

MONITORAMENTO DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA NO FRESAMENTO DO AÇO ABNT 4140 E A SUA RELAÇÃO COM A QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

Luís Henrique Andrade Maia¹, luishmaia@gmail.com

Jánes Landre Jr.¹, janes@pucminas.br

Marcelo Becker², becker@sc.usp.br

Wisley Falco Sales³, wisley@ffassis.edu.br

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

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

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

Resumo: Em certos processos, a qualidade superficial das peças é de grande importância para que se garanta a finalidade desta. Atualmente observa-se duas maneiras de se tentar assegurar essa qualidade superficial. A primeira é por experiência adquirida pelo operador e a outra é por meio da análise das peças. A primeira é passível de erro e a segunda, dependendo de quão apertada é sua tolerância, demorada e cara. Baseado nisso, diversos estudos vem sendo desenvolvidos para propor um sistema que fosse capaz de monitorar a operação de usinagem e a relacionar com a qualidade da superfície, sem que seja necessário parar a linha de montagem. Este estudo fez uma correlação entre os sinais de emissão acústica coletados na usinagem do aço de baixa liga ABNT 4140 e a qualidade de superfície usinada por meio dos parâmetros R_a , R_z e R_q . Utilizou-se neste trabalho uma fresa de 80 mm de diâmetro com seis insertos intercambiáveis. Os insertos utilizados para a realização dos experimentos foram de metal duro triplamente revestido com Al_2O_3 , $TiCN$ e TiN . As aquisições de dados foram feitas com as seguintes condições de corte: velocidade de corte (v_c) de 50, 150 e 250 m/min; profundidade de corte (a_p) de 0,25 e 1,25 mm e avanço por dente (f_z) de 0,05 e 0,12 mm/rev. Foram realizados testes combinando os parâmetros do processo. Adquiriram os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_q após cada passe. Verificou-se que os sinais de EA são bastante influenciados pela qualidade de superfície usinada.

Palavras-chave: Emissão Acústica, Qualidade de Superfície, MQF, Fresamento.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é hoje uma das ferramentas mais importantes para se conferir forma a metais. Visto isso, cada vez mais se tenta entender os mecanismos e a prever falhas em equipamentos envolvidos neste processo.

No contexto atual, um produto é competitivo no mercado se ele apresenta o menor fator investimento/produto e desta forma a indústria investe cada vez mais em avanços tecnológicos para que esta relação se mantenha a mínima. Pesquisas em novos materiais tanto de corte quanto de usinagem propriamente dita, além de novos mecanismos de lubrificação e mesmo em máquinas-ferramentas leva a um ambiente quase que inimaginável a uma década atrás.

Contudo, ainda 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, as ferramentas são utilizadas, naquela linha de montagem até aquele número obtido.

Mas o processo tribológico envolvido pode variar dependendo das características ambientes. Isso faz com que se coloque um fator de segurança na quantidade de horas-peças que a ferramenta fabrica e refugue a ferramenta que ainda poderia fazer peças dentro da tolerância.

Com o objetivo de tentar prever a hora exata de troca da ferramenta, muitas pesquisas foram e ainda são realizadas para monitorar de forma indireta as características, tanto da ferramenta quanto da qualidade da superfície usinada.

A monitoração indireta é a captação de certo parâmetro que não está diretamente relacionado com o sistema e o correlacionar com um parâmetro envolvido.

Nesta linha, no presente estudo tentou-se por meio do monitoramento dos sinais de emissão acústica correlacioná-los com a qualidade de superfície usinada no fresamento a seco do aço SAE 4140.

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.*, 2006a).

Segundo Maia *et al.* (2006b), materiais mais resistentes de ferramentas de corte são mais eficazes, pois toleram maiores velocidades, permitindo a eliminação da aresta postiça de corte. Outro aspecto importante é quanto ao atrito entre peça/ferramenta, pois quanto menor, melhor o acabamento superficial. Deste modo a utilização de metal duro e cerâmico SIALON ($\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3$) é melhor que aço rápido e aço carbono, quando usinando aços de baixa liga.

Segundo Maia *et al.* (2008), a monitoração de certos fenômenos por meio de sinais de emissão acústica é um fato relativamente novo no âmbito fabril, pois no acadêmico já é intensivamente investigado desde a década de 70 do século passado.

O uso do monitoramento através de sinais de emissões acústicas na usinagem começou com Grabec e Leskovic (1977), neste trabalho eles analisaram o som emitido no corte de uma liga de alumínio e descobriram que o espectro de frequência audível era discreto, enquanto que o da faixa ultra-sônica, que depois veio a ser conhecida como emissão acústica, era contínua.

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.

Segundo Li (2002), emissão acústica é uma onda de som ou, mais propriamente, uma onda de tensão que viaja através do material como resultado de alguma repentina liberação de tensões de energia.

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 os analisados pelo presente trabalho.

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.

A qualidade de superfície usinada foi medida através dos parâmetros de rugosidade e estas foram feitas através de um perfilômetro de contato fabricado pela Mitutoyo, modelo Surtronic 3+.

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.

CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova adotados para realização do experimento foram barras de dimensões 80x100x100 mm, como mostrado na Fig. (1).

