

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS RETIRADOS DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA QUE REPRESENTEM O ESTADO DE DESGASTE DA FERRAMENTA

Ulisses Borges Souto

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2500, bloco O, Sta. Mônica, Uberlândia, Minas Gerais.
ubsouto@mecanica.ufu.br

Rodrigo Henriques Lopes da Silva

henriqueslopes@bol.com.br

Márcio Bacci da Silva

mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo: Este trabalho buscou encontrar parâmetros estatísticos retirados do sinal bruto de emissão acústica (EA) que apresentem relação com a evolução do desgaste de uma ferramenta no processo de fresamento. Os experimentos foram realizados com o fresamento frontal de um aço perlítico de forja (Din 38MnS6). O desgaste monitorado foi o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$), sendo este dividido em três estágios: ferramenta com desgaste menor que 0,20 mm, ferramenta em estágio intermediário de desgaste (entre 0,20 e 0,30 mm) e ferramenta altamente desgastada, próximo ao final de vida (acima de 0,45 mm). O sinal de EA foi adquirido com seis repetições para cada uma destes estágios de desgaste. Em seguida, foram calculados parâmetros estatísticos a partir deste sinal (skewness, curtose, RMS de todo o sinal, pico, fator de crista além do RMS dentro de quatro bandas de frequências específicas). Aplicando posteriormente um teste de hipótese para cada um dos parâmetros, verificou-se que alguns destes apresentaram significativa diferença entre estágios de desgaste, o que pode resultar em bons valores para dados de entrada de uma rede neural para o reconhecimento do estágio de desgaste da ferramenta.

Palavras-chave: desgaste de flanco, fresamento, emissão acústica, monitoramento.

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa em usinagem tem importância fundamental entre os processos de fabricação, sendo o mais empregado na fabricação de produtos, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais, além disso, esse processo emprega milhões de pessoas em todo o mundo (Trent, 1984). Estima-se que 15% do valor dos produtos seja representado pelo processo de usinagem, quando este se faz necessário.

O fresamento é um dos processos mais produtivos e versáteis existentes em usinagem, cuja ferramenta, denominada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo. O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu eixo e o movimento de avanço é geralmente feito pela peça que está sendo usinada (Diniz, 2001).

O fato de a fresa poder possuir diferentes geometrias faz com que este processo apresente três variações: o fresamento tangencial, o fresamento de topo e o fresamento frontal. Esse processo possui também alta taxa de remoção de cavaco, resultando em um significativo aumento da velocidade de produção.

O desgaste de ferramentas constitui importante variável nos processos de usinagem, influenciando diretamente no acabamento, tolerâncias dimensionais e por consequência na qualidade das peças que são usinadas. O maior problema no fresamento é o fato do processo ter como característica o corte interrompido, o que submete a ferramenta a elevadas variações cíclicas de tensões mecânicas e térmicas. Estas características expõem a ferramenta a falhas, que podem ser por quebra ou lascamento.

A necessidade da instalação de sistemas de monitoramento *on-line* adequados nos processos de usinagem é, atualmente, um importante requisito no desenvolvimento de sistemas de usinagem completamente automatizados (Dolinsek e Kopac, 1999).

Nesse contexto, a tentativa de prever o exato momento em que a ferramenta deve ser substituída é de fundamental importância, pois o prejuízo de eventual falha seria eliminado e por consequência haveria uma redução dos custos do processo. Nesse contexto a emissão acústica pode ser utilizada. Segundo Matsumoto e Diniz (1997), a emissão acústica pode ser definida como sendo ondas de tensão elástica geradas como resultante de rápida liberação de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material, podendo então ser detectadas por sensores piezoelétricos que transformam estes deslocamentos em sinais elétricos.

As principais fontes de emissão acústica na usinagem, mostradas na Fig. 1, são: o atrito cavaco-ferramenta, o atrito ferramenta-peça, a deformação da peça e a deformação e quebra de cavaco. Como o desgaste da ferramenta influencia todas estas fontes, seu desenvolvimento pode ser medido indiretamente pela medição de EA (Dornfeld, 1988).

