

ANÁLISE DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA NO MICROFRESAMENTO DE AÇO COM GRÃOS ULTRAFINOS

Kandice Suane Barros Ribeiro

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP – Brasil.
kandicebarros@usp.br

Marcelo Marchi

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP – Brasil.
marcelo.marchi@outlook.com

Alessandro Roger Rodrigues

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP – Brasil.
roger@sc.usp.br

Resumo. Diante das dimensões reduzidas das ferramentas de microfresamento, a seleção não otimizada dos parâmetros de corte tende a maximizar o desgaste e a quebra da ferramenta durante operações de microusinagem. A análise do desgaste da ferramenta e da integridade da superfície da peça é normalmente realizada após a usinagem, o que exige um maior tempo de investigação pós-processo em microscópios de alta resolução. Isto posto, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para explorar as condições da microfresa durante a usinagem é fundamental. Portanto, o objetivo desta pesquisa é propor um método de monitoramento por emissão acústica (EA) em operações de microfresamento do aço COS AR60 com grãos ultrafinos (322 HB). Os testes de microfresamento foram realizados empregando ferramentas de diâmetro de 800 μm , dois dentes e revestimento TiNAl, em um centro de usinagem CNC Hermle C800U sem aplicação de fluido de corte. Os sinais de emissão acústica foram adquiridos à taxa de 250 kHz e processados no MATLAB®. O valor RMS de cada sinal foi calculado e utilizado na avaliação da condição da ferramenta em conjunto com o desgaste de flanco medido. Os resultados apontaram uma redução em 2,29% no diâmetro da microfresa e que o sinal de emissão acústica puro e filtrado (1 kHz a 2 kHz) aumentou com o crescimento dos níveis de desgaste da ferramenta. Com isso, o estudo do sinal de emissão acústica mostrou-se viável e promissor no monitoramento de operações de microfresamento.

Palavras-chave: Microfresamento. Desgaste. Monitoramento. Emissão acústica. Processamento de sinais.

1. INTRODUÇÃO

A demanda pela produção de dispositivos ricos em detalhes tem impulsionado o desenvolvimento de processos de fabricação que atendam os requisitos necessários para atribuição de formas, texturas e tolerâncias aos componentes (Ehmann *et al.*, 2007). Dentre os processos de microusinagem convencionais, o microfresamento possui maior flexibilidade e versatilidade, visto que possibilita a produção de variadas geometrias e microestruturas de alta complexidade (Brinksmeier *et al.*, 2001).

No microfresamento, o efeito escala é significativo, uma vez que ocorre quando a dimensão da espessura do material removido é da mesma ordem de grandeza que o raio de aresta da ferramenta, ou o tamanho do grão do material (Cheng e Huo, 2013), implicando em um aumento não linear da energia específica de corte à medida que a espessura do cavaco não deformada diminui (Mian *et al.*, 2011).

O tamanho de grão de um material multifásico determina a quantidade de grãos na área da seção de corte ao ser microusinado. A heterogeneidade na microestrutura da peça leva a variações significativas no processo de usinagem (força de usinagem, cavaco, etc.) à medida que o corte passa de uma fase para outra. (Cardoso e Davim, 2012). Assim, grande esforço tem sido feito no estudo e desenvolvimento de materiais com grãos ultrafinos, buscando um melhor comportamento mecânico e uma microestrutura mais homogênea (Komatsu *et al.*, 2012). De acordo com Bissacco *et al.* (2005), a escolha de materiais com o menores tamanho de grãos e com alta homogeneidade trazem benefícios para o processo de microfresamento. A microusinagem de materiais com tamanho de grão normal pode ser considerada como uma usinagem anisotrópica (Chae *et al.*, 2006), visto que da perspectiva da redução de escala, o material passa a se comportar de forma heterogênea.

O tempo necessário para análise da microfresa em um microscópio ou a instrumentação requerida para que essa análise seja *in loco* dificultam a otimização da produção por serem processos que demandam um maior tempo (Dow *et al.*, 2004). O desgaste da ferramenta tem impacto na usinagem devido ao papel que desempenha no aumento das forças e potência de corte, temperatura de contato, precisão dimensional e rugosidade da peça (Trent, 1984). A troca da ferramenta na usinagem ocorre então sempre que há uma avaria e quando os níveis de desgaste atingem proporções elevadas, o que

compromete a qualidade e o andamento da operação (Machado *et al.*, 2009). Embora haja condições variadas de corte, há uma predominância da ocorrência de desgaste de flanco na superfície de folga principal relatada na literatura (Rahman *et al.*, 2001; Dow *et al.*, 2004). De acordo com Kumar *et al.* (2006), abrasão, adesão e difusão são os principais mecanismos de desgaste que culminam no desgaste de flanco e de cratera.