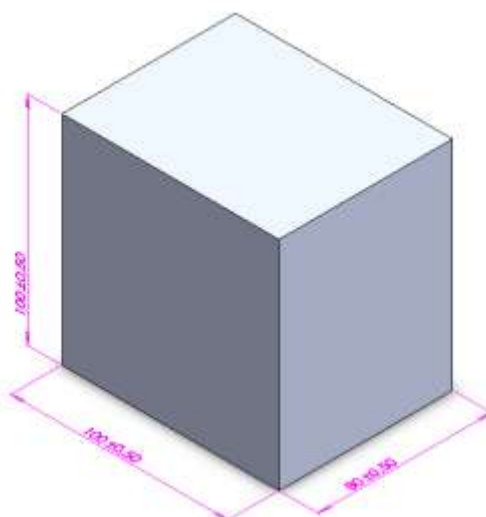


Figura 1 – Desenho 3D do corpo de prova.

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). 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	resto

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 + Al₂O₃ (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 modelo 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, 150 e 250 m/min; avanço por dente (f_z) de 0,05 e 0,12 mm/rev e profundidade de corte (a_p) de 0,25 e 1,25 mm.

Os testes de vida foram realizados capturando os sinais de emissão acústica após cada 10 passes e retirando os insertos medindo o desgaste de flanco de tais. Foram feito isso até que se passassem uma hora-teste.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente analisaram-se os sinais em função dos parâmetros de corte e logo depois se fez sua correlação com os de rugosidade.

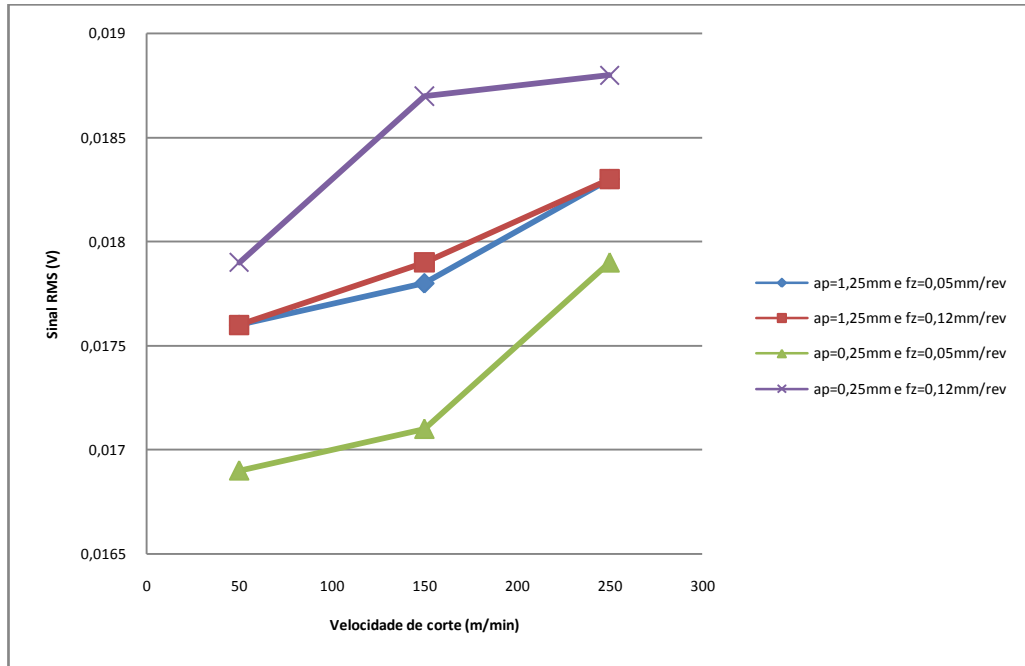


Figura 2 – Sinal RMS em função da velocidade de corte (v_c).

Analisando a Fig. (2), pode-se ver que os sinais RMS do experimento crescem à medida que a velocidade de corte também cresce. Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto maior é a velocidade de corte, aumenta-se a taxa de deformações elasto-plásticas e de remoção de material e conseqüentemente aumenta-se a liberação de energia devido aos rearranjos cristalinos na estrutura atômica do material e conseqüentemente maior o sinal de emissão acústica.

