



## **ESTUDO DA SENSIBILIDADE DO RAIOS DE CURVATURA NATURAL DO CAVACO VIA AJUSTE POLINOMIAL E REDES NEURAS**

**Sebastião Simões Cunha Jr** *e-mail: simoes@mecanica.ufu.br*  
Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC, CEP 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil.

**André Luis Beloni dos Santos** *e-mail: albeloni@mecanica.ufu.br*  
União Educacional de Minas Gerais, UNIMINAS, CEP 38400-156, Uberlândia, MG, Brasil.

**Wisley Falco Sales** *e-mail: wisley@pucminas.br*  
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, CEP 30535-610, Belo Horizonte, MG, Brasil.

**Marcus Antonio Viana Duarte** *e-mail: mvduarte@mecanica.ufu.br*  
Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC, CEP 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil.

**Resumo.** *Este trabalho se utiliza de um procedimento experimental para estabelecer uma relação entre o raio de curvatura natural do cavaco com os parâmetros de usinagem: velocidade e profundidade de corte, avanço e ângulo de saída da ferramenta, no corte ortogonal do aço SAE 5140. Inicialmente ajustou-se uma função polinomial desta relação e, por meio de um ajuste de sensibilidade, os parâmetros mais influentes na curvatura natural do cavaco foram determinados. Para efeito de comparação de resultados, realizou-se também um ajuste de sensibilidade a partir de um modelamento via redes neurais. Os resultados indicaram que o procedimento de redes neurais pôde estimar o raio de curvatura natural do cavaco de maneira mais precisa para as diversas faixas e combinações de parâmetros de entrada utilizados, mostrando ser uma ferramenta importante para a determinação de uma tendência de comportamento do raio de curvatura do cavaco em função da variação dos parâmetros de corte analisados. De uma forma geral, verificou-se que o raio de curvatura do cavaco aumenta com o aumento da profundidade e velocidade de corte, com o ângulo de saída, e diminui com o aumento do avanço.*

**Palavras-chaves:** *redes neurais, parâmetros da usinagem, análise de sensibilidade, curvatura natural do cavaco*

### **1. INTRODUÇÃO**

Com o aperfeiçoamento das máquinas operatrizes e dos materiais das ferramentas de corte, aumentou-se a produtividade dos processos de fabricação por arrancamento de cavaco. Na usinagem de materiais relativamente dúcteis, como os aços, o cavaco, geralmente, contínuo e na forma de fita se coloca como um problema de primeira ordem, sendo que o aumento da velocidade de corte agrava ainda mais o problema, segundo Jawahir e Lutervelt (1993). Com isto, aumentou a preocupação dos engenheiros de produção com o controle do cavaco. Estudos e esforços têm sido concentrados no sentido de se obter uma forma controlada do mesmo, isto é, que não causem ferimentos ao operador, perdas na qualidade superficial da peça, avarias na ferramenta, na peça ou na máquina operatriz, e que não sejam problemáticos para a sua remoção e descarte. Tudo isto para não promover custos adicionais e aumento no valor final das peças produzidas.

Desde a década de 50, com a exigência imperativa de se controlar mais efetivamente o cavaco, principalmente devido ao aumento das condições de corte e impulsionadas pelo avanço tecnológico do conjunto peça-máquina-ferramenta de corte, pesquisadores iniciaram estudos analíticos e experimentais sobre os fatores que influenciam no tipo, na forma e na capacidade de quebrar o cavaco. Importantes trabalhos como os de Fang e Jawahir (1990) (1993), Jawahir (1988a) (1988b), Nedess e Hintze (1989), Kane (1987) e Cook et al. (1963) chegaram à conclusão de que os principais parâmetros a serem considerados para estudo da formação do cavaco são:

- Máquina operatriz - características operacionais;
- Propriedades do material da peça;
- Propriedades do material da ferramenta;
- Condições de corte;
- Geometria da ferramenta;
- Projeto do quebra-cavacos;
- Fluido de corte.

Na usinagem natural, isto é, sem quebra-cavacos, a capacidade de quebra dos cavacos depende principalmente de três fatores, Machado e Silva (1993): fragilidade do material da peça, curvatura natural do cavaco e da espessura do cavaco  $h$ . Entretanto, se a curvatura natural do cavaco  $r_c$ , não for suficientemente pequena para causar a fratura para uma dada espessura de corte, torna-se necessário a adoção de medidas de maneira a se conseguir a fratura periódica do cavaco.