Nesse contexto, medir os níveis de desgaste de forma otimizada e apontar o momento mais adequado para a substituição da ferramenta de corte têm potencializado estudos na área de microusinagem (Tansel *et al.*, 1998; Dow *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 2018). Uma opção para o investigar a evolução do desgaste de microfresas e a ocorrência de avarias nas arestas de corte consiste na utilização de sensores que tornem possível a avaliação do estado da microfresa sem influenciar no tempo de *setup* com paradas desnecessárias do processo (Malekian *et al.*, 2009). As principais técnicas de monitoramento no microcorte envolvem sensores de emissão acústica, vibração e força (König *et al.*, 1992).

Jamielniak e Arrazola (2008) monitoraram a condição da ferramenta no microfresamento via sensores de força e de emissão acústica e identificaram que o sinal de emissão acústica sofre variações em termos de intensidade do valor quadrático médio (RMS). Essa forma de processamento de sinal possibilitou a detecção do contato peça-ferramenta, transmitindo informações a respeito da integridade da ferramenta de corte. Os resultados apontaram que a correlação entre força e desgaste no microfresamento é semelhante à do fresamento convencional, embora os níveis de força tenham sido consideravelmente inferiores.

Mian *et al.* (2011) realizaram testes de microfresamento na liga de níquel Inconel 718 usando uma fresa de topo de metal duro com 500 μm de diâmetro, monitorando o sinal de emissão acústica do processo. O autor utilizou, no processamento do sinal, as Transformadas Rápida de Fourier (FFT) e de Wavelet (WT) para identificar as bandas de frequência e de energia presentes no sinal, respectivamente. Os resultados obtidos mostraram que o monitoramento de emissão acústica contribuiu significativamente para a investigação do mecanismo de efeito de escala.

Os sinais de EA podem fornecer informações importantes sobre operações de microfresamento. Porém, análises mais rigorosas necessitam de processamento de sinal para obtenção de informações que correlacionem o sinal com o desgaste da ferramenta de corte ou quanto à qualidade superficial da peça, por exemplo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é identificar a condição da microfresa durante o processo de microfresamento, a partir do monitoramento do desgaste da ferramenta via aquisição e processamento de sinais de emissão acústica.

2. METODOLOGIA

Os ensaios de microfresamento foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC Hermle C800U, de comando numérico Siemens 828D, alocado no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Para controle de rotação, utilizou-se um cabeçote pneumático de alta rotação NSK HES501 acoplado ao eixo-árvore do centro de usinagem, com controlador NSK Astro-e500. Os microcanais foram usinados com microfresas de diâmetro e raio de aresta medidos em 803,660 e 1,98 μm , respectivamente, e duas arestas, com substrato de metal duro e revestimento TiNAl. O corpo de prova foi de aço COS AR60 de Grãos Ultrafinos (GUF) de tamanho de grão médio de 0,7 μm (Fig. 1) e dureza 322 HB, obtido conforme descrito na patente PI11072474, nas dimensões de 10x26x60 mm.

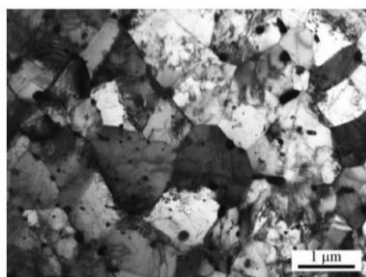


Figura 1. Microestrutura do GUF

A estratégia de usinagem adotada foi o corte em cheio (máxima penetração de trabalho) sem a aplicação de fluido de corte. Os ensaios foram realizados com rotação de 24.000 rpm, avanço por aresta de 3 μm e profundidades de usinagem de 40, 70, 100, 130, 160 e 190 μm . Para cada profundidade há um volume de material removido, grandeza que se correlaciona com a produção e com a severidade do processo de usinagem (desgaste da ferramenta de corte). O ensaio ocorreu de forma progressiva na fabricação de três microcanais para cada profundidade de usinagem. A escolha dos parâmetros de corte foi realizada a fim de averiguar como as condições de usinagem influenciam o desgaste da microfresa e o comportamento do sinal de emissão acústica, partindo do pressuposto que condições severas de usinagem seriam evitadas para preservar a ferramenta de prováveis avarias.

