



## **MONITORAÇÃO DO FRESAMENTO DE CAVIDADES EM ALTAS VELOCIDADES DE CORTE EM AÇO AISI H13 VIA EMISSÃO ACÚSTICA**

Souza, P.M.; Pottie, A.L.F; Maia, L.H.A.

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500 - Coração Eucarístico, Belo Horizonte - MG, 30535-901

### **RESUMO**

A usinagem de cavidades em aços para trabalho a frio ou a quente, conhecidos como aços para matrizes, normalmente é dispendiosa devido às elevadas propriedades mecânicas do material da peça e ao custo do ferramental. Nos últimos 15 anos a incorporação de sistemas CAE/CAD/CAM/CNC na usinagem proporcionou otimização do projeto, das trajetórias da ferramenta e conseqüentemente no tempo e custos de fabricação das peças. Ao mesmo tempo, na usinagem de cavidades complexas é comum entrar com uma ferramenta de corte e continuar com ela até o final daquela operação, ou seja, supondo que a geometria da aresta se mantém em condições de trabalho. Mas, nem sempre isso ocorre, pois comumente ela se desgasta ao longo do processo e, portanto, técnicas de monitoração, como vibrações e emissão acústica (EA ou AE) estão sendo utilizadas com o objetivo de avaliar a evolução de seu desgaste.

**Palavras-chave:** fresamento, usinagem de alta velocidade, emissão acústica.

### **1.INTRODUÇÃO**

A maioria das peças fabricadas hoje em dia utilizando processos como fundição, forjamento, extrusão, entre outros, necessita de um molde para a sua produção. A fabricação de um molde pode envolver altos custos, levando em conta o tempo de produção da matéria prima até a confecção do produto.

Antes de 1950, a maioria das operações de produção era realizada com forma manual e eram desprovidas de flexibilidade. A partir de meados década de 80 surgiram as máquinas com Controle Numérico Computadorizado (CNC) e a

diversificação da gama de material utilizado nas ferramentas de corte como o metal duro e Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PcBN), conferindo velocidade e características de acabamento, dimensão e forma cada vez mais precisas em relação aos seus antecessores.

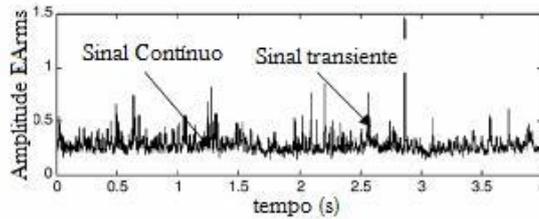
O processo de usinagem de materiais no estado endurecido já mostra como um grande avanço na fabricação de moldes e matrizes. Normalmente esses aços (de elevado grau de encruamento) são usinados no estado de recebimento e necessitam de tratamentos térmicos posteriores para alívio de tensões.

Os *softwares* CAM oferecem uma pequena variedade de estratégias de usinagem e propiciam relativa assistência aos programadores para a escolha dos parâmetros de usinagem, que são usados sem muitos critérios, gerando programas NC (Controles Numéricos) com avanço e rotações constantes e forçam o uso de valores conservadores.

A tecnologia HSM (*High Speed Machining*) proporciona aumento na taxa de remoção do cavaco, portanto vem sendo utilizado no fresamento de cavidades, no entanto nota-se a diminuição da vida da ferramenta. O desenvolvimento de novos materiais de ferramentas para a fabricação de moldes e matrizes acarreta o aumento da vida da ferramenta, ou seja, otimização do processo de usinagem por fresamento em alta velocidade torna-se necessário. (FALLBÖHMER et al., 2000)

