

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE MICROFRESAMENTO DE INCONEL 718 ATRAVÉS DE SINAIS DE ACÚSTICA E VIBRAÇÕES

Déborah de Oliveira

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70910-900, Brasília-DF, Brasil.
oliveira.deborah@unb.br

Milla Caroline Gomes

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, CEP: 38408-100, Uberlândia-MG, Brasil.
millagomes150@gmail.com

Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP: 70910-900, Brasília-DF, Brasil.
mziberov@unb.br

Marcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, CEP: 38408-100, Uberlândia-MG, Brasil.
mbacci@ufu.br

Resumo. A microusinagem pode ser diferenciada da usinagem macro como sendo um processo em que as características da peça, geometrias e dimensões, ou mais comumente em que a ferramenta possui de 1 μm a 1000 μm . Diferente da usinagem macro, neste processo a aresta de corte não é considerada perfeitamente plana e haverá uma grande influência do efeito escala. Além disso, estas dimensões reduzidas dificultam o controle e o acompanhamento do processo, seja em relação às superfícies geradas ou ao desgaste da microferramenta. Neste sentido, os pesquisadores têm tentado estudar diferentes metodologias de controle para obter informações sobre o processo, se destacando o uso de sensores de força, vibrações e emissão acústica. Considerando esta necessidade, este trabalho visa avaliar o uso de sensores de vibrações e acústica para correlacionar com a condição de desgaste da microferramenta. Os resultados mostraram que por meio da utilização dos sinais de vibração e de acústica é possível monitorar a condição de desgaste das microferramentas.

Palavras-chave: Microfresamento. Inconel 718. Monitoramento. Acústica. Vibrações.

1. INTRODUÇÃO

A microusinagem é definida como um processo subtrativo de fabricação em que o material é diretamente removido por uma microferramenta (Jain, 2015). De maneira mais específica, pode ser definida como um processo em que a ferramenta deve possuir dimensões entre 1 μm e 1000 μm (Camara *et al.*, 2012). Camara *et al.* (2012) comentam ainda que o aspecto mais importante da microusinagem é o fato de a microferramenta ter o raio de sua aresta de corte com dimensões próximas às da microestrutura do material e da espessura de corte, o que faz com que as teorias tradicionalmente aplicadas à usinagem não possam ser utilizadas na microusinagem.

Além dessa diferença, Masuzawa (2000) pontua as seguintes características da microusinagem em relação à usinagem convencional:

- Máquinas de usinagem de ultraprecisão conseguem atingir os mais altos níveis de exatidão de posicionamento;
- Há uma necessidade de redução dos raios de ponta das ferramentas;
- O processo não depende da condutividade elétrica da peça;
- É possível controlar o tempo de usinagem, pois os processos são estáveis;
- Para peças muito pequenas a rigidez do material pode ser um limitante para a operação.

Devido às características do processo muitas micro peças ainda não podem ser fabricadas em escala industrial, principalmente devido à impossibilidade de aplicar processos de acabamento posteriores, como é realizado em usinagem macro (Brinksmeier *et al.*, 2010 e Camara *et al.*, 2012). Além disso, dentre os problemas que podem ocorrer na superfície microusinada destacam-se, a baixa qualidade dos contornos, as rebarbas e os defeitos na superfície, como por exemplo, destacamentos e material aderido (Dornfeld *et al.*, 2006). Desta forma, é essencial que se estudem formas de monitorar o

processo para prever a qualidade das peças e as condições da ferramenta, de forma a obter peças finais com a qualidade desejada.

Sabe-se ainda que o uso adequado do monitoramento na usinagem aumenta a confiabilidade, e evita paradas desnecessárias (Machado *et al.*, 2011). Considerando ainda os requisitos de alta precisão do microfresamento, o monitoramento pode auxiliar no acompanhamento adequado do desgaste das microferramentas, em geral mais demorado e oneroso que de ferramentas convencionais, sendo que o desgaste irá influenciar diretamente nas características superficiais da peça. Também é importante destacar que o monitoramento de desgaste se torna fundamental nos processos de microfresamento devido ao pequeno tamanho das microferramentas que impossibilita observar a olho nu a presença de algum dano ou até mesma quebra da mesma (Zhu *et al.*, 2009).