Para o monitoramento foi utilizado um sensor de EA convencional (Sensis), um monitor de processos (Sensis DM42), uma placa de aquisição *National Instruments* modelo DAQ USB-6211 e um microcomputador. O sinal foi adquirido a

uma taxa de 250 kHz por meio de uma aplicação desenvolvida em LabVIEW®. O *setup* experimental é apresentado na Fig. 2. Para análise da ferramenta, o microscópio laser 3D confocal Olympus OLS 4100 foi utilizado antes e depois do teste. Imagens de topo e de cada aresta nas superfícies de saída e de folga principal foram realizadas com aumento óptico de 10x e 50x, respectivamente.

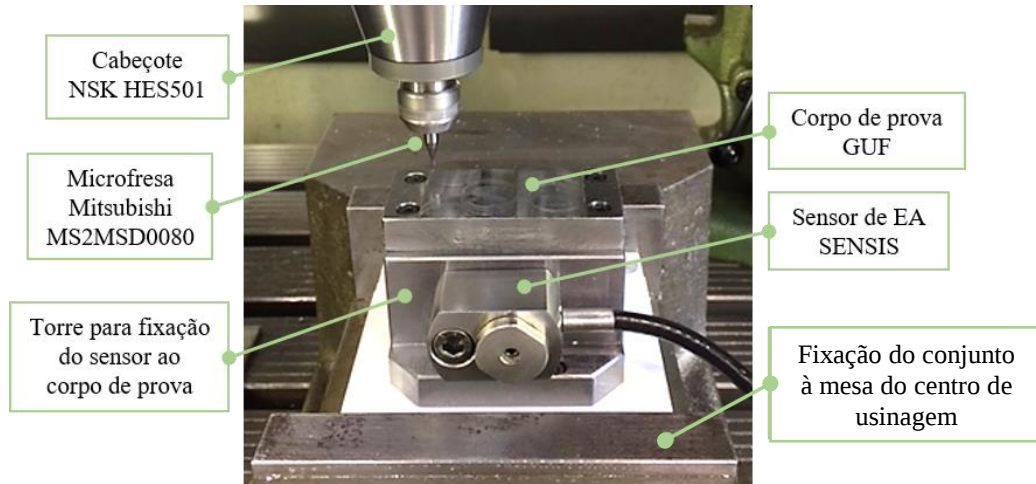


Figura 2. Setup experimental do ensaio de microfresamento

Para o processamento de sinal, rotinas no MATLAB® foram desenvolvidas para a análise dos dados com base na implementação de filtros digitais e de algoritmos FFT e RMS. No processamento do sinal de emissão acústica, a análise espectral foi dada a partir do gráfico de FFT, com janela Hanning (considerando 8.192 amostras) para verificar a faixa de frequência mais significativa do sinal. Uma vez determinada a banda de análise, os valores RMS (em blocos de 2.048 amostras) foram calculados tanto para o sinal bruto quanto para o sinal filtrado na frequência previamente determinada.

Posteriormente, aos sinais RMS de EA bruto e processado foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) *oneway*, visando identificar ou não significância nos resultados obtidos com a variação da profundidade de usinagem (*software* Statistica v.64). Testes de normalidade validaram a aplicação da ANOVA, que utilizou um nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise visual da microfresa utilizada no ensaio (Fig. 3) indicou a presença de desgaste de flanco na superfície de folga principal e secundária, e também do desgaste de cratera na superfície de saída, KT2 (ISO 8688-2, 1989). O encontro desses dois tipos de desgaste provoca uma região irregular ao longo da aresta de corte, que potencializa a redução do diâmetro da microfresa. Esse valor, ao término do ensaio, foi de 785,29 μm , que representa uma redução de 2,28% do diâmetro inicial medido (-18,37 μm).

O desgaste de flanco, ao longo da microusinagem, apresentou níveis conforme Fig. 4, na qual se evidencia a correlação entre o desgaste de flanco máximo medido e o volume de material removido. É possível destacar a semelhança da curva com o comportamento típico de evolução do desgaste em ferramentas de corte: a primeira etapa é caracterizada por uma alta taxa de crescimento do desgaste, seguida por uma zona de transição na qual a taxa de desenvolvimento do desgaste tende a ser constante, até que o crescimento acelerado é retomado na terceira zona (região de falha).