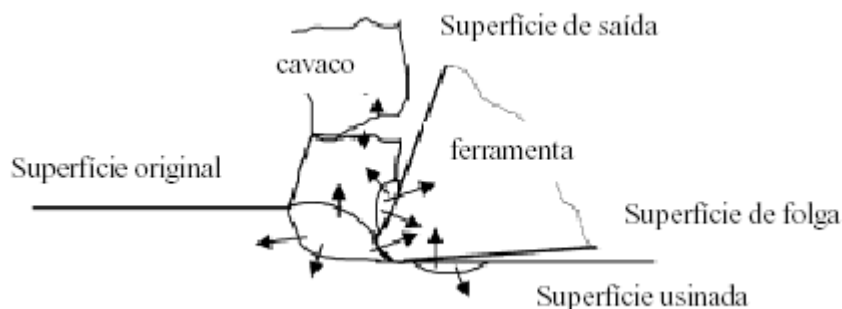


Figura 1: Fontes de emissão acústica durante a usinagem (Li,2002).

Dois tipos de sinais são associados à EA: o sinal contínuo, devido às deformações plásticas em materiais dúteis e o sinal de pico, oriundos da propagação de trincas e impactos do cavaco. No fresamento, os sinais de pico são normalmente observados quando ocorre a quebra do cavaco, quebra ou lascamento da ferramenta e na entrada e saída do ciclo ativo da ferramenta, enquanto os sinais contínuos decorrem da deformação plástica do material da peça e do cavaco.

Fatores como a quebra e o lascamento da ferramenta e a quebra do cavaco são facilmente identificáveis pela presença repentina de picos de EA, seguidos de mudanças na intensidade do sinal (Lan e Dornfeld, 1984). Por outro lado, o desgaste da ferramenta é mais difícil de detectar devido a baixa intensidade do sinal, a presença de fontes de ruídos e sua dependência com os demais parâmetros de corte (Ranvindra *et al.*, 1997).

O objetivo deste trabalho é relacionar o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) com o sinal bruto de emissão acústica, produzido durante o processo de fresamento. Através deste sinal, foram retirados parâmetros estatísticos e verificados se estes realmente representam estados de desgaste de flanco diferentes e, portanto, capazes de servirem como dados de entrada confiáveis para uma rede neural.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Durante os testes o sinal de emissão acústica foi adquirido por um sensor piezoelétrico de EA fabricado pela Sensis, que possui um pré-amplificador e pode ser acoplado a máquina-ferramenta ou mesmo a peça, através de imãs. Os sinais são então enviados para um condicionador de sinal (Sensis DM-42, com 4 entradas e 2 níveis de comparação). A partir da saída para sinal bruto, o sinal de EA adquirido é enviado a um bloco de conectores BNC-2110 e a seguir para uma placa de aquisição NI-DAQmx PCI-6251M, que possui uma taxa de amostragem de 1,25 MS/s, fabricados pela *National Instruments*.

As operações de fresamento foram realizadas em um centro de usinagem CNC Romi *Discovery* 760, que possui potência máxima de 22 kW, variação contínua de velocidade de corte e avanço, capacidade máxima de rotação do eixo árvore de 10.000 rpm e avanço rápido de até 25.000 mm/min.

Os experimentos consistiram no fresamento frontal de barras de aço microligado perlítico de forja (Din 38MnS6) otimizados, com dimensões de 400 x 50 mm e 100 mm de altura, usinados ao longo de todo o seu comprimento. Uma fresa (R245 125Q40-12M de 125 mm de diâmetro) foi montada com apenas um inserto (Sandvik SEMN 12 04 AZ) para facilitar a compreensão do sinal. Este inserto possui quatro arestas de corte e quatro arestas alisadoras e é revestida com nitreto de titânio (TiN). A Figura 2 mostra a montagem do equipamento para a realização dos ensaios.