Diante da importância de se monitorar os processos de microusinagem, para assegurar um bom acabamento das superfícies usinadas, este trabalho tem como objetivo analisar sinais de vibração e de acústica adquiridos durante o microfresamento do Inconel 718 para serem utilizados no monitoramento da condição de desgaste das microferramentas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de microfresamento foram realizados em uma microfresadora CNC Mini-mill/GX (Minitch Machinery Corporation), de 3 eixos e com resolução de posicionamento de 0,1 μm , além disso, possui velocidade de avanço máxima de 1000 mm/min. A amostra selecionada foi um bloco de Inconel 718 possuindo as seguintes dimensões: 15 mm de largura, 15 mm de altura e 20 mm de comprimento. O material possui elevada dureza, aproximadamente 530 HV (De Oliveira *et al.*, 2019a), e algumas das suas propriedades mecânicas podem ser vistas na Tab. 1.

Tabela 1. Propriedades do Inconel 718 HV (adaptado de De Oliveira *et al.*, 2019b)

Propriedade	Valor
Limite de resistência à tração (MPa)	1275
Limite de escoamento (MPa)	1034
Módulo de Young (GPa)	200
Densidade à temperatura ambiente (g/cm^3)	8,22
Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	1260 – 1336
Condutividade térmica (W/mk)	11,4

A microferramenta utilizada foi uma microfresa de metal duro, revestida de (Al, Ti)N. Suas dimensões, em milímetros e graus, podem ser observadas na Fig.1.

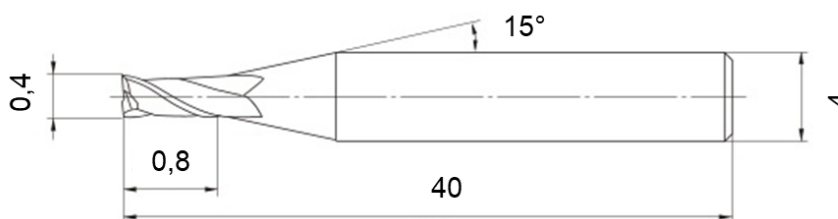


Figura 1. Microferramenta MS2MSD0040 (Mitsubishi, 2021)

Os ensaios foram realizados com fluido de corte Coolube 2210EP do fabricante UNIST e consistiram em usinar 12 microcanais retos, com 15 mm de comprimento e 40 μm de profundidade na superfície da amostra de Inconel 718. Como parâmetro de fim de vida da microferramenta foi adotado um desgaste de 12 μm , no diâmetro.

Os parâmetros de corte utilizados para os ensaios podem ser observados na Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros de corte

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Rotação n (rpm)	11000	20000	40000	60000
Velocidade de corte v_c (m/min)	13,8	25,1	50,3	75,4
Avanço v_f (mm/min)	110	200	400	600
Avanço por dente f_z ($\mu\text{m}/\text{dente}$)	5			

Em relação ao monitoramento, foram selecionados dois sensores, um de vibração e um de acústica. O sensor de vibração consistia em um acelerômetro modelo 352C33, fabricado pela PCB Piezotronics, com sensibilidade de 100,4 mV/g e faixa de frequência de 0,5 Hz a 10,0 kHz. Já o sensor de acústica foi um microfone modelo 4957, fabricado pela Brüel & Kjær, com sensibilidade de 11,2 mV/Pa e faixa de frequência variando de 0,5 Hz a 10,0 kHz. Para obter o sinal gerado pelo corte com maior sensibilidade, o acelerômetro foi fixado perpendicular à direção do avanço, o microfone por sua vez foi posicionado próximo a peça (mantendo a distância fixa) e equipado com uma proteção acrílica devido ao uso de fluido de corte, Fig. 2. Vale ressaltar que ensaios preliminares foram realizados para verificar a possibilidade de utilizar a proteção acrílica sem prejuízos para a obtenção dos sinais acústicos.