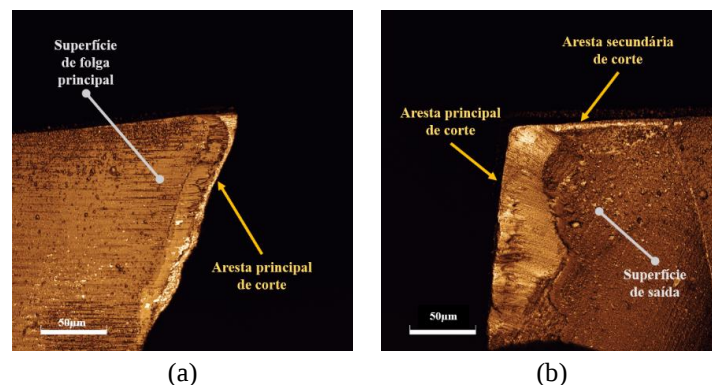


Figura 3. Superfície de folga (a) e de saída (b) da aresta que apresentou maiores níveis de desgaste

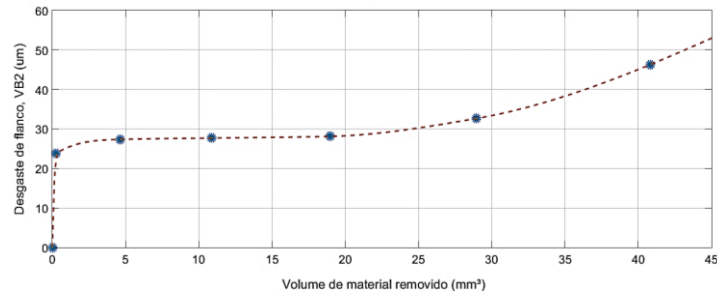


Figura 4. Desgaste de flanco máximo por volume de material removido

A análise espectral é um método de eficiente aplicação no estudo de sinais. Baseia-se na seleção de faixas de frequências que caracterizam a variável física de interesse (Zeng e Forssberg, 1994). O método utilizado neste estudo para análise da frequência do sinal foi a Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*). Os sinais de EA no domínio da frequência, para todos as profundidades de usinagem, são apresentados na Fig. 5.

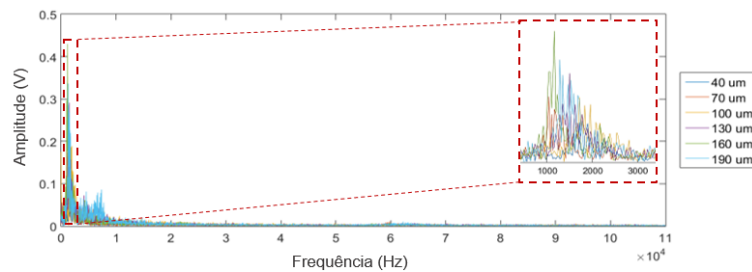


Figura 5. FFT dos sinais de EA (bruto) com janela Hanning de 8.192 amostras para $a_p = 40, 70, 100, 130, 160$ e $190 \mu\text{m}$

Com a Fig. 5, pode-se destacar as frequências de maior amplitudes e energia do espectro de frequência. Assim, a região da banda de frequência para análise foi definida entre 1 kHz e 2 kHz. Os valores RMS dos sinais de EA puro e filtrado se correlacionam com a profundidade de usinagem, conforme Fig. 6a e Fig. 6b, respectivamente. A barra de erro representa os valores do conjunto amostral representativos no intervalo de 3 vezes o desvio padrão.

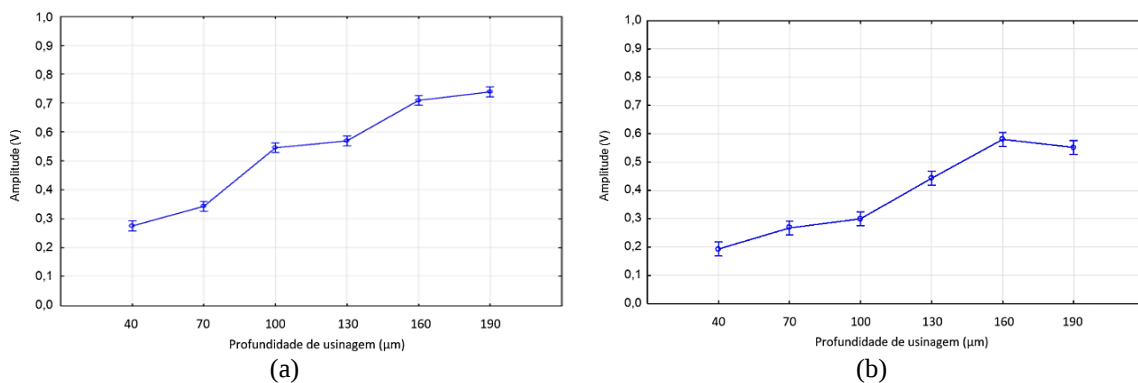


Figura 6. Efeito da profundidade de usinagem no sinal RMS de EA bruto (a) e filtrado na banda de 1 a 2 kHz (b)

