



MODELAGEM DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO PROCESSO DE TORNEAMENTO VIA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES

Meola, Tatiana

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Bloco 1M – Campus Santa Mônica Uberlândia – MG
CEP 38400-902
tatianameloa@bol.com.br

Duarte, M. A. V.

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Bloco 1M – Campus Santa Mônica Uberlândia – MG
CEP 38400-902
mvduarte@mecanica.ufu.br

Da Silva, M. B.

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Bloco 1M – Campus Santa Mônica Uberlândia – MG
CEP 38400-902
mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo. *Devido à busca constante de maior qualidade nos produtos modernos, o monitoramento em tempo real do acabamento superficial das peças usinadas vem sendo cada vez mais desejável. Neste trabalho, é realizado um estudo visando correlacionar a rugosidade superficial de peças torneadas com os níveis de vibrações medidos no porta ferramentas. Estudou-se o torneamento do aço ABNT 1045 usinado com a ferramenta do tipo SNMG 1204 08 P45, em que, variaram-se a velocidade de corte (sete valores) e o avanço (três valores). O ajuste de um modelo linear para a precisão do acabamento superficial, tendo como parâmetros de entrada a velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e o fator de crista (FC), resultou num erro de 2.5%.*

Palavras-chave: *monitoramento, acabamento superficial, torneamento, vibrações.*

1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação destinados à obtenção de produtos com melhores qualidades e custos operacionais reduzidos, vêm esmerando-se com o avanço tecnológico industrial.

A usinagem, processo de fabricação mais popular, em que se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavaco, pode ser taxada, ao mesmo tempo, como complexa e simples (Machado e da Silva, 1998). A primeira qualidade é devido às dificuldades em se determinar as imprevisíveis condições ideais de corte e às complicações na modelagem do processo (mudança de fase, transferência de calor e não linearidade), juntamente com fatores que a afetam, como materiais da peça e ferramenta e vibrações da máquina. A segunda, porque, uma vez determinadas as condições ideais de corte, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de ação especial do operador.

Apesar de toda a automatização envolvida nas linhas de produção, há, devido às dificuldades de equacionamento, necessidade de se levar em conta se o acabamento superficial está dentro dos

limites esperados e se a ferramenta de corte atingiu sua vida estimada. O fim da vida da ferramenta é determinado quando o desgaste da mesma atinge valores previamente estabelecidos, os quais normalmente baseiam-se no limite de capacidade de produzir peças dentro dos padrões de qualidade (acabamento superficial e tolerância dimensional), determinados pelo projeto.

O acabamento superficial pode ser classificado como ondulações e desvios micro- geométricos, principalmente rugosidade superficial. Esta última nada mais é do que irregularidades finas resultantes da ação inerente do processo de corte e, pode ser obtida com a realização de testes de usinagem, variando-se os seguintes parâmetros: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Vale ressaltar, que o acabamento superficial, de um modo geral, melhora quando: deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas; a ponta da ferramenta não é aguda; a ferramenta e a peça estão centradas; material da peça livre de defeitos; aresta de corte sem quebras; corte sem aresta postiça de corte (APC) (Machado e da Silva, 1998). Tais parâmetros determinam as condições de corte da peça e ferramenta influenciando no acabamento superficial.

A medição do desgaste pode ser realizada de forma direta ou indireta. Aquela, com o auxílio de um microscópio ferramenteiro, e , esta, através da medição da rugosidade superficial, usando-se um rugosímetro, e, por meio dos erros de forma com equipamentos específicos. Tais procedimentos apresentam, no entanto, para os processos automatizados, a necessidade de interrupção da usinagem na hora das medições.

Espera-se que as máquinas automatizadas sejam capazes de realizar o controle do desgaste e a troca das ferramentas, sem a interferência do homem (Du et all, 1995). Tal ocorrência só é permitida com o desenvolvimento de técnicas de monitoramento do processo de usinagem em tempo real, as quais são fundamentadas em medições de parâmetros que se relacionam com o desgaste da ferramenta e/ou o acabamento superficial da peça.

