

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE “Ra” DE UMA SUPERFÍCIE FRESADA UTILIZANDO SINAIS DE VIBRAÇÃO EM BANDAS DE FREQUENCIA DE 1/3 DE OITAVA.

André Luis Beloni dos Santos

Universidade Presidente Antônio Carlos - UNIPAC, Faculdade Regional de Araguari, Araguari-MG, CEP 38440-000, e-mail: abeloni@mecanica.ufu.br

Marcos Moraes de Sousa

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC, Campus Sta Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-089, e-mail: mmsousa@mecanica.ufu.br

Marcus Antonio Viana Duarte

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC, Campus Sta Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-089, e-mail: mvduarte@mecanica.ufu.br

***Resumo.** Em uma operação de usinagem por fresamento, o comportamento dinâmico do conjunto ferramenta-peça-máquina durante o corte e a sua influência sobre a rugosidade Ra dependem de muitos fatores que devem ser considerados. A escolha de um conjunto de variáveis de corte inadequadas, por exemplo, pode levar a um aumento das forças de corte que com o tempo resulta em níveis de vibração não aceitáveis, acarretando até mesmo a inutilização da peça trabalhada. Sendo assim, torna-se de grande importância o estudo de métodos de monitoramento da rugosidade. A correlação da vibração mecânica com o parâmetro rugosidade tem sido amplamente explorada por apresentar uma certa facilidade desta correlação quando são utilizadas ferramentas matemáticas básicas de análise de sinais. Neste trabalho é apresentada uma análise dos sinais de vibração em bandas de 1/3 de oitava de frequência, centradas desde 16,5 Hz até 2000 Hz, com o objetivo de mostrar a tendência do comportamento da rugosidade Ra em função das amplitudes dos sinais de vibração na usinagem de barras de aço ABNT 1045 em um processo de fresamento frontal.*

***Palavras-chave:** nível de vibração, rugosidade, fresamento.*

1. INTRODUÇÃO

A estimativa do acabamento de uma superfície usinada, a partir de uma dada condição de corte e da geometria da ferramenta, há muito desperta interesse entre os pesquisadores em qualidade superficial. Por conseqüência, inúmeros foram os modelos propostos, quase sempre para dar uma indicação do valor esperado de Ra e Rmax.

Tais modelos podem variar desde os mais simples, onde a fixação do sistema e da ferramenta são consideradas extremamente rígidas, até aqueles onde a influência do comportamento dinâmico do processo no perfil da superfície gerada é levada em consideração (Shaw, 1984).

Identificar o fator mais preponderante e sua parcela de contribuição na rugosidade de uma certa superfície não é tarefa das mais simples. Quase sempre, as variáveis que influenciam a qualidade de uma superfície usinada são em número muito elevado e altamente correlacionadas, de difícil modelamento.

Em processos de corte descontínuos, particularmente, essa dificuldade em se estabelecer uma correlação entre o acabamento da superfície e as variáveis que afetam o processo torna-se ainda mais complexa.

A necessidade de obtenção de modelos mais confiáveis motivou alguns pesquisadores a utilizarem até mesmo metodologias e procedimentos analíticos na busca de resultados mais precisos.

Kline et al (1982), e Sutherland and Devor (1986), propuseram um modelo para a determinação dos erros de perfil, baseados na teoria de “*Cantilever beam*” e em uma formulação de elementos finitos para explicar os efeitos da deflexão da ferramenta e da peça, durante o corte, nos resultados obtidos.

Babin et al (1985), utilizaram a mesma teoria de “*Cantilever beam*” para estimar a topografia de uma superfície gerada por fresamento misto.

Apesar dos avanços obtidos, modelos como esses não levam em consideração a influência do comportamento dinâmico do sistema ferramenta/peça sobre o perfil da superfície gerada.

Os importantes efeitos resultantes do comportamento dinâmico foram, contudo, considerados por pesquisadores como Montgomery and Altintas (1991). Neste trabalho, os autores propuseram um modelo para a determinação de uma superfície gerada em função da ação de corte dos dentes e da vibração do sistema.