De acordo com os dados expostos na Fig. 6a é possível identificar uma tendência de crescimento dos valores RMS do sinal bruto com o aumento da profundidade de usinagem e, por conseguinte, com o aumento do volume de material removido. Destaca-se ainda a variação da amplitude do sinal com a profundidade de usinagem, e uma tendência de crescimento do sinal e.g. para profundidade de usinagem de 130 e 190 µm. Nesses pontos, com a mesma profundidade de usinagem, o fator de influência sobre os níveis de sinal de emissão acústica passa a ser o desgaste da microfresa, enquanto quando comparada apenas a evolução da amplitude do sinal com o volume de material removido, tanto o desgaste da microfresa quanto a profundidade de usinagem possuem parcelas significativas no comportamento do sinal.

Para o estudo do sinal bruto, é possível apontar que os sinais apresentam amplitudes significativamente distintas para as profundidades de 40 µm, 70 µm, uma faixa de 100 a 130 µm e outra entre 160 e 190 µm, o que, em outras palavras, configuram patamares de profundidades de usinagem que podem ser mais bem trabalhadas em pesquisa futura. Para o

sinal filtrado, as faixas de profundidade de usinagem também apresentam uma tendência: 40 µm, uma faixa de 70 a 100 µm, 130 µm e outra faixa de 160 a 190 µm. O estudo da correlação entre sinal de EA e os níveis de desgaste de flanco e de cratera é tema sugerido para trabalhos futuros, assim como a correlação entre o raio de aresta e os tipos e mecanismos de desgaste predominantes no microfresamento.

4. CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado, pode-se concluir que o monitoramento da condição da microfresa na usinagem de microcanais por meio de sinais de EA mostrou-se sensível tanto à variação da profundidade de usinagem quanto à evolução do desgaste da microfresa. A análise visual da microfresa revelou a ocorrência de desgaste de flanco na superfície de folga principal e desgaste de cratera na superfície de saída. Como consequência do aumento dos níveis de desgaste, houve uma redução no diâmetro da microfresa medida em 2,28%. Devido à limitação do setup experimental, não foi possível identificar as parcelas de influência da variação da profundidade de usinagem e da evolução do desgaste no sinal de EA, sendo esses fatores analisados em conjunto neste trabalho. Porém, pôde-se obter que há uma relação de proporcionalidade direta entre o volume de material removido, a amplitude do sinal de EA RMS e a evolução do desgaste da microfresa (flanco máximo) na análise do sinal bruto e filtrado na banda de frequência entre 1 kHz e 2 kHz. Por fim, mediante ANOVA do conjunto de valores de EA RMS, identificaram-se os patamares de profundidade de usinagem com diferença significativa entre si nas faixas de 70 a 130 µm e de 160 a 190 µm, em termos de amplitude de sinal e de níveis de desgaste da microfresa.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento da pesquisa. Aos Prof. Me. Rodrigo José Ferreira da Silva e Prof. Dr. Ricardo Arai pela contribuição na execução dos ensaios experimentais.

