

## **AValiação DO DESGASTE DE FERRAMENTA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE NO FRESAMENTO DE AÇO BAIXA-LIGA POR MEIO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Luís Henrique Andrade Maia<sup>1</sup>, [luishmaia@gmail.com](mailto:luishmaia@gmail.com)

Jánes Landre Jr.<sup>1</sup>, [janes@pucminas.br](mailto:janes@pucminas.br)

Marcelo Becker<sup>2</sup>, [becker@sc.usp.br](mailto:becker@sc.usp.br)

Wisley Falco Sales<sup>3</sup>, [wisley@ffassis.edu.br](mailto:wisley@ffassis.edu.br)

<sup>1</sup>Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC MINAS, Av. Dom José Gaspar 500, Prédio 10, Coração Eucarístico, Belo Horizonte – MG.

<sup>2</sup>Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Av. do Trabalhador Sancarlense, 400, São Carlos – SP

<sup>3</sup>Faculdade do Sul da Bahia – FASB, Av. General Salgado Viana, 364, Mirante do Rio, Teixeira de Freitas - BA

**Resumo:** A economia de mercado vigente, em que as empresas buscam o máximo rendimento por seus investimentos, tem um papel cada vez maior nas decisões por pesquisas na área de fabricação. Levando em conta este ambiente, se propôs um estudo sobre monitoramento indireto do fresamento utilizando de sinais de emissão acústica para avaliar o desgaste de ferramenta em diversas condições de corte do aço baixa-liga ABNT 4140. Para tanto, fez-se a captação dos sinais de emissão acústica combinando as seguintes condições de corte: velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50 e 250 m/min; profundidade de corte ( $a_p$ ) de 1,5 mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,12 mm/rev, na condição à seco e utilizando do método MQF na vazão de 60ml/h. Após a captura os sinais foram tratados e confrontados com o desgaste de flanco da ferramenta. Utilizou-se nestes testes uma fresa de 80 mm de diâmetro com seis insertos intercambiáveis. Os insertos utilizados para a realização dos experimentos foram de metal duro triplamente revestidos com TiN, TiCN e  $Al_2O_3$ . Ao final notou-se que os sinais de EA tendem a crescer conforme o desgaste da ferramenta vai aumentando, não sendo isso uma regra a todo o experimento.

**Palavras-chave:** Emissão Acústica, Desgaste de Ferramenta, MQF, Fresamento.

### **1. INTRODUÇÃO**

A cada dia a usinagem ganha mais importância no ambiente acadêmico visto que ela é hoje um dos mecanismos mais importantes para se conferir forma a materiais, e seu profundo entendimento é de vital importância para o crescimento fabril.

Dentro deste aspecto, muitas das pesquisas já são de uso corriqueiro na indústria, como é o caso de métodos de aplicação de fluidos como o de mínima quantidade de fluido (MQF) que é contemplado neste estudo, a própria usinagem em altas velocidades (*High Speed Machine* - HSM) e materiais de ferramentas de corte, para não dizer outros.

Existem certos aspectos do processo que devido a sua natureza laboriosa não são implementados pela indústria. Um desses é a qualidade da superfície usinada. Imagine o quão trabalhoso e oneroso seria a medição de parâmetros de rugosidade em toda uma grande linha de produção. Como a qualidade de superfície está relacionada, entre outras variáveis, ao desgaste da ferramenta, o que se faz atualmente é fazer pré-testes vendo quantas horas-peças uma ferramenta x consegue trabalhar originando uma qualidade de superfície dentro das tolerâncias exigidas para a peça. Após chegar a esse número ele é assumido como referência e então as ferramentas são utilizadas, naquela linha de montagem, até o instante em que o padrão foi atingido (Maia *et al.* 2008a).

Esse número ainda é submetido a um fator de segurança devido a variações oriundas dos aspectos tribológicos e metalúrgicos que o processo pode sofrer o que leva a um número muito conservador que faz com que na realidade se refugie uma ferramenta que muita das vezes estaria boa a realizar peças dentro das tolerâncias.

