



AVALIAÇÃO DO PERFIL DE RUGOSIDADE E DO DESGASTE DA FERRAMENTA ATRAVÉS DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA

Ulisses Borges Souto

Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, LEPU, Av. João Naves de Ávila, nº 2160, 38400-089, Uberlândia, MG.

ubsouto@mecanica.ufu.br

Rodrigo Henriques Lopes da Silva

henriqueslopes@bol.com.br

Márcio Bacci da Silva

mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo verificar o comportamento do nível do sinal (RMS) de emissão acústica (EA) com o aumento do desgaste de flanco da ferramenta e também verificar a relação entre o sinal de EA e rugosidade superficial no fresamento. O sinal de EA foi adquirido durante um tempo de aproximadamente 200 segundos e então comparado com a rugosidade média (R_a) e o desgaste de flanco. Para os experimentos foi utilizada uma barra de aço AISI 1045 de seção 100 x 400 mm, usinada por pastilhas de metal duro revestidas. A ferramenta, inicialmente nova, foi usinada até seu fim de vida, que neste trabalho ocorreu por fratura. Os resultados mostraram boa correlação entre o sinal de EA e o desgaste de flanco, contudo o mesmo não ocorre com a rugosidade.

Palavras-chave: Emissão acústica, fresamento, rugosidade, desgaste de ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, em países desenvolvidos, a fabricação corresponde um terço do produto interno bruto (Machado e da Silva, 2004), e essa área cresce a cada dia. Um dos processos de fabricação mais importantes é o processo de usinagem, utilizado em todo o mundo devido à facilidade de obtenção de produtos acabados. O fresamento, dentro dos processos de usinagem, destaca-se como um dos mais versáteis e mais utilizados em pequenas, médias e grandes empresas devido à sua grande versatilidade e altas taxas de remoção de material.

Monitorar o processo de corte enquanto este ocorre é de importância fundamental quando o que se planeja é um produto com alta qualidade, economia de tempo e de material empregado. Existem vários métodos para o monitoramento da produção, contudo o sistema de emissão acústica (EA) relacionado ao desgaste da ferramenta e à rugosidade pode ser uma importante e consistente ferramenta para a indústria, devido à facilidade e o custo relativamente baixo de operação.

O objetivo desse trabalho é relacionar o sinal de EA com o desgaste da ferramenta de corte, além do perfil de rugosidade da peça. A finalidade é observar se a EA pode vir a ser uma valiosa ferramenta na previsão do final de vida de uma aresta de corte e também nas condições de rugosidade geradas na superfície usinada.

1.1 Fresamento

O fresamento é um processo de usinagem convencional capaz de gerar superfícies diversas utilizando uma ferramenta multicortante denominada por porta ferramenta, que pode ter vários insertos.

Esse tipo de operação tem como principal característica o fato de possuir o corte interrompido, o que provoca tensões que comprometem o desempenho das ferramentas. O corte interrompido é gerado devido ao fato de cada inserto passar por uma fase ativa, aquela em que ele corta o material e uma fase inativa, em que não retira material da peça usinada. Devido ao ciclo ativo e inativo, ocorrem mudanças bruscas e elevadas de temperaturas e tensões mecânicas na ferramenta cortante, o que pode provocar avarias na mesma, como trincas, que podem até mesmo levar à perda da ferramenta.

1.2 Emissão Acústica (EA)

Emissão acústica é a onda elástica gerada dentro de um sólido, devido a processos de deformação e fratura, além da técnica empregada em sua medida (Wadley et al, 1980). Para Beattie (1983) as ondas acústicas são geradas no interior de um sólido, quando este está sujeito a estímulos exteriores. Liu (1991) define em seu trabalho que a EA são ondas de tensões elásticas geradas pela rápida liberação de energia de deslocamento proveniente de fontes localizadas dentro do material. A onda de emissão acústica propaga-se nos materiais com a mesma velocidade de uma onda acústica (velocidade do som), daí o nome.