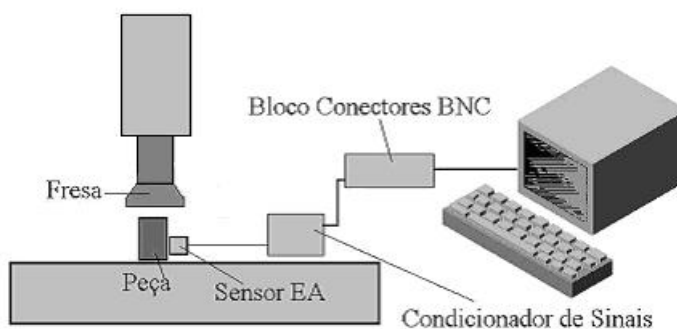


Figura 2: Esquema de montagem dos equipamentos.

A investigação foi realizada com uma condição de corte fixa adotada a partir de informações do fabricante das pastilhas sobre seu uso correto em condições apropriadas para o desbaste. Esta condição utilizada foi: velocidade de corte (v_c) de 300 m/min, profundidade (ap) de 0,5 mm, avanço por dente (f_z) de 0,166 mm/rotação.

O sinal de emissão acústica foi coletado em três posições diferentes da peça durante a passagem da fresa. As posições foram no início, no meio e no fim da passada. Após a aquisição, a parte do sinal correspondente ao ciclo inativo de cada rotação da fresa foi eliminada e em seguida os sinais dos três trechos de aquisições relativos ao ciclo ativo de cada passada foram unidos, gerando um único arquivo de dados para posterior análise.

Cada aquisição do sinal de EA foi realizada a uma taxa de aquisição de 1 MHz. Portanto, as análises realizadas no domínio das frequências foram realizadas até a frequência de 500 KHz. Também empregou-se o filtro passa-alta de 50 kHz disponível no condicionador de sinais. Esta faixa de frequências foi empregada por ser mais representativa dos fenômenos de usinagem além de ser mais fácil de eliminar ruídos (Liang e Dornfeld, 1987).

Os estágios de desgaste utilizadas foram:

1. $VB_{Bmáx}$ entre 0 e 0,20 mm (ferramenta nova);
2. $VB_{Bmáx}$ entre 0,20 e 0,30 mm (condição média);
3. $VB_{Bmáx}$ acima de 0,45 mm (condição gasta).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 3 representa a aquisição completa para um dos testes realizados, sendo efetuada durante dois segundos com um total de dois milhões de pontos coletados. No eixo das abscissas tem-se o número de pontos e no eixo das ordenadas a amplitude do sinal bruto de EA em volts.

Esta figura mostra, a partir do ponto zero, o sinal que corresponde a algum ruído, em que não há corte de material e, portanto, não há fontes de EA. Logo a seguir a ferramenta inicia o ciclo ativo entrando na peça e instantaneamente o sinal chega a níveis próximos de 0,6 V. Observa-se na figura que quando a ferramenta deixa a peça, o sinal de EA não cai abruptamente como havia ocorrido na entrada. Isto ocorre por que na saída há deformações na peça, que provocam formação de rebarbas. Esta formação exige menor esforço da ferramenta, portanto a amplitude do sinal será menor que no ciclo ativo e continua a decair até que a rebarba esteja completamente formada e a ferramenta entre em ciclo inativo. Outro aspecto interessante que pode ser observado desta figura é que, como ciclos ativos estão bem evidenciados, a contagem de seu número em um certo período de tempo representa o número de rotações empregadas na máquina-ferramenta.

A partir do sinal de EA das seis repetições, foram retirados alguns parâmetros estatísticos. A princípio, foram retirados cinco parâmetros: curtose, *skewness*, pico, fator de crista e o RMS de todo o sinal. Outros quatro parâmetros foram retirados e serão descritos ao longo do texto. Quando se aplica o RMS em um sinal o resultado obtido é o erro médio quadrático ou nível de energia. O fator de crista é o resultado da divisão do valor máximo (pico) pelo valor RMS. O parâmetro *skewness* representa a simetria da distribuição e é um momento central de terceira ordem. O parâmetro curtose é uma medida de excursões de pontos fora da normalidade (média) e é um momento central de quarta ordem.