Whitehouse (1997), utilizou métodos estatísticos para identificar e estimar a contribuição dos diferentes parâmetros estudados na rugosidade de uma dada superfície usinada.

Em muitas situações, principalmente na indústria, a rugosidade de uma superfície é utilizada como parâmetro de controle do processo de fabricação.

Como exemplo, Wright (1986), descrevem uma metodologia para a estimativa da rugosidade baseada no espectro de frequências espaciais gerado por superfícies fresadas, como forma de monitoramento do desgaste de ferramentas de corte.

De um modo geral, a grande maioria dos modelos existentes na literatura foram desenvolvidos considerando-se uma condição ideal de corte, ou seja, sem a presença de atrito entre as superfícies em contato. Desta maneira, o acabamento da superfície usinada seria dado apenas pelas marcas deixadas na peça devido ao avanço da ferramenta de corte, simplificando consideravelmente a proposição do modelo.

Em uma situação real de trabalho, os valores de rugosidade estimados pelos modelos teóricos simplificados são consideravelmente inferiores (às vezes muito inferiores) aos valores efetivamente medidos na superfície usinada. Esta diferenciação de valores decorre de variáveis do processo que influenciam a rugosidade e que não são consideradas quando da determinação do modelo, tais como: as condições da máquina ferramenta, as propriedades do material de trabalho, o material da ferramenta, o processo de corte empregado, a geometria do corte, as condições de trabalho adotadas, níveis de vibração, o mecanismo de formação do cavaco, fluxo lateral do cavaco, erros de fixação da peça e da ferramenta, presença de aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta e recuperação elástica do material da peça.

Muito mais do que ser influenciada pelo grande número de variáveis do processo, a rugosidade apresentada por uma superfície usinada depende de uma combinação de fatores que se encontram relacionados à geração desta nova superfície.

Na indústria, o monitoramento dos valores de rugosidade de uma superfície pode ser um importante parâmetro para fornecer uma indicação do desgaste das ferramentas e estabelecer o momento de sua troca. O adequado controle deste parâmetro poderia fornecer uma estimativa da vida da ferramenta, evitando uma possível quebra com graves conseqüências à superfície do material usinado.

Neste contexto, torna-se muito importante entender como algumas das principais variáveis do processo de corte influenciam a rugosidade de uma superfície.

Sendo assim, este trabalho apresenta uma análise do comportamento das amplitudes dos sinais de vibração em bandas de frequência de 1/3 de oitava, buscando identificar uma correlação com a rugosidade de uma superfície submetida a um processo de fresamento frontal.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para estudar a tendência do comportamento das amplitudes dos sinais de vibração em função da rugosidade R_a da superfície fresada, foram ensaiadas, até o fim de vida, quatro condições de corte geradas a partir de um programa de otimização denominado INIT (dos Santos 1996).

Os ensaios experimentais foram realizados com uma única fresa do tipo frontal de 80 mm de diâmetro e capacidade para 6 insertos.

As ferramentas utilizadas foram de metal duro, triplamente revestidas (TiN, TiC, TiN), da classe P 25. Barras de sessão quadrada de aço ABNT 1045 e bitola 101,26 mm foram utilizadas em todos os ensaios experimentais, as quais foram cortadas em tarugos de 550 mm. Para a execução dos ensaios de fresamento, utilizou-se uma fresadora CNC Romi, com potência de 16 kW e variação contínua de velocidade e avanço, com capacidade máxima de rotação do eixo árvore de 4000 RPM, disponível no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da UFU (LEPU). O controle dos níveis de desgaste das ferramentas de corte ao longo dos testes experimentais foi feito em um microscópio ferramenteiro desenvolvido no LEPU.

As medições de rugosidade R_a e desgaste das ferramentas foram efetuadas ao final de um percurso de avanço correspondente a um passe da ferramenta (550 mm), ou então entre intervalos de passes maiores, quando as condições de corte eram pouco severas e as variações de desgaste eram muito pequenas entre dois passes consecutivos. Os desgastes foram medidos em todas as seis pastilhas de corte, até que o critério de fim de vida adotado fosse alcançado em pelo menos uma delas. Neste momento o teste era encerrado e as seis arestas de corte substituídas por novas para a realização de um novo teste com uma nova condição de corte. O critério de fim de vida das ferramentas de corte adotado foi o desgaste de flanco máximo $VB_{Bmax} = 0,7$ mm.