A EA é gerada durante a mudança de transiente, no domínio da deformação e tensão, dentro do material. Tal mudança acompanha deformação, fratura ou processo de transformação de fase. Com isso, espera-se que análise da forma da onda da EA proporcione informações sobre o aspecto dinâmico do evento. A energia da onda elástica que constitui a forma de onda da emissão é proporcional ao trabalho realizado pela carga externa sobre a peça testada (Wadley et al, 1980).

1.3 Desgaste de Ferramentas de Corte

As duas principais causas para a substituição da ferramenta de corte são: a ocorrência de uma avaria (trinca, lasca ou quebra), sendo este mais comum em cortes do tipo interrompido, como o fresamento, ou quando o desgaste atinge proporções elevadas que pode comprometer o bom andamento do processo.

As ferramentas utilizadas no corte interrompido (fresamento) estão mais sujeitas a avarias. Nesse caso existirá o desenvolvimento de desgaste uniforme somente se a ferramenta de corte possuir tenacidade suficiente para resistir aos choques mecânicos e térmicos inerentes ao processo (Machado e da Silva, 2004).

Pelo menos três formas de desgaste podem ser identificadas: a – desgaste de cratera; b – desgaste de flanco; c – desgaste de entalhe, de acordo com a Figura 1, que representa uma ferramenta de corte.

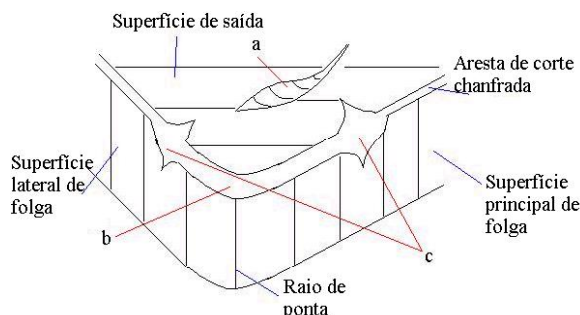


Figura 1: Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Dearnley e Trent, 1982).

1.4 Rugosidade Superficial

A condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas (Machado e da Silva, 2004). Assim, o acabamento superficial é a combinação de alguns fatores que podem ser definidos como ondulação, rugosidade e falhas.

A rugosidade de uma superfície usinada é o resultado da combinação de alguns fatores que ocorrem durante o processo de corte tais como as condições de corte, geometria da ferramenta, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça e material da ferramenta, (Nakayma, Shaw and Brewer, 1996; Shouckry, 1982).

As condições de corte, principalmente o avanço e a velocidade de corte tem grande influência na rugosidade superficial. Velocidades de corte muito baixa podem favorecer o aparecimento da aresta postiça de corte (APC), que é altamente prejudicial ao acabamento. As diferenças de altura entre os picos e vales das marcas de avanço são aumentadas à medida que se aumenta o avanço.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos desse trabalho consistiram do monitoramento do sinal de EA durante a usinagem de uma peça de aço AISI 1045 com dimensões 400 x 100mm, usinadas com pastilhas de metal duro revestidas e arestas alisadoras (Sandivik R245-12 T3 M-PM 4030). As pastilhas foram montadas em uma fresa de 125mm de diâmetro (Sandivik R245-125Q40-12M) e foram realizados no centro de usinagem Romi Discovery 760 (CNC).

Durante os ensaios de fresamento, o sinal de emissão acústica foi captado por um sensor piezoelétrico de EA. O sensor *Sensis*, que possui um pré-amplificador, pode ser acoplado a máquina-ferramenta ou mesmo a peça, sem que haja prejuízo de captação, através de imãs. Os sinais, então, são enviados para um condicionador de sinal (*Sensis DM-42*, com 4 entradas e 2 níveis de comparação). A partir daí o sinal (RMS) é enviado para a placa de aquisição do computador. Além disso, é utilizado um *trigger*, que tem a função de informar cada rotação da ferramenta, possibilitando a aquisição do sinal de emissão acústica separadamente a cada rotação da fresa. Este *trigger* consiste em uma fonte de raio laser que é refletida por um material aderido ao corpo da fresa. A luz refletida é captada por fotodiodo também montado no *trigger*. Um novo ciclo de aquisição de sinal é iniciado a cada volta do eixo árvore. A Figura 2 mostra o esquema do sistema montado para a usinagem e aquisição.