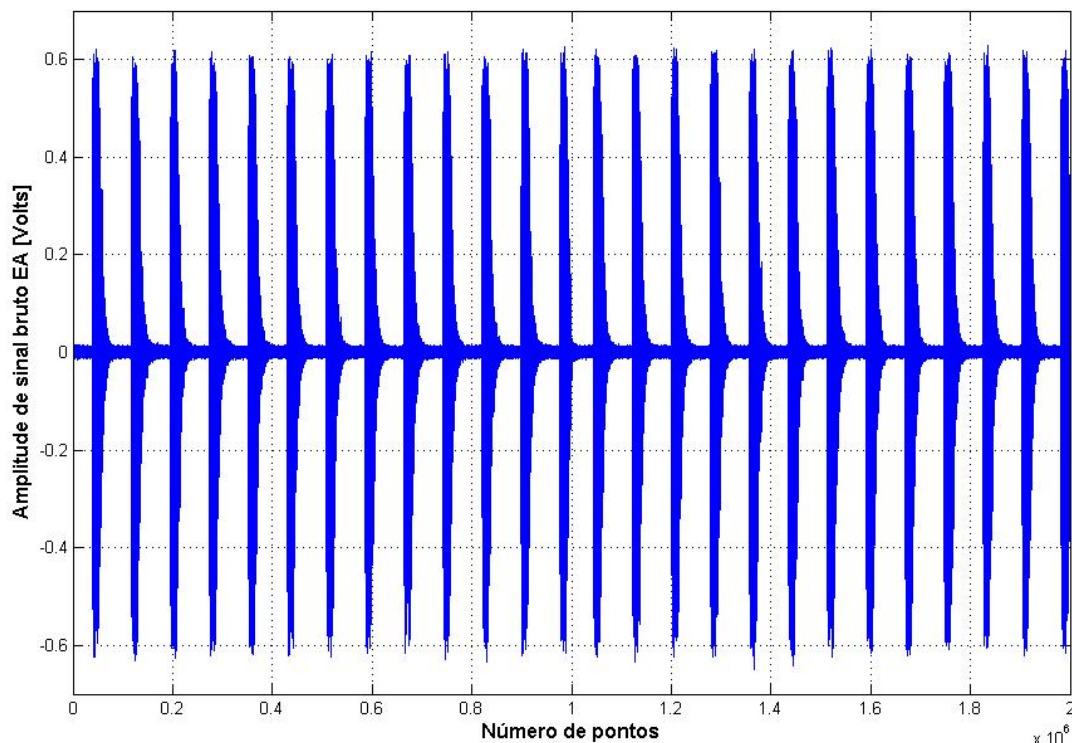


Figura 3: Representação da usinagem através da aquisição de sinal bruto de EA durante 2 segundos.

A Figura 4 apresenta os espectros de frequência para as três faixas de desgaste de flanco máximo utilizados nesse trabalho. Estes foram confeccionados a partir de 1024 pontos, utilizando-

se um overlap de 512. Devido à utilização de um filtro passa alta de 50 kHz nos testes, as frequências abaixo deste valor foram desconsideradas. Esta figura foi gerada através do *software* MatLab®.

Através de aproximações de imagem, em que se observou faixas de frequências em que as curvas representativas de cada estágio de desgaste estavam o mais separadas possível, foram escolhidas quatro bandas para a análise de sinal. Se estas curvas estivessem muito próximas, seria extremamente difícil que qualquer procedimento de reconhecimento de estágio de desgaste empregado posteriormente identificasse alguma diferença entre eles.