O controle em tempo real é baseado no monitoramento das forças de usinagem, nas vibrações mecânicas do sistema (de Sousa et All, 1997; Beloni et all, 2001; na emissão acústica (Caldeirani, 1998) ou ainda através da medição de vários parâmetros do processo (Braga et all, 1993).

Tendo em vista a importância do monitoramento indireto da qualidade das peças usinadas, o objetivo deste trabalho é avaliar o melhor sintoma vibratório a ser utilizado para o monitoramento do acabamento superficial no processo de torneamento de campo.

2. PROCEDIMENTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho realizaram-se, na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 42 testes no processo de torneamento do aço 1045, utilizando-se a ferramenta do tipo SNMG 1204 08 P45 e um torno MAX – II – 520 da IMOR de 5 Kw, máquina bastante comum. A utilização de uma ferramenta do tipo P45 deveu-se a existência destas ferramentas em estoque e ao fato de que as arestas foram trocadas em cada ensaio.

Tais testes foram efetuados a seco - ϕ da peça 92.6 mm, utilizando-se sempre ferramentas novas, não havendo a necessidade de se medir o desgaste delas. O processo foi realizado com sete velocidades de corte diferentes para três avanços distintos e profundidade de corte constante ($a_p=1\text{mm}$).

Na Tab. (1), são apresentados os parâmetros de usinagem utilizados nos 42 testes realizados no processo de torneamento, em que V_c representa a velocidade de corte [m/min], f o avanço [mm/volta] e o R_a valor médio de rugosidade superficial [μm] para cada um dos testes efetivados. As medições de rugosidade foram feitas utilizando um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo, modelo Surftest 211, com 'cut off' ajustado de 0,8 mm.

Foram medidas também, vibrações do porta ferramenta. Mediram-se as acelerações com um acelerômetro do tipo 4367 da B&K, sendo que os sinais provenientes de um pré amplificador de carga (tipo 2635 da B&K) foram discretizadas com uma frequência de amostragem de 8192 Hz numa placa A/D do tipo ADC-100 da picotechnology.

Tabela 1. Parâmetros de usinagem utilizados nos testes

Teste	Vc	F	Ra	Teste	Vc	f	Ra
1	54	0.149	3.32	22	52	0.149	3.76
2	67	0.149	3.30	23	65	0.149	3.81
3	83	0.149	2.19	24	81	0.149	3.69
4	106	0.149	2.08	25	103	0.149	3.31
5	134	0.149	1.19	26	131	0.149	2.45
6	167	0.149	1.07	27	163	0.149	1.79
7	211	0.149	1.07	28	207	0.149	1.78
8	53	0.176	6.73	29	52	0.176	4.84
9	67	0.176	3.66	30	65	0.176	4.32
10	83	0.176	2.49	31	81	0.176	3.30
11	106	0.176	2.51	32	103	0.176	3.42
12	134	0.176	2.18	33	131	0.176	2.39
13	167	0.176	2.48	34	163	0.176	2.00
14	211	0.176	2.86	35	207	0.176	1.97
15	54	0.204	6.80	36	52	0.204	4.95
16	67	0.204	4.20	37	65	0.204	4.40
17	83	0.204	2.89	38	81	0.204	3.25
18	106	0.204	2.52	39	103	0.204	3.45
19	134	0.204	2.40	40	131	0.204	2.49
20	167	0.204	2.50	41	163	0.204	2.18
21	211	0.204	2.75	42	207	0.204	1.98

Para fins de modelagem pode-se utilizar redes neurais artificiais do tipo back propagation (dos Santos, 2001) para relacionar o acabamento superficial com os parâmetros de usinagem e as vibrações medidas em algum ponto do torno. Porém, estudos preliminares resultaram na observação de níveis de correlação elevados entre os parâmetros de usinagem e alguns sintomas vibratórios com o acabamento superficial. Por este motivo optou-se pelo uso de uma expansão polinomial em série de potências, representada pela Eq. (1), para modelar a relação entre o acabamento superficial (Ra) e os parâmetros de usinagem e de vibrações.