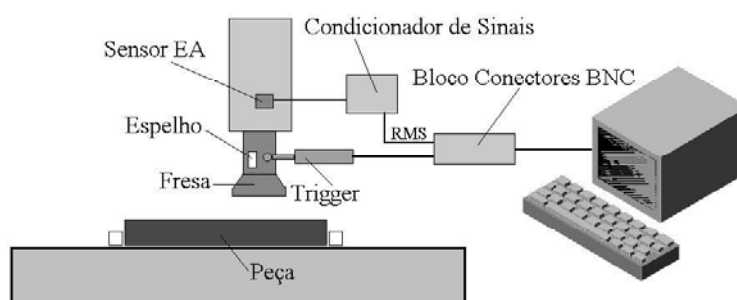


Figura 2: Representação esquemática da operação de fresamento e da aquisição neste experimento.

O sinal RMS de emissão acústica é recebido a cada volta da fresa e transformado em um mapa de intensidade luminosa, através de um *software*, baseado no *LabVIEW*. Quanto maior for a intensidade do sinal de EA, maior será a intensidade luminosa do mapa. Se a região estiver negra, não foi coletado sinal algum de EA. Com a evolução do corte, o mapa vai sendo gerado volta a volta e, portanto, tem-se uma autêntica fotografia do que ocorreu no processo através da emissão acústica.

A ferramenta foi retirada e seu desgaste medido, a cada passada da ferramenta, através de um microscópio óptico com aumento aproximado de 40 vezes, dotado de uma mesa de coordenadas. Além disso, foram feitas medições de rugosidade através do rugosímetro *Mitutoyo SJ 201P*.

O corte foi realizado durante tempo médio de 200 segundos, o que proporcionou a aquisição de cerca de 450.000 pontos a cada passada, sendo 400 pontos por volta em cerca de 1000 voltas. A análise dos resultados colhidos foi efetuada pelo programa *Matlab*, em que através de funções foi possível fazer a seleção dos resultados coletados, eliminando o ciclo inativo do corte. Após a retirada dos pontos que foram considerados desprezíveis, devido ao fato do sinal de EA tender a zero naqueles pontos, realizou-se alguns cálculos estatísticos a fim de encontrar parâmetros que mostrassem correlação da EA com os outros fenômenos observados.

Os testes consistiram na usinagem da peça utilizando ferramenta nova, com desgaste de flanco inicial nulo, até que ela atingisse seu fim de vida, que neste trabalho foi a fratura. Esta fratura ocorreu quando a aresta apresentava um desgaste de flanco máximo por volta de 0,34 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que o perfil de rugosidade seja formado é necessário que vários eventos ocorram. Apesar de, em alguns casos, as marcas não poderem ser vistas a olho nu, o perfil de rugosidade está presente em todas as peças fabricadas e é necessário que esse perfil siga padrões estabelecidos em projeto para que não haja prejuízo durante o serviço desta peça. Pode-se prever, de maneira aproximada, o perfil teórico de uma superfície. Porém, devido às vibrações do sistema, rebarbas, fluxo lateral (*side flow*), formação de APC, desgaste ou avarias da cunha cortante, o perfil real desvia do teórico.

Apesar de se tratar de fenômenos independentes, rugosidade, desgaste de ferramenta e EA, a intenção é relacionar esses parâmetros entre si. No caso deste trabalho, relacionar os dois primeiros ao parâmetro emissão acústica.