O monitoramento da fabricação de matrizes por meio de sinais de emissão acústica é uma nova realidade no âmbito fabril (HASSAN et al., 2023). A emissão acústica em si é a propagação de uma onda vibracional na rede dos materiais cristalinos, devido ao rearranjo da estrutura interna do material (MAIA et al., 2015). Quando ocorre uma deformação no material (corte, atrito, trinca entre outras) ocorre um desarranjo da estrutura do material que tende a rearranjá-los, esses rearranjos geram ondas vibracionais que deslocam a velocidade do som, daí o nome de emissão acústica. Estes sinais são captados através de um sensor piezoelétrico. Os sinais de emissão acústica classificam-se em dois tipos: o sinal contínuo e o sinal de pico ou transiente. O sinal transiente é caracterizado por um pico de grande amplitude, mas de pequena duração, enquanto o sinal contínuo tem amplitude relativamente menor, mas com uma longa duração (Figura 1) (SOUTO, 2007). Na usinagem, o sinal contínuo se caracteriza pelas deformações plásticas de materiais dúcteis, enquanto o sinal transiente é característico da propagação de trincas e impactos de cavaco.

Figura 1 – Caracterização de um sinal de EA (Li [4] – Adaptado)



Na figura 1 a amplitude do sinal de emissão acústica (EA) foi representada em termos de RMS (do inglês, *root mean square*, que é a raiz quadrática média do sinal).

A faixa de frequência de um sinal de emissão acústica está acima da faixa audível pelo ouvido humano (20 Hz a 20 kHz). Não há um consenso sobre qual a banda da faixa de frequência de emissão acústica, mas estudos práticos levam a crer que está entre 15 kHz a 1000 kHz. Essa faixa é beneficiada pela ausência das principais vibrações mecânicas e ruídos impostos pelo sistema usinado.

## 2.PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização deste trabalho utilizou-se de um corpo-de-prova de dimensões 100 x 100 x 100 mm de aço AISI H13, cuja composição química encontra-se na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço AISI H13

%C	%V	%Mn	%S	%P	%Cr	%Mo	%Fe
0,37	1,02	0,38	0,02	0,02	5,20	1,59	Resto

Utilizou-se o centro de usinagem CNC ROMI Discovery 560 com comando numérico Siemens Sinumerik 810D com potência de 12,5 CV em uma faixa rotação que varia de 10 a 10000 rpm.

A ferramenta foi uma fresa de 8 mm, com um inserto intercambiável de metal duro integral, modelo RDHT0803MO-E03 H25, e com opção de aplicação de fluido de corte pelo centro da ferramenta.

Para o monitoramento dos sinais de emissão acústica usou-se um sensor de EA ativo da marca Sensis. Empregou-se também um sistema de monitoramento DM 42, também da marca Sensis para fazer condicionamento de sinais colhidos pelo sensor que captou os dados em uma faixa de frequência de 0 a 600 kHz. Também foi utilizado um bloco conector e uma placa de aquisição de dados da marca National Instruments modelos CB-68LP e PCI-6221 respectivamente, que tem por principal função colher os dados do sistema de monitoramento e os enviar ao computador, sendo posteriormente tratados no LABVIEW, em seguida os dados foram tratados através de um *software* feito na plataforma MATLAB.

Para execução dos testes realizaram-se as usinagens analisando o comportamento dos sinais de emissão acústica no fresamento da cavidade (*pocket*) com insertos novos, fazendo a inserção que começa pelo centro e vai para as extremidades originando os dentes da engrenagem. Após isso se deu um incremento na profundidade de corte e repete-se a operação anterior, dando origem mais tarde a matriz da engrenagem (Figura 2). Após a confecção da matriz analisou-se o desgaste de flanco dos insertos com um microscópio óptico da marca Mitutoyo modelo TM.