A utilização de quebra-cavacos é a maneira mais eficiente de se diminuir o raio de curvatura do cavaco, de modo que ao se chocar contra a peça, ferramenta ou porta-ferramentas, o cavaco se fragmente segundo Shaw (1984). Nakayama (1962) fez estudos mostrando como a geometria do quebra-cavaco influencia na espessura do cavaco e na sua deformação, promovendo a sua quebra. Machado (1990), usinando ligas de níquel e de titânio, utilizou um dispositivo hidráulico que alimentava o fluido de corte sob alta pressão, contra o cavaco, aumentando a sua curvatura de forma a diminuir  $r_c$ , com objetivo de melhorar e controlar a quebra do cavaco.

Neste trabalho foram utilizados e analisados dois procedimentos: a) ajuste polinomial e b) redes neurais artificiais. Pretende-se desta forma, estabelecer um modelo que melhor relacione o raio de curvatura natural do cavaco e os parâmetros velocidade e profundidade de corte, avanço e ângulo de saída da ferramenta, com o objetivo de verificar como cada parâmetro tanto individual quanto em conjunto influencia esta curvatura. O estabelecimento desta relação vem de encontro às exigências cada vez maiores do controle do cavaco gerado e da possibilidade de planejamento de condições de corte favoráveis ao controle do mesmo. Para facilitar a medição do raio de curvatura, trabalhou-se no corte ortogonal, torneamento, utilizando-se ferramentas de corte de metal duro. Todo o procedimento de usinagem foi filmado e a curvatura natural  $r_c$  para cada condição de corte foi determinada mediante a um analisador de imagens computadorizado (Sales, 1995).

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como material de trabalho foram usinadas barras de seção circular de 76 mm de diâmetro do aço SAE 5140, com dureza média de 330 HV. Os ensaios foram realizados com ferramentas triangulares lisas de metal duro (sem quebra-cavacos), triplo revestidas (TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN), da classe GC 435, da Sandvik, que cobre as classes P35 e K20. A geometria resultante da montagem da ferramenta no suporte foi:  $\gamma_0 = 6^\circ$ ,  $\lambda_s = 0^\circ$  e  $\alpha_0 = 5^\circ$ .

Todos os testes foram realizados em um torno mecânico ROMI MAXI II 520 - 6 HP, com variação discreta de velocidade até 1400 rpm. As condições de corte adotadas foram:

- Velocidade de corte ( $V_c$ ): entre 60 e 334 m/min;
- Avanço ( $f$ ): entre 0,070 e 0,313 mm/rev;
- Profundidade de corte ( $a_p$ ): 1,0 1,2 1,5 2,0 2,5 3,0 3,2 e 3,5 mm;
- Ângulo de saída ( $\gamma_0$ ): 3, 6, 9, 12, 15 e 18°, variado utilizando-se de calços, retificando a superfície de folga, para manter  $\alpha_0$  constante.

A operação de torneamento foi filmada, utilizando-se de uma filmadora Hitachi KP 110 - CCD, e gravada em fita. No suporte porta-ferramentas foi colocado uma escala de 20 mm e um quadrado de 7 mm de lado, com o objetivo de se fazer a calibração do sistema de medição. A imagem gravada, com as condições de corte devidamente anotadas, foi transmitida a um ao programa “*Image Pro Plus*”, utilizado para análise de imagens. Por meio da função “slow motion”, do vídeo, avançou-se a imagem do cavaco formado até o quadro imediatamente antes do contato com a peça. Nesta posição a imagem foi congelada, e enviada ao software. O programa possui recursos para medir, na imagem, parâmetros geométricos, no caso o raio de curvatura conforme Fig. (1).