Neste trabalho foi considerado apenas o desgaste de flanco, pois durante os testes a presença de outros tipos de desgaste, como o de cratera e de entalhe, não foram percebidos. O desgaste de flanco foi medido a cada passada da ferramenta, o mesmo ocorrendo com a rugosidade.

A Figura 3 mostra o sinal de emissão acústica para uma volta completa apenas, considerando tanto ciclo ativo quanto inativo no último teste da série. No gráfico percebe-se claramente bandas à esquerda e à direita, que é a região de ciclo inativo, onde há uma queda na intensidade do sinal de EA, que pode ser considerado como ruído. Por outro lado, o ciclo ativo apresenta amplitudes próximas de 1,8 volts. Devido a esse fato, o ciclo inativo pode ser desconsiderado nos cálculos.

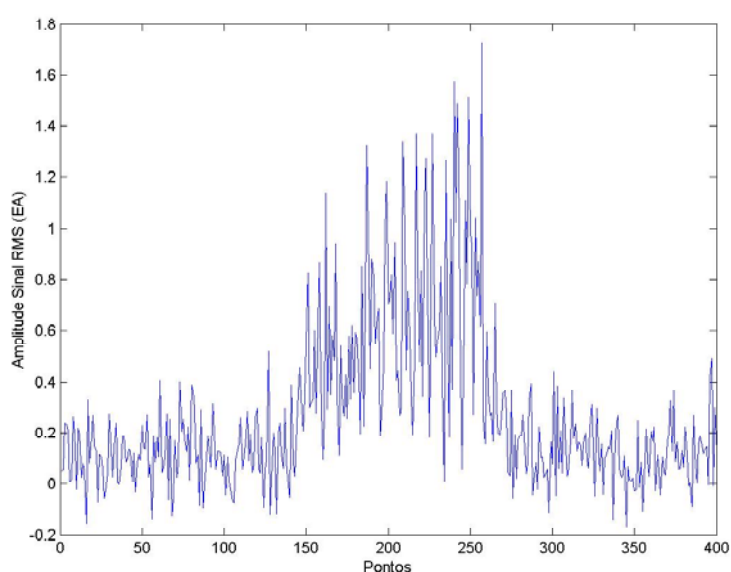


Figura 3: Sinal de emissão acústica para uma volta da fresa.

Diniz et al (1992), utilizou em seus experimentos com EA e torneamento uma faixa de frequência, após analisar seu espectro de frequências, entre 200 kHz e 300 kHz.. Mas, devido a limitações do equipamento empregado nesse experimento, principalmente com a faixa de corte do filtro passa baixa, empregou-se apenas o filtro passa alta com 50 kHz.

O espectro de frequências nesse trabalho não foi utilizado, pois o sinal utilizado foi o RMS e, portanto, as informações do espectro poderiam não corresponder à realidade.

As Figuras 4 e 5 mostram a diferença do sinal de EA de uma ferramenta em seu início e em seu fim de vida durante o corte.

A Figura 4 representa a ferramenta com desgaste de flanco igual a zero. Através desta figura percebe-se que o sinal é bem uniforme ao longo de todo o corte não havendo grandes variações na coloração da superfície. A Figura 5 mostra o sinal de EA com a ferramenta em sua última passada. Observa-se que o sinal varia bastante, sendo evidenciado por tons intensos, que indicam que os níveis foram altos naquela região, provavelmente devido aos altos níveis de atrito e esforços que ocorrem quando a ferramenta apresenta elevado estado de desgaste de flanco.

Outro resultado interessante da aquisição de emissão acústica é o ponto de fratura da ferramenta, que fica bem evidente na Figura 6. A fratura da ferramenta ocorreu aproximadamente na volta 600 e pode ser percebida pela coloração menos intensa a partir de uma linha. Este fato ocorre provavelmente porque, ao haver a fratura da ferramenta, a mesma diminui contato com a peça, o que faz com que a intensidade média do sinal seja reduzida.

