

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL EM RELAÇÃO AOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE USINAGEM NO FRESAMENTO VIA REDES NEURAIAS

André Luis Beloni dos Santos
Marcos Morais de Sousa
Marcus Antonio Viana Duarte
Carlos Roberto Ribeiro

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Av. João Naves de Ávila 2160 – 38400-089, Campus Sta Mônica, Uberlândia, Minas Gerais

Resumo. *No processo de fresamento, onde o comportamento dinâmico do conjunto ferramenta-peça-máquina é particularmente mais complexo, devido a descontinuidade do corte, torna-se muito difícil estabelecer um modelo que relacione o acabamento superficial com a variação dos parâmetros de usinagem. Este trabalho tem por objetivo determinar uma relação experimental entre o acabamento superficial, através da determinação da rugosidade $Ra[\mu m]$, e alguns dos principais parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte, comprimento em balanço da fresa, desgaste de flanco máximo, nível de vibração e deslocamento da mesa de trabalho em relação a fresa. Para isto foram realizados 246 ensaios experimentais, que submetidos a um treinamento via redes neurais possibilitaram estabelecer uma tendência de comportamento.*

Palavras-chave: *Fresamento, Redes neurais, Modelamento, Acabamento superficial*

1. INTRODUÇÃO

A integridade superficial de peças acabadas decorrentes de processos convencionais de usinagem está intimamente relacionada, na grande maioria dos casos, às condições de funcionamento e à confiabilidade destes componentes mecânicos.

Em processos de corte contínuos, como por exemplo no torneamento e na furação, vários são os trabalhos que estabelecem um modelo de comportamento do acabamento superficial em relação aos principais parâmetros de usinagem.

Entretanto, em um corte descontínuo, como no caso do fresamento, onde as variáveis do processo são mais complexas, torna-se particularmente mais difícil estabelecer um modelo similar.

A variação da geometria física do sistema devido ao deslocamento da mesa de trabalho e do eixo porta fresa pode alterar significativamente as frequências naturais e o fator de amortecimento modal do sistema, alterando o acabamento superficial da superfície usinada.

No fresamento, o comportamento dinâmico do conjunto ferramenta-peça-máquina durante o corte, depende de muitos fatores que devem ser considerados, uma vez que a variação das forças de corte com o tempo podem resultar em níveis de vibração não aceitáveis. A própria condição da máquina ferramenta e a sua rigidez podem afetar a qualidade da superfície usinada. Uma pequena folga no mecanismo de avanço, ou mesmo uma fundação mal projetada, podem originar níveis de vibração que comprometam o resultado da operação, incluindo a vida da ferramenta.

O desgaste das ferramentas no decorrer da usinagem provoca um aumento da força necessária para cisalhar o material, fazendo aumentar a vibração no conjunto peça-ferramenta-máquina, o que afeta o acabamento superficial da peça. Como a vibração não depende somente do desgaste, mas também da geometria da ferramenta, das condições de usinagem, do material da peça e do método de fresamento, entre outros fatores, torna-se muito importante que se conheça a influência de cada um deles, afim de que seus efeitos possam ser minimizados e o acabamento superficial possa ser minimamente afetado.

O comportamento de alguns desses fatores em relação ao acabamento superficial são (Metals Handbook, 1989, Sandvik, 1994, Trent, 1984):

