

ANÁLISE DO DESGASTE DE FERRAMENTAS VIA EMISSÃO ACÚSTICA NA USINAGEM DE UM AÇO INOXIDÁVEL

Rodrigo Henriques Lopes da Silva, rodrigohenriqueslopes@hotmail.com¹

Stéfano Grandi Bombonato, omegahert@hotmail.com¹

Augusto Aires Lustosa, augusto_lustosa@yahoo.com.br¹

Ulisses Borges Souto, ulisses.souto@sociesc.org.br²

Márcio Bacci da Silva, mbacci@mecanica.ufu.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia/MG, CEP 38408-902.

²Sociesc, Rua Albano Schmidt, 333, Joinville/SC, CEP 89206-001

Resumo: *Este trabalho apresenta uma proposta de monitoramento do processo de fresamento com o intuito de detectar a necessidade de troca da ferramenta de usinagem, não havendo desperdícios melhorando a produtividade. Foi utilizado o fresamento de topo com apenas um inserto de metal duro montado numa fresa com capacidade para três insertos. Os experimentos foram realizados em aço inoxidável VP-80 endurecido por precipitação. O sinal de emissão acústica (EA) foi adquirido durante a usinagem, com varias repetições, com o sensor fixado na peça. O desgaste de flanco era medido periodicamente e os testes realizados até o final da vida da ferramenta. Foi analisada a correlação de diversos parâmetros estatísticos retirados do sinal de emissão acústica (EA) com o desgaste da ferramenta. Os parâmetros estatísticos analisados foram: skewness, curtose, RMS, pico e fator de crista. Análise gráfica dos parâmetros estatísticos e espectros de frequência mostram que alguns parâmetros têm uma significativa correlação com os estágios de desgaste*

Palavras chave: *fresamento, desgaste, monitoramento, emissão acústica*

1.INTRODUÇÃO

O processo de Usinagem representa a classe mais largamente empregada na fabricação de produtos, sendo assim a pesquisa nessa área tem fundamental importância frente aos demais processos de fabricação (Trent,1984). Devido ao volume de capital gasto na área da usinagem, qualquer aumento da produtividade certamente causará um impacto econômico significativo. Dentro desse contexto, o processo de fresamento é empregado em larga escala em todo o mundo, sendo um dos processos de vital importância para a indústria da fabricação.

O desgaste e eventuais falhas das ferramentas são fenômenos inevitáveis no qual o operador é quem determina o momento em que a ferramenta deve ser substituída, baseando-se em parâmetros pré-determinados como acabamento superficial, mudança da geometria da ferramenta ou falha da mesma, sem a devida precisão principalmente após a introdução de processos que ocorrem em câmaras fechadas do tipo CNC e processos em alta velocidade (high speed machining), onde o operador não tem boa visualização do processo.

Assim, um dos maiores desafios da usinagem atual é conseguir utilizar um processo que faça a previsão do momento ótimo de troca da ferramenta, otimizando o processo e gerando o menor prejuízo possível, ou mesmo eliminando prejuízos. Um dos desafios dos pesquisadores é determinar com segurança o momento em que a ferramenta deve ser substituída durante o processo de usinagem em tempo real.

Existem vários campos de pesquisa para o monitoramento do desgaste em processo, que vão desde a medição de vibração, temperatura, força, potência e até emissão sonora (Blum,1990). A medição do sinal de emissão acústica surge como uma área relativamente nova e promissora neste campo de pesquisa. Isto em função do alto número de fenômenos de usinagem que emitem este sinal, de sua rapidez de resposta, baixa interferência de ruídos, baixa intrusividade, facilidade de operação de seus equipamentos e custo relativamente baixo (Dornfeld,1987).