Com o objetivo de tentar prever “o momento exato” de troca da ferramenta, muitas pesquisas foram e ainda são realizadas para monitorar de forma indireta as características da ferramenta.

O método de monitoração indireta se caracteriza por captar um parâmetro que não está diretamente relacionado com o processo e o correlacionar com um parâmetro envolvido. Este método é de grande valia em processos nos quais os parâmetros intrínsecos ao processo se tornam difíceis e laboriosos o monitoramento.

O intuito deste trabalho foi tentar avaliar por meio dos sinais de emissão acústica o desgaste de ferramenta no fresamento do aço ABNT 4140 e ver se é possível utilizar do método de monitoramento destes sinais para prever a verdadeira hora de efetuar a troca de ferramenta.

No fresamento estão envolvidos parâmetros relacionados às condições de corte, à geometria e ao estado de afiação das ferramentas, às propriedades do material usinado, à interação entre material usinado e ferramenta e à máquina ferramenta, dentre outros como o estado de tensão plástica tridimensional (Maia et al., 2006).

Estudos publicados anteriormente demonstraram que o uso da técnica de emissão acústica obtém bons resultados na monitoração de fenômenos de corte na usinagem.

Comparada a outras técnicas de monitoramento, como medida da força de corte, o monitoramento por emissão acústica oferece melhor sensibilidade para detectar mecanismos de deformações subjacentes na usinagem (Lee et al., 2002). Em outras palavras, o monitoramento por meio dos sinais de emissão acústica é mais apropriado para detectar mecanismos de deformações em micro-escala em uma ambiente ruidoso fabril por causa de sua sensibilidade.

Emissão acústica é a propagação de uma onda vibracional na rede dos materiais cristalinos, devido ao rearranjo da estrutura interna do material (Willians, 1968). 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 que transformam sinais mecânicos em sinais elétricos (Maia et al., 2008b).

Os sinais de emissão acústica classificam-se em dois tipos: o sinal contínuo e o sinal de pico ou transiente, Souto (2007); Blum e Inasaki (1990); Matsumoto e Diniz (1997). O sinal transiente segundo Souto (2007) é caracterizado por um pico de grande amplitude, mas de pequena duração, enquanto que o sinal contínuo tem amplitude relativamente menor, mas com uma longa duração (fig. 1). Na usinagem, o sinal contínuo se caracteriza pelas deformações plásticas de materiais dúcteis, enquanto que o sinal transiente é característico da propagação de trincas e impactos de cavaco.

Sales et al. (2007), afirmaram que na usinagem, a emissão acústica é dependente de mecanismos de deformações básicas, como movimentos de deslocamento, deslizamentos de grãos, maclação e coalescência de vazios. Ainda segundo Sales et al. (2007), a liberação de sinais emissão acústica sobre estas circunstâncias pode ser atribuída ao tamanho de grão, densidade de deslocamento e a distribuição de partículas de segunda fase em materiais cristalinos durante o processo de deformação.

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 25 kHz a 1000 kHz. Essa faixa é beneficiada pela ausência das principais vibrações mecânicas e ruídos impostos pelo sistema usinado.

A iteração ferramenta-peça gera um sinal de emissão acústica característico que aumenta sua amplitude devido a diversos fenômenos. Parâmetros de corte são um destes fenômenos e eles foram analisados pelo presente trabalho. Portanto, neste trabalho se propõe estudar o comportamento do sinal de emissão acústica com o desgaste da ferramenta, quando fresando aço de baixa liga com fresas de metal duro revestidas e intercambiáveis.

## 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### MÁQUINA-FERRAMENTA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para realização dos ensaios de fresamento, utilizou-se de um centro de usinagem da marca ROMI modelo Discovery 560 com comando numérico Siemens modelo Sinumerik 810 D. Que apresenta uma potência de 12,5 cv, faixa de velocidade de 7 a 10000 rpm.

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 de EA 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. Um computador armazenou os dados colhidos através de um software desenvolvido na plataforma LABVIEW. Posteriormente os dados foram tratados através de outro software feito na plataforma MATLAB.