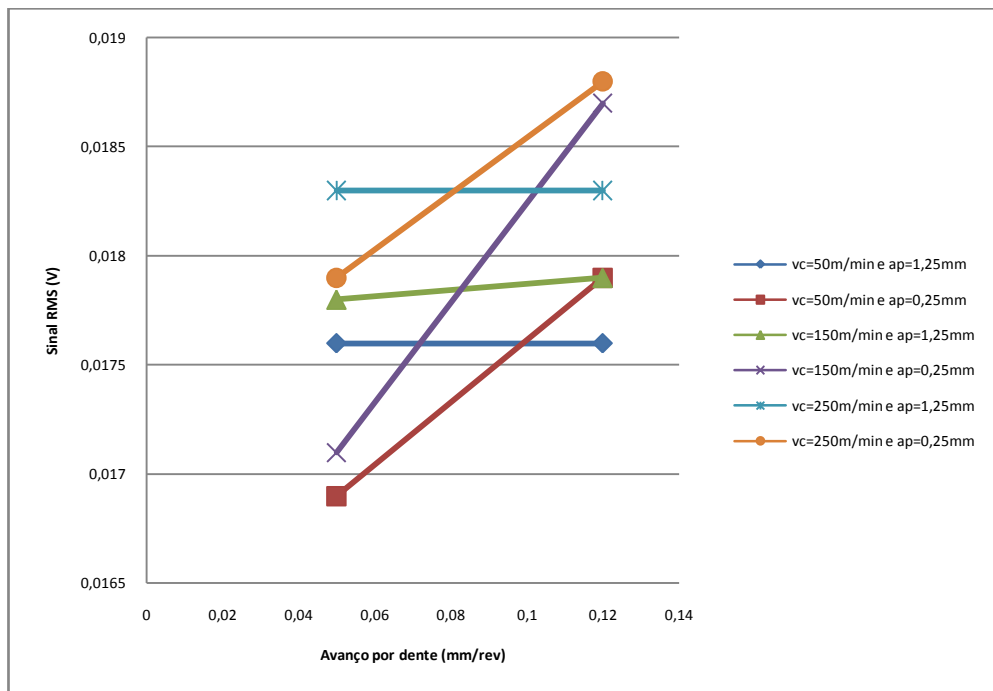


Figura 3 – Sinal RMS em função do avanço por dente (f_z).

Analisando agora a Fig. (3), nota-se que o sinal de emissão acústica (RMS) cresce para quase todos os dois avanços analisados o que já era de se esperar, uma vez que com o aumento do avanço por dente, mais material é retirado e assim maior energia se desprende no sistema, originando maior sinal.

Também vê que os sinais se mantêm constante na velocidade de corte 50 m/min com uma profundidade de corte de 1,25 mm, o que pode ser explicado pela formação da aresta postiça de corte que pode ter facilitado o corte no avanço por dente maior, mantendo o sinal constante.

Ainda, podem-se ver os sinais constantes na velocidade de corte de 250 m/min com uma profundidade de corte de 1,25 mm, a esta velocidade não se tem mais a aresta postiça de corte o que leva a crer que o “amolecimento” do material usinado favoreceu o corte e manteve constante o sinal. Tönshoff *et al.* (2000) usinando aço endurecido, concluíram que aumentando a temperatura na interface ferramenta-peça além do aumento do desgaste de flanco da

ferramenta, faz com que se gerasse um amortecimento do sinal de emissão acústica, fenômeno este que eles chamam de “dumping effect”.

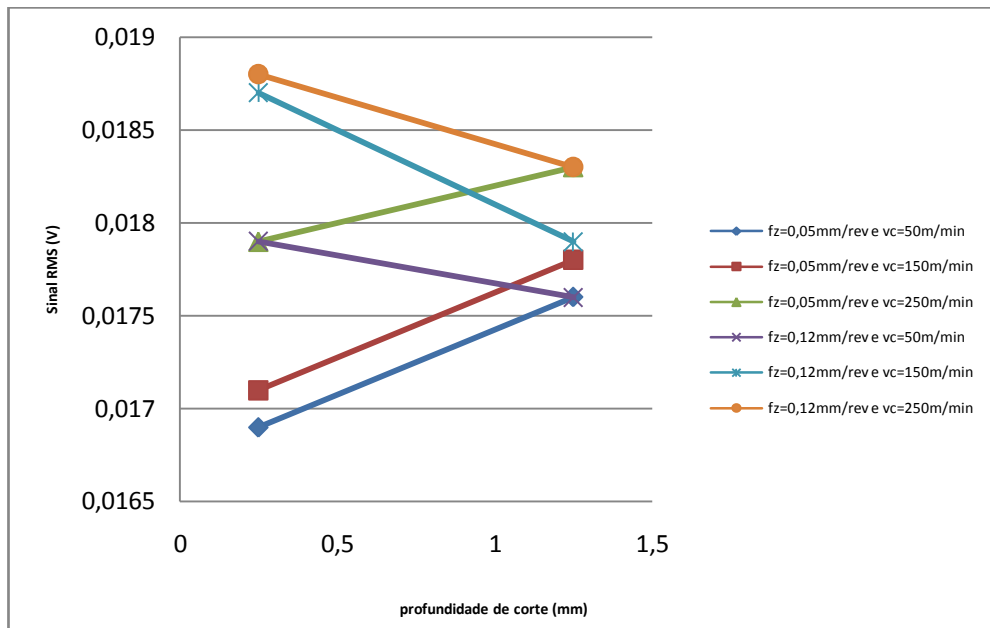


Figura 4 – Sinal RMS em função da profundidade de corte (a_p).

Avaliando o sinal RMS em função da profundidade de corte (fig. 4), nota-se que os sinais capturados com o avanço por dente de 0,05 mm/rev aumentaram, aumentando a profundidade de corte, o que já era esperado, pelo aumento da energia gerada. Os sinais oriundos do avanço por dente de 0,12 mm/rev diminuíram quando se aumentou a profundidade de corte. Isso pode ser explicado pelo aumento da temperatura na interface de corte o que levou a um corte mais “macio” e conseqüentemente o efeito de amortecimento superou os demais (Tönshoff *et al.*, 2000) e fez com que produzisse menor sinal.

ANÁLISE EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE R_a

Agora faz-se a análise dos parâmetros de rugosidade em função dos parâmetros de corte.

Lembrando que o parâmetro de rugosidade R_a , que é a rugosidade média é definida como o desvio médio do perfil analisado ao longo de sua linha média.