- O comprimento em balanço da fresa deve ser mantido o menor possível, de modo a aumentar a rigidez do sistema;
- A peça deve ser adequadamente fixada em toda a sua dimensão, evitando o corte em áreas que não sejam apoiadas em relação às forças de corte desenvolvidas;
- O aumento do raio de ponta da ferramenta melhora o acabamento superficial;
- Maiores avanços por dente como no caso de fresas de passo largo resultam em um acabamento superficial mais grosseiro e em um maior esforço em cada dente.
- Um número excessivo de dentes em contato simultaneamente na peça pode causar uma pressão excessiva no corte, aumentando os esforços de corte;
- Quando possível, o uso de uma geometria positiva deve ser preferencial, o que faz reduzir as forças de corte;
- O fresamento discordante favorece o desgaste das ferramentas devido ao escorregamento relativo peça-fresa quando da entrada da ferramenta no corte, fazendo aumentar as forças no sistema. Também faz aumentar a necessidade de fixação, uma vez que as forças de corte geradas tendem a levantar a peça da mesa;
- A vibração do sistema tende a aumentar com o aumento da profundidade de corte;
- Com o aumento da dureza e do limite de resistência do material de trabalho, os níveis de vibração tendem a aumentar.
- Uma fresa cujos dentes se encontram muito distantes uns dos outros, ou seja, uma fresa de passo largo, pode resultar em uma usinagem com vibração excessiva, resultando em um pobre acabamento superficial da peça, inacuracidade dimensional e excessivo desgaste do dente.
- Ângulos de posição da ordem de 45 e 60 graus proporcionam à ferramenta um melhor balanceamento das forças axial e radial durante o corte, sendo adequados para operações sensíveis a ocorrência de vibrações, como aquelas com grande comprimento em balanço da fresa.

Sendo assim, face às dificuldades de obtenção na literatura de um modelo que relacionasse o acabamento superficial de peças fresadas com variáveis do processo, este trabalho utiliza uma metodologia via redes neurais para o estabelecimento de uma relação entre alguns dos principais parâmetros de corte e sua influência no acabamento superficial da peça usinada. Os parâmetros estudados foram: velocidade de corte “vc”, avanço por dente “fz”, profundidade de corte “ap”, comprimento da fresa em balanço “z”, desgaste da ferramenta de corte “VBmax”, deslocamento “x” da mesa em relação a fresa e vibração “Vib”, medida no mancal inferior do eixo principal da máquina ferramenta.

Foi também realizada uma análise de sensibilidade de maneira a fazer uma estimativa da influência de cada parâmetro estudado no acabamento superficial.

2. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

O avanço tecnológico das máquinas ferramentas e ferramentais de corte exige o monitoramento dos parâmetros e o modelamento dos processos de manufatura, como por exemplo, das condições de rugosidade de uma superfície usinada, ou o desgaste das ferramentas de corte.

Os esforços iniciais se baseavam no estudo de modelos analíticos que dependiam de uma grande quantidade de dados experimentais. O grande número de variáveis envolvidas e a complexidade dos processos de usinagem, geravam dificuldades que comprometiam a confiabilidade de tais modelos. Com o advento dos discriminadores inteligentes (Rangwala et al., 1987, Dornfeld, 1990, Monostori, 1993), um grande número de pesquisadores vem obtendo excelentes resultados com a utilização de técnicas de inteligência artificial para o monitoramento e modelamento de sistemas altamente não lineares, como é o caso dos processos de corte, de difícil solução em computadores digitais. Neste contexto, o emprego das redes neurais artificiais vem se destacando em diversas áreas de atuação, demonstrando eficiência na estimação de parâmetros e otimização de modelos.

Uma das características, talvez a maior vantagem do uso de redes neurais, é que elas não requerem, a priori, um entendimento do comportamento físico do processo. Elas utilizam um procedimento sistemático para relacionar dados de entrada e de saída, substituindo modelos exigentes em termos computacionais.

Existem duas diferenças básicas entre o procedimento neurocomputacional, empregado pelas redes neurais e o utilizado por algoritmos convencionais seqüenciais. A primeira é que as redes neurais empregam um processamento paralelo, podendo portanto realizar operações e solucionar problemas de uma maneira muito mais rápida. A segunda e mais importante é que as redes neurais tem a capacidade de aprender, podendo ser treinadas para reconhecer dados de entrada e gerar respostas apropriadas como saída.

Uma rede neural típica pode ser classificada como um sistema dinâmico que consiste de muitas unidades de processamento (ditos neurônios), interligados logicamente e que formam as camadas. Há uma camada de entrada e uma camada de saída, cada uma contendo pelo menos um neurônio.