Figura 2 – Desenho da estratégia utilizada para usinar a matriz em CAM

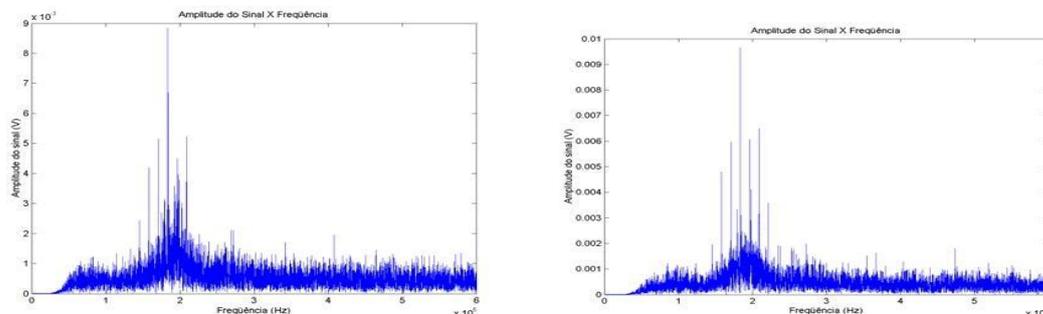


Os testes foram feitos utilizando um avanço por dente de 0,1 mm/rev., profundidade de corte de 0,5 mm a seco e com fluido de corte emulsionável em concentração de 8% em água, variando a velocidade de corte em 200 e 300 m/min.

### **3.RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Primeiro tentou-se analisar os espectros de frequência (FFT – Fast Fourier Transform) gerados na usinagem do aço AISI H13, mas devido à semelhança entre eles (Figura 3) partiu-se para a análise estatística destes sinais.

Figura 3 – Espectros de frequência dos sinais de emissão acústica captados com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 200 m/min, com avanço por dente de 0,1 mm/rev., e profundidade de corte de 0,5 mm no teste realizado a seco, respectivamente o início e fim do processo

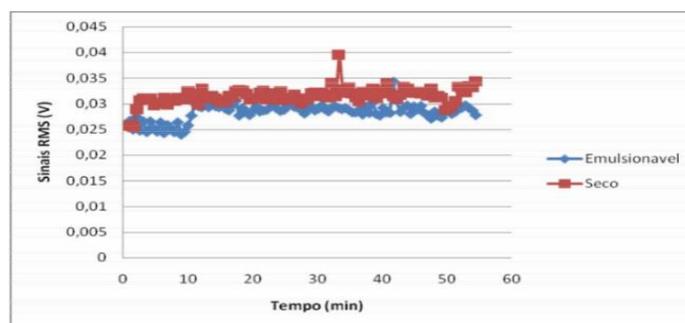


#### 4. ANÁLISE DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA EM FUNÇÃO DO AMBIENTE DE USINAGEM

Analisando a figura 4, nota-se que em toda a usinagem da matriz os sinais captados no teste a seco foram maiores que o realizado com fluido de corte emulsionável (ZHOU et al., 2011). Já era esperado isso, uma vez que em aços de elevada dureza, como o H13, o atrito na interface peça-ferramenta é muito grande fazendo com que a temperatura nessa região atinja valores bem altos e acabe por acelerar o desgaste da ferramenta. Como a adição do fluido era pelo centro da fresa, não houve problema de resfriamento cíclico no inserto, e isto foi o responsável por além de garantir maior vida à ferramenta, diminuir o sinal em relação ao teste a seco.

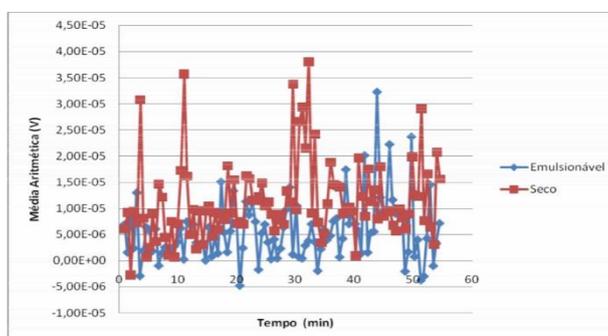
Ainda avaliando a figura 5, nota-se um crescimento do sinal RMS tanto no teste a seco (próximo a 1 min de teste) quanto no teste com fluido emulsionável (próximo a 10 min de testes). Esses crescimentos se devem ao lascamento da cunha cortante, que aumenta a área de contato entre a ferramenta e a peça e consequentemente gera maior energia, energia essa captada pelos sinais de emissão acústica.