6. REFERÊNCIAS

- Bissacco, G., Hansen, H. N. e De Chiffre, L., 2005. "Micromilling of hardened tool steel for mould making applications". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, n. 2-3, p. 201-207.
- Brinksmeier, E., Riemer, O. e Stern, R., 2001. "Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium: Machining of Precision Parts and Microstructures". In *Proceedings of 10th International Conference on Precision Engineering - ICPE*. Yokohama, Japão. p. 3-11.
- Cardoso, P. e Davim, J. P., 2012. "Micro milling of metallic materials - A brief overview". *Transactions of Famena*, Vol. 36, n. 2, p. 79-85.
- Chae, J., Park, S. S. e Freiheit, T., 2006. "Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 46, n. 3-4, p. 313-332.
- Cheng, K. e Huo, D., 2013. *Micro-Cutting: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, West Sussex, 1ª edição.
- Ehmann, K. F., Bourell, D., Culpepper, M. L., Hodgson, T. J., Kurfess, T. R., Madou, M. e Rajurkar, L., 2007. *Micromanufacturing: International Assessment of Research and Development*. Springer, Dordrecht, 1ª edição.
- Dow, T. A., Miller, E. L. e Garrard, K., 2004. "Tool force and deflection compensation for small milling tools". *Precision Engineering*. Vol. 28, n. 1, p. 31-45.
- ISO 8688-1, 1989. "Tool life testing in milling – Part 1: face milling". INTERNATIONAL STANDARD, Geneva.
- Jemielniak, K. e Arrazola, P. J., 2008. "Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol. 1, n. 2, p. 97-102.
- Komatsu, T., Yoshino, T., Matsumura, T. e Torizuka, S., 2012. "Effect of crystal grain size in stainless steel on cutting process in micromilling". *Procedia CIRP*. Vol. 1, n. 1, p. 150-155.
- König, W., Kutzner, K. e Schehl, U., 1992. "Tool monitoring of small drills with acoustic emission". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 32, n. 4, p. 487-493.
- Kumar, A. S., Durai, A. R. e Sornakumar, T., 2006. "Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels". *Tribology International*. Vol. 39, n. 3, p. 191-197.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Da Silva, M. B., 2009. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher, São Paulo, 1ª edição.
- Malekian, M., Park, S. S. e Jun, M. B. G., 2009. "Tool wear monitoring of micro-milling operations". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209, n. 10, p. 4903-4914.

- Mian, A. J., Driver, N. e Mativenga, P. T., 2011. "Identification of factors that dominate size effect in micro-machining". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 51, n. 5, p. 383-394.
- Rahman, M., Kumar, A. S. e Prakash, J. R. S., 2001. "Micro milling of pure copper". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 116, n. 1, p. 39-43.
- Santos, A. G., Silva, M. B. e Jackson, M. J., 2018. Tungsten carbide micro-tool wear when micro milling UNS S32205 duplex stainless steel. *Wear*. Vol. 414-415, p. 109-117.
- Tansel, I., Rodriguez, O., Trujillo, M., Paz, E. e Li, W., 1998. "Micro-end-milling – I. Wear and breakage". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 38, n. 2, p. 1419-1436.
- Trent, E. M., 1984. *Metal Cutting*. Butterworths & Co Ltd, Londres, 2ª edição.
- Zeng, Y. e Forssberg, E., 1994. "Application of vibration signal measurement for monitoring grinding parameters". *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 8, n. 6, p.703-713.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

EVALUATION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS ON MICRO MILLING OF ULTRAFINE-GRAINED STEEL

Kandice Suane Barros Ribeiro

Department of Mechanical Engineering, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo. Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schimidt, CEP 13566-590, São Carlos/SP – Brazil.
kandicebarros@usp.br

Marcelo Marchi

Department of Mechanical Engineering, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo. Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schimidt, CEP 13566-590, São Carlos/SP – Brazil.
marcelo.marchi@outlook.com

Alessandro Roger Rodrigues

Department of Mechanical Engineering, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo. Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schimidt, CEP 13566-590, São Carlos/SP – Brazil.
roger@sc.usp.br

Abstract. Regarding the reduced dimensions of micro-milling tools, a non-optimised selection of cutting parameters tends to maximise tool wear and breakage during operations. The analysis of tool wear and surface integrity of the workpiece is usually carried out after machining, which demands a time-consuming analysis in high resolution microscopes. Hereupon the development of a monitoring system for exploring microtool conditions during machining is imperative. This research proposes a method of monitoring based on an acoustic emission (AE) sensor in micro-milling operations of ultrafine-grained steel COSAR 60 (322 HB). Cutting tests were performed with carbide endmill tools with TiNAl coating, two flutes and 800 μm diameter in a CNC machining centre Hermle C800U without cutting fluid application. AE signals were acquired at the rate of 250 kS/s. The data were obtained in LabVIEW® and processed in MATLAB®, where the Root Mean Square (RMS) value was calculated and used in the evaluation of tool condition along with the measured flank wear. The results revealed that increasing chip removal volume a decrease of 2.28% in tool diameter and an increasing of the AE signal amplitude for both raw and filtered data. Thus, this method of monitoring is feasible for micro-milling application.

Keywords: Micro-milling. Tool wear. Monitoring. Acoustic Emission. Signal Processing.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.