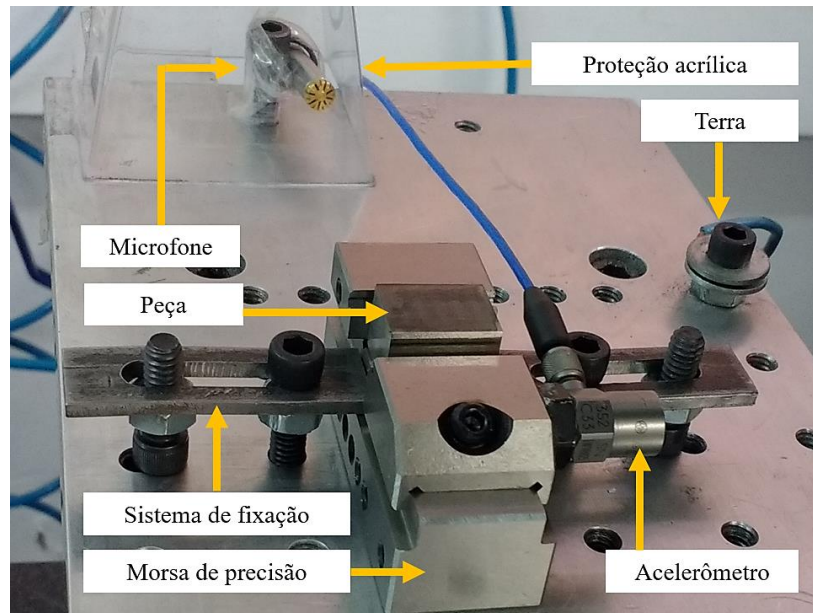


Figura 2. Sistema de fixação da amostra e sensores

Além dos sensores, foi utilizado um condicionador da PCB Piezotronics modelo 482A20, com faixa de frequência de 0,225 Hz a 50,000 kHz, para adquirir os sinais dos sensores com um ganho de 100 vezes. E uma placa National Instruments, NI USB 9162, com resolução de 24 bits e faixa de medição de -10 V a +10 V para conversão analógico/digital. Os sinais foram adquiridos pelo software Aquis IV – CVRI, desenvolvido no Laboratório de Acústica e Vibração (LAV) da UFU, a partir do qual puderam ser coletados e armazenados para análise utilizando o software MATLAB.

A aquisição do sinal foi realizada, separadamente para cada canal, e obteve dados durante todo o processo: desde a movimentação da microfresa até a saída completa do canal, com um tempo total de aquisição igual a 30 s. A taxa de aquisição adotada foi de 32768 Hz, pois de acordo com Gomes *et al.* (2021) todas as excitações que podem influenciar no desgaste das microferramentas podem ser adquiridas nesta faixa.

Para as análises foram selecionados os sinais referentes aos dois primeiros canais para representar a ferramenta nova, o canal onde ocorre o critério de fim de vida e o seguinte, para representar o sinal do critério de fim de vida e os dois últimos canais para representar o máximo desgaste de cada condição de corte analisada. Portanto, os canais foram sempre selecionados em pares para aumentar a amostragem.

A metodologia de tratamento e análise de sinais foi baseada no trabalho de Gomes (2019), e ocorreu da seguinte forma, através do software MATLAB:

- Identificação da região do sinal onde ocorre o microfresamento;
- Análise no domínio da frequência utilizando o método de Welch para determinação da Densidade Espectral de Potência (PSD) e das bandas de frequência sensíveis ao desgaste;
- Tratamento dos sinais com filtro Butterworth de ordem 4;
- Extração dos seguintes parâmetros estatísticos: Valor Médio Quadrático (RMS), Pico, Pico a Pico, Curtose (Kurtosis), Assimetria (Skewness) e Fator de Crista;
- Finalmente, após o cálculo dos parâmetros estatísticos, foi realizada a análise de sensibilidade por meio do gráfico boxplot, para verificação de quais parâmetros estatísticos podem ser utilizados no monitoramento da condição da microferramenta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 tem-se apresentado sinais adquiridos no domínio do tempo, para as microfresas em boas condições de corte (cor azul), desgastada até o final de vida (preto) e desgastada nos últimos canais (vermelho), para os sinais de acústica. Conforme pode-se observar, os níveis das amplitudes dos sinais adquiridos correspondentes à microfresa nova e desgastada não se diferenciam. Esse mesmo comportamento foi notado nos sinais de vibração. Sendo assim, todas as análises foram realizadas no domínio da frequência, para isso, foi utilizado o estimador de Welch para a determinação da Densidade Espectral de Potência (PSD), já que neste domínio foi possível identificar diferenças entre os sinais para diferenciar a condição da microferramenta. Este resultado foi semelhante ao encontrado por Hsieh, *et al.* (2012), que analisaram os sinais no domínio da frequência para monitorar a condição da microfresa no microfresamento do aço SK2.