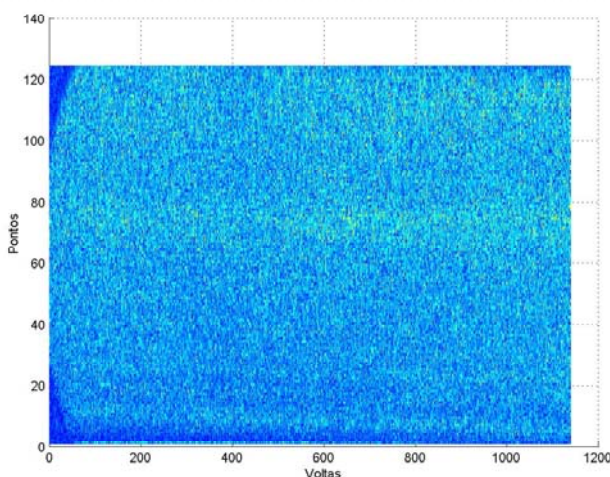


Figura 4: Emissão acústica durante o fresamento com uma aresta sem desgaste.

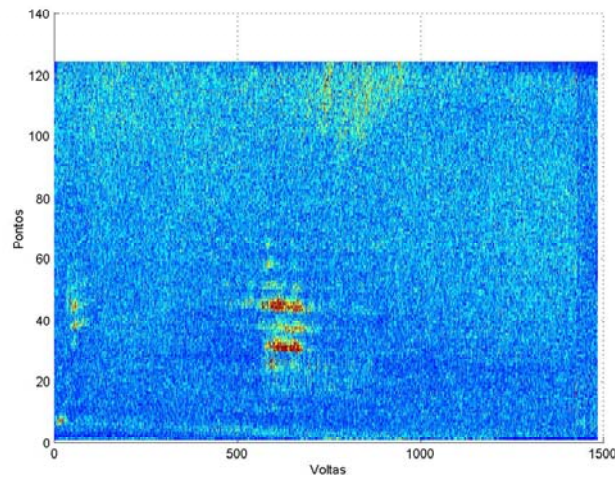


Figura 5: Emissão acústica durante o fresamento com uma aresta que apresentava $VB_{Bmax}=0,34$ mm.

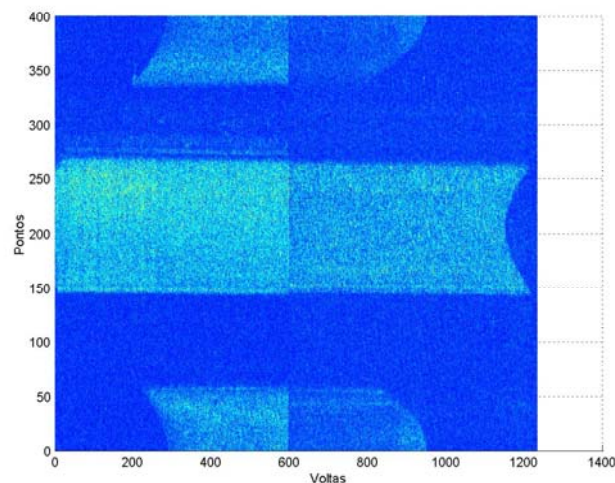


Figura 6: Mudança do sinal da emissão acústica no momento da fratura da ferramenta de corte.

Para que as relações entre emissão acústica, desgaste de flanco máximo e rugosidade possam ser realizadas é necessária a introdução de parâmetros que permitam a comparação entre os dois. Nesse trabalho foram utilizados os parâmetros estatísticos kurtosis e skewness para a representar o sinal de emissão acústica. Já com o desgaste foi utilizado o desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}) normalmente e para a rugosidade foi utilizada a rugosidade média Ra .

A kurtosis tem por objetivo detectar se os picos da curva de EA estão distribuídos de forma uniforme no comprimento de amostragem, no caso o tempo total de aquisição. Sendo o valor da kurtosis próximo de três significa que a distribuição tem a forma de uma gaussiana balanceada, o ideal é que esses valores estejam próximos a três, demonstrando que picos e vales estão distribuídos de maneira uniforme.