Neurônios na camada de entrada são, de certa forma, hipotéticos, pois não realizam qualquer processamento. É a camada através do qual os dados são apresentados ou introduzidos à rede. A camada de saída fornece as respostas aos dados que são apresentados à rede, ou seja, os resultados desejados. Usualmente existem uma ou mais camadas “ocultas” comprimidas entre a camada de saída e a de entrada.

3. MODELO ESTRUTURAL DA REDE NEURAL UTILIZADA

A Figura 1 representa a estrutura da rede neural proposta para o modelamento do acabamento superficial, em função dos parâmetros de usinagem estudados.

Foi utilizada uma rede neural do tipo perceptron multicamadas com controle de erro por back-propagation, composta por uma camada de entrada, uma camada de saída com um neurônio e uma camada intermediária, composta por cinco neurônios. Sete foram os parâmetros de entrada estudados: velocidade de corte “vc”, avanço por dente “fz”, profundidade de corte “ap”, comprimento da fresa em balanço “z”, desgaste da ferramenta de corte “VBmax”, deslocamento “x” da mesa em relação a fresa e vibração “Vib”, os quais

foram usados para estimar a rugosidade “Ra” da superfície usinada (parâmetro de saída desejado).

Com relação às funções de transferência, foram utilizadas cinco funções do tipo “tansig” na camada oculta e uma função também “tansig” na camada de saída (Demuth et al., 1993).

O conjunto de dados para treinamento da rede neural consistiu de um arquivo composto por 199 ensaios experimentais normalizados, sendo que para validação da rede foram utilizados outros 57 conjuntos de dados experimentais.

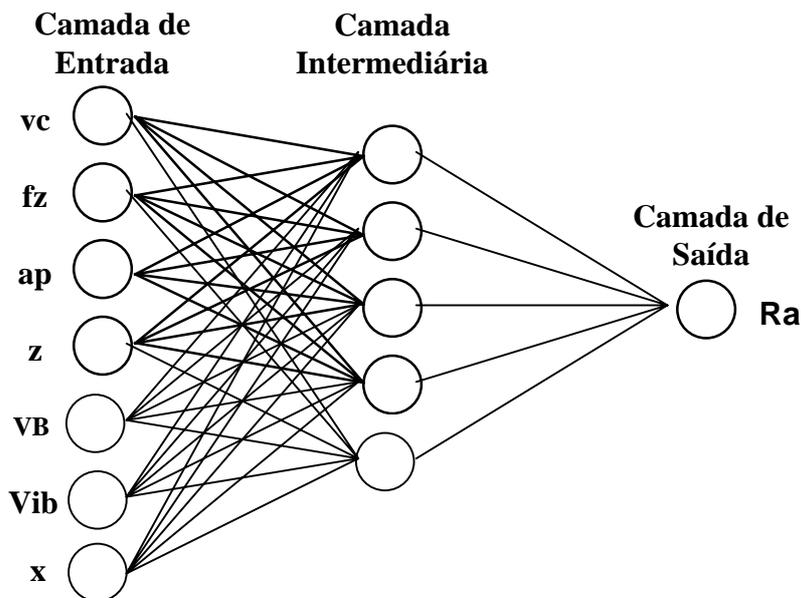


Figura 1 – Estrutura da rede neural utilizada para o modelamento do acabamento superficial.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos ensaios experimentais, definiu-se inicialmente os intervalos de variação máxima e mínima entre os quais os valores dos parâmetros de entrada deveriam variar. As condições de corte adotadas foram:

- velocidade de corte “vc”: entre 150 e 300 [m/min]
- avanço por dente “fz”: entre 0.05 e 0.25 [mm/rot]
- profundidade de corte “ap”: entre 1 e 2.5 [mm]
- deslocamento “x” da mesa em relação a fresa : entre 5 e 545 [mm]
- comprimento da fresa em balanço “z”: entre 10 e 52 [mm]

Estes valores foram definidos em função da potência da máquina fresadora, do material de trabalho utilizado e orientações do fabricante da ferramenta de corte.