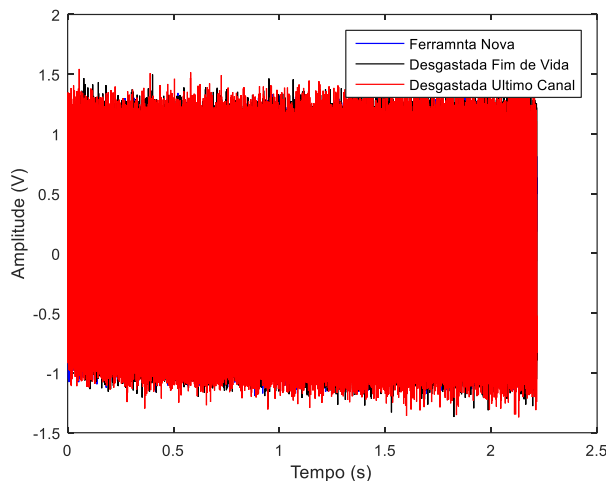


Figura 3. Sinais sobrepostos em função do tempo para ferramenta nova (azul), desgastada até o final de vida (preto) e desgastada nos últimos canais (vermelho)

Por meio da análise no domínio da frequência foi determinada uma banda de frequência, na qual há amplitudes do sinal da microfresa desgastada maior que as amplitudes do sinal da microfresa nova. A partir da determinação dessa banda foram extraídos os parâmetros estatísticos para cada condição de ensaio.

Finalmente, foi verificado a sensibilidade de cada um dos parâmetros com a identificação da condição de desgaste da microferramenta, através do gráfico boxplot. Para os parâmetros analisados possuírem sensibilidade é necessário que as caixas e ou medianas, referentes a condição nova da microferramenta estejam abaixo das caixas ou medianas associadas a condição desgastada da microferramenta, já que os níveis de energia para os sinais de uma ferramenta desgastada são maiores do que os associados a ferramenta nova (Lu e Wan, 2013).

Na Figura 4 tem-se apresentado os parâmetros sensíveis a identificação da condição da microferramenta para as condições do ensaio 1, tanto para os sinais de vibração como para os de acústica.