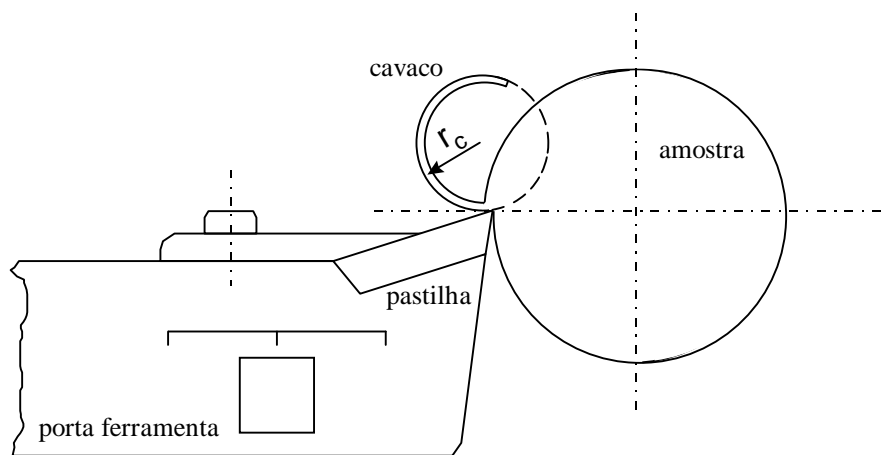


Figura 1. Suporte porta-ferramentas com as referências para a calibração e medição do raio de curvatura  $r_c$  no programa analisador de imagens.

Foram executadas 310 operações de usinagem e medição do raio de curvatura natural do cavaco para o aço SAE 5140, com a variação dos parâmetros realizados de forma aleatória e assumindo-se que os pontos se enquadrem numa distribuição Gaussiana. Os dados obtidos foram então agrupados em uma forma matricial onde as colunas eram compostas por:  $f$   $a_p$   $\gamma_0$   $V_c$  e  $r_c$ .

### 3. AJUSTE POLINOMIAL

Para o modelamento da relação do raio de curvatura do cavaco via ajuste polinomial, foi feita uma interpolação dos dados obtidos experimentalmente. O erro do ajuste pode ser calculado de acordo com a Eq. (1).

$$\varepsilon = 100 \frac{(r_c - \bar{r}_c)(r_c - \bar{r}_c)^T}{(r_c \ r_c)^T} \quad (1)$$

onde  $r_c$ : raios de curvatura experimentais,  $\bar{r}_c$ : raios de curvatura dados pelo polinômio de ajuste,

T: operação de transposição da matriz.

O polinômio que melhor se ajustou aos pontos aleatoriamente distribuídos, foi um polinômio de grau 3, o qual apresentou um menor erro (12,39%).

Utilizando-se do polinômio de grau 3 ajustado, verificou-se o comportamento do grau de curvatura do cavaco com relação à variação de um parâmetro, mantendo-se os demais constantes. Fez-se então uma análise de sensibilidade, para a verificação dos parâmetros mais influentes no raio de curvatura natural do cavaco. A sensibilidade adimensional,  $S_j$ , de  $r_c$  em relação ao  $i$ -ésimo parâmetro  $P_i$ , foi obtida através da Eq. (2), de acordo com Duarte (1994).

$$S_i = \left| \frac{P_i}{r_c} \cdot \frac{\partial r_c}{\partial P_i} \right| \quad \text{onde, } i = f, a_p, \gamma_0, V_c \quad (2)$$

#### 4. AJUSTE VIA REDES NEURAIS

A estrutura e as características da rede neural proposta neste trabalho para o modelamento do raio de curvatura natural do cavaco são mostradas na Fig. (2). Foi utilizada uma rede composta por três camadas: a) camada de entrada composta pelos quatro parâmetros:  $f$ ,  $a_p$ ,  $V_c$  e  $\gamma_0$  b) camada intermediária e c) camada de saída usada para estimar o raio de curvatura do cavaco  $r_c$ .