O grande motivador para o estudo do monitoramento de processos em usinagem consta em dominar todas as etapas do processo de fabricação prevendo o aumento das forças, temperatura, vibração do sistema e possíveis falhas devido a alguma alteração destes fatores, ao acompanhar o processo em tempo real através de sensores elimina-se a falta de precisão de um operador diminuindo tanto os custos como o tempo para troca de ferramentas, evitando paradas desnecessárias e aumentando a produção.

Na primeira parte do trabalho foram coletados sinais de emissão acústica durante o fresamento de topo de aço inoxidável VP80 onde posteriormente os resultados foram analisados estatisticamente e relacionados com o desgaste da ferramenta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados experimentos utilizando o processo de fresamento de topo para a usinagem de canais. O sinal de emissão acústica é captado um minuto após a entrada da ferramenta da peça, com o sensor de emissão acústica acoplado no corpo de prova a ser usinado. Devido às dimensões da peça, foi possível a usinagem de sete canais, em seguida a superfície da peça era preparada para novos testes.

A cada canal feito pela peça durante o fresamento, a fresa é retirada da máquina para medição do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) através de estereó microscópio com aumento de até 45 vezes e software de análise de imagens. A figura 1 mostra uma ilustração do corpo de prova

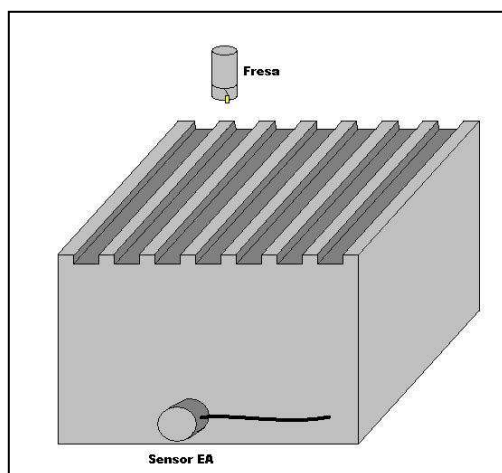


Figura 1 – Ilustração da montagem experimental.

As barras de aço foram fornecidas pela Villares Metals S/A. São aços inoxidáveis martensíticos utilizados para fabricação de moldes para injeção de plástico. O aço específico utilizado foi o VP80 envelhecido a 550°C, com dureza média de 46 HRC. Esse tipo de aço pertence ao grupo de aços inoxidáveis martensíticos endurecíveis por precipitação (PH). A composição química do aço é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço (Villares Metals S/A).

Material	Teor (% em peso)							Dureza
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	
VP80	0,04	0,25	0,25	12,5	7,5	1,5	1,2	46 HRC

Foi utilizada uma fresa de topo toroidal de 32 mm de diâmetro, com insertos intercambiáveis, fixados por parafuso (referência R390-032A32-11M, Sandvik, 2004). A fresa possui a possibilidade do uso de até três insertos. Nos testes foi utilizado apenas um inserto. Isto foi necessário para evitar a influência do sinal de emissão acústica de outra aresta.

Para o faceamento, foi utilizada uma fresa com especificação R245 125Q40-12M de 125 mm de diâmetro, fabricada pela Sandvik Coromant, com capacidade para oito insertos. Os insertos de metal duro empregados têm especificação SEMN 12 04 AZ, também fabricados pela Sandvik Coromant, possuem quatro arestas de corte e quatro arestas alisadoras e são revestidos com nitreto de titânio (TiN).

As operações de fresamento foram realizadas em um centro de usinagem CNC Romi Discovery 760, com potência máxima de 11 kW (15 cv), 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.

A aquisição do sinal de emissão acústica foi realizada a partir de um sensor de EA conectado na peça e um condicionador de sinais DM 42 (com quatro canais de entrada e um canal de saída que fornece sinal RMS e outro canal de saída que fornece o sinal bruto). Estes equipamentos citados são fabricados pela Sensis. O sinal de EA é enviado a uma placa NI-DAQmx PCI-6251M, da National Instruments, que possui uma taxa de amostragem de 1,25 MS/s, indicada para a aquisição do sinal bruto de EA.