O critério de fim de vida adotado foi o desgaste de flanco máximo igual a 0.7 mm.

Como material de trabalho foram utilizadas barras de aço ABNT 1045 de sessão quadrada e bitola de 101.6 mm, cortadas em tarugos de 550 mm. A dureza média apresentada foi de 192 HB.

Os ensaios foram realizados com pastilhas de metal duro, triplamente revestidas (TiN, TiC, TiN), marca Sandvik, de geometria R245-12 T3 M-PM, classe P25. Como porta ferramentas foi utilizada uma fresa frontal de 125 mm de diâmetro e capacidade para oito insertos.

Foram geradas 82 condições diferentes para realização dos ensaios experimentais, variando-se os parâmetros de corte de maneira aleatória, dentro dos limites pré-estabelecidos. A cada valor diferente de “vc”, “fz”, “ap” e “z” ensaiado, foram medidos os níveis de vibração RMS e rugosidade Ra (μm), em 3 posições “x” diferentes, dando origem a um arquivo de dados com 246 ensaios. O valor de desgaste de flanco medido correspondia ao maior valor encontrado dentre todas as pastilhas analisadas após cada passe.

As medições de rugosidade foram realizadas em um rugosímetro portátil, marca Mitutoyo, enquanto que as medições de desgaste foram feitas em um microscópio ferramenteiro.

Todos os ensaios experimentais foram realizados em uma máquina fresadora CNC, marca Romi, modelo Interact IV, com capacidade de rotação máxima do eixo árvore de 4000 rpm e potência máxima de 15 CV, disponível no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da UFU.

Para a medição dos níveis de vibração RMS, tornou-se necessário, inicialmente, determinar os locais mais apropriados para colocação dos sensores (acelerômetros piezoelétricos), na máquina fresadora.

A determinação destes locais foi obtida com base no estudo das Funções Resposta em Frequência (FRFs), estimadas para os 29 pontos mostrados na Figura 2 (Sousa, Duarte e Machado, 1998). Deste estudo, observou-se que as respostas em frequência das superfícies não estruturais, ou seja, que não estão rigidamente fixadas a estrutura da fresadora, são poucos sensíveis às variações geométricas do sistema, caracterizando assim, os pontos adequados para a instrumentação mínima para o monitoramento da vibração. Já as FRFs dos pontos localizados nas superfícies estruturais mostraram-se sensíveis com relação à geometria da máquina. O local 01 (mancal inferior do eixo principal), foi utilizado para monitorar a vibração por apresentar boa sensibilidade na detecção dos níveis RMS de aceleração, e ainda por ser um local utilizado em monitoramento nas técnicas de manutenção preditiva (Stewart, 1977 e Braun e Lenz, 1986). A Figura 3 mostra a instrumentação utilizada na montagem experimental para obtenção dos níveis RMS de vibração.

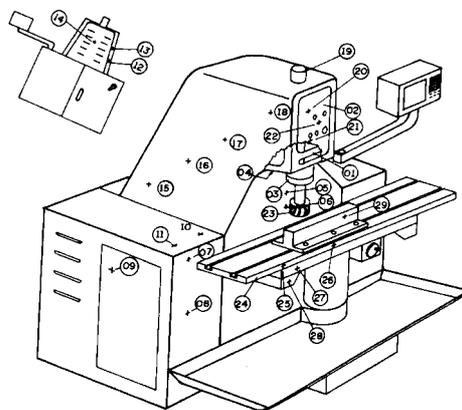


Figura 2 - Pontos utilizados para obtenção das FRFs.