Outro parâmetro que pode ser utilizado para indicar a forma da curva de EA é o skewness, que é um parâmetro derivado da curva de distribuição de amplitude e diz respeito ao achatamento da curva.

A Figura 7 mostra a relação entre kurtosis e desgaste de flanco. Através dela pode-se notar que os valores giram em torno de três à medida que o desgaste vai evoluindo, contudo perto do fim de vida da ferramenta esses valores começam a subir e em seu fim de vida chegam próximo a oito, o que demonstra que a quantidade de picos e vales estão mal distribuídos ao longo da curva.

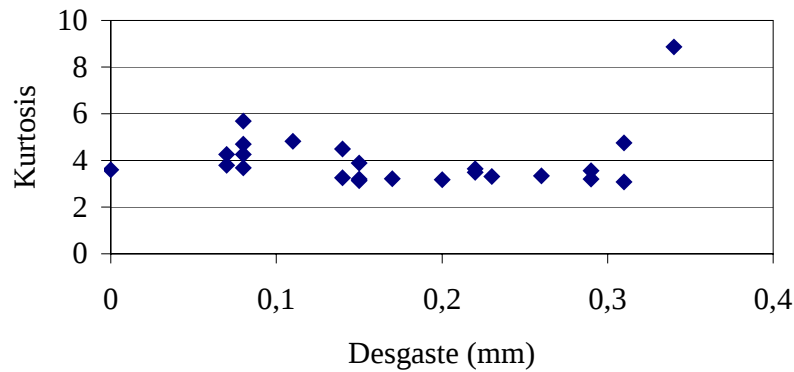


Figura 7: Gráfico kurtosis do sinal de EA x desgaste de flanco máximo.

A figura anterior mostra, até 0,1 mm de desgaste, uma grande dispersão dos valores da kurtosis. Depois há uma estabilização da kurtosis com a evolução do desgaste e finalmente um rápido crescimento com a aproximação do final da vida da ferramenta. Este comportamento do parâmetro kurtosis assemelha-se muito com o padrão de comportamento do desgaste de uma ferramenta em relação ao tempo de uso, que também passa por três estágios até o fim de vida.

A Figura 8 mostra a relação entre o parâmetro estatístico skewness e o sinal de EA. A análise do gráfico mostra relação parecida entre esse parâmetro e a kurtosis.

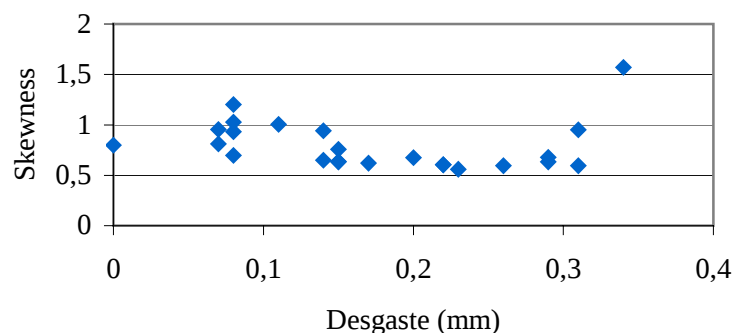


Figura 8: Gráfico skewness do sinal de EA x desgaste de flanco máximo.

O gráfico da figura anterior mostra que, para valores de desgaste próximo a 0,1 mm os valores do skewness variam bastante, contudo caem e ficam próximos ao valor de 0,5, assim como ocorre com a kurtosis, esses valores voltam a crescer perto do fim de vida da ferramenta, atingindo níveis elevados para este parâmetro.

Outro objetivo do trabalho foi relacionar a emissão acústica à rugosidade média Ra presente na superfície após as passadas. Para tal foram consideradas os testes de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para este trabalho.