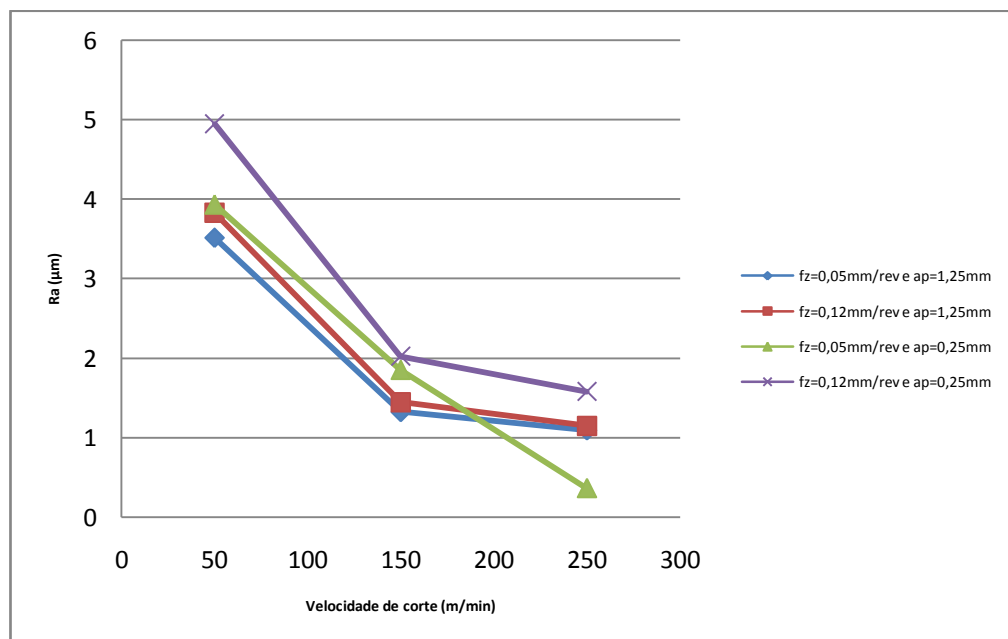


Figura 5 – Rugosidade R_a em função da velocidade de corte (v_c).

Avaliando a Fig. (5), nota-se que a rugosidade R_a diminui à medida que se aumenta a velocidade de corte em todos os parâmetros avaliados. Isso se dá que pelo fato de que se aumentando a velocidade de corte se elimina a formação de

aresta postiça de corte que interfere em muito no acabamento da peça, além de aumentar a temperatura na interface cavaco-ferramenta, reduzir a força de usinagem e novamente reforçar o efeito do amortecimento dos sinais gerados em níveis cristalinos e atômicos.

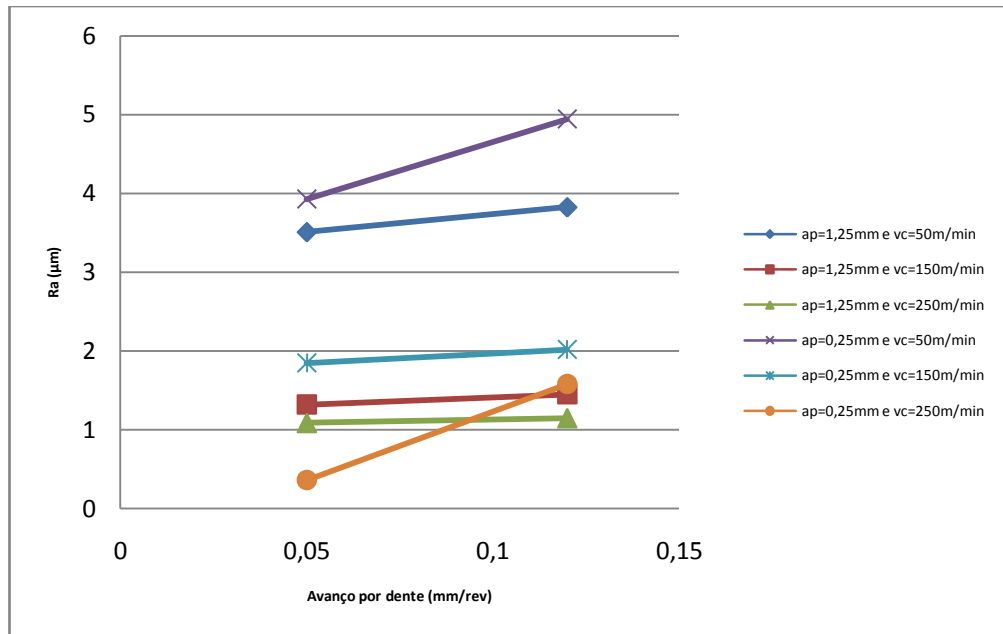


Figura 6 – Rugosidade R_a em função do avanço por dente (f_z).

Analisando a Fig. (6) vê-se que os valores de rugosidade R_a tende a aumentar para todos os parâmetros analisados aumentando o avanço por dente. Isso pode ser explicado pelo fato que com o aumento do avanço, aumentam-se as marcas de avanço, prejudicando o acabamento da superfície usinada. Neste caso, aumentando-se o avanço, aumenta-se a temperatura da interface cavaco-ferramenta, mas com influência muito menor do que para a velocidade de corte, ou seja, o efeito de amortecimento praticamente inexistente para a faixa de avanços avaliados. Por outro lado, o aumento do avanço aumentou a área de contato cavaco-ferramenta e conseqüentemente a taxa de deformações elasto-plásticas e a energia dos sinais de AE. Não tão claro, ocorre com o aumento da profundidade de corte (fig. 7), pois o seu aumento é ainda menos influente na temperatura da interface cavaco-ferramenta (Sales *et al.*, 2007) do que o avanço e observa-se que o efeito de aumento da área de contato, também aumentou o efeito do amortecimento, reduzindo os sinais RMS de AE.