Para a determinação dos locais mais apropriados para a colocação dos acelerômetros para a medição dos níveis de vibração, foi realizado, inicialmente, um procedimento baseado no estudo das Funções Resposta em Freqüência (FRFs), estimadas para 80 possíveis pontos para instalação dos sensores (Sousa, 1998). A partir daí, definiu-se o mancal inferior do eixo porta fresa e parte anterior da mesa de trabalho, como os mais adequados para a instalação dos acelerômetros (Sousa et alli, 1998). Após uma análise dos sinais adquiridos pelos acelerômetros nos dois pontos de monitoramento, verificou-se que ambos apresentavam comportamento vibracional muito semelhantes. Dessa maneira, por ser um ponto tradicional de medição de valores para controle em manutenção e também menos sensível à influência de fatores externos como o peso da peça, optou-se por utilizar os sinais de vibração monitorados pelo acelerômetro instalado no mancal inferior do eixo porta fresas (Stewart, 1977; Braun e Lenz, 1986).

Para cada passe realizado, em cada uma das quatro condições de corte ensaiadas até o fim de vida, os valores correspondentes medidos de desgaste de flanco máximo da ferramenta VB_{Bmax} , rugosidade R_a e vibração RMS do conjunto ferramenta/máquina/peça foram anotados, resultando em um arquivo de dados com 96 ensaios.

O monitoramento dos sinais de vibração durante o corte foi realizado sempre na região central do comprimento fresado de 550 mm, de maneira a se evitar a interferência decorrente da entrada e saída da fresa no material de trabalho.

Com o objetivo de melhor caracterizar os sinais de vibração e visando uma maior condensação dos dados, os espectros de vibração foram obtidos nas bandas de freqüência de 1/3 de oitava centradas em: 16,5; 20; 25; 31,6; 40; 50; 61,3; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 316; 400; 500; 600; 800; 1000; 1250; 1600; 2000 Hz.

3. RESULTADOS

A Tabela 1 mostra as condições de corte geradas pelo programa de otimização que foram utilizadas nos ensaios experimentais.

Tabela 1. Condições de corte geradas.

Condições de corte geradas por INIT	v_c (m/min.)	f_z (mm/rev.)	a_p (mm)
1	156,99	0,2311	1,523
2	329,45	0,1110	2,206
3	325,18	0,1304	1,784
4	215,00	0,1464	1,974

Os valores de rugosidade R_a , colocados em ordem crescente de resposta, foram plotados em relação a cada uma das 20 bandas de frequência de 1/3 de oitava no qual o sinal de vibração foi discretizado. Os espectros de vibração foram obtidos nas bandas de frequência de 1/3 de oitava centradas em: 16,5; 25; 31,6; 40; 50; 61,3; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 316; 400; 600; 800; 1000; 1250; 1600; 2000 Hz.

Por terem os resultados mais significativos e representativos, são apresentados os gráficos de vibração X rugosidade R_a correspondentes às condições de corte 2 e 3 da Tabela 1.

A Figura 1 apresenta o comportamento da amplitude dos sinais de vibração, nas diferentes bandas de frequência de 1/3 de oitava, em função da rugosidade R_a medidos durante os ensaios de fim de vida realizados para a condição de corte 2, conforme Tabela 1.

Como forma de melhor caracterizar a tendência de comportamento entre os “parâmetros” vibração e rugosidade R_a , também foram traçadas curvas mostrando a variação dos níveis de vibração, para determinadas bandas de frequência, em relação à rugosidade R_a . A Figura 2 apresenta estas características para as bandas de 31,5 Hz (Fig. 2 A) e 50 Hz (Fig. 2 B), respectivamente.