O sensor de emissão acústica possui um núcleo composto por dois cristais piezelétricos. A frequência de ressonância de cada cristal individualmente é de 1 MHz. Os sinais dos cristais são adquiridos de forma diferencial, a fim de eliminar ruídos. Posteriormente, o sinal é amplificado com ganho 200 pelo pré-amplificador que fica embutido

no sensor. Dessa forma, este sensor fornece um sinal de baixa impedância e grande sensibilidade para o monitoramento. A faixa de frequência do sinal é de 100 kHz a 500 kHz.

Em todos os testes, as condições de corte foram mantidas constantes: 151,2 m/min de velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z) de 0,1 mm/dente, profundidade de corte de 1 mm (a_p) e rotação de 1512 rpm.

3.RESULTADOS

A análise dos resultados será dividida em duas etapas. A primeira etapa consta na obtenção dos espectros de frequência de uma aquisição com ferramenta nova e uma ferramenta desgastada para comparar quais frequências são mais sensíveis ao desgaste de flanco e também compreender melhor o sinal de emissão acústica.

A segunda etapa é baseada na análise de parâmetros estatísticos representativos do sinal de emissão acústica com o intuito de encontrar qual o parâmetro é mais sensível ao desgaste de flanco da ferramenta.

A figura 2 abaixo mostra o espectro de frequência de dois estágios de desgaste da ferramenta, ferramenta nova e ferramenta com alto desgaste.