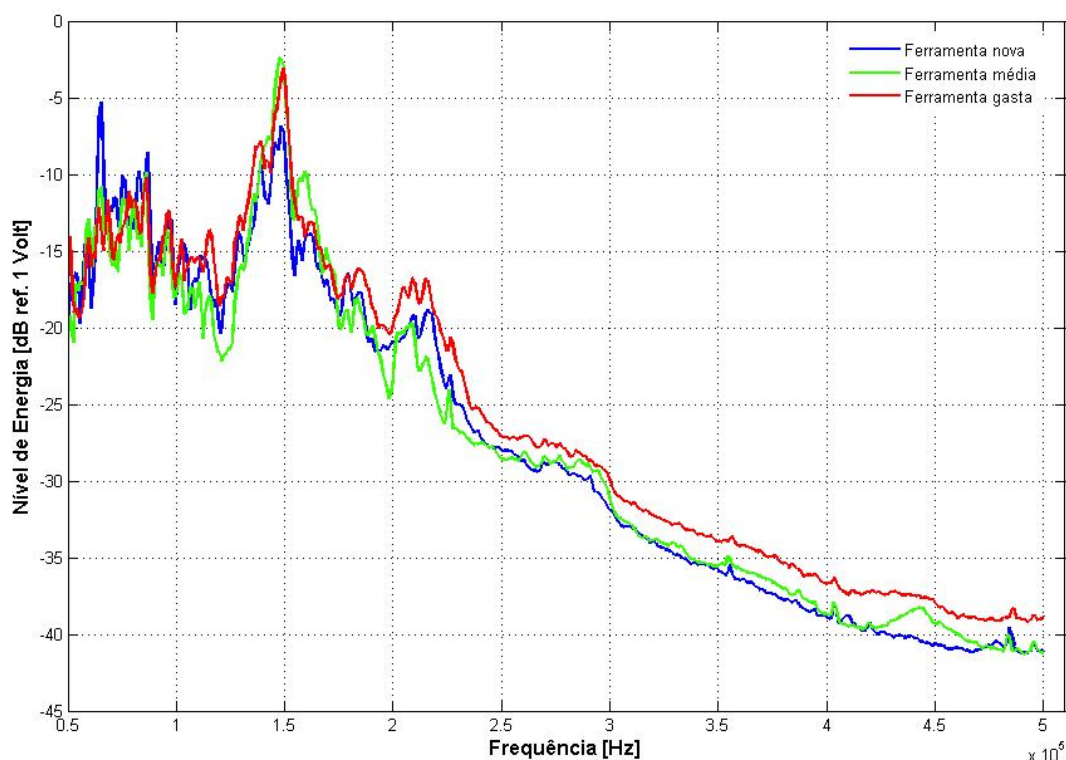


Figura 4: Espectro de frequência para as três condições de desgaste.

Da observação da aproximação de imagem da figura anterior identificou-se três bandas de frequências que aparentam serem ideais para o proposto neste trabalho. Estas são as três primeiras bandas apresentadas a seguir. Também se observou o comportamento dentro de uma quarta banda que englobasse as três primeiras. A partir da retirada do RMS dentro de cada uma destas faixas, foram criados então mais quatro parâmetros.

- Banda 1: 120 à 170 kHz;
- Banda 2: 190 à 240 kHz;
- Banda 3: 260 à 300 kHz;
- Banda 4: 120 à 300 kHz.

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os resultados do cálculo dos parâmetros estatísticas realizadas a partir dos sinais coletados.

Tabela 1: Parâmetros calculados para a ferramenta nova.

	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 4	Repetição 5	Repetição 6
Custose	9.822	9.307	9.701	9.047	10.624	9.530
Pico	-2.040	-2.013	-1.973	-1.934	-1.934	-2.020
RMS	-9.341	-9.169	-9.257	-9.514	-9.924	-9.856
FC	7.301	7.156	7.284	7.580	7.991	7.836
Skewness	0.183	0.162	0.158	0.166	0.189	0.183
Banda 1	-11.577	-11.152	-11.159	-13.013	-13.655	-13.784
Banda 2	-15.960	-15.634	-15.551	-17.921	-18.364	-18.415
Banda 3	-20.366	-20.137	-20.172	-22.069	-22.546	-22.765
Banda 4	-11.093	-10.693	-10.677	-12.605	-13.197	-13.311

Tabela 2: Parâmetros calculados para a condição média.