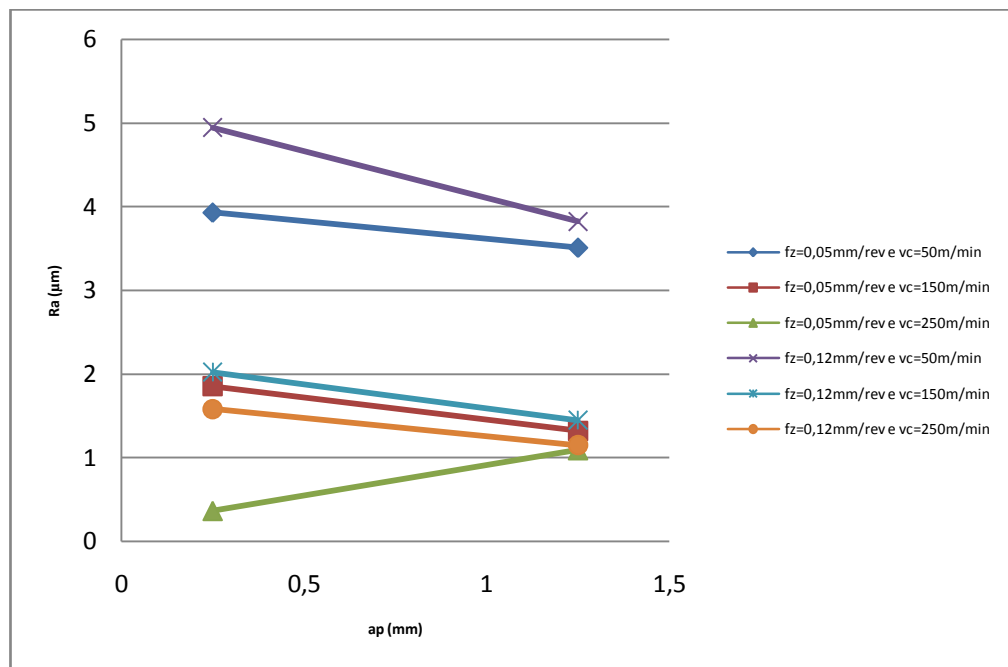


Figura 7 – Rugosidade R_a em função da profundidade de corte (a_p).

ANÁLISE EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE R_q

Avaliando agora o parâmetro R_q , que é definido como sendo desvio médio quadrático da rugosidade, ou seja, raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil em relação à linha média.

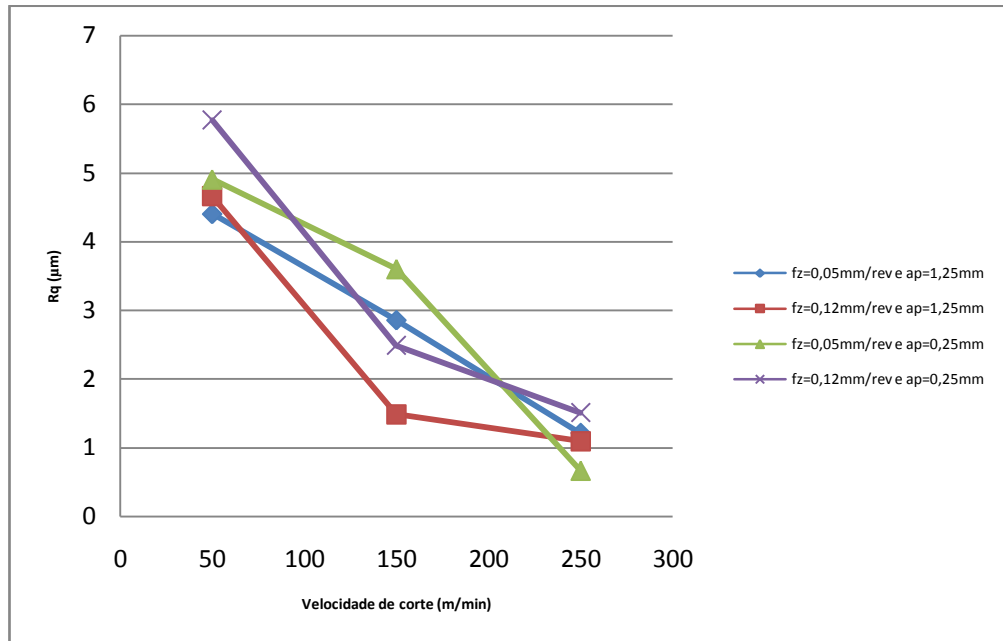


Figura 8 – Rugosidade R_q em função da velocidade de corte (v_c).

Avaliando a Fig. (8), nota-se que assim como no parâmetro R_a , a rugosidade R_q também decresceu à medida que se aumentou a velocidade de corte, sendo a eliminação da área de formação da aresta posposta de corte também o motivo desta diminuição.