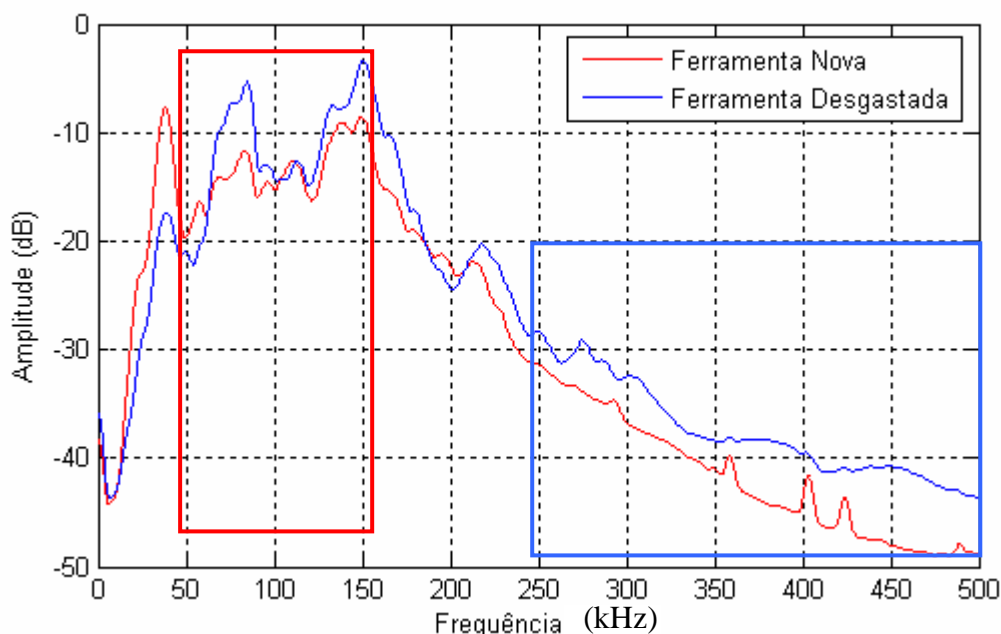


Figura 2 -Espectros de frequência para ferramenta nova e desgastada

Realizando uma análise visual do espectro de frequência (figura 2), existem bandas de frequência para ferramenta nova que diferem de forma significativa de uma ferramenta desgastada. Para bandas de frequências entre 50 e 150 KHz nota-se que não há diferenças quanto ao comportamento do gráfico pois tanto para ferramenta nova como para a desgastada a banda de frequência é um espelho em relação a outra, porém com amplitudes maiores para a ferramenta desgastada. Para bandas de frequências entre 250 a 500 kHz o comportamento do gráfico entre uma ferramenta nova e desgastada variou de forma brusca, ao contrário do caso anterior e provavelmente seja fácil a diferenciação entre ferramenta nova e desgastada nessa faixa de frequências. Provavelmente nestas bandas esteja caracterizado o efeito do desgaste de flanco da ferramenta. Sendo assim fica comprovado que o sinal de emissão acústica contém dados em bandas de frequências específicas sobre a vida da ferramenta de corte. Este tratamento foi realizado por Souto (2007) onde concluiu-se que algumas bandas podem representar melhor as diferenças entre os sinais de ferramentas com diferentes níveis de desgaste.

Na segunda etapa da análise foram obtidos alguns parâmetros estatísticos do sinal bruto adquirido no processo. Foram calculados os seguintes parâmetros: curtose, *skewness*, rms, pico e fator de crista.

Em seguida foram construídos gráficos de desgaste em função dos vários parâmetros obtidos, tais curvas foram obtidas pela união de todos os testes realizados, o intuito era comprovar que a existência de relação entre o desgaste e o sinal de EA, representada pelos parâmetros utilizados ocorreria em todos os testes realizados, ocorre independentemente do inserto. Foi utilizada uma curva de ajuste de interpolação quadrática visando ajustar a melhor curva com o intuito de entender a correlação dos parâmetros com o desgaste de flanco. Após a construção de todos os gráficos os parâmetros que melhor se relacionam com o desgaste de flanco da ferramenta são os valores de RMS e *Skewness* mostrados nas figuras 3 e 4.