$$R_{at} = a_1 + a_2V_c + a_3f + a_4F + a_5T + \dots \quad (1)$$

Onde:

R_{at}: acabamento superficial teórico [μm]

V_c: velocidade de corte [m/min]

f : avanço [mm/volta]

F: sintoma vibratório no domínio da frequência (bandas de 1/3 de oitava)

T: sintoma vibratório no domínio do tempo

Para efeito de comparação entre os N valores de R_{at} e os valores de Ra medidos R_{am} utilizou-se a função erro ξ definida pela Eq. (2).

$$\xi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{[R_{a_{mi}} - R_{a_{ti}}]^2}{R_{a_{mi}}^2} \right) \quad (2)$$

3. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os sintomas vibratórios estudados foram constituídos pelos níveis de potência de aceleração em 23 bandas de 1/3 de oitava centradas entre 20 e 3100 Hz e cinco sintomas estatísticos constituídos por nível médio quadrático global (RMS), valor máximo de pico (P), valor máximo pico a pico (P-P), fator de crista (FC) e kurtosis (K), estes últimos são representados pelas Eq. (3) e Eq. (4) (Braun and Lenz, 1996).

$$FC = P / RMS \quad (3)$$

$$K = E[(a - \bar{a})^4] / RMS \quad (4)$$

Para escolher os sintomas vibratórios a serem utilizados na Eq. (1), optou-se pelo uso do coeficiente de correlação C (%) entre o acabamento superficial (Ra) e as vibrações, os parâmetros estatísticos de tempo e os parâmetros de usinagem como mostram as Tab. 2, Tab. 3 e Tab. 4.

Tabela. 2. Coeficiente de correlação entre Ra e níveis de potência vibratória em bandas de 1/3 de oitava (Fc [Hz])

Fc	20	25	31.2	40	50	63	80	100
C	-40.97	-26.48	-23.12	-29.63	-23.49	-14.62	25.70	31.05
Fc	125	160	200	250	312	400	500	630
C	3.49	32.09	43.88	12.30	25.55	35.27	36.47	41.26
Fc	800	1000	1250	1600	2000	2500	3100	
C	53.45	52.01	35.64	46.28	24.26	-18.87	-39.33	

Tabela 3. Coeficiente de correlação entre Ra e os parâmetros estatísticos no tempo

T	C
RMS	-13.02
P	24.73
P-P	23.17
FC	81.70
K	84.70

Tabela 4. Correlação entre Ra e os parâmetros de usinagem Vc e f

Parâmetro	Vc	f
C	-71.01	81.79

De acordo com a Tab. 3, o maior coeficiente de correlação foi calculado para a banda de 1/3 de oitava centrada na frequência de 800 Hz. A Fig. 1 mostra que à medida em que os valores de rugosidade superficial aumentam (acabamento superficial deteriora), os valores de aceleração tendem a crescer.