Por fim, o desgaste da ferramenta foi monitorado por meio de um microscópio óptico da marca Mitutoyo, modelo TM 15, para que o mesmo não fosse mais uma variável do processo.

### CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova adotados para realização do experimento foram barras de dimensões 80x100x100 mm. O aço utilizado para a fabricação do corpo de prova tem a especificação ABNT 4140 com dureza de 210 HV e cuja composição química é mostrada na Tab. (1) retirada do teste de composição química feita no laboratório da Fiat Powertrain. Esse aço tem como principais características: boa resistência mecânica, média usinabilidade, baixa soldabilidade e temperabilidade relativamente alta. Ele é largamente utilizado para fabricação de eixos, pinos, bielas, entre outros, na indústria automobilística, agrícola e de máquinas e equipamentos em geral.

Tabela 1 – Composição química do aço ABNT 4140.

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cr	%Mo	%Fe
0,45	0,21	0,83	0,04	0,03	0,90	0,21	Balanço

#### FERRAMENTA E CONDIÇÕES DE CORTE UTILIZADAS

Para execução dos experimentos utilizou uma fresa de 80 mm de diâmetro com seis insertos intercambiáveis da marca Sandvik.

Os materiais dos insertos utilizados foram metal duro classe P [TiCN + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (TiN)], recomendado para usinagem de metais de baixa liga. O uso desses insertos foi escolhido pelo fato da utilização destes em maior parte das indústrias nacionais.

A geometria dos insertos eram quadrangular, com raio de ponta de 1,5mm fabricada pela Sandvik classe GC 4235 com a seguinte especificação: R245-12T3 M-PM.

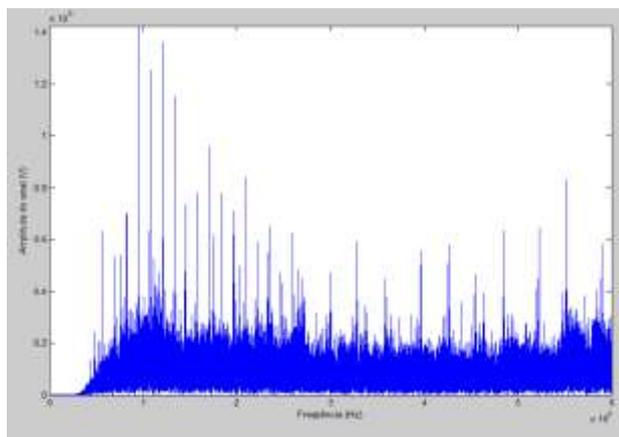
Os ensaios foram realizados a seco, fazendo dois passes de 40 mm na peça, sendo um no corte concordante e outro no corte discordante.

Os parâmetros de corte utilizados nos testes foram os seguintes: velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50 e 250 m/min; avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,12 mm/rev e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 1,5 mm.

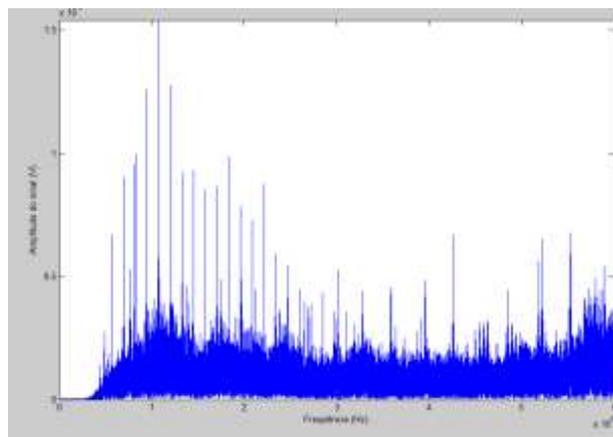
Os testes de vida foram realizados capturando os sinais de emissão acústica após cada 10 passes e medindo o desgaste de flanco dos insertos. Foram feito isso até que se passassem uma hora-teste ou que a ferramenta chegasse ao fim de vida.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Avaliou-se primeiro os sinais de emissão acústica no domínio do tempo e como os gráficos do começo dos testes e do fim de vida deram muito parecidos a olho nu (Fig. (1)) se optou por fazer as análises utilizando de seus RMS (*root mean square*, ou raiz quadrada média) que tem por principal função dar a energia do sinal.