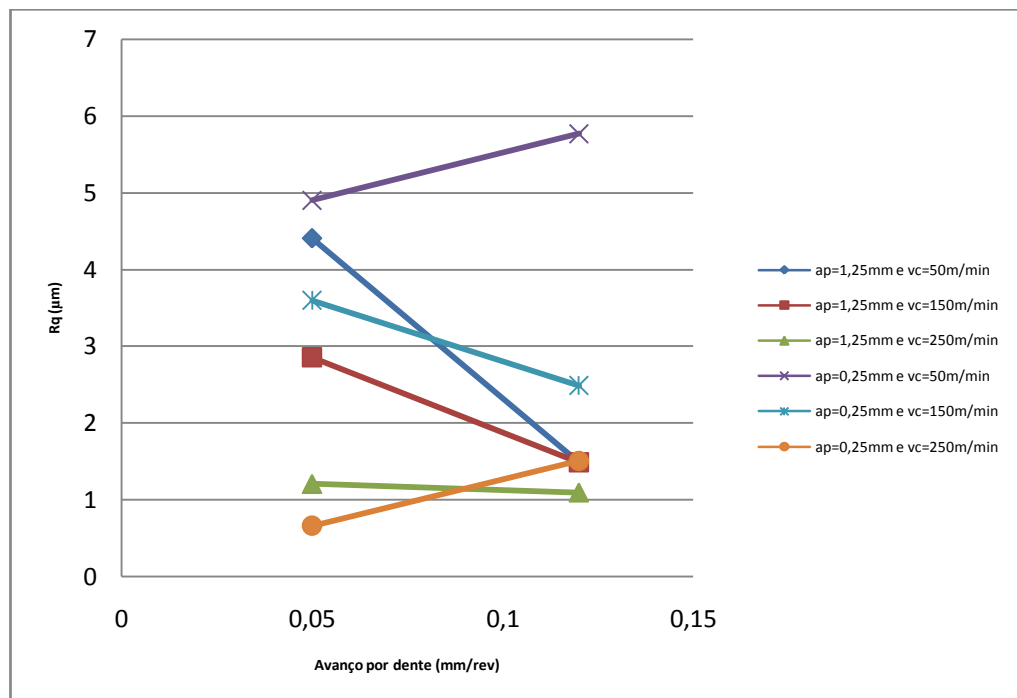


Figura 9 – Rugosidade R_q em função do avanço por dente (f_z).

Analisando agora a Fig. (9), nota-se que diferente do parâmetro R_a , a rugosidade R_q diminui com o aumento do avanço por dente em quase sua totalidade, excetuando com $a_p=0,25$ mm, com $v_c=50$ m/min e com $v_c=250$ m/min. Isso leva a crer o efeito de amortecimento, devido ao aumento da temperatura e da área da interface cavaco-ferramenta mostrou-se dominante para o aço ABNT 4140.

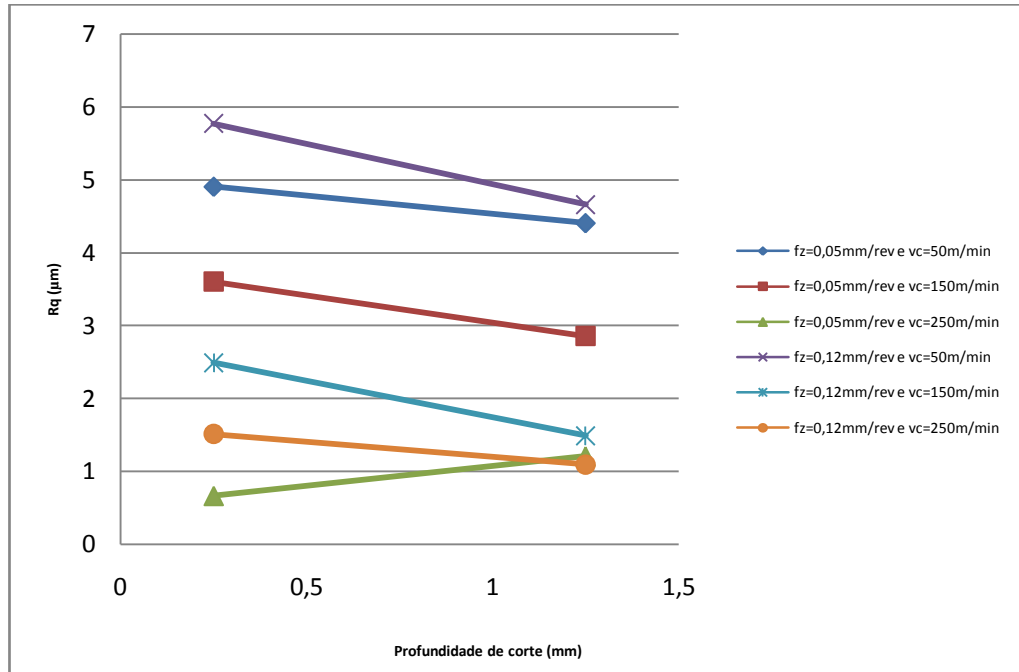


Figura 10 – Rugosidade R_q em função da profundidade de corte (a_p).

Como na análise da Fig. (7), a Fig. (10) demonstra que excetuando a linha $f_z=0,05\text{mm/rev}$ e $v_c=250\text{m/min}$ todo o gráfico tem a tendência a diminuir seus valores de R_q quando se aumenta a profundidade de corte. Como na análise do parâmetro R_a , isso não era esperado. Mas como nele, as profundidades de acabamento devem ter influenciado o resultado.

ANÁLISE EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE R_t

Analisando agora o parâmetro de rugosidade R_t , que define como sendo a distância entre o perfil base e o perfil de referência, em outras palavras é a maior distância encontrada entre um pico e um vale numa região amostrada.