Testes	1	11	15	18	21	24
Kurtosis	3,6085	3,206	3,1848	3,3144	3,5682	4,7594
Skewness	0,799	0,635	0,6732	0,5584	0,6761	0,9499
Vb (mm)	0	0,15	0,2	0,23	0,29	0,34
Ra (µm)	0,16	0,33	0,37	0,29	0,62	0,81

O estudo da tabela 1 deu origem a três gráficos, dois que relacionam EA e rugosidade e outro que relaciona desgaste e rugosidade.

A Figura 9 mostra a relação entre o parâmetro kurtosis e a rugosidade. A análise do gráfico mostra que, ao longo da vida da ferramenta o aumento da rugosidade acarreta um aparente aumento do sinal de emissão acústica, representado pela kurtosis. Um dos fatores prováveis é o conseqüente aumento da dificuldade do corte, que dá origem a maiores deformações e também da intensidade do sinal de emissão acústica.

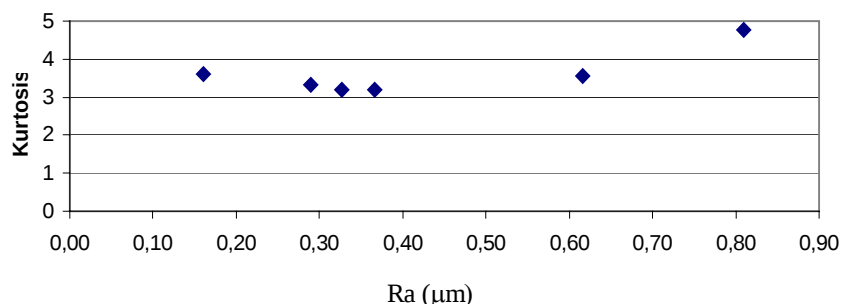


Figura 9: Kurtosis em função da rugosidade média (Ra).

A Figura 10 representa a relação entre rugosidade média e o skewness do sinal de EA. Ao contrário do que ocorreu em relação ao desgaste e a EA, o uso do parâmetro skewness junto da rugosidade não se mostrou interessante para relacionar emissão acústica e rugosidade, pela análise do gráfico. Há uma grande variação dos pontos, não exibindo uma relação clara que mostre que o sinal esteja aumentando com a evolução aumento da rugosidade.

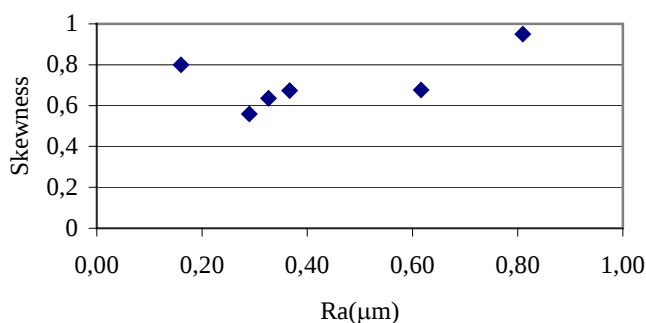


Figura 10: Skewness em função da Rugosidade Média (Ra).

A Figura 11 relaciona rugosidade média e o desgaste de flanco existente nesses testes durante o corte. Percebe-se pelo gráfico que o crescimento do desgaste da ferramenta representa um aumento considerável nos valores da rugosidade, ou seja, o aumento da rugosidade tem relação direta com o desgaste da ferramenta, isso vem comprovar a literatura existente, como em Machado e da Silva (2004), que citam esse fato.

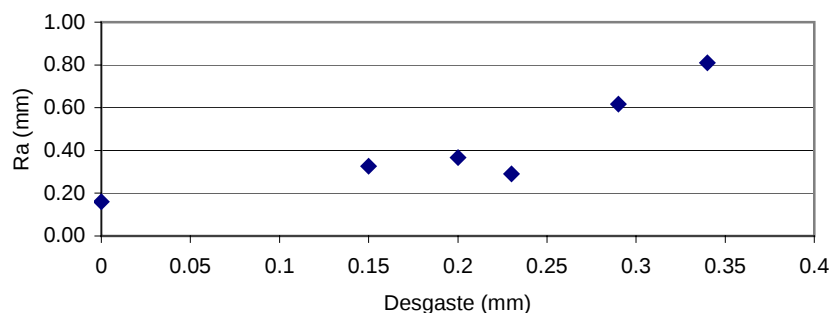


Figura 11: Rugosidade média (Ra) em função do desgaste de flanco.