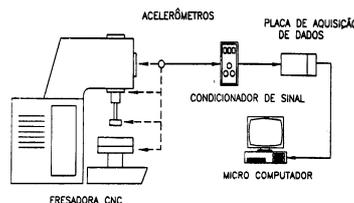


Figura 3 - Diagrama da instrumentação utilizado no monitoramento das vibrações.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O erro “ ε ”, dado pela Equação 1, dos valores estimados de rugosidade obtido pela rede neural, foi de aproximadamente 8 %.

$$\varepsilon = \frac{(Ra - \overline{Ra})(Ra - \overline{Ra})^t}{(Ra \cdot Ra^t)} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde, Ra é o vetor linha dos valores de rugosidade obtidos experimentalmente e \overline{Ra} é o vetor linha dos valores de rugosidade obtidos pela rede neural.

A partir dos valores de rugosidade estimados pela rede neural, foram traçadas curvas onde se pode verificar a tendência de comportamento da rugosidade “ Ra ” com relação à variação de cada parâmetro de entrada estudado, mantidos os demais constantes.

A Figura 4, mostra a tendência de comportamento da rugosidade da superfície usinada com a variação da velocidade de corte. Verifica-se que com o aumento da velocidade de corte, há uma tendência de melhora da qualidade do acabamento superficial da peça, enquanto que para baixas velocidade de corte, um aumento da rugosidade e conseqüente empobrecimento do acabamento superficial é observado.

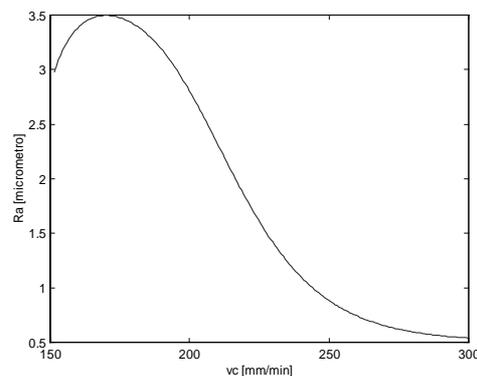


Figura 4 – Curva de rugosidade “ Ra ” em função da velocidade de corte “ vc ”.

A Figura 5 mostra a tendência de comportamento da rugosidade da superfície usinada com a variação do avanço por dente. O resultado encontrado pode ser justificado pelo fato de menores avanços por dente significarem um maior número de passadas das ferramentas de corte por sobre a superfície já usinada, devido a própria característica do fresamento frontal, fazendo empobrecer o acabamento superficial.

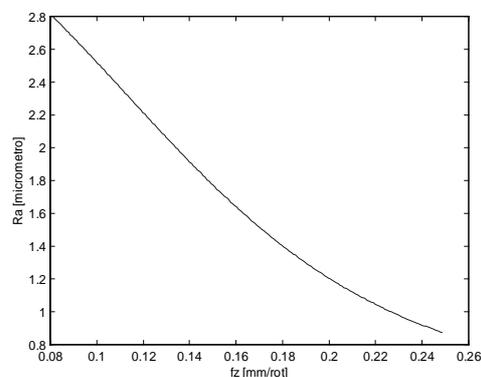


Figura 5 – Curva de rugosidade “ Ra ” em função do avanço por dente “ fz ”.

A Figura 6 mostra a tendência de comportamento da rugosidade da superfície usinada com o aumento da profundidade de corte. Observando-se as curvas mostradas nas Figuras 7 e 10, referentes ao deslocamento “x” da mesa em relação a fresa, e ao comprimento “z” em balanço da fresa, respectivamente, pode-se concluir que a rugosidade é bastante influenciada pela rigidez e variação da geometria da máquina. Sendo assim, profundidades de corte maiores poderiam fazer supor a máquina estar trabalhando numa condição de corte mais estável, melhorando o acabamento superficial.

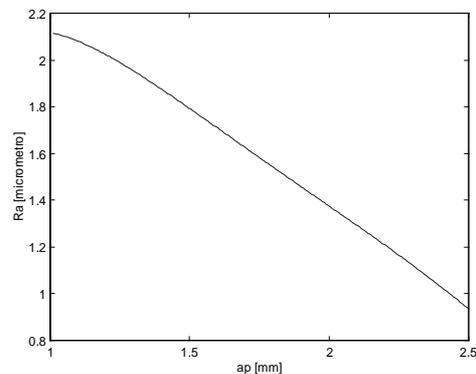


Figura 6 – Curva de rugosidade “Ra” em função da profundidade de corte “ap”.