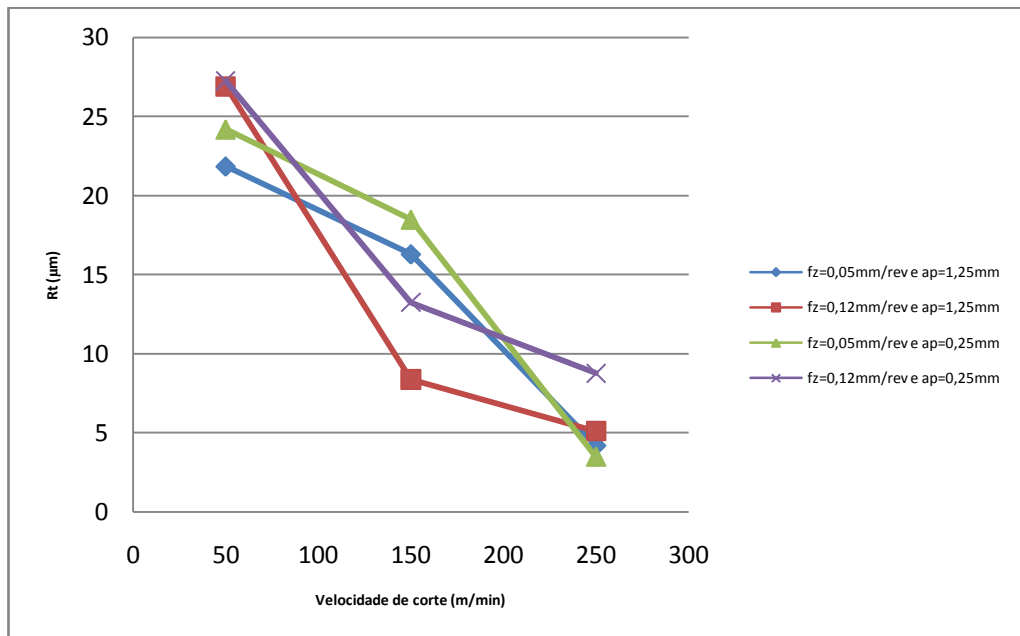


Figura 11 – Rugosidade R_t em função da velocidade de corte (v_c).

Mais uma vez, vê-se que o parâmetro de rugosidade, desta vez R_t (Fig. (11)), diminui à medida que se aumenta a velocidade de corte, comprovando a teoria da aresta postíça de corte influi no acabamento superficial da peça usinada.

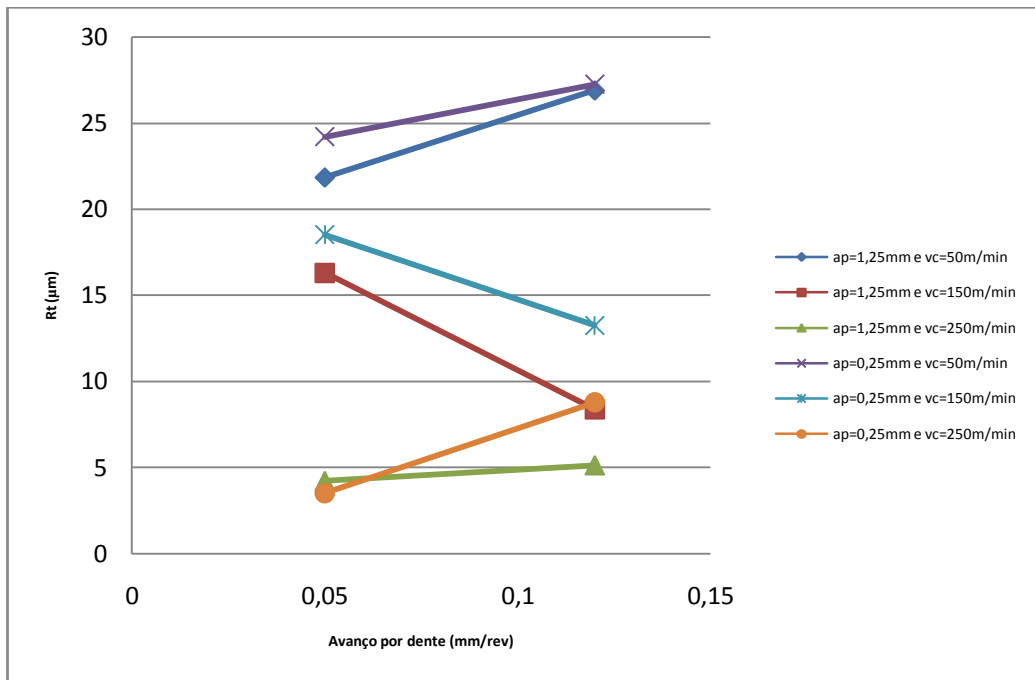


Figura 12 – Rugosidade R_t em função do avanço por dente (f_z).

Analisando a Fig. (12), vê-se que para a maioria dos parâmetros avaliados a rugosidade R_t cresce à medida que o avanço por dente aumenta, excetuando as linhas de $v_c=150\text{ m/min}$ com $a_p=0,25\text{ mm}$ e $a_p=1,25\text{ mm}$. Isso reforça a hipótese levantada anteriormente que o aumento do avanço por dente veio a prejudicar o acabamento da superfície.