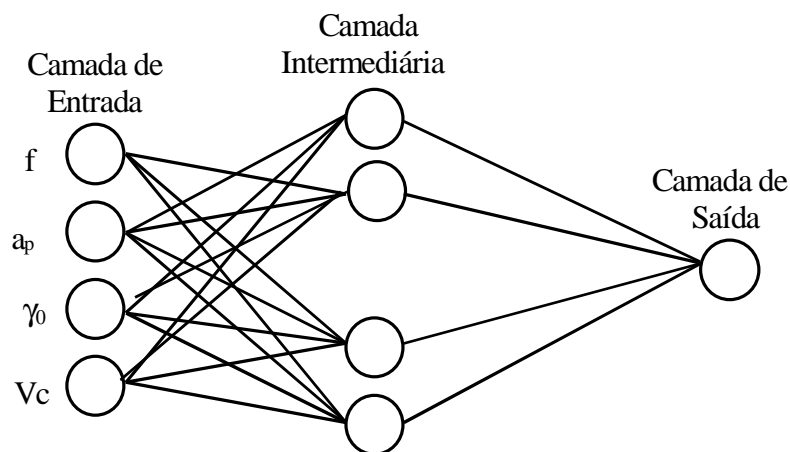


Figura 2. Estrutura da rede neural utilizada para o modelamento do raio de curvatura do cavaco.

Com relação às funções de transferência para o modelamento da rede neural, foram utilizadas quatro funções do tipo tangente hiperbólica na camada oculta e uma função de ativação linear na camada de saída de acordo com Masters (1993).

O conjunto de dados para treinamento da rede, consistiu de um arquivo de dados experimentais composto por 200 valores normalizados dos parâmetros de entrada  $f$ ,  $a_p$ ,  $\gamma_0$  e  $V_c$ , e seus correspondentes valores de saída também normalizados  $r_c$ . Os dados restantes foram empregados na certificação do modelo.

Para o procedimento de análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos, inicialmente foi gerada uma tabela de dados básica de 1000 linhas por 5 colunas. Cada linha representando um ensaio aleatório. As quatro primeiras colunas são as variáveis independentes ( $f$ ,  $a_p$ ,  $\gamma_0$  e  $V_c$ ), e a última coluna a variável dependente  $r_c$ , obtida aplicando-se a rede neural às variáveis independentes. A partir desta tabela básica foram geradas quatro outras semelhantes. A primeira diferindo da básica por uma perturbação de 5% na coluna relativa à variável  $f$ , a segunda em 5% em relação à coluna da variável  $a_p$ , e assim sucessivamente em relação às variáveis  $\gamma_0$  e  $V_c$ . Os dados resultantes foram então submetidos à rede neural, obtendo-se as variações no raio de curvatura do cavaco provocadas pelas perturbações nas variáveis independentes. Desta forma, analisou-se a tendência do comportamento da curvatura do cavaco em relação aos parâmetros  $f$ ,  $a_p$ ,  $\gamma_0$  e  $V_c$ , ou seja, a sensibilidade do raio de curvatura em relação às variáveis perturbadas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. (3) mostra o ajuste proporcionado pela rede neural em relação aos valores de  $r_c$ , para os dados obtidos a partir dos ensaios experimentais do aço SAE 5140. O erro  $\varepsilon$ , dado pela Eq. (3), dos valores estimados dos raios de curvatura obtidos pela rede neural, foi de aproximadamente 2%.

$$\varepsilon = 100 \frac{(r_c - \overline{r_{cl}})(r_c - \overline{r_{cl}})^T}{(r_c \cdot r_c)^T} \quad (3)$$

onde  $r_c$ : raios de curvatura experimentais,  $\overline{r_{cl}}$ : valores estimados pela rede neural.

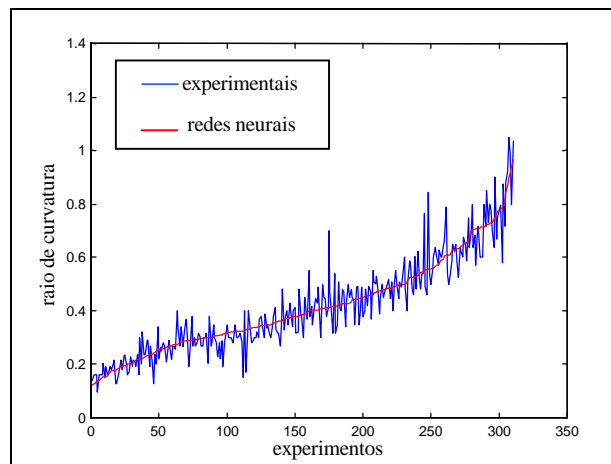


Figura 3. Raio de curvatura do cavaco dado pela rede neural para o aço SAE 5140.