4. CONCLUSÕES

- 1- O mapa de intensidade luminosa gerada pela amplitude de sinal de EA reproduz com boa fidelidade o corte;
- 2- A kurtosis e o skewness do sinal de EA mostrou boa correlação com a curva de vida da ferramenta;
- 3- Com relação à rugosidade a kurtosis e skewness não se mostraram eficazes no acompanhamento da evolução do parâmetro Ra.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem ao CNPq, FAPEMIG e Instituto Fábrica do Milênio (IFM), pelo apoio prestado através de verbas para compra de equipamentos, materiais, além de bolsas de pesquisa concedidas para os envolvidos no trabalho.

Agradecimentos também devem ser feitos ao apoio institucional oferecido pela Universidade Federal de Uberlândia, através da Faculdade de Engenharia Mecânica no uso de seus laboratórios, em que se realizaram os experimentos que proporcionaram a confecção do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Beattie, A.G., 1983, "Acoustic Emission, principles and instrumentation", Journal of Acoustic Emission, v.2, p 95-128.
- Dearnley, P.A. and Trent, E.M., 1982, "Wear Mechanisms of Coated Carbides Tools", Metal Technology, vol. 9, pp. 60-75.
- Diniz, A.E., Liu, J.J. and Dornfeld, D.A., 1992, "Correlating Tool Life, Tool Wear and Surface Roughness by Monitoring Acoustic Emission in Finish Turning", Wear, vol. 152, pp 395-407.
- Liu, J.J., 1991, "Monitoring the precision machining process: sensor, signal, processing and information analysis", Berkeley: Dept. of Mech. Eng. of University of California, 171p, (PhD Tesis).
- Machado, A.R. e Da Silva, M.B., 2004, "Usinagem dos Metais", apostila didática, 8ª. Versão, Editora da Universidade Federal de Uberlândia.
- Nakayama, K., Shaw, M.C. and Brewer, R.C., 1966, "Relationship Between Cutting Forces, Temperature, Built-up Edge and Surface Finish", Annals of CIRP, vol. 14, pp.211-223.
- Shouckry, A.S., 1982, "The Effect of Cutting Conditions on Dimensional Accuracy", Wear, vol.80, pp.197-205.
- Wadley, H.N.G., Scruby, C.B. and Speake, J.H., 1980, "Acoustic emission for physical examination of metals", International Metal Reviews, Review 249, n. 2, p. 41-64.

EVALUATION OF ROUGHNESS PROFILE AND TOOL WEAR CONDITION THROUGH ACOUSTIC EMISSION SIGNAL

Ulisses Borges Souto

ubsouto@mecanica.ufu.br

Rodrigo Henriques Lopes da Silva

henriqueslopes@bol.com.br

Márcio Bacci da Silva

mbacci@mecanica.ufu.br

Federal University of Uberlandia, Laboratory for Teaching and Research in Metal Cutting, LEPU, Av. João Naves de Ávila, nº 2160, 38400-089, Uberlandia, MG.

Abstract: *The objective of this work is to observe the acoustic emission signal (RMS) behavior with the increase of tool wear and the relationship between AE signal and surface roughness in milling. The AE signal was considerate for about 200 seconds and after it was compared with Ra parameter and flank wear. This work used an AISI 1045 carbon steel bar with 100 x 400 mm section. It was used new cutting edges until the end of its tool-life. The results shown good relationship between AE signal and flank wear, but the same does not happen in roughness.*

Keywords: *Acoustic emission, milling, roughness, flank wear.*