Sinal de emissão acústica oriundo do começo do teste de vida de ferramenta



Sinal de emissão acústica oriundo do final do teste de vida de ferramenta

**Figura 1 – Gráficos de sinais de emissão acústica no domínio da frequência com velocidade de corte de 50m/min, avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,5mm utilizando o método MQF.**

Analisando os sinais RMS de emissão acústica em função do desgaste de flanco da ferramenta (Fig. (2)), nota-se que os sinais oriundos do teste a seco geraram uma amplitude de sinal menor que os sinais captados nos testes com fluido em MQF. Isso pode ser explicado pelo fato de que em ambos os casos a aresta postiça de corte foi formada, mas nos testes a seco sua formação foi mais acentuada, gerando um sinal de menor amplitude. Mas como a deposição e o “arrancamento” de material ocorrem de forma instável na aresta de corte, isso influi no desgaste da ferramenta aumentando consideravelmente, o que pode ser visto pela abscissa da curva em azul em comparação com a curva em vermelho. Então, dois fatores concomitantes foram dominantes para os resultados, que foi a geração de calor (maior no corte a seco) e desgaste da ferramenta mais acentuado provocado pela APC. Com o aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta e na zona de cisalhamento primária (deslocada para cima devido a APC), o efeito do amortecimento ganha força e faz com que os níveis dos sinais de EA também diminuam.