A Fig. (4) mostra a sensibilidade do raio de curvatura do cavaco em relação à profundidade de corte, via ajuste polinomial. Verifica-se que o aumento de  $a_p$  promove o aumento de  $r_c$ . Entre 2,2 e 2,5 há uma redução de  $r_c$ . Esta queda pode ser assumida por uma possível influência destes pontos estarem na extremidade do universo de amostragem (Duarte, 1994). Já na Fig. (5) tem-se a sensibilidade do raio de curvatura em relação à profundidade de corte usando redes neurais. Observa-se que a tendência da curva foi mantida mostrando assim a robustez das redes neurais.

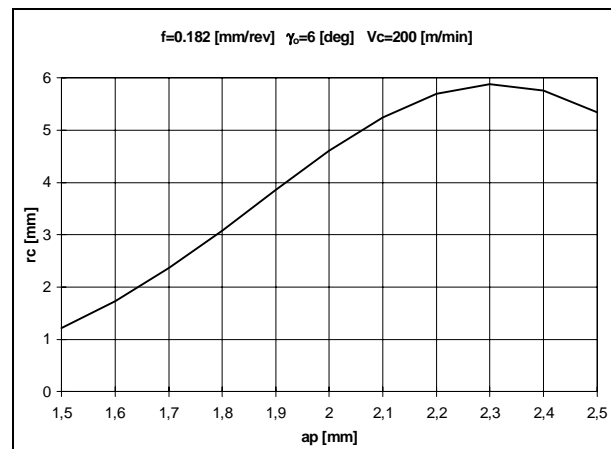


Figura 4. Sensibilidade do raio de curvatura em relação à profundidade de corte - ajuste polinomial.

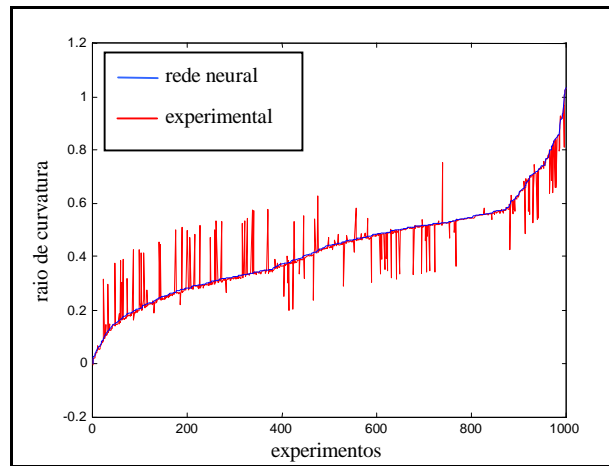


Figura 5. Sensibilidade do raio de curvatura em relação à profundidade de corte - redes neurais.

A Fig. (6) mostra a sensibilidade do raio de curvatura do cavaco em relação ao parâmetro velocidade de avanço, via ajuste polinomial. Observa-se uma tendência de redução de  $r_c$  com o aumento de  $f$ . Na Fig. (7) tem-se o mesmo só que usando redes neurais. Novamente observa-se que a rede neural conseguiu acompanhar a tendência do experimento.

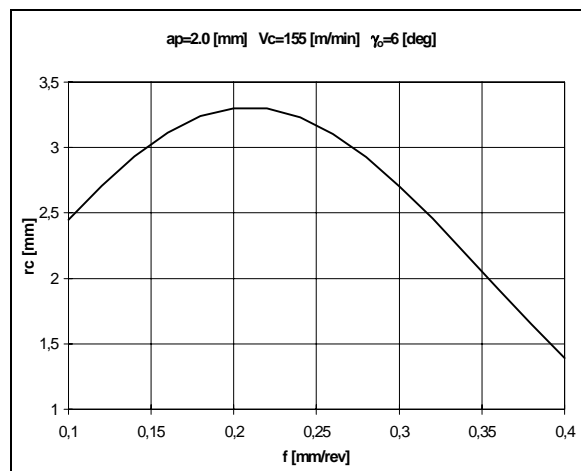


Figura 6. Sensibilidade do raio de curvatura em relação ao parâmetro avanço via ajuste polinomial.