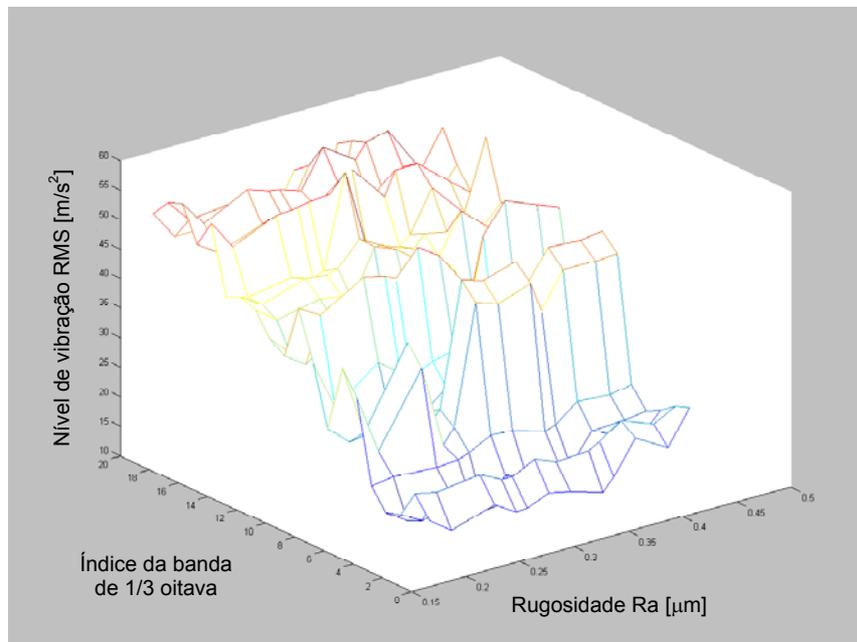


Figura 1. Curvas das amplitudes de vibração nas bandas de frequência de 1/3 de oitava versus R_a , para os dados relativos à condição de corte 2 da Tabela 1.

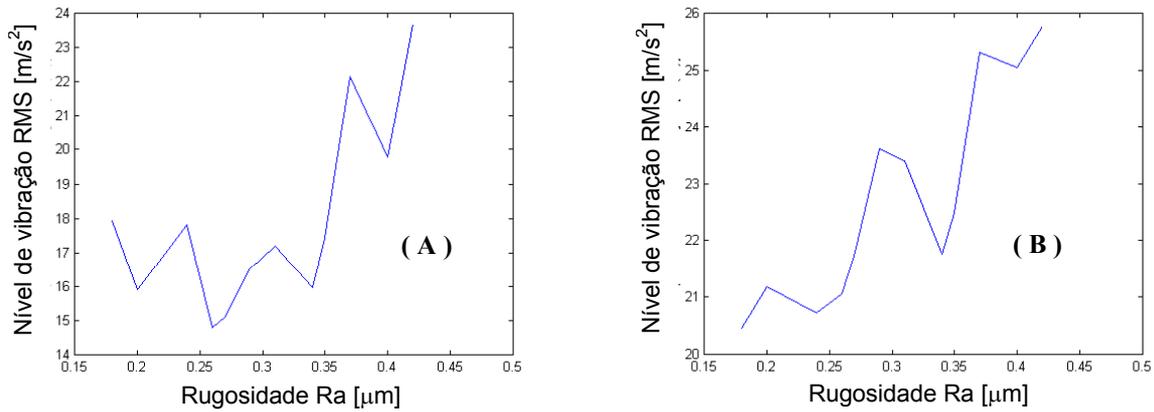


Figura 2. Curva da amplitude dos sinais de vibração versus Ra, obtida a partir dos ensaios de fim de vida para a condição de corte 2 da Tabela 1: A) para a banda de 31,6 Hz, B) para banda de 50 Hz.

Analogamente, a Figura 3 apresenta o comportamento da amplitude dos sinais de vibração, nas diferentes bandas de frequência de 1/3 de oitava, em função da rugosidade Ra medidos durante os ensaios de fim de vida realizados para a condição de corte 3, conforme Tabela 1.

Como forma de melhor caracterizar a tendência de comportamento entre os “parâmetros” vibração e rugosidade Ra, também foram traçadas curvas mostrando a variação dos níveis de vibração, para determinadas bandas de frequência, em relação à rugosidade Ra. A Figura 4 apresenta estas características para as bandas de 125 Hz (Fig. 4 A) e 200 Hz (Fig. 4 B), respectivamente.