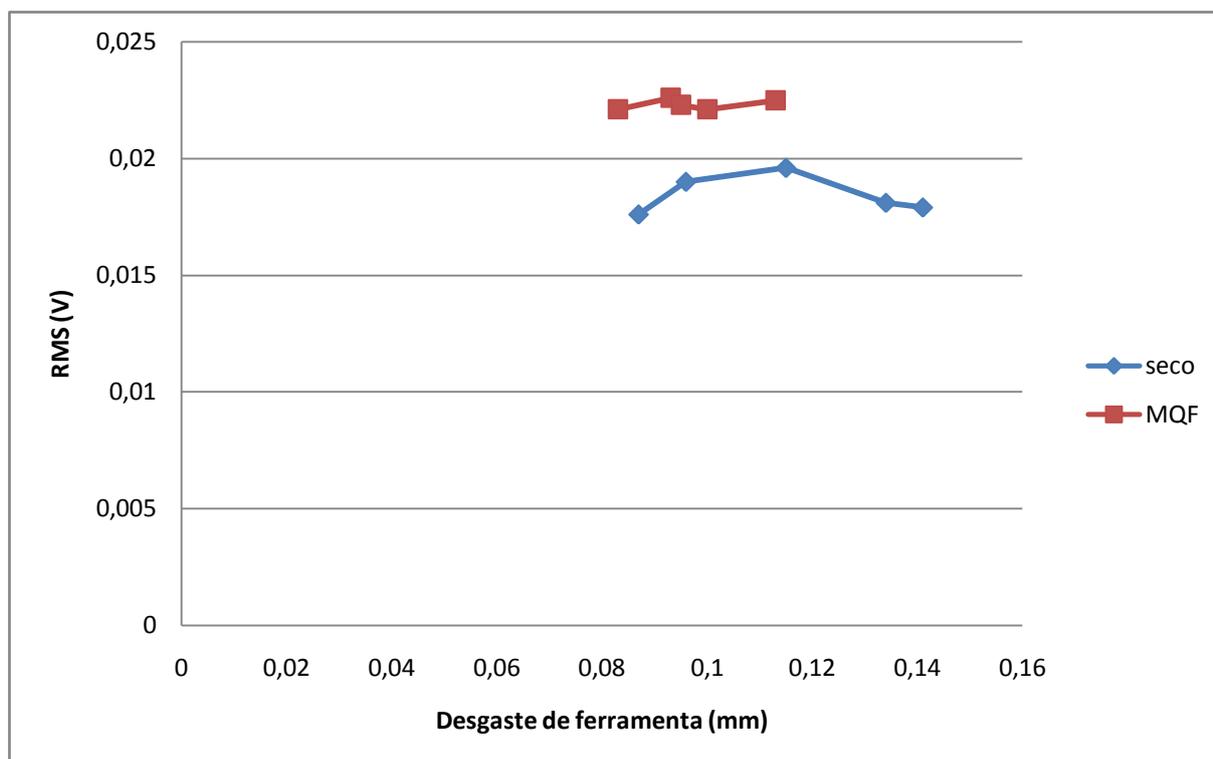


Figura 2 – Sinais RMS em função do desgaste de flanco da ferramenta obtida com uma velocidade de corte de 50m/min, avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,5mm.

Avaliando a Fig. (3), que mostra os sinais RMS de emissão acústica em função do desgaste de flanco da ferramenta a uma velocidade de corte de 250m/min, nota-se que em uma velocidade de corte maior em que não tem mais a influência da aresta postiça de corte, os sinais oriundos do corte a seco e com fluido em MQF são bastante parecidos. Aqui vale uma ressalva importante, que a ferramenta de corte utilizada nos testes a seco sofreu um desgaste mais acentuado que a ferramenta utilizada no corte MQF, o que demonstra que o sinal RMS está mais relacionado com o desgaste de ferramenta do que com o meio.