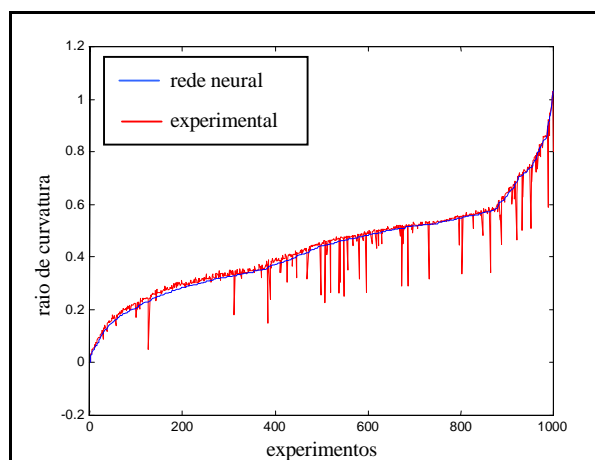


Figura 7. Sensibilidade do raio de curvatura em relação ao parâmetro avanço via redes neurais.

A Figura 8 mostra a sensibilidade do raio de curvatura do cavaco em relação ao ângulo de saída da ferramenta, via ajuste polinomial. Pode-se verificar que o aumento de  $\gamma_0$  promove um aumento de  $r_c$ . Especificamente para esta análise, o polinômio mais representativo foi o de segundo grau, com um erro de 17,93%. Já na Fig. (9) tem-se esta análise usando a rede neural.

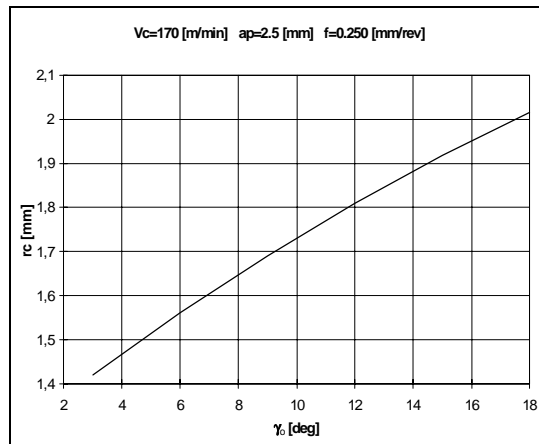


Figura 8. Sensibilidade do raio de curvatura ao ângulo de saída da ferramenta - ajuste polinomial.

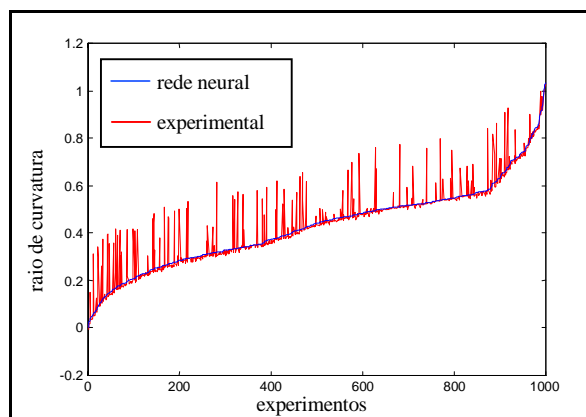


Figura 9. Sensibilidade do raio de curvatura ao ângulo de saída da ferramenta - redes neurais.

A Fig. (10) mostra a sensibilidade do raio de curvatura do cavaco em relação à velocidade de corte, via ajuste polinomial. Pode-se observar que o aumento de  $V_c$  promove um aumento de  $r_c$ . O mesmo se aplica quando se usa a rede neural Fig. (11).

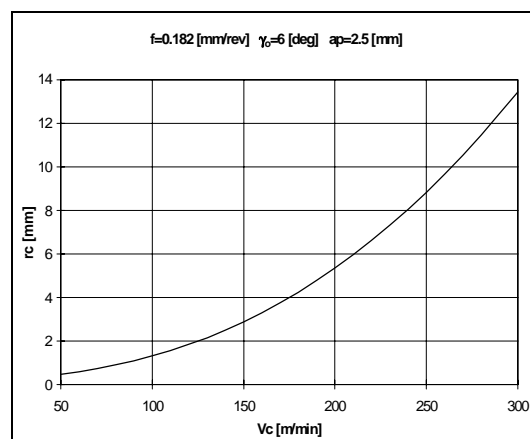


Figura 10. Sensibilidade do raio de curvatura à velocidade de corte - ajuste polinomial.