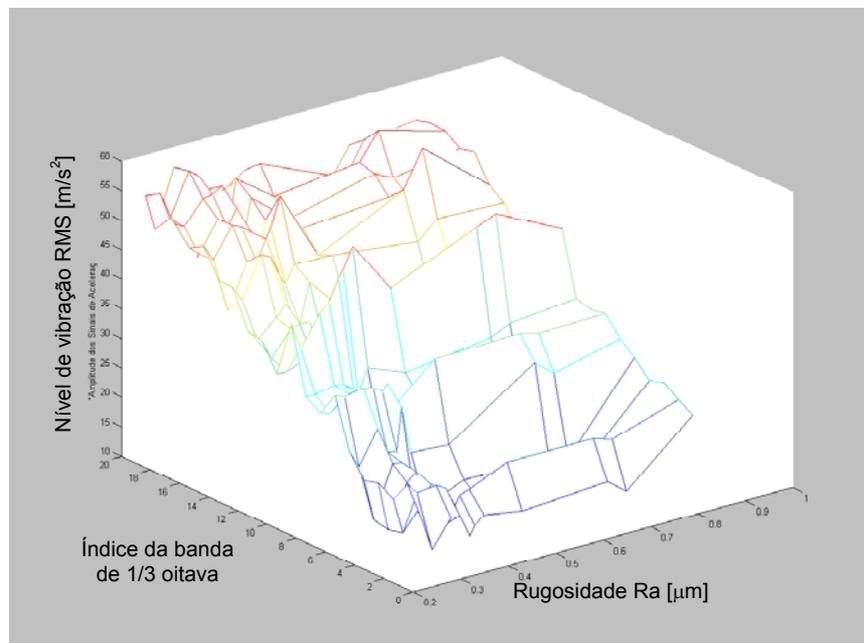


Figura 3. Curvas das amplitudes de vibração nas bandas de frequência de 1/3 de oitava versus Ra, para os dados relativos à condição de corte 3 da Tabela 1.

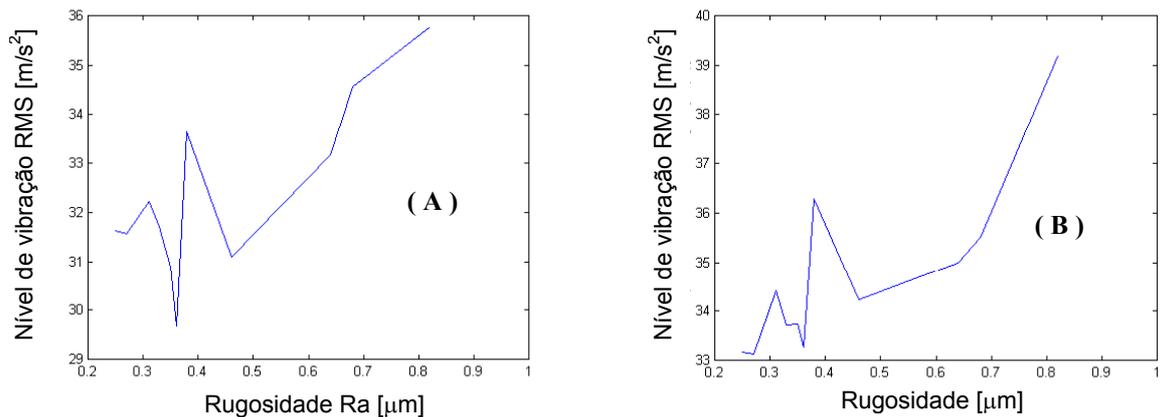


Figura 4. Curva da amplitude dos sinais de vibração versus Ra, obtida a partir dos ensaios de fim de vida para a condição de corte 3 da Tabela 1: A) Banda de 125 Hz, B) Banda de 200 Hz.