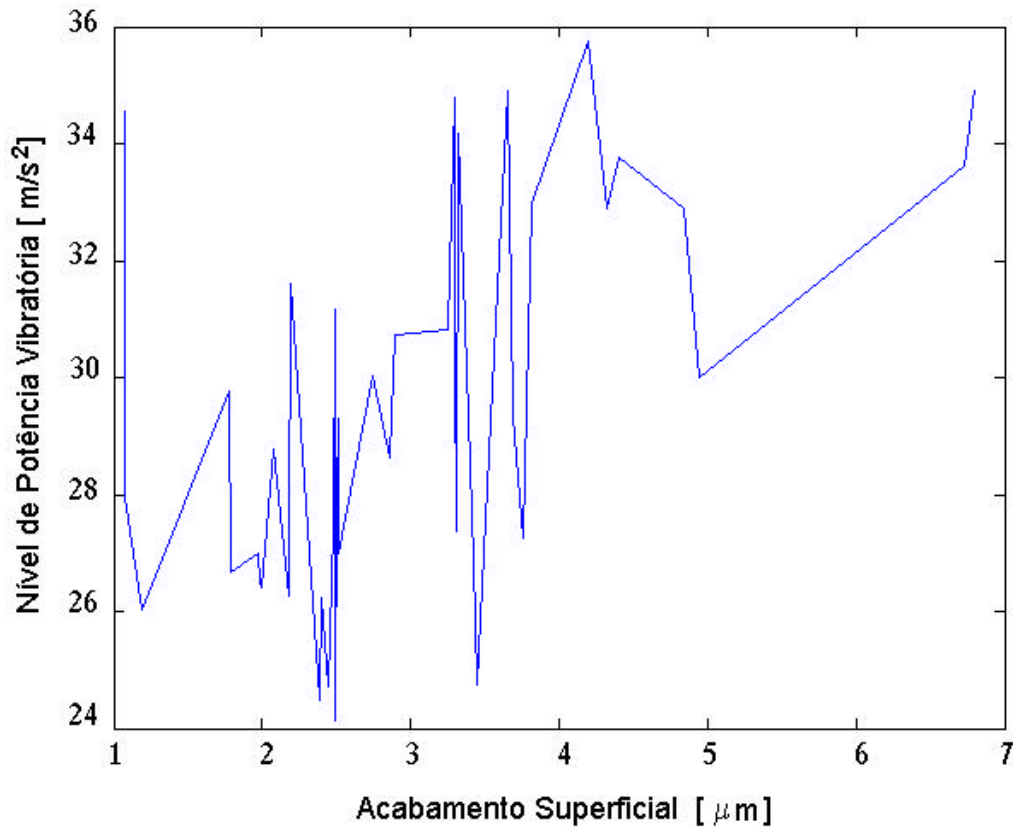


Figura 1. valores de vibrações centradas na frequência 800 Hz em função dos valores da rugosidade superficial (R_a).

Os parâmetros estatísticos de tempo mais correlacionados com o acabamento superficial são o fator de crista (FC) e a Kurtosis (K). As curvas das Fig. 2 e Fig. 3 mostram o comportamento desses parâmetros diante do aumento dos valores de rugosidade superficial.

Vale lembrar que as correlações V_c & R_a e f & R_a (Tab. 5) são altas e estão coerentes com a teoria (Machado e da Silva, 1998). Fig. 4 e Fig. 5 mostram esses comportamentos, em que, o aumento da velocidade de corte, em geral, tende a melhorar o acabamento superficial (diminuir a rugosidade superficial), ou seja, em baixas velocidades as forças são maiores e pode acontecer APC, então, à velocidades de corte mais elevadas, o acabamento superficial torna-se insensível à velocidade. Já o avanço, o qual é muito mais influente no acabamento, quando crescente, aumenta as forças de usinagem e, portanto, as deflexões, deteriorando o acabamento superficial. Este efeito pode ser bem observado na Fig. (5), em que, devido ao procedimento experimental para cada avanço utilizou-se sete velocidades de corte, evidenciando os patamares de avanço constante. Observa-se, nitidamente, na Fig. (5) que a rugosidade aumenta com o avanço e é altamente dependente de V_c .

Em função da análise de correlação, escolheram-se os parâmetros velocidade corte V_c , avanço f , nível de potência vibratória na banda de 1/3 de oitava centrada em 800 Hz NWV800, fator de crista FC e Kurtosis K. A Tab. (6) mostra os erros normalizados (via Eq. (2)) para as combinações, de grau 1 e grau 2, das melhores combinações dos parâmetros analisados.