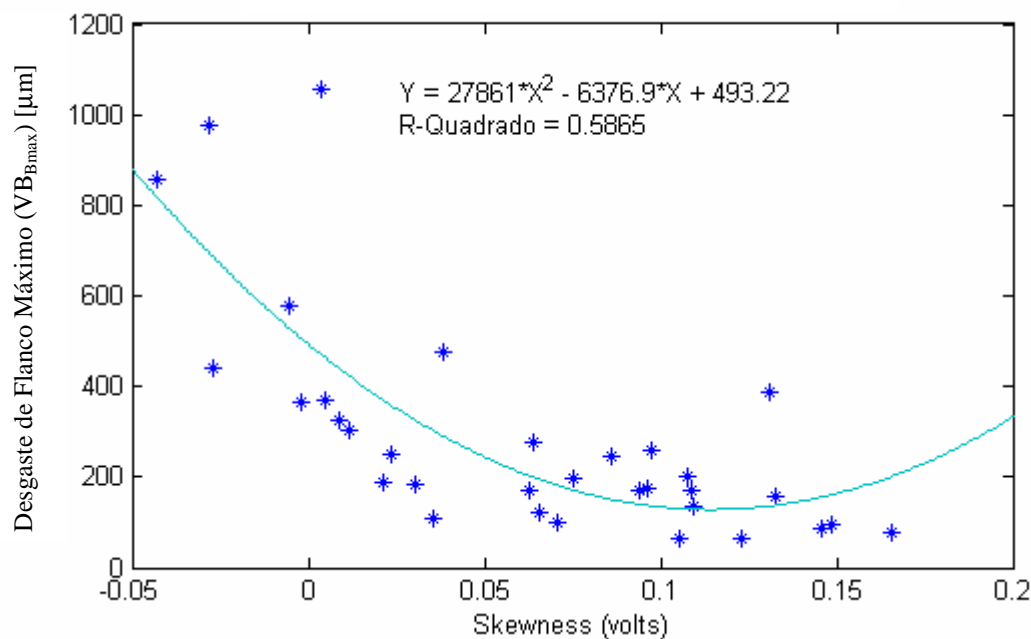


Figura 3 –Gráfico *Skewness* X Desgaste

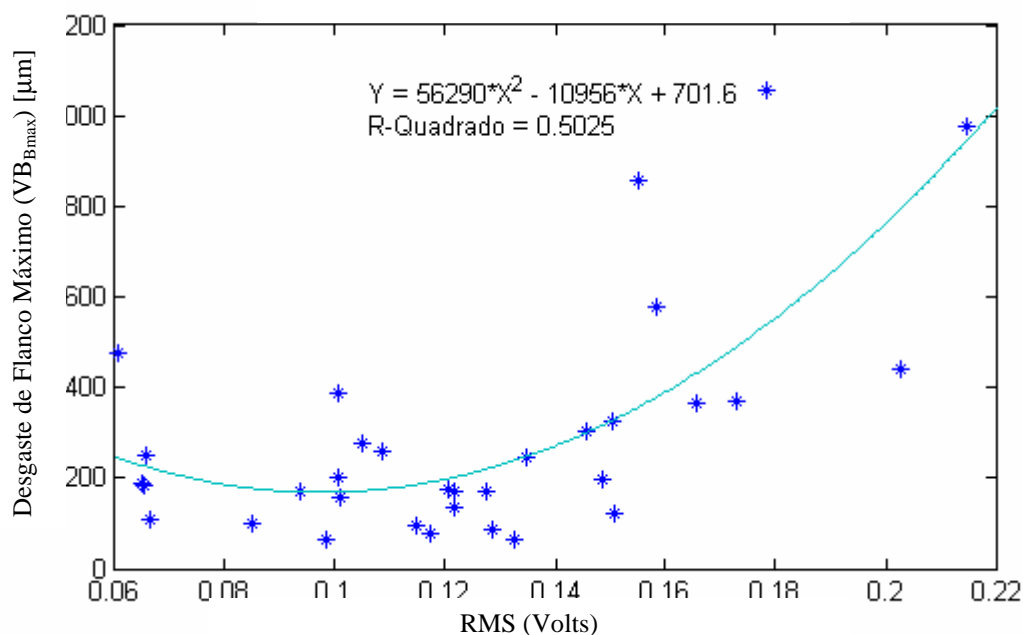


Figura 4–Gráfico RMS X Desgaste

Nas figuras acima é observado que a correlação entre os parâmetros e o desgaste das ferramentas não é alta. No entanto, em se tratando de processos de usinagem, onde existem inúmeras variáveis isso é normal. Os parâmetros de maior sensibilidade são o *skewness* e o Rms, com coeficiente de correlação 0,5865 e 0,5025 respectivamente (este coeficiente depende da curva de ajuste). A análise se concentra então no comportamento destes dois parâmetros. Deve-se primeiramente entender melhor o que eles representam e o que significa a correlação com o desgaste das ferramentas.

O desgaste da ferramenta tem efeito direta e indiretamente no sinal de emissão acústica. A seguir será feita uma discussão considerando os efeitos do desgaste no processo, como por exemplo: efeito na profundidade de corte, temperatura e força.

4. DISCUSSÕES

A profundidade de corte (ap) no fresamento de topo é determinada pela aresta principal de corte onde ocorre o desgaste de flanco, no fresamento de topo a profundidade de corte não é afetada de forma significativa, a menos que a ferramenta sofra uma avaria de origem mecânica (lascamento) que não é um desgaste contínuo como o desgaste de flanco. Durante o corte interrompido, como ocorre no fresamento, a ferramenta de corte passa por uma fase ativa onde ocorre a formação do cavaco e uma fase inativa onde não acontece a formação do cavaco e consecutivo resfriamento. A temperatura varia de forma cíclica aumentando durante a fase ativa e diminuindo durante a fase inativa. Esse comportamento onde ocorre uma flutuação cíclica da temperatura leva a formação de tensões na região de corte da ferramenta podendo causar avarias de origem térmica.