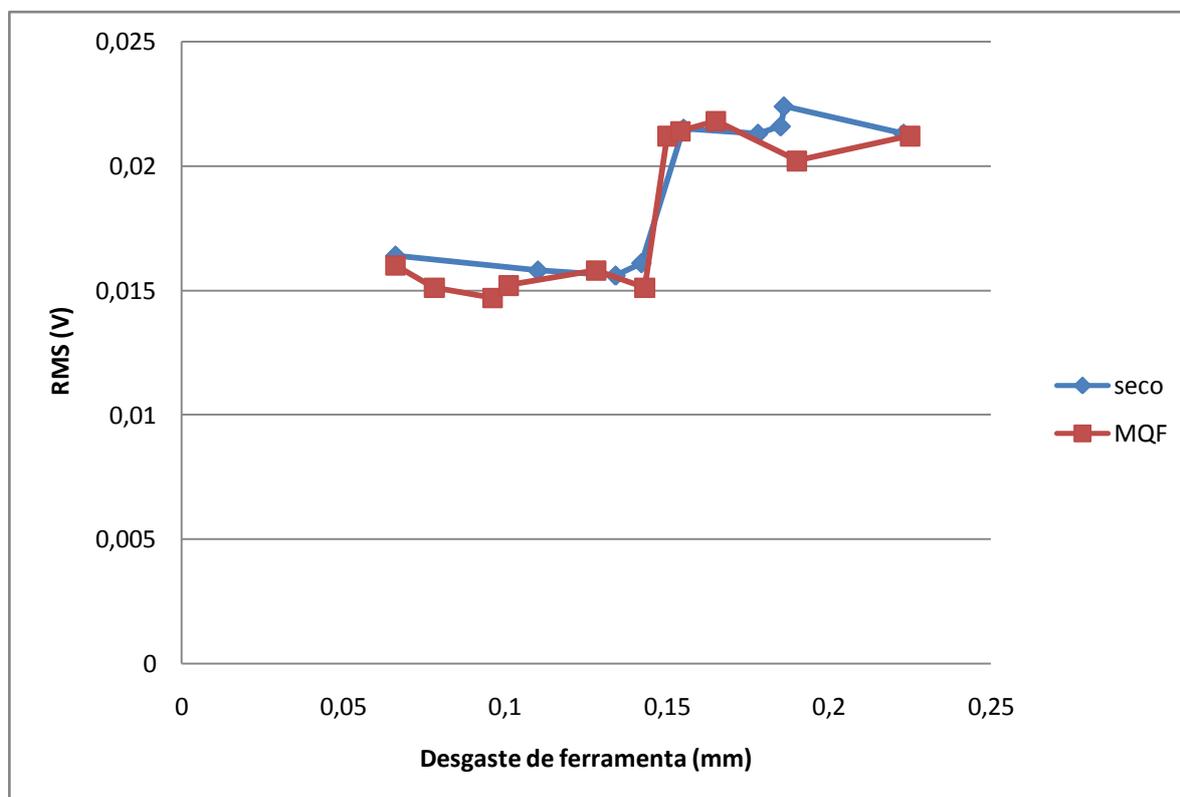
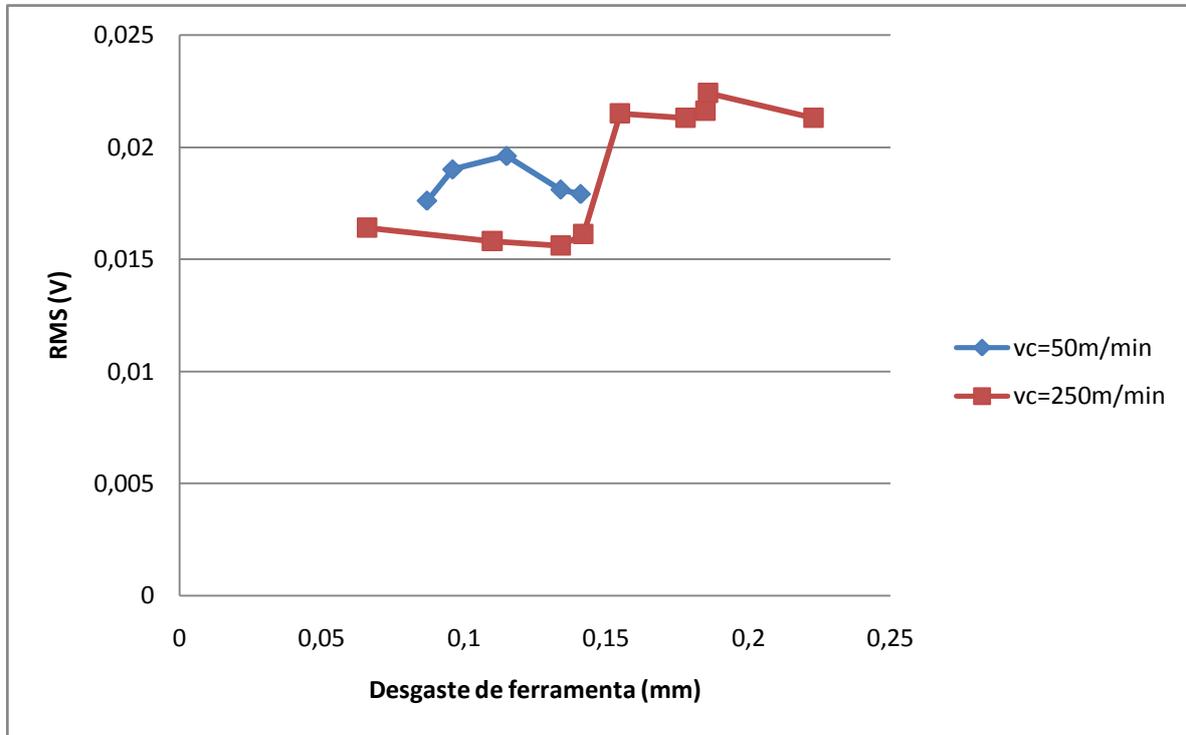


Figura 3 - Sinais RMS em função do desgaste de flanco da ferramenta obtida com uma velocidade de corte de 250m/min, avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,5mm.

Avaliando agora os sinais RMS provenientes dos testes a seco variando apenas a velocidade de corte (Fig. (4)), vê-se que apesar de no final do teste realizado com velocidade de corte de 250m/min o sinal RMS ter aumentado, ele obteve uma menor amplitude de sinal se comparado com o teste realizado com velocidade de corte de 50m/min, com o mesmo desgaste de flanco. Isso reforça a teoria que a aresta postiça de corte presente no teste de 50m/min e ausente no de 250m/min aumenta a amplitude dos sinais, seja pela variação dinâmica do corte, seja pela deposição de aço na ferramenta que pode estar aí gerando um sinal oriundo a reordenação cristalina referente ao encruamento do aço depositado na ferramenta.