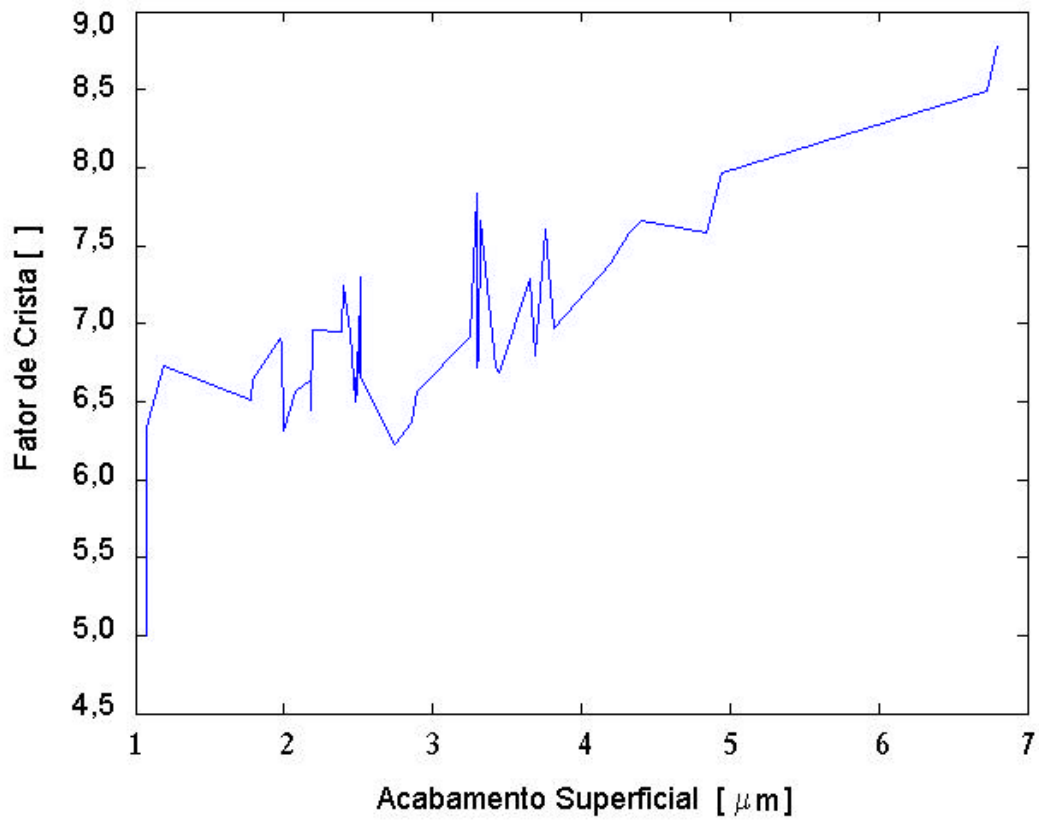


Figura 2. valores do fator de crista em função dos valores de rugosidade superficial (Ra).