Conforme o desgaste da ferramenta aumenta, maior será a área de contato da ferramenta. A temperatura irá se distribuir de forma melhor devido ao aumento de área logo a temperatura cíclica não sofrerá grandes variações. Portanto, conforme houver um aumento do desgaste da ferramenta, ela terá uma temperatura mais homogênea, dificultando a formação de avarias de origem térmica.

De uma maneira geral, quanto maior a resistência do material a usinar, maior a resistência nos planos de cisalhamento, portanto maior será a força de usinagem. Com o decorrer do desgaste de flanco há uma alteração da geometria da ferramenta de corte com aumento na área de contato entre a ferramenta e o cavaco e a peça a ser trabalhada, logo haverá um aumento nas forças de usinagem. Outro fator que aumenta a força de usinagem é a profundidade de corte e avanço, porém estes fatores se mantêm constantes em todo o processo.

Conforme evolui o desgaste de flanco o valor do parâmetro estatístico RMS tende a aumentar. Este parâmetro representa a medida da energia do sinal de emissão acústica, conforme mostrado na figura 4, este é ampliado, mostrando que a energia no processo está crescendo com a perda de material da ferramenta de corte.

No desgaste de flanco temos um aumento da área de contato da superfície de folga principal da ferramenta, com a peça usinada, isso proporciona um aumento nos níveis de sinal de emissão acústica, com o aumento das forças de usinagem e o atrito na região de contato da ferramenta com a peça.

Com o progresso do desgaste da ferramenta, mais difícil será a remoção de material da peça a ser trabalhada, logo a operação de fresamento se caracteriza por uma elevada taxa de deformação plástica, aumento de atrito e da força de usinagem ao invés de haver remoção do material da peça, gerando um crescente aumento da energia e nos níveis de emissão acústica.

Logo, nota-se que o gráfico que relaciona os valores de rms com o desgaste de flanco da ferramenta, figura 4, está coerente com o a teoria, pois com o decorrer do tempo o nível de energia aumenta com o aumento do desgaste de flanco.

No gráfico da figura 3 é mostrado que o parâmetro estatístico *skewness* decresce com o aumento do desgaste. Este parâmetro indica se há uma maior quantidade de valores acima ou abaixo da média de todos os pontos adquiridos, ou seja, indica a proporção entre picos e vales numa distribuição (sinal de emissão acústica, vibração, rugosidade).

Um valor de *skewness* negativo indica que a maior parte dos pontos se encontra a abaixo da média, ou seja, que temos um maior número de vales. Valores de *skewness* positivos indicam que a maior parte dos pontos se encontra acima da média, ou seja, que temos um maior número de picos.

Provavelmente esta diminuição pode estar relacionada com a evolução da temperatura no processo. Como mencionado anteriormente, conforme o desgaste de flanco aumenta, as flutuações de temperatura diminuem, pois esta se distribui pela ferramenta de corte devido ao aumento da área de contato da ferramenta com a peça.

5. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que existe uma boa correlação, em se tratando de processo de usinagem, entre alguns parâmetros estatísticos do sinal de emissão acústica e o desgaste da ferramenta. As melhores correlações do sinal de emissão acústica são a *skweness* e o RMS. Outro fator importante a ser mencionado, que pode justificar a baixa correlação entre os parâmetros estatísticos e o desgaste das ferramentas, refere-se às frequências harmônicas do CNC utilizado. Na avaliação da sensibilidade do sinal, deve ser feita aquisição do sinal de emissão acústica da máquina sem usinar. Os resultados devem ser utilizados para construção de filtros para eliminação das frequências naturais do CNC. Os dados dos ensaios devem ser submetidos a esses filtros, retirando as frequências da máquina. O sinal resultante teria dados apenas referentes ao processo de usinagem.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fornecimento da bolsa concedida e incentivo à pesquisa através do processo 309100/2006-2, à empresa *Villares Metals S.A* pelo fornecimento do material dos corpos de prova, à Fapemig pelo apoio à pesquisa através do processo APQ-2741-6.01/07, ao IFM e CAPES pelos recursos ao desenvolvimento científico e tecnológico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLUM, T., INASAKI, I., "A Study on Acoustic Emission from Orthogonal Cutting Process", Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, August 1990, pp. 203.