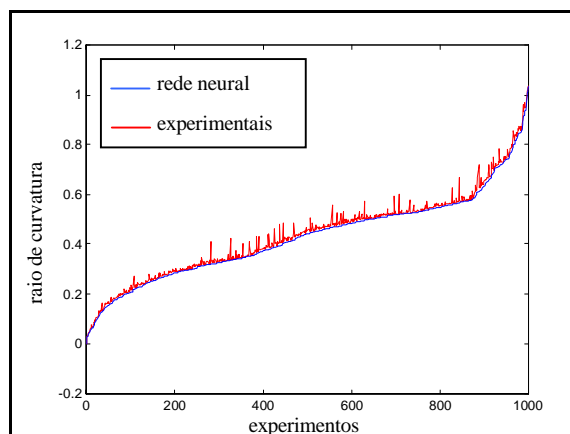


Figura 11. Sensibilidade do raio de curvatura à velocidade de corte - redes neurais.

A análise da sensibilidade adimensional aplicada aos dados deste aço, mostra que os parâmetros avaliados que apresentam maiores influências, em ordem decrescente são:  $a_p$ ,  $\gamma_0$ ,  $f$  e  $V_c$ . Os valores singulares da matriz de sensibilidade adimensional foram: 537,58, 127,92, 80,18 e 13,76. A análise destes valores também conduzem à conclusão de que todos os parâmetros avaliados são fortemente influentes no fenômeno.

A medição do raio de curvatura natural do cavaco, seguindo os procedimentos experimentais e por meio da técnica empregada, permitiu relacionar  $r_c$  com os principais parâmetros do processo de usinagem por retirada de cavaco. A técnica empregada, entretanto, não é perfeita. Alguns fatores são enumerados abaixo como possíveis fontes de erros, que na presente investigação foram amenizados pelo grande número de testes realizados. São eles:

- Velocidade de geração da imagem pequena. Muito embora com outros objetivos, Yao e Jawahir (1990), em seus estudos utilizaram um “software” de simulação do corte bidimensional, a  $V_c = 100$  m/min, em 3,6 ms o cavaco já toca na peça, no ponto exato de se medir  $r_c$ . Com isto conclui que necessita-se de uma filmadora capaz de gerar 1000 quadros/s para se chegar a resultados mais confiáveis;
- Dificuldades de selecionar a pose que se deseja medir a curvatura, já que o período compreendido entre o início do corte e saída do cavaco, na ponta da ferramenta, até o ponto do choque com a peça, é muito pequeno e varia com a velocidade de corte (Yao e Jawahir, 1990).

Além disso não foram considerados outros parâmetros que podem interferir no raio de curvatura do cavaco, como: força e temperatura de usinagem, utilização de fluido de corte, desgaste da ferramenta, vibrações no sistema (máquina-suporte-ferramenta).

## 6. CONCLUSÕES

A técnica empregada permitiu relacionar a curvatura do cavaco com os demais parâmetros investigados, com razoável confiabilidade, embora apresente algumas fontes de erro, como limitações da filmadora. Entretanto trata-se de uma técnica inovadora pois não foram encontrados na literatura trabalhos similares.

A análise de sensibilidade utilizada, mostrou nestas investigações que para o aço SAE 5140 os parâmetros mais influentes em ordem decrescente são:  $a_p$ ,  $\gamma_0$ ,  $f$  e  $V_c$ .

A análise de sensibilidade mostrou que os parâmetros são linearmente independentes, ou seja, não podem ser analisados individualmente, e sim todos são fortemente dependentes da curvatura natural do cavaco ou seja, o raio de curvatura do cavaco aumenta com o aumento da profundidade, velocidade de corte e ângulo de saída e diminui com o aumento do avanço.