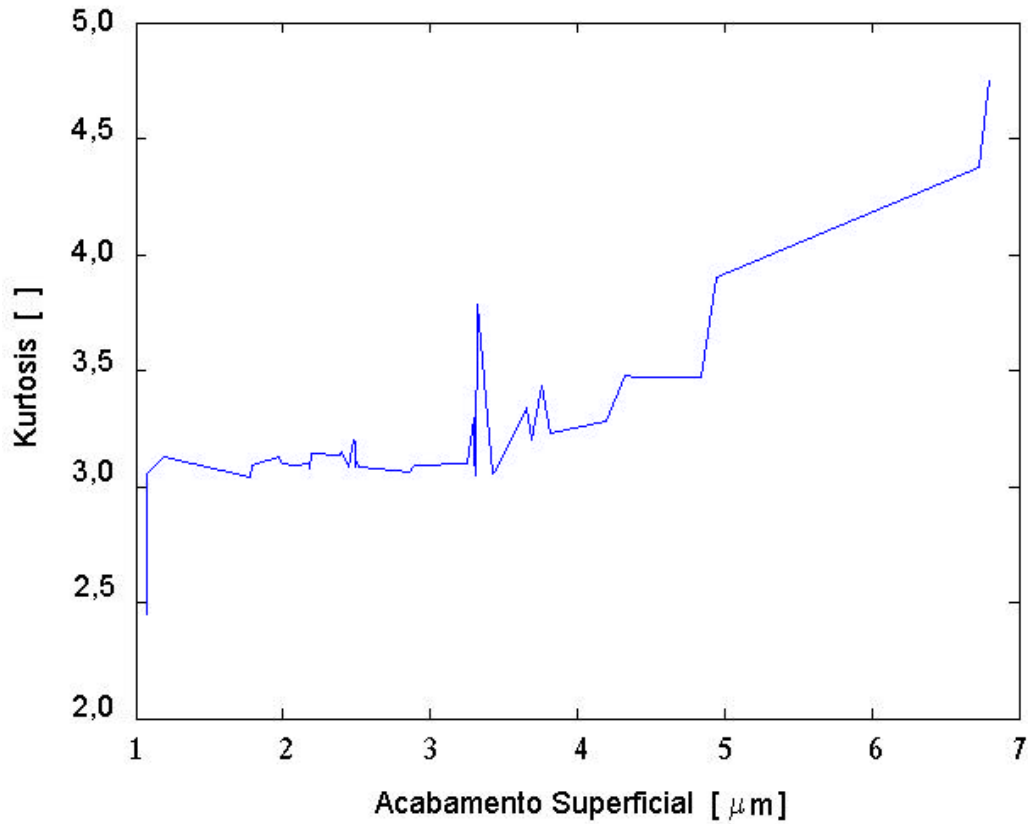


Figura 3. valores da kurtosis em função dos valores de rugosidade superficial (Ra).