DIEI, E.N., DORNFELD, D.A., "Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Face Milling", ASME Journal of Engineering for Industry, August 1987, pp. 234-240.

Emel, J., Kannatey-Asibu, E., "Acoustic Emission and Force Sensor Fusion for Monitoring the Cutting Process", International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 31, No. 11-12, 1989, pp. 795-809.

Emel, E., Kannatey-Asibu, E., "Acoustic Emission Monitoring of the Cutting Process – Negating the Influence of Varyng Cutting Conditions", ASME Journal of Engineering Materials of Technology, Vol. 113, No. 6, October 1991, pp. 456-464.

KALPAKJIAN, S., SCHMID, S.R., "Manufacturing Engineering and Technology", 2001, 4a. edição; Prentice Hall.

KANENOBU, A.A., ROSSI, G.C., "Monitoramento do Desgaste da Ferramenta num Processo de Fresamento Topo", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP.

KANNATEY-ASIBU, E., DORNFELD, D.A., "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 103, August 1981, pp. 330-340.

KANNATEY-ASIBU, E., DORNFELD, D.A., "A Study of Tool Wear Using Statistical Analysis of Metal-Cutting Acoustic Emission", Wear, 76, pp. 247-261.

MACHADO, A.R., SILVA, M.B., "Usinagem dos Metais", 4ª versão, Abril de 2004.

NETO, A.P., "Determinação do Tempo de Vida de Fresas-WEG", Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Departamento de Produção.

PIGARI, A.C. e DINIZ, A.E., 1966, "Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, vol. XVIII, nº 3, pp. 227-238.

PORTO, V.J " Usinagem de Ultraprecisão" pp. 213-236.

TRENT, E.M., 1984, "Metal Cutting", 2 ed. London: Butterworths, 254 p.

SOUTO, U.B., 2007, "Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento Via Emissão Acústica", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

UEHARA, K., "New Attempts for Short Time Tool Life Testing", Annals CIRP, vol. 22, No. 1, 1973, pp. 13-18.

TOOL WEAR ANALYSIS USING ACOUSTIC EMISSION IN STAINLESS STEEL MACHINING

Stéfano Grandi Bombonato, omegahert@hotmail.com¹
Augusto Aires Lustosa, agosto_lustosa@yahoo.com.br¹
Rodrigo Henriques Lopes da Silva, rodrigohenriqueslopes@hotmail.com¹
Ulisses Borges Souto, ulisses.souto@sociesc.org.br²
Márcio Bacci da Silva, mbacci@mecanica.ufu.br¹

¹Mechanical Engineering Faculty, Federal University of Uberlândia, Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia/MG, Brazil, CEP 38408-902.

²Sociesc, Rua Albano Schmidt, 333, Joinville/SC, CEP 89206-001

Abstract: *This work presents a proposal of a methodology for monitoring milling operation using acoustic emission signal. It is used a frontal milling operation with only one insert in the tool holder. The workpiece material is a stainless steel VP-80 precipitated hardened. The tool flank wear is measured periodically and the corresponding acoustic emission signal is recorded during the operation. The AE signal was acquired during several operations, using the same cutting condition, with a piezoelectric sensor mounted in the middle section of the workpiece. Different statistic parameters are used to correlate the AE signal and flank wear: skewness, kurtosis, rms, pick and crest factor. For some parameters there is a significant correlation between AE and tool wear.*

Keywords: *milling, tool wear, process monitoring, acoustic emission*