**Figura 4 - Sinais RMS em função do desgaste de flanco da ferramenta obtida em testes a seco, com um avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,5mm.**

Avaliando a Fig. (4), que demonstra os sinais RMS em função do desgaste de flanco oriundas de testes utilizando fluido de corte no método MQF, nota-se que os sinais RMS provenientes do teste em velocidade de corte de 50m/min são maiores que os do teste realizado com velocidade de corte de 250m/min. Isso comprova a teoria de que a aresta postiça de corte influi nos sinais de emissão acústica os aumentando. Além disso, a maiores velocidades de corte, tem-se maior geração de calor o que aumenta o efeito de amortecimento na rede cristalina do material e reduz o nível de energia liberada (EA), conforme se observa nas Figs. (4) e (5).

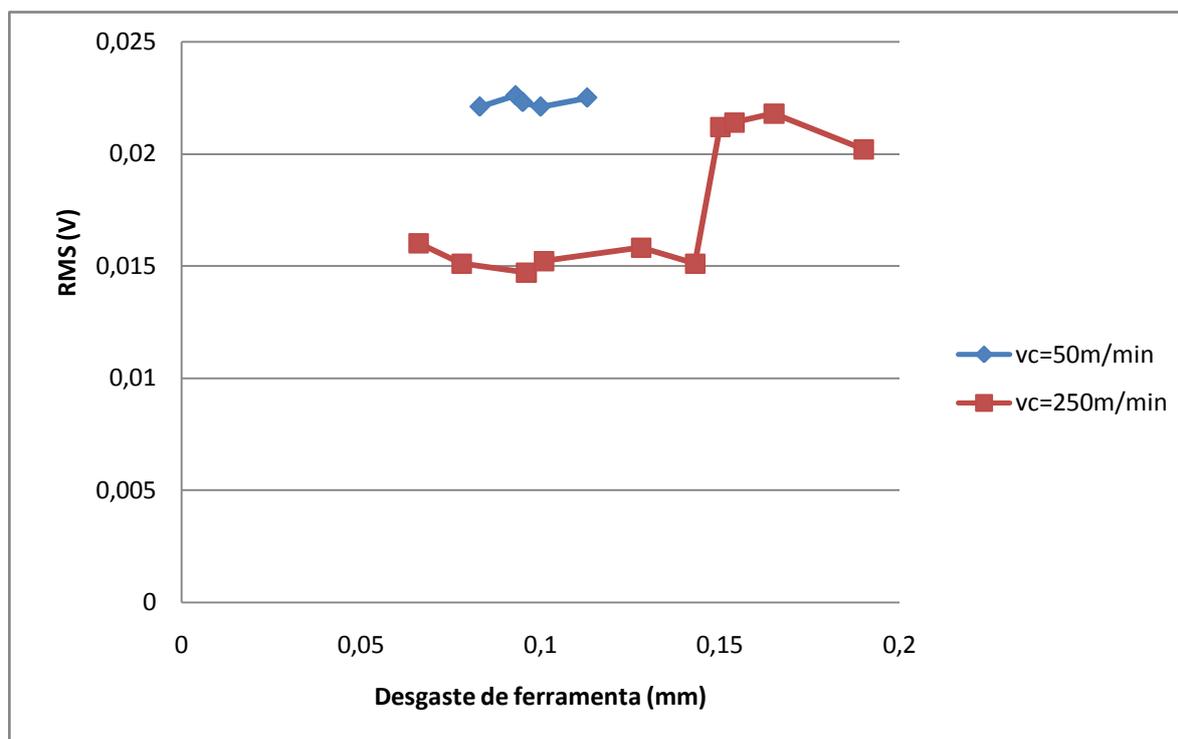


Figura 5 - Sinais RMS em função do desgaste de flanco da ferramenta obtida em testes em MQF, com um avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,5mm.

#### 4. CONCLUSÕES

Avaliando os resultados obtidos conclui-se que os sinais de emissão acústica sofrem influência significativa do desgaste de ferramenta, o que já era esperado uma vez que apoiando-se na teoria de emissão acústica, qualquer variação no corte, ocorre diferenças nos rearranjos cristalinos e isso é claramente captado pelos sinais.