Figura 4 – Sinal RMS de emissão acústica em função do tempo, com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 200 m/min, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5 mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,1 mm/ver



Avaliando a figura 5, nota-se que as médias aritméticas dos sinais adquiridos no teste a seco, de um modo geral apresentaram maiores valores que as do teste com fluido emulsionável. Isso só vem a reforçar a conclusão já notada anteriormente que o fluido de corte diminuiu o desgaste da ferramenta e com isso gerou menores sinais (XAVIOR; ADITHAN, 2009).

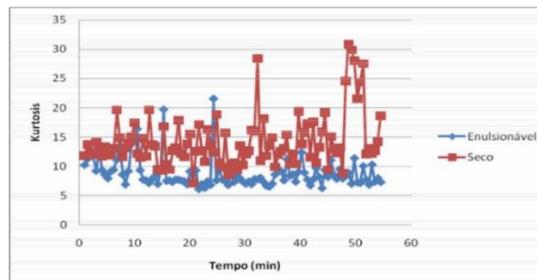
Figura 5 – Médias aritméticas dos sinais de emissão acústica em função do tempo, com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 200 m/min, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5 mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,1 mm/rev.



Analisando a figura 6, observa-se que os sinais captados no teste a seco apresentaram de um modo geral Kurtosis menores que os sinais do teste com fluido emulsionável. Kurtosis é uma medida de dispersão que caracteriza o “achatamento” da curva da função de distribuição. Dados com uma Kurtosis igual a 3 indica que a função de distribuição apresenta o mesmo achatamento que uma distribuição normal. Dados com uma Kurtosis maiores que 3 indica que a função de distribuição destes dados apresenta-se afuniladas em relação a distribuição normal, ou seja, com grande predominância de altos picos que se afastam da média aritmética. Baseado nisso,

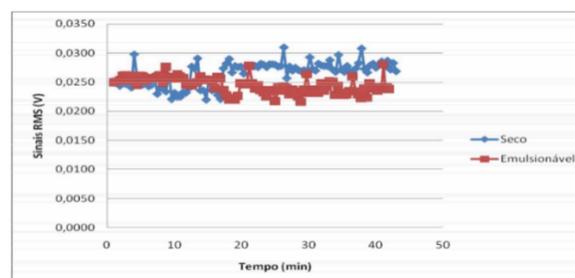
nota-se que as Kurtosis relativas ao teste a seco apresentam-se valores muito maiores que 3, o que demonstra uma distribuição dominada por alta amplitude dos sinais.

Figura 6 – Kurtosis dos sinais de emissão acústica em função do tempo, com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 200 m/min, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5 mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,1 mm/rev



Avaliando a figura 7, sinais capturados na velocidade 300 m/min, com profundidade de corte de 0,5 mm e um avanço por dente de 0,1 mm/rev., nota-se que os sinais adquiridos no teste a seco mostraram-se em um primeiro momento, valores RMS até menores que com fluido emulsional (1 a 18 min), isso pode ser explicado devido ao efeito de amortecimento (Tönshoff *et al.*<sup>[8]</sup>), onde a alta temperatura na interface peça-ferramenta faz com que o metal “amoleça” e conseqüentemente facilite o corte e gere um sinal mais brando. Após isso, nota-se um crescimento do sinal gerado pelo lascamento da ferramenta no teste a seco que continua até o fim do teste.

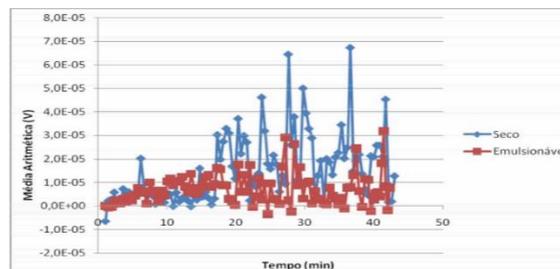
Figura 7 – Sinal RMS de emissão acústica em função do tempo, com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 300 m/min, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,1 mm/rev



Analisando a figura 8, vê-se que os sinais oriundos do teste a seco apresentam em um primeiro momento (1 a 18 min) valores até que menores que os sinais do teste