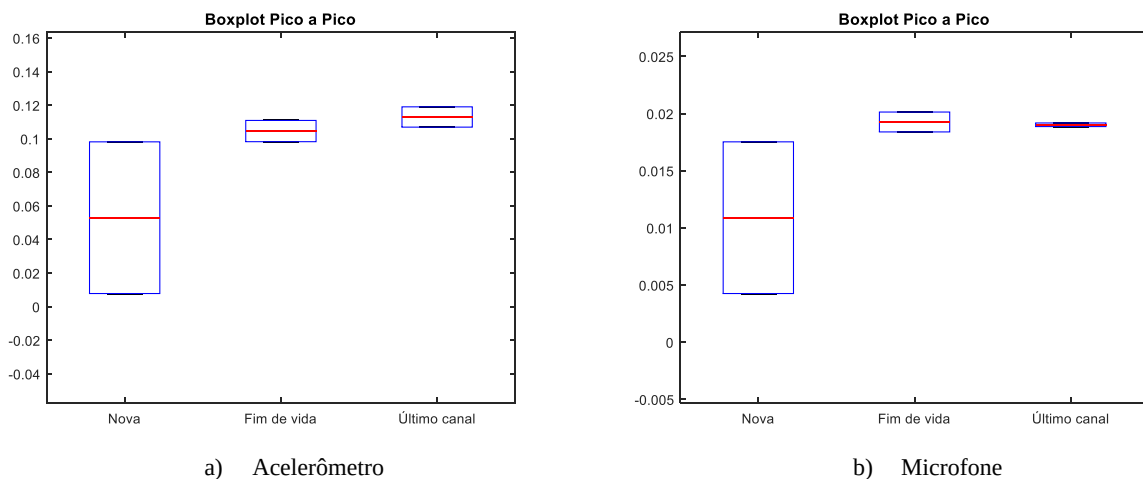


Figura 4. Parâmetros sensíveis à identificação da condição da microfresa obtidos para a condição do ensaio 1

Conforme podemos verificar na Figura 4, o parâmetro estatístico sensível a determinação da condição de desgaste da microferramenta correspondeu ao Pico a Pico. Este parâmetro foi sensível pois as medianas (linha vermelha) das caixas correspondentes às microferramentas novas se encontram localizadas abaixo das medianas referentes às microferramentas desgastadas (condições de fim de vida e do último canal), isso ocorre por os níveis de energia associados a uma ferramenta nova ser menor do que os associados a ferramenta desgastada. O mesmo comportamento pode ser observado para os sinais de vibração, Fig. 4a, e de acústica, Fig. 4b.

Esta mesma análise foi realizada para as outras condições de ensaios, a fim de determinar os parâmetros estatísticos sensíveis a condição nova e desgastada da microfresa. Na Tabela 3 tem-se os parâmetros estatísticos sensíveis para cada condição de ensaio.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos sensíveis a condição da microferramenta extraídos dos sinais de vibração e acústicos.

Ensaio	Sinais	Parâmetro Estatístico
2	Sinais de Vibração e Acústicos	RMS
3	Sinais de Vibração e Acústicos	Curtoses
4	Sinais de Vibração e Acústicos	Fator de Crista

Destas análises pode-se concluir que é possível realizar o monitoramento da condição de desgaste da microferramenta por meio dos sinais de vibração e de acústica, uma vez que há parâmetros estatísticos que conseguem diferenciar o estágio de desgaste da ferramenta, assim como observado nos trabalhos de Downey, *et al.* (2016) e Gomes, *et al.* (2021).

Pode-se perceber que o mesmo parâmetro estatístico, tanto para o acelerômetro como para o microfone, foi capaz de diferenciar o estado da microfresas. Isso ocorreu porque os parâmetros foram extraídos da mesma banda de frequência para as condições de ensaios, assim como observado por Gomes (2019). Além disso, considerando a similaridade dos resultados obtidos para ambos os sensores, pode-se priorizar o uso do acelerômetro devido às suas características de menor custo e maior robustez, destacando-se em operações de usinagem com fluido de corte.

4. CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios e a análise dos sinais as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- As análises no domínio do tempo não foram capazes de mostrar diferenças na condição de desgaste das microfresas, sendo assim, as análises foram realizadas no domínio da frequência, onde foi possível identificar bandas de frequências nas quais a amplitude do sinal da microfresa desgastada foi maior que a amplitude do sinal da microfresa nova, para cada condição de corte utilizada;
- Por meio da análise no domínio da frequência foi possível determinar parâmetros sensíveis a identificação da condição da microferramenta demonstrando que é possível realizar o monitoramento da condição de desgaste das microferramenta;
- Uma vez que os sensores de acústica e vibração apresentaram resultados semelhantes para o monitoramento do microfresamento de Inconel 718, sugere-se o uso apenas do acelerômetro uma vez que é um sensor mais robusto e de menor custo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, FAPEMIG. Ao Departamento da Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB). Agradecemos também à comissão organizadora do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.

