Além disso, a complexidade dos fenômenos que ocorrem simultaneamente durante a operação de torneamento sugere que a extração de características de desgaste mais apuradas a partir do sinal de EA poderia ser obtida através da utilização de técnicas de análise mais elaboradas como Inteligência Artificial ou Lógica Fuzzi.

## REFERÊNCIAS

- Diei, E.N.; Dornfeld, D.A. (1987). A Model of Tool Fracture Generated Acoustic Emission During Machining. *Journal of Engineering for Industry*, v.109, p.227-233, ago.
- Narheim, Y.; Lan, M.S. (1988). Acoustic Emission Reveals Information about the Metal Cutting Process and Tool Wear, *Proceedings of 16th NAMRC*, p.240-244, mai.
- Pigari, A.C. (1995). Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica. Campinas. 130p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas.
- Pollock, A.A. (1989). *Methods of Nondestructive Evaluation. Acoustic Emission Inspection*, p.278-294.
- Ryabov, O.; Mori, K.; Kasashima, N. (1996). An In - Process Direct Monitoring Method for Milling Tool Failures Using a Laser Sensor. *Annals of the CIRP*, v. 45, n.1, p.97-100.
- Teti, R.; Dornfeld, D. (1989). Modeling and Experimental Analysis of Acoustic Emission from Metal Cutting. *Journal of Engineering for Industry*, v.111,p.229-237, ago.

## PRACTICAL EVALUATION OF ACOUSTIC EMISSION BASED TOOL WEAR MONITORING SYSTEMS IN TURNING

**Abstract.** *An acoustic emission (AE) based tool wear monitoring system was evaluated in a turning operation of a mechanical transmission main shaft characterised by complex geometry. It was found that there is a relationship between the tool track and the AE “signature” of the process (RMS voltage plotted versus time). Furthermore, there is a strong correlation between crater and flank tool wear and the AE signal, but the combination of them plus adhesion phenomena determine low amplitudes between initial and final stages of the tool life. Besides that, the influence of the fixture system was found to be several times higher than the influence of the wear. Therefore, a tool wear monitoring system based on acoustic emission would not be adequate for this application.*

**Keywords:** *tool wear monitoring; turning; acoustic emission.*