A Figura 7 mostra a tendência de comportamento da rugosidade da superfície usinada com a variação do comprimento em balanço da fresa. Os resultados apresentados mostram que quanto maior o comprimento em balanço da fresa, maior são os valores de rugosidade encontrados. Estes resultados confirmam as observações feitas quando da realização dos ensaios, que mostraram um sensível aumento dos níveis de vibração com o aumento de “z”, o que vem confirmar a teoria de que quanto maior o nível de vibração gerado durante o corte, pior o acabamento superficial da peça.

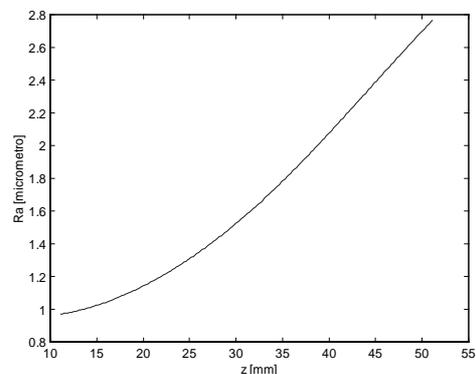


Figura 7 – Curva de rugosidade “Ra” em função do comprimento em balanço da fresa “z”.

A Figura 8 mostra a tendência de comportamento da rugosidade da superfície usinada com o aumento do desgaste de flanco máximo da ferramenta de corte. Os resultados mostrados indicam uma melhora do acabamento superficial com o aumento dos valores de desgaste. Isto pode ser explicado pela característica do corte proporcionado pela geometria da ferramenta utilizada, dotada de “wiper edge”. O desgaste da ferramenta se processa na aresta principal de corte, enquanto que a aresta secundária promove uma operação de acabamento na superfície fresada. Como os valores de desgaste não foram excessivos, até um valor máximo de 0.3 mm, outros fatores, como um aumento efetivo de vibração, que poderiam reverter a tendência de redução da rugosidade com o aumento do desgaste, não foram determinantes.

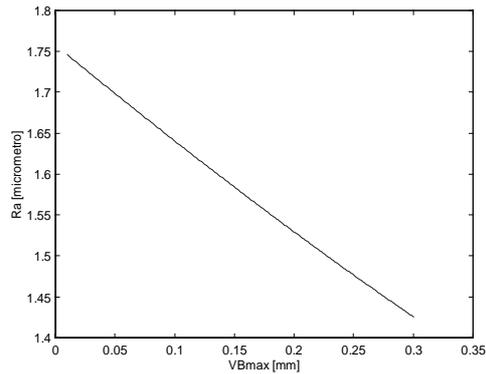


Figura 8 – Curva de rugosidade “Ra” em função do desgaste de flanco “VBmax”.

A Figura 9 mostra a tendência de comportamento da rugosidade da superfície usinada com o aumento do nível de vibração RMS. Os resultados encontrados estão de acordo com a literatura, que mostra que o acabamento superficial da superfície usinada empobrece com o aumento dos níveis de vibração.

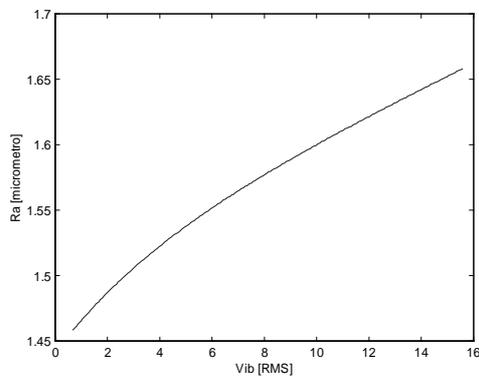


Figura 9 – Curva de rugosidade “Ra” em função do nível de vibração RMS.