6. REFERÊNCIAS

- Camara, M.A., Rubio, J.C.C., Abrão, A.M. and Davim, J.P., 2012. "State of the art on micromilling of materials, a review". *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 28, p. 673-685.
- Brinksmeier, E., Riemer, O. and Twardy, S., 2010. "Tribological behavior of micro structured surfaces for micro forming tools". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, p. 425-430.
- De Oliveira, D., Gomes, M.C. and Da Silva, M.B., 2019a. "Spheroidal chip in micromilling". *Wear*, Vol. 426-427, p. 1672-1682.
- De Oliveira, D., Da Silva, R.B. and Gelamo, R.V., 2019b. "Influence of multilayer graphene platelet concentration dispersed in semisynthetic oil on the grinding performance of Inconel 718 alloy under various machining conditions". *Wear*, Vol. 426-427, p. 1371-1383.
- Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y., 2006. "Recent Advances in Mechanical Micromachining". In *Annals of the CIRP*, Vol. 55.

- Downey, J., O'sullivan, D., Nejmen, M., Bombinski, S., O'leary, P., Raghavendra, R. and Jemielniak, K., 2016. "Real time monitoring of the CNC process in a production environment-the data collection & analysis phase". *Procedia CIRP*, Vol. 41, p. 920-926.
- Gomes, M. C., 2019. *Estudo experimental do microfresamento do aço AISI 316L*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Gomes, M.C., Brito, L.C., Da Silva, M.B. and Duarte, M.A.V., 2021. "Tool wear monitoring in micromilling using support vector machine with vibration and sound sensors". *Precision Engineering*, Vol. 67, p. 137-151.
- Hsieh, W.H., Lu, M.C. and Chiou, S.J., 2012. "Application of backpropagation neural network for spindle vibration-based tool wear monitoring in micro-milling". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, n. 1-4, p. 53-61.
- Jain, V.K., 2015. "Special issue on micromanufacturing". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 85, p. 1937-1939.
- Lu, M.C. and Wan, B.S., 2013. "Study of high-frequency sound signals for tool wear monitoring in micromilling". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, n. 9-12, p. 1785-1792.
- Machado, A.R., Silva, M.B., Coelho, R.T. e Abrão, A.M., 2011. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Blucher, São Paulo, 2ª edição.
- Masuzawa, T., 2000. "State of the art of micromachining". In *CIRP-Annals of Manufacturing Technology*, Vol. 49, p. 473-488.
- Mitsubishi, 2021. "Mitsubishi Carbide". 3 Jan. 2021
<<https://www.mitsubishicarbide.com/mmus/catalog/pdf/lj/lj403a.pdf>>.
- Zhu, K., Wong, S.Y. and Hong, G.S., 2009. "Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden Markov models". *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, p. 547-560.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

MONITORING OF THE INCONEL 718 MICROMILLING PROCESS BY VIBRATION AND ACUSTIC SIGNALS

Déborah de Oliveira

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip code 70910-900, Brasilia-DF, Brazil.
oliveira.deborah@unb.br

Milla Caroline Gomes

Federal University of Uberlandia, Faculty of Mechanical Engineering, Campus Santa Mônica, Zip code 38408-100, Uberlandia-MG, Brazil.
millagomes150@gmail.com

Maksym Ziberov

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip code 70910-900, Brasilia-DF, Brazil.
mziberov@unb.br

Marcio Bacci da Silva

Federal University of Uberlandia, Faculty of Mechanical Engineering, Campus Santa Mônica, Zip code 38408-100, Uberlandia-MG, Brazil.
mbacci@ufu.br

Abstract. *Micromachining can be differentiated from macro machining as being a process in which the part characteristics, geometries, and dimensions, or more commonly in which the tool diameter has from 1 μm to 1000 μm . Unlike macro machining, in this process the cutting edge is not considered perfectly sharp and there will be a great influence of the size effect. In addition, these reduced dimensions make it difficult to control and monitor the process, whether in regard of the generated surfaces or the microtool wear. In this sense, researchers have tried to study different control methodologies to obtain information about the process, with emphasis on the use of sensor to obtain signals of force, vibration, and acoustic emission. Considering this need, this work aims to evaluate the use of vibration and acoustic sensors to correlate with the microtool wear condition. The results showed that through the use of vibration and acoustic signals it is possible to monitor the wear condition of the micro tools.*

Keywords: Micromilling, Inconel 718, Signal Monitoring, Acoustic, Vibration.

RESPONSIBILITY NOTICE

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