	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 4	Repetição 5	Repetição 6
Custose	7.868	7.699	7.895	8.550	9.289	9.597
Pico	-1.873	-1.925	-1.819	-1.934	-1.975	-1.779
RMS	-8.861	-8.789	-8.811	-8.697	-8.865	-8.681
FC	6.988	6.864	6.992	6.763	6.889	6.902
Skewness	0.062	0.059	0.048	0.047	0.047	0.053
Banda 1	-9.857	-9.683	-9.716	-10.200	-10.288	-10.093
Banda 2	-16.329	-16.560	-16.269	-14.558	-14.917	-14.962
Banda 3	-19.917	-20.023	-19.921	-19.552	-19.592	-19.629
Banda 4	-9.637	-9.509	-9.532	-9.723	-9.830	-9.685

Tabela 3: Parâmetros calculados para a condição gasta.

	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 4	Repetição 5	Repetição 6
Custose	8.968	9.055	8.525	9.733	9.365	9.597
Pico	-1.796	-1.773	-1.841	-1.794	-1.773	-1.779
RMS	-8.812	-8.806	-8.623	-8.716	-8.629	-8.681
FC	7.016	7.033	6.782	6.922	6.856	6.902
Skewness	0.054	0.047	0.033	0.076	0.058	0.053
Banda 1	-10.004	-10.040	-9.763	-10.755	-10.404	-10.401
Banda 2	-14.754	-14.666	-14.692	-15.349	-15.264	-15.340
Banda 3	-19.552	-19.495	-19.404	-19.343	-19.277	-19.328
Banda 4	-9.639	-9.660	-9.420	-10.256	-9.956	-9.948

A partir dos dados das tabelas anteriores foram realizados testes de hipótese para observar se há realmente alguma diferença entre os parâmetros de cada estágio do desgaste.

Os testes de hipótese foram realizados com 95% de confiança. O valor esperado deste teste é que seja maior que 1 (um), ou seja, que ele seja recusado. Sendo estes valores maiores que 1, significa que os valores dos parâmetros são distintos para cada estágio de desgaste, o que viabiliza a utilização como dado de entrada de algum procedimento na identificação do desgaste via sinal de EA, tal como uma rede neural. Os testes foram empregados comparando cada parâmetro de um estágio de desgaste com o mesmo de outro estágio. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos.

Tabela 4: Resultados dos testes de hipótese.

	Condição nova	Condição média	Condição gasta
Curtose	1.660	0.905	1.051
Pico	1.562	4.932	1.487
RMS	2.797	3.077	0.871
FC	2.272	2.202	0.202
Skewness	10.969	8.595	0.071
Banda 1	2.383	2.128	0.788
Banda 2	1.124	1.713	0.808
Banda 3	1.534	1.895	2.155
Banda 4	2.222	2.068	0.649

O resultado obtido a partir dos testes de hipótese realizados, entre a ferramenta nova e com desgaste médio apresentaram bons valores para todos os parâmetros estudados, quase todos acima de um, mostrando que há diferença reconhecível entre as curvas analisadas. Para a análise entre ferramenta nova e gasta apenas o parâmetro curtose do sinal não apresentou bom resultado. A comparação entre média e gasta não foi tão satisfatório como as anteriores, mostrando que as curvas são muito próximas e de difícil diferenciação para a maioria dos parâmetros, exceto curtose, pico e o sinal RMS da banda 3 (260 à 300 kHz).

Mas o que é relevante da pesquisa é levar-se em consideração toda a vida da ferramenta e não a comparação entre dois estágios de desgaste isolados. Portanto, para os três estágios de desgaste os parâmetros estatísticos que se mostraram mais interessantes no estudo para um futuro treinamento de redes foram: o sinal RMS de emissão acústica na banda 3 que corresponde a frequência de 260 a 300 kHz e o sinal de pico, ambos atingindo valores maiores que um em todas as comparações.