O mesmo pode-se dizer da aresta postiça de corte presente em baixas velocidades de corte como a usada no experimento ( $v_c=50\text{m/min}$ ). O problema da aresta postiça de corte advém do fato que ela além de ser responsável pela grande liberação de energia produzida pelo seu corte na peça, a sua própria formação também é responsável pela produção de energia e ambas são captadas pelos sinais de emissão acústica, ressaltando que a primeira é de amplitude bem maior que a última.

Avaliando o uso de fluido, conclui-se que seu uso influenciou mais na vida da ferramenta que no sinal propriamente dito. Sendo que nos testes utilizando a velocidade de corte de 250m/min sua utilização não teve muita influência nos sinais captados. Quanto ao uso dele nos testes utilizando a velocidade de corte de 50m/min foi válido, uma vez que ele amenizou a formação da aresta postiça de corte, o que pode ser visto pela maior amplitude dos sinais em comparação com o teste a seco.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG pela bolsa de mestrado, à PUC Minas pelo espaço e equipamentos cedidos, ao Paulo Sergio por disponibilizar junto a Fiat Powertrain a análise do aço, ao CNPq (processo 475279/2004-2) e ao IFM (Instituto Fábrica do Milênio) pela verba na compra de materiais.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Blum, T.; Inasaki, I.; 1990, "A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process." Journal of Engineering for Industry. Vol. 112, pp. 203-211.
- Lee, Y.; Chang, A. K.; Dornfeld, D. A., 2002, "Acoustic emission monitoring for the diamond machining of oxygen-free high-conductivity copper" Journal of Materials Processing Technology. Vol. 127, pp. 199-205.
- Maia, L. H. A., Gonzalez, A. G., Landre, Jr., J., Becker, M., Sales, W. F., 2008b, "Influência dos parâmetros de corte nos sinais de emissão acústica." Simpósio de Mecânica Computacional – SIMMEC, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Maia, L. H. A., Landre Jr, J., Becker, M., Sales, W. F., 2008a, "Correlation between the signals of acoustic emission and surface quality when milling of SAE 4140 steel" Congresso SAE Brasil 2008, São Paulo, SP, Brasil.
- Maia, L. H. A., Sousa, F. M. G., Barcellos, C. S., Sales, W. F., 2006, "Evaluation of burr formation phenomenon and roughness when turning SAE 4140 steel." Congresso SAE Brasil 2006, São Paulo, SP, Brasil.

- Matsumoto, H.; Diniz, A. E., 1997, "Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor." 14<sup>a</sup> COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP, Brasil.
- Sales, W. F.; Bonney, J.; Ezugwu, E. O.; Fadare, D. A.; "Influence of Cutting Parameters on Acoustic Emission Signal when High Speed Turning of the Ti-6Al-4V Alloy". In Press 2007.
- Souto, U. B.; "Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica." 2007. 198p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UFU, Uberlândia.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### **Evaluations of tool wear in different cutting conditions in milling of low-alloy steel through of signals of acoustic emission**

**Abstract:** *The market economy system where the companies look for the maximum productivity for its investments, has a relevant function on the decision for the researches in manufacture area. Take into account this environment, propose a study of indirect monitoring of milling using of the signals of acoustic emission for evaluate the tool wear in several cutting conditions: cutting speed ( $v_c$ ) of 50 and 250 m/min, depth of cut ( $a_p$ ) of 1,5 mm and feed per teeth ( $f_z$ ) of 0.12 mm/rev, in dry cutting and utilizing of the MQF method in 60ml/h. Behind the acquisition, the signals were treated and confronted with the flank wear of the tool. For this tests was utilized one mill of 80 mm of diameter with six inserts interchangeable. Inserts used were of cemented carbide coated by TiN, TiCN and  $Al_2O_3$ . At the end of the tests its noted that the AE signals tend to grow according of tool wear grows, if this is not a general rule throughout the experiment.*

**Key-words:** *Acoustic Emission, Tool Wear, MQF, Milling.*