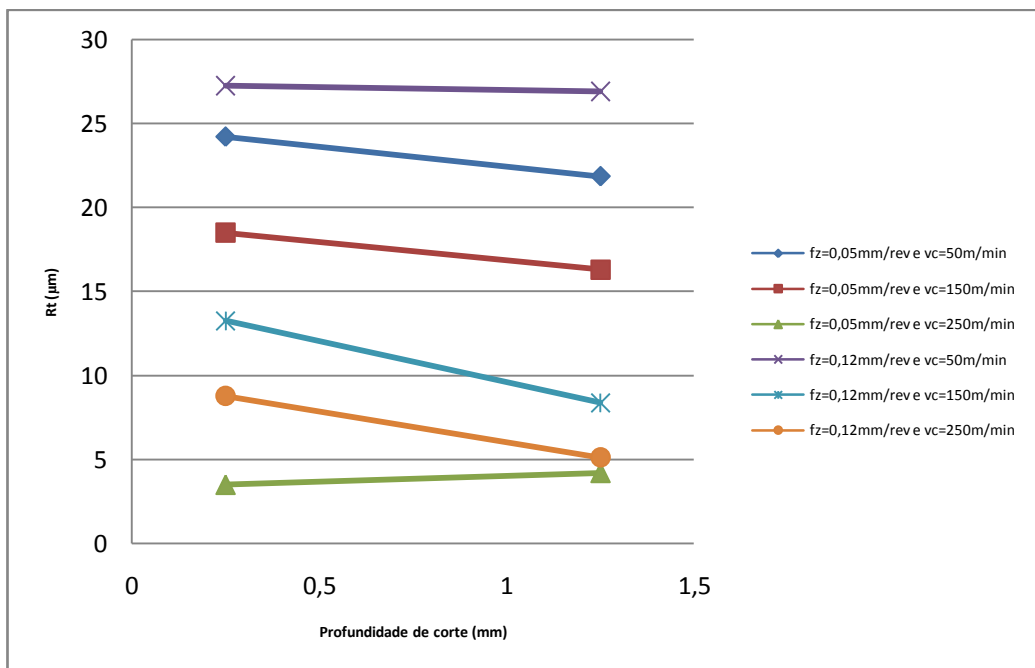


Figura 13 – Rugosidade R_t em função do avanço por dente (a_p).

Analisando a Fig. (13), nota-se que excetuando pela linha $f_z=0,05\text{ mm/rev}$ e $v_c=250\text{ m/min}$, todo o gráfico tende a diminuir com o aumento da profundidade de corte, o que reforça a afirmação anterior que com profundidades de corte tão baixas (acabamento) deve ter influenciado os resultados.

4. CONCLUSÕES

Avaliando a correlação entre os sinais RMS e os parâmetros de rugosidade, conclui-se que encontrou uma correlação moderada entre elas. A um primeiro momento, conseguiu-se afirmar que existe uma correlação entre ambos. Só isso em si já é um grande sucesso. Mas como todas as duas variáveis sofrem muita influência de vários mecanismos, precisa-se tentar isolar melhor estes mecanismos a fim de que se possa verificar o aumento dessa correlação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG 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.

6. REFERÊNCIAS

- Grabec, P.; Leskovar, P.; 1977, "Acoustic emission of a cutting process" Ultrasonics. Vol. 15, pp. 17–20.
- LI, X., 2002. "A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring during Turning". International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol.42, pp. 157-165.
- 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., 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.
- Maia, L. H. A., Sousa, F. M. G., Barcellos, C. S., Sales, W. F., 2006, "Formação de rebarbas e qualidade da superfície usinada no torneamento do aço ABNT4140 quando usinando a seco e com fluido emulsionável." XI Colóquio de Usinagem no CEFET-GO, Goiânia, GO, 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.
- Tönshoff, H.K.; Jung, M.; Mänuel, S.; Rietz, W.; 2000, "Using acoustic emission signals for monitoring of production processes", Ultrasonics, 37, pp. 681-686.
- Willians, R. V., 1968, "Acoustic Emission", British Steel Corporation Ltd., Adam Hilger Ltd., pp.5.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

MONITORING OF THE SIGNALS OF ACOUSTIC EMISSION IN MILLING OF THE ABNT 4140 STEEL AND ITS RELATIONSHIP WITH THE QUALITY OF SURFACE

Abstract: *In some cases, the quality surface of the parts is of great importance to ensure that the purpose of this. Currently there are two ways to try to ensure that quality surface. The first is by experience gained by the operator and the other is through the analysis of parts. The first is capable of error and the second, depending on how tight is its tolerance, lengthy and expensive. Established therein, various studies has been developed to propose a system that would be able to monitor the operation of workability and to relate with the quality of surface, without this need stop assembly line. This study was a correlation between the signs of noise emission machining collected in the steel alloy low ABNT 4140 and the quality of surface usinada by means of parameters Ra, Rz and Rq. For the accomplishment of the tests a mill of 80 diameter mm was used with six interchangeable inserts. The inserts used were of hard metal threefold coated with TiN, TiCN and Al₂O₃. Data acquisitions were made with the following cutting conditions: cutting speed (vc) of 50, 150 and 250m/min, depth of cut (ap) of 0,25 and 1,25mm and feed per teeth (fz) de 0,05 and 0,12 mm/rev, in dry cutting and utilizing of the MQF method in 60ml/h. The tests form made combining these parameters. It's acquired the parameters for roughness Ra, Rz and Rq after each pass. It was found that the signs of AE are greatly influenced by the quality of surface.*

Key-words: *Surface quality, Acoustic emission, Milling, SAE 4140 steel.*