4. CONCLUSÕES

As amplitudes dos sinais de vibração obtidas durante a fase de ensaios mostraram sempre uma tendência de crescimento com o aumento da rugosidade da superfície fresada, nas quatro condições de corte estudadas e nas diversas bandas de frequência analisadas. Os resultados encontrados mostram que os sinais de vibração, quando discretizados em bandas de frequência de 1/3 de oitava, permitem uma visualização mais precisa das faixas de frequência onde a rugosidade torna-se mais acentuada. Constatou-se assim, uma acentuada correlação entre a rugosidade Ra e a vibração, nas diversas bandas de frequência estudadas, demonstrando a viabilidade de se estabelecer um modelo que estime com confiabilidade o acabamento de uma superfície fresada em um processo produtivo.

5. REFERÊNCIAS

- Babin, T.S., Lee, J.M., Sutherland, J.W. and Kapoor, S.G., 1985, "A Model for End Milled Surface Topography", Proceedings of the 13th North American Metalworking Research Conference, pp. 362-368.
- Braun, S. and Lenz, E., 1986; "Mechanical Signature Analysis", Academic Press Ed., pp. 321-342.
- dos Santos, A.L.B, 1996, "Otimização de Ensaios Utilizados na Determinação dos Coeficientes da Equação de Taylor Expandida", Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG.
- Kline, W.A., Devor, R.E. and Shareef, I.A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling", Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, vol. 104, pp. 272-278.
- Montgomery, D. and Altintas, Y., 1991, "Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling", Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, vol. 113, pp. 160-168.
- Shaw, M.C., 1984, "Metal Cutting Principles", Oxford Science Publication, New York, 594 pags., ISBN 0-19-859002-4.
- Sousa, M.M., 1998; "Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar o Desgaste das Ferramentas de Corte e o Acabamento Superficial no Processo de Fresamento", Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia, MG.
- Sousa, M.M., Duarte M.A.V. e Machado, A.R., 1998; "Monitoramento do acabamento superficial no fresamento via vibrações", XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP.
- Stewart, R.M., 1977; "Some Useful data Analysis Techniques for Gearbox Diagnostics", Proc. of Meeting on Applications of Times Series Analysis, ISVR, pp. 19.

- Sutherland, J.W. and Devor, R.E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems", Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry, vol. 108, pp. 269-279.
- Whitehouse, D.J., 1997, "Review Article:Surface Metrology", Meas. Sci. Technol., n. 8, pp. 955-972.
- Wright, P.K., 1986, "Frictions Interactions in Machining: Comparisons between Transparent Sapphire and Steel Cutting Tools", Metals Technology, pp.150-160.

6. DIREITOS AUTORAIS

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

ANALYSIS OF ROUGHNESS "Ra" BEHAVIOR OF A MILLING SURFACE USING VIBRATION SIGNAL IN THE 1/3 OCTAVE FREQUENCY BAND

André Luis Beloni dos Santos

Universidade Presidente Antônio Carlos - UNIPAC, Faculdade Regional de Araguari, Araguari-MG, CEP 38440-000, e-mail: abeloni@mecanica.ufu.br

Marcos Morais de Sousa

Federal University of Uberlândia, FEMEC, Campus Sta Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-089, e-mail: mmsousa@mecanica.ufu.br

Marcus Antonio Viana Duarte

Federal University of Uberlândia, FEMEC, Campus Sta Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-089, e-mail: mvduarte@mecanica.ufu.br

***Abstract.** In milling process, the dynamic behaviour of the workpiece-tool-machine assembly during cutting affects the surface roughness "Ra" and depends on many factors. The choice of a set of inadequate cutting parameters may lead to an increase of cutting forces which with time will result in unacceptable levels of vibration, causing damage of the workpiece. Thus, the study of methods of roughness monitoring is of great importance. The correlation of vibration with roughness has been much studied since they are easily correlated using basic mathematical tools for analysis of signals. This paper presents an analysis of vibration signal in 1/3 octave frequency band, centred on 16,5 Hz to 2000 Hz, with objective to show the tendency of the behaviour of the amplitudes of the vibration signal as a function of roughness "Ra" when machining ABNT 1045 steel bars in a face milling tests carried out with coated cemented carbide.*

Keywords: vibration level, roughness, face milling.