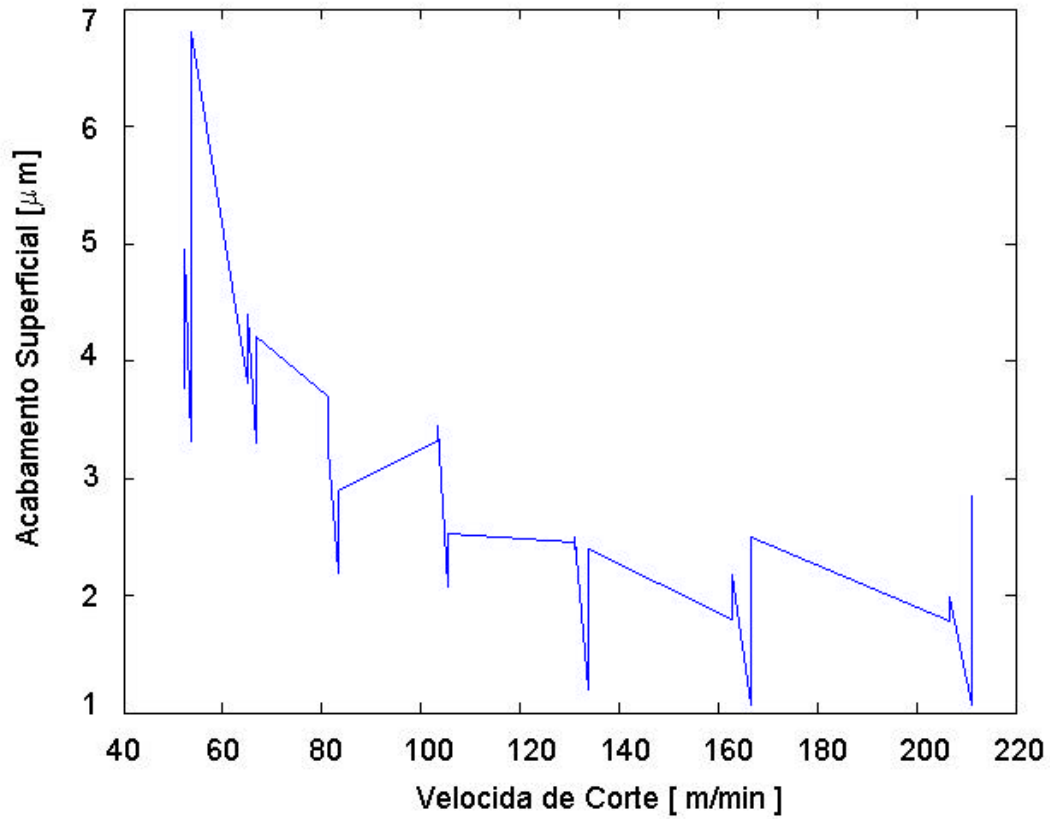


Figura 4. valores de rugosidade superficial (Ra) em função dos valores da velocidade (Vc).

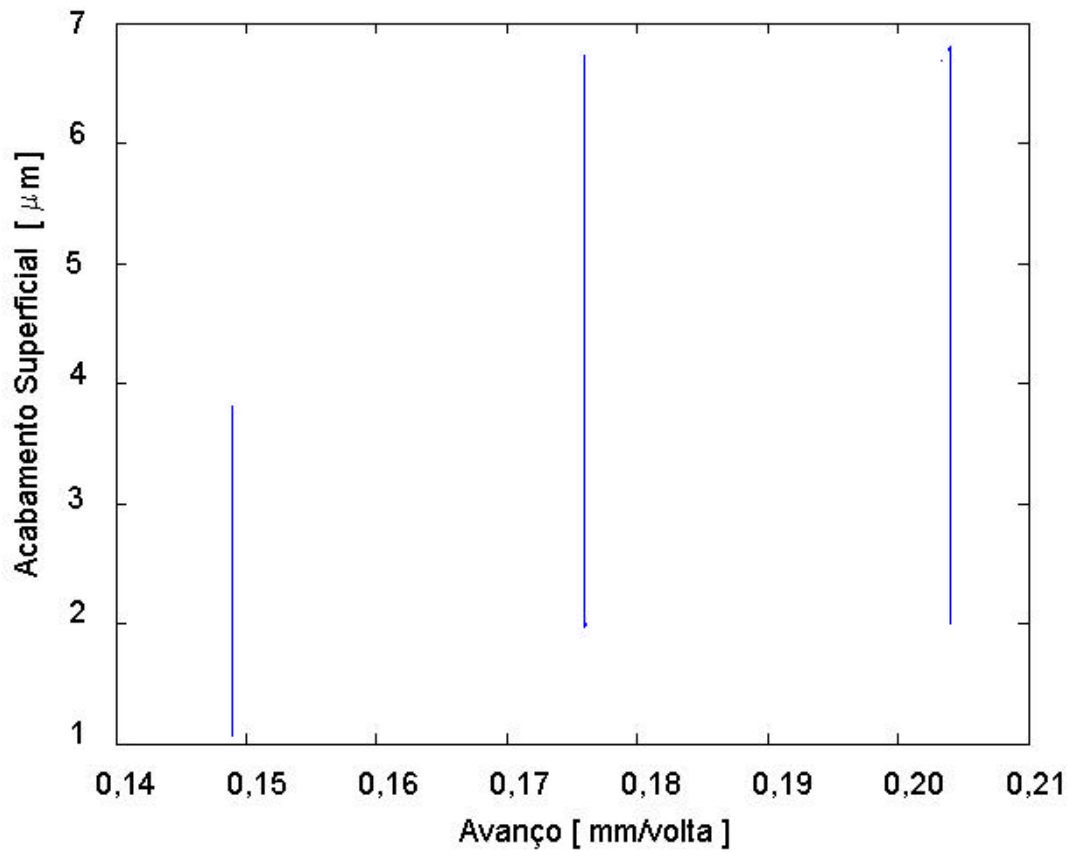


Figura 5. valores de rugosidade superficial (Ra) em função dos valores do avanço (f).