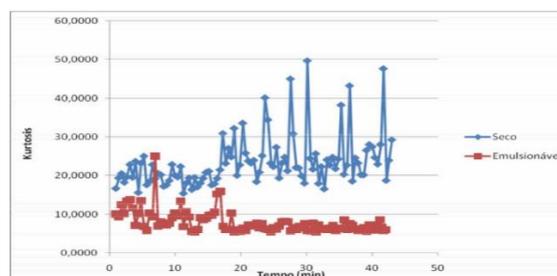
com fluido isso só reforça o efeito de amortecimento mostrado anteriormente. Após a quebra os sinais do teste a seco crescem e ficam maiores que os do teste com fluido. Pode-se notar claramente que as médias aritméticas dos sinais crescem no mesmo tempo que os sinais RMS do teste a seco crescem (figura 8).

Figura 8 – Médias aritméticas dos sinais de emissão acústica em função do tempo, com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 300 m/min, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,1 mm/rev



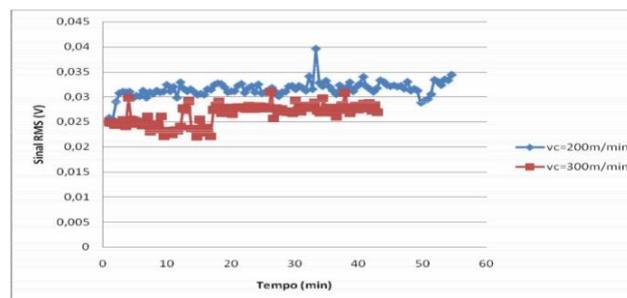
Analisando a figura 9, observa-se que as Kurtosis do teste com fluido emulsional dão valores mais próximos de 3, o que demonstra que sua distribuição é menos “afunilada” que a do teste a seco. Isso demonstra que de um modo geral os sinais a seco apresentam uma distribuição com altos picos e com uma amplitude maior.

Figura 9 – Kurtosis dos sinais de emissão acústica em função do tempo, com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 300 m/min, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,1 mm/rev



Avaliando a figura 9, nota-se que os sinais RMS com velocidade de corte de 200 m/min são maiores que os sinais oriundos do teste com velocidade de corte de 300 m/min. Isso se dá devido ao aumento da velocidade de corte tem a tendência de “amolecer” o metal devido ao aumento da temperatura na interface peça-ferramenta o que vem a gerar o efeito de amortecimento nos sinais de emissão acústica (Tönshoff *et al.*<sup>[8]</sup>).

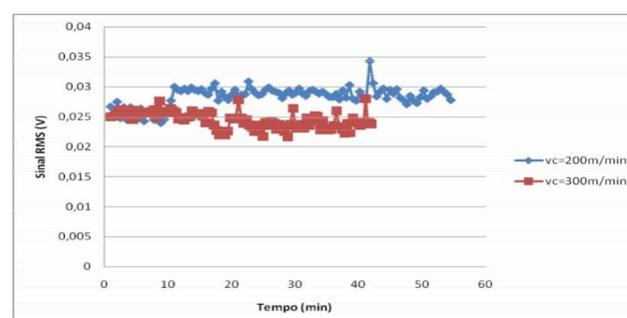
Figura 9 – Sinal RMS de emissão acústica em função do tempo, a seco, com profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,1 mm/rev.



## 5. ANÁLISE DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE

Visualizando a figura 10, reitera a afirmação que o “amolecimento” da peça oriunda do aquecimento gerado pela interface peça-ferramenta, faz com que os sinais diminuam seus valores. Como já falado anteriormente, nota-se a quebra da ferramenta e sua influência no sinal RMS.

Figura 10 – Sinal RMS de emissão acústica em função do tempo, com fluido emulsionável, com profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,1 mm/rev.



## 6. ANÁLISE DE VIDA DE FERRAMENTA UTILIZADA NA USINAGEM

Devido à complexidade da superfície usinada (figura 11), e por ter se usada a estratégia de não se parar o experimento para avaliar outros parâmetros, não pode avaliar a qualidade de superfície antes do lascamento da ferramenta.