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos deste trabalho permite-se tirar as seguintes conclusões:

- O parâmetro curtose do sinal bruto de EA falhou apenas na identificação do estágio de desgaste nova da ferramenta para o estágio gasta;
- O parâmetro estatístico pico mostrou-se sempre uma boa ferramenta na identificação do estágio de desgaste da ferramenta;
- O parâmetro RMS dentro da faixa de frequências que vai de 260 a 300 kHz também mostrou ser representativo do estágio de desgaste;
- Aumentando-se o número de repetições dos ensaios talvez ensaie alguns outros parâmetros que falharam para todas comparações dos estágios de desgaste;
- Este estudo preliminar mostra que alguns parâmetros podem servir como dados de entrada confiáveis na identificação do estado da ferramenta via redes neurais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem ao Instituto Fábrica do Milênio (IFM), CNPq, Fapemig e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem pelo apoio institucional e financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Diniz, A.E., 2006, “Tecnologia da usinagem dos metais”, 5ª edição, Editora Artliber.
- Dolinsek, S. and Kopac, J., 1999, “Acoustic Emission Signals for Tool Wear Identification”. **Wear**. 225-229, pp. 295-303.
- Dornfeld, D.A., 1988, “Monitoring of Cutting Process by Means of AE Sensor”, Proceedings of the 3rd International Machine Tool Engineering Conference.

- Lan, M.S. and Dornfeld, D.A., 1984, "In Process Tool Fracture Detection", J. Eng. Ind., 106, pp. 111-118.
- Li, X., 2002, "A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Monitoring During Turning", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, pp. 157-165.
- Liang, S.Y. and Dornfeld, D.A., 1987, "Detection of Cutting Tool Wear Using Adaptive Time Series Modeling of Acoustic Emission Signal", ASME, Winter Annual Meeting, Boston.
- Machado, A.R. e Da Silva, M.B. , 2004, "Usinagem dos Metais", Apostila Didática, 8ª edição, Editora da UFU.
- Matsumoto, H. e Diniz, A.E., 1997, "Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor". In: 14ª COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP, Brasil.
- Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G., Krishnamurthy, R., 1997, "Acoustic Emission for Tool Condition Monitoring in Metal Cutting", Wear, 212, pp. 78-84.
- Trent, E.M. and Wright, P.K., 2000, "Metal Cutting", 4th Edition, Butterworths - Heinemann, ISBN 0-7506-7069-X.

EVALUATION OF STATISTICS PARAMETERS FROM ACOUSTIC EMISSION SIGNAL REPRESENTING THE TOOL WEAR CONDITION

Ulisses Borges Souto

Federal University of Uberlandia, Av. João Naves de Ávila 2120, Campus Sta. Mônica, Uberlândia, Minas Gerais.
ubsouto@mecanica.ufu.br

Rodrigo Henriques Lopes da Silva

henriqueslopes@bol.com.br

Márcio Bacci da Silva

mbacci@mecanica.ufu.br

Abstract: *This work investigates the significance of some statistical parameters obtained from acoustic emission (AE) raw signal to represent the evolution of tool wear in milling process. The experiments were carried out through face milling operation of a steel forging (Din 38MnS6). The type of wear monitored was the maximum flank wear ($VB_{Bmáx}$), classified into three periods of tool life: new tool with no wear; intermediate wear (between 0,20 and 0,30 mm) and high wear close to the end of life (above 0,45 mm). The AE signal was acquired with six repetitions for each one of these periods of tool life. The statistical parameters obtained from the signal were: skewness, kurtosis, RMS, peak, factor of crest beyond the RMS inside of four bands of specific frequencies. Applying a hypothesis test on all parameters, it was verified that some of them presented significant difference between the periods of life. This can result in good values for entrance data in a neural network to monitor the tool life.*

Keywords: *flank wear, milling, acoustic emission, monitoring.*