Tabela 6. Erros médios quadráticos ξ (%) para os polinômios de grau 1 e 2

Parâmetro	Taylor	
	Grau 1 (ξ)	Grau 2 (ξ)
NWV800, V_c , f	6.03	5.54
FC, V_c , f	2.50	2.39
K, V_c , f	5.71	5.93

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões que podem ser tiradas deste trabalho são:

- acabamento superficial no processo de torneamento pode ser monitorado com grande precisão via parâmetros de usinagem e medição das vibrações.
- Observou-se grande correlação entre os parâmetros velocidade de corte (71%) e, principalmente, o avanço (82%), sendo que o comportamento da rugosidade superficial com estes parâmetros está de acordo com a literatura.
- Os parâmetros de aceleração do porta ferramenta mais correlacionados com a rugosidade superficial foram o nível de potência vibratória na banda de 1/3 de oitava centrada em 800 Hz, o fator de crista e o momento central de quarta ordem, a kurtosis.
- Um ajuste linear relacionando a rugosidade superficial com os parâmetros velocidade de corte, avanço e fator de crista da aceleração, resultou num erro de 2,5% entre os valores de R_a preditos e medidos, o que mostra a excelência do monitoramento.

5. REFERÊNCIAS

- Braga, D. V., Diniz E. A. e Cupini, N. L., 1993, "Monitoramento Indireto da Vida da Ferramenta de Torneamento Usando Parâmetros Elétricos de Máquina Ferramenta", J. Of the Braz. Soc. Mechanical Sciences Vol. XV, pp 210-220.
- Braun, S. and Lenz, E., 1996, "Mechanical Signature Analysis", Academic Press Ed., pp. 321 – 342.
- Caldeirani, J. F., 1998, "Estudo do Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insetos Intercambiáveis", Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP.
- De Sousa, M. M, Duarte, M. A. V., Machado, A. R., 1997; "Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar o Processo de Usinagem por Fresamento", CIDIM - 97, Havana, Cuba, de 23 a 26 de setembro de 1997, Anais em CD, paper No. 4-182.
- Dos Santos, A L. B., Marcus A. V. Duarte e Carlos R. Ribeiro, 1998, "Modelamento da Usinagem por fresamento utilizando redes neurais", Máquinas e Metais, No. 394, outubro de 1998, p 125 - 133.
- Dos Santos, A. L. B., 2001, "Metodologia via Redes Neurais para a Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento Frontal", Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia, MG, 186 pp.
- Du, R., Elbestawi, M. A. and Wu, S. M., 1995, "Automated Monitoring of Manufacturing Process Part 1, Monitoring Methods", Journal of Engineering for Industry Vol 117, pp 121-131.
- Machado, A. R. e da Silva, M. B, 1998, "Usinagem dos Metais", Editora Universidade Federal de Uberlândia, 171 pp.

MODELING SURFACE FINISHING IN TURNING OPERATION THROUGH VIBRATION MONITORING

Meola, Tatiana

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Bloco 1M – Campus Santa Mônica Uberlândia – MG
CEP 38400-902
tatianameloa@bol.com.br

Duarte, M. A. V.

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Bloco 1M – Campus Santa Mônica Uberlândia – MG
CEP 38400-902
mvduarte@mecanica.ufu.br

Da Silva, M. B.

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Bloco 1M – Campus Santa Mônica Uberlândia – MG
CEP 38400-902
mbacci@mecanica.ufu.br

Abstract. *The effort to increase quality of product urging on the developments in monitoring of surface finishing during the cutting operation. This work presents a study on correlation between surface roughness vibration measured in the tool holder in turning operation. Tests using ABNT 1045 steel and cemented carbide with ISSO specifications SNMG 1204 08 P45 were carried out. It was used seven different values of cutting speed, and three different values of feed rate. The adjust of a linear statistical model for surface roughness, using as input parameters the cutting speed, feed rate and crest factor, resulted a global RMS error of 2,5 %.*

keywords: *monitoring, surface finishing, turning, vibration.*