Figura 11 – Matriz usinada evidenciando complexidade da superfície mostrando respectivamente a matriz e o detalhe



Em todos os testes houve o lascamento da ferramenta utilizada. Isso se deu devido à alta dureza do material e da complexidade da superfície usinada. Na tabela 2, mostra-se as dimensões do desgaste de flanco máximo dos inserts (medido na aresta principal de folga).

Tabela 2 - Desgaste da ferramenta

	$v_c = 200 \text{ m/min}$		$v_c = 300 \text{ m/min}$	
	Seco	Emulsionável	Seco	Emulsionável
Aresta de folga	0,856mm	0,378mm	0,458mm	0,233mm
Aresta de corte	0,506mm	0,337mm	0,295mm	0,454mm

Apesar de que em todos os testes realizados, a ferramenta ter sofrido lascamento, nota-se que este segue a premissa já dita anteriormente, que de modo geral, o aumento da velocidade de corte, faz com que haja o “amolecimento” do material usinado e com isso facilite o corte. Além disso, também pode-se dizer que, baseado nos resultados da tabela 2, que o fluido emulsionável reduz a taxa de desgaste da ferramenta e conseqüentemente protege a ferramenta de corte.

## 7. CONCLUSÕES

Analisando os resultados, pode-se afirmar que a monitoração por sinais de emissão acústica se mostrou eficiente e capaz de captar indícios de lascamento da

ferramenta, o que em um ambiente hostil como é o caso da usinagem de matrizes já pode-se afirmar como um grande ganho.

A monitoração também se mostrou eficiente para avaliar esforços, como foi o caso da detecção do maior sinal RMS nos testes feitos a seco em comparação com fluido emulsionável.

Por meio deste estudo pode-se comprovar que o sistema de monitoramento utilizando os sinais de emissão acústica capta sinais oriundos da liberação de energia de mecanismos de ordem microscópicas, como é o caso do “amolecimento” do metal usinado através do aumento da temperatura na interface peça-ferramenta, o que facilita o corte e conseqüentemente libera menos energia.

## **8.AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a FAPEMIG pelos recursos disponibilizados no projeto TEC 798- 05 e pela bolsa de mestrado, à PUC Minas pelo espaço e equipamentos cedidos, ao CNPq (processo 475279/2004-2) e ao IFM (Instituto Fábrica do Milênio) pela verba na compra de materiais.

## **9.BIBLIOGRAFIA**

FALLBÖHMER, P. et al. High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, n. 1, p. 104–115, jan. 2000.

HASSAN, M. et al. Real-time Tool Prefailure Detection in Conventional and High-Speed Milling Applications. **Procedia CIRP**, v. 118, p. 448–453, 1 jan. 2023.

MAIA et al. A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission. **Tribology International**, v. 92, p. 519–532, 1 dez. 2015.

SOUTO, U. B., 2007, “Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica.” 198p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UFU, Uberlândia.

XAVIOR, M. A.; ADITHAN, M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 2, p. 900–909, jan. 2009.

ZHOU, J.-H. et al. Tool Wear Monitoring Using Acoustic Emissions by Dominant-Feature Identification. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, n. 2, p. 547–559, fev. 2011.

## **MONITORING OF CAVITY MILLING AT HIGH CUTTING SPEEDS IN AISI H13 STEEL VIA ACOUSTIC EMISSION**

### **ABSTRACT**

Machining cavities in cold or hot work steels, known as die steels, is usually expensive due to the high mechanical properties of the workpiece material and the cost of the tooling. Over the last 15 years, the incorporation of CAE/CAD/CAM/CNC systems into machining has led to optimization of design, tool paths and, consequently, part manufacturing time and costs. At the same time, when machining complex cavities, it is common to start with a cutting tool and continue with it until the end of the operation, i.e. assuming that the edge geometry remains in working condition. However, this is not always the case, as it often wears out during the process and therefore monitoring techniques such as vibrations and acoustic emission (AE) are being used in order to evaluate the evolution of its wear.

**Keywords:** milling, high-speed machining, acoustic emission.