## 7. REFERÊNCIAS

- Beck, J. V. and Arnold, K. J., 1977, "Parameter Estimation in Engineering Science", John Wiley, New York.
- Cook, N. H.; Jhaveri, P. and Nayak, N., 1963, "The Mechanism of Chip Curl and Importance in Metal Cutting", Transactions of the ASME, p. 374 - 380.
- Duarte, M. A. V., 1994, "Ajuste de Modelos Dinâmicos de Estruturas com Não Linearidades Concentradas", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Fang, S. D. and Jawahir I. S., 1993, "The effects of Progressive Tool Wear an Tool Restricted Contact on Chip Breakability in Machining", Proc. Int. Conf., ASME, Manufacturing International 90, vol. IV, ASME Publ., Atlanta, GA, pp. 31-37.
- Fang, X. D. and Jawahir, I. S., 1990, "An Expert System Based on a Fuzzy Mathematical Model for Chip Breakability Assessments in Automated Machining", Proc. Int. Conf., ASME, Manufacturing International 90, Vol. IV, ASME Publ., Atlanta, GA, pp. 31 - 37.
- Ferraresi, D., 1977, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Edgard Blucher, São Paulo, Brasil.
- Jawahir, I. S., 1988a, "A Survey and Future Predictions for the Use of Chip Breaking in Unmanned Systems", The International Journal of Advanced manufacturing Technology, 3 (4), 87-104, IFS Publications.
- Jawahir, I. S., 1988b, "The Chip Control Factor in machinability Assessments: Recent Trends", Journal of Mechanical Working Technology, 17, pp. 213-224.
- Jawahir, I. S. and Luttermelt, C. A., 1993, "Recent Developments in Chip Control Research and Applications", Annals of the CIRP, Vol. 42/2, pp. 659 - 693.
- Machado, A. R., 1990, "Machining of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System", Ph.D. Thesis, University of Warwick, England, UK, pp. 288.
- Machado, A. R.; Silva M. B., 1993, "Usinagem dos Metais.", Editora UFU, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, Brasil.
- Nakayama, K., 1962, "A Study on Chip Breaker", Bulletin of JSME, 5 (15), pp. 142-150.
- Sales, W. F., 1995, "Relação Experimental Entre o Raio de Curvatura Natural do Cavaco e os Principais Parâmetros de Usinagem", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- Shaw, M. C., 1986, "Metal Cutting Principles", Oxford Scientific Publications, USA, 594 pp., ISBN - 0-19-859.002-4.
- Trent, E. M., 1991, "Metal Cutting", 3rd Edition, Butterworths, 245 pp., ISBN 0-408- 108568.
- Yao, Y.; Jawahir, I. S.; Jamieson, D. and Fang, X. D., 1990, "Computer Animation of Chip Flow an Chip Curl in an Expert Process Planning System for Metal Machining", Transactions of NAMRI/SME, pp. 161-166.

# A SENSITIVITY STUDY OF CHIP CURL RADIUS USING POLINOMIAL FITTING AND NEURAL NETWORK

**Sebastião Simões Cunha Jr**      *e-mail: simoes@mecanica.ufu.br*  
Federal University of Uberlândia, FEMEC, ZIP CODE: 38400-902, Uberlândia, MG, Brazil.

**André Luis Beloni dos Santos**      *e-mail: albeloni@mecanica.ufu.br*  
Educational Union of Minas Gerais, UNIMINAS, ZIP CODE: 38400-156, Uberlândia, MG, Brazil.

**Wisley Falco Sales**      *e-mail: wisley@pucminas.br*  
Catholic Pontific University of Minas Gerais, ZIP CODE: 30535-610, Belo Horizonte, MG, Brazil.

**Marcus Antonio Viana Duarte**      *e-mail: mvduarte@mecanica.ufu.br*  
Federal University of Uberlândia, FEMEC, ZIP CODE: 38400-902, Uberlândia, MG, Brazil.

**Abstract.** *This work presents an experimental procedure to establish a relationship between the chip curl radius and the machining parameters: cutting speed, depth of cut, feed rate and rake angle, in the orthogonal cutting of SAE 5140 steel. A polynomial function has been used to fit these parameters and a study of sensibility was made evaluating the more influential parameters in the chip curl radius determination. With the purpose of comparison, it was also used a neural network to study the problem of machining parameters sensibility. The results shown that the neural network could best prize the chip curl radius to different bands and combinations of the input parameters. By this way, the neural network shown to be a robust tool in the determination of the behavior tendency of the chip curl radius as a function of the machining parameters. The results shown that the chip curl radius increase with the depth of cut, cutting speed and rake angle and decrease with the feed rate.*

**Key-words:** *neural network, machining parameters, sensitivity analysis, chip curl radius.*