A Figura 10 mostra a tendência de comportamento da rugosidade da superfície usinada com o deslocamento “x” da mesa em relação à fresa. Pode-se verificar que há uma tendência de empobrecimento do acabamento superficial nas extremidades da peça. Isto pode ser explicado pelo fato de que na entrada e saída do corte, a ferramenta não se encontrar totalmente apoiada sobre a superfície da peça, gerando níveis de vibração maiores. Sob um outro aspecto, Sousa e outros, 1998, concluíram que a variação da geometria do conjunto máquina/peça/ferramenta exerce também grande influência no acabamento superficial, devido a variação do comportamento dinâmico da fresadora com o deslocamento da mesa.

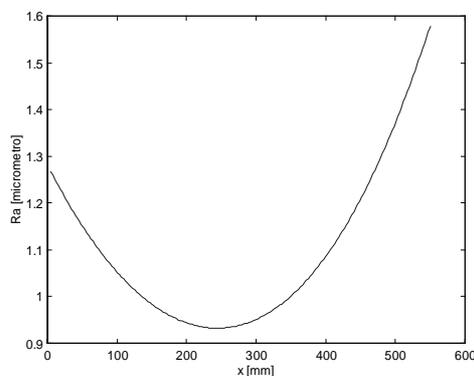


Figura 10 – Curva de rugosidade “Ra” em função da posição “x” da mesa em relação à fresa.

6. CONCLUSÕES

- A utilização de redes neurais para a estimativa do acabamento superficial mostrou-se eficiente para a determinação da tendência do comportamento da rugosidade em relação aos parâmetros de corte estudados.
- A variação da geometria da máquina durante o corte exerce grande influência no acabamento superficial da peça.
- Os resultados obtidos mostraram que o acabamento superficial é dependente de um grande número de variáveis correlacionadas.
- Os resultados apresentados nos gráficos relativos ao avanço por dente e profundidade de corte, em função da rugosidade, sugerem um maior estudo para verificar a possível correlação destes com os outros diferentes parâmetros estudados, o que poderia ajudar a justificar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- AB Sandvik Coromant, 1994, Modern metal cutting: a practical handbook.
- Braun, S. and Lenz, E., 1996, Mechanical signature analysis, Academic Press Ed., pp 321-342.
- Demuth, H. and Beale, M., Neural network toolbox for use with matlab, The Math Works Inc., Natick, Mass. 1993.
- Dornfeld, D.A., Neural network sensor fusion for tool condition monitoring, Annals CIRP, 1990, 39/1, 101.
- Metals Handbook, 1989, Machining, Ed. 9, ASME International.
- Monostori, L., A step towards intelligent manufacturing: modelling and monitoring of manufacturing process through artificial neural networks, Ann. CIRP, 1993, 42/1, 485.
- Rangwala, S. and Dornfeld, D.A., Integration of sensor via neural networks for detection of tool wear states, ASME PED, 1987, 25, 109.
- Sousa, M. M., Duarte M. A. V. e Machado, A. R., 1997, Monitoramento do acabamento superficial no fresamento via vibrações, XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP.
- 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.
- Stewart, R. M., 1977, Some useful data analysis techniques for gearbox diagnostics, Proc. of Meeting on Applications of Times series Analysis, ISVR, pp. 19.
- Trent, E.M., 1984, Metal cutting, Ed. 2, Edition butterwords.

A STUDY TO RELATE THE SURFACE FINISH TO THE MAIN CUTTING PARAMETERS IN MILLING USING NEURAL NETWORK

Abstract. In interrupted cutting process, as milling, it is difficult to establish a relationship between surface finish and the main cutting parameters. This study aims to relate the surface finish (R_a [μm]) with the following parameters: cutting speed, feed per tooth, depth of cut, overhanging length of the cutter, maximum flank wear, vibration level and 'x' position of the milling table in relation to the cutter. Surface finish was recorded for each experiment and the associated data used to train an artificial neural network. The trained network was used to predict surface finish, and the values used to verify its behaviour against the studied parameters.

Keywords: Milling, Neural network, Modelling, Surface finish