

MODELAGEM VIA REDES NEURAIAS PARA A ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE CORTE EM FERRAMENTAS DE METAL DURO NO PROCESSO DE FRESAMENTO FRONTAL

A NEURAL NETWORK PROCEDURE TO PREDICT THE CUTTING TEMPERATURE OF COATED TOOL CEMENTED CARBIDE IN FACE MILLING PROCESS

André Luis Beloni dos Santos¹
Sebastião Simões da Cunha Junior²
Márcio Bacci da Silva³
Ulisses Borges Souto⁴

^{1,3,4}UFU - Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila 2160 – bloco 1M, CEP 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil
e-mail: albeloni@mecanica.ufu.br

²UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá – IEM – Instituto de Engenharia Mecânica
Av. BPS 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, MG, Brasil.

RESUMO

A temperatura gerada durante o corte, decorrente do cisalhamento do material de trabalho, é um dos motivos que demandam maior preocupação em um processo de usinagem, uma vez que sua elevação excessiva pode provocar distorções e mau acabamento da superfície usinada e, principalmente, ativar mecanismos de desgaste que conduzem à falha prematura da ferramenta de corte, diminuindo a produtividade e aumentando os custos de fabricação. Os problemas com a temperatura podem tornar-se ainda mais complexos em processos de usinagem com corte interrompido, como no caso do fresamento. Desta forma, a determinação de um procedimento que estimasse com confiabilidade a temperatura de corte nos processos de usinagem e em particular no fresamento, poderia ser de grande valia, uma vez que possibilitaria a otimização dos parâmetros de corte de modo a minimizar as conseqüências negativas que a temperatura pode causar no processo produtivo. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo utilizar um procedimento via redes neurais para a estimativa da temperatura de corte em cada ciclo de trabalho de ferramentas de metal duro no processo de fresamento frontal, estabelecendo uma relação experimental entre esta variável e os principais parâmetros do processo de fresamento: velocidade de corte " v_c ", avanço por dente " f_z ", profundidade de corte " a_p " e penetração de trabalho " a_e ". A escolha da metodologia de redes neurais foi motivada por ser uma técnica que tem se mostrado muito eficiente na estimativa de parâmetros e na modelagem de sistemas altamente não lineares. A metodologia utilizada mostrou-se confiável na estimativa da temperatura de corte no fresamento, permitindo a otimização dos parâmetros de usinagem e a conseqüente possibilidade do aumento da vida das ferramentas de metal duro utilizadas.

Palavras-chave: Redes Neurais Artificiais, Temperatura de Corte, Fresamento.

ABSTRACT

The high temperatures generated during the cutting process can quickly become one of the main reasons of premature failure of the cutting tools. In milling process due to the characteristic of discontinuity of the cutting operation, it becomes much more problematic. The determination of a reliable procedure to estimate the cutting temperatures in machining processes could allow the optimization of the cutting parameters providing a tool life longer. By this way, the present work proposes a neural network based procedure aiming to establish an experimental relationship between the cutting temperature generated in coated tools cemented carbide and the main cutting parameters in the face milling process: cutting speed " v_c ", feed per tooth " f_z ", depth of cut " a_p " and cutting width " a_e ". The trained networks were used to predict the cutting temperatures generated not just in the entrance but also in the exit of the cutting tool of the work piece. The choice of the Neural Network procedure was motivated by the satisfactory results presented by this technique when predicting and modeling nonlinear systems with non-correlated variables. The results showed that the neural networks methodology used is a promising technique to estimate the cutting temperatures, besides being an important tool to aid in the choice of the fit parameters, having as a consequence an increasing of the tool life.

Keywords: Neural Networks, Cutting Temperature, Milling.

1 - INTRODUÇÃO

Em processos de usinagem, a temperatura gerada durante o corte decorrente do cisalhamento do material de trabalho sempre foi motivo de grande preocupação, uma vez que sua elevação excessiva pode provocar distorções e mau acabamento da superfície usinada e, principalmente, ativar mecanismos de desgaste que conduzem à falha prematura da ferramenta de corte, diminuindo a produtividade e aumentando os custos de fabricação. Os problemas com a temperatura podem tornar-se ainda mais complexos em processos de usinagem com corte interrompido, como no caso do fresamento. A temperatura desenvolvida na aresta cortante e a variação desta temperatura a cada ciclo de trabalho da ferramenta são fatores determinantes na geração e evolução das trincas de origem térmica, que potencializam o desgaste das ferramentas de metal duro e conseqüentemente, reduzem a vida da ferramenta de corte.

2 - AVARIAS E DESGASTES NAS FERRAMENTAS NO CORTE INTERROMPIDO

Durante um corte interrompido, como, por exemplo, no fresamento de faceamento, cada dente da ferramenta de corte experimenta uma fase ativa, de corte, período em que existe a formação do cavaco e, portanto, aquecimento da ferramenta, e uma fase inativa, sem corte, período em que não existe a formação de cavaco por aquele dente e, portanto, ocorre o resfriamento da ferramenta. Dessa forma, as temperaturas num corte interrompido flutuam ciclicamente, aumentando durante o tempo ativo da aresta de corte e diminuindo durante o tempo inativo. Essa flutuação cíclica da temperatura na interface cavaco-ferramenta leva a uma modificação, também cíclica, da distribuição de tensão na região de corte da ferramenta, podendo provocar avarias na forma de trincas térmicas.

As condições térmicas das ferramentas utilizadas em cortes interrompidos, assim como, o papel desenvolvido pela temperatura no tipo de falha da ferramenta já são bem conhecidos. São inúmeros os trabalhos que mostram que a distribuição de temperatura durante o ciclo de corte depende principalmente das condições de corte (principalmente da velocidade de corte, avanço e da relação entre o tempo ativo e inativo de um ciclo), do material da ferramenta de corte e do material de peça (Bhatia *et al.*, 1986; Chakraverti *et al.*, 1984a; Wang *et al.*, 1969 e Palmari, 1987).

É raríssimo encontrar citações na literatura de trincas de origem térmica em ferramentas que não sejam de metal duro. As ferramentas de aço-rápido costumam ter tenacidade suficiente para suportarem as variações de tensões, sem nucleação de trincas; e as ferramentas cerâmicas são frágeis os suficientes para lascarem ou quebrarem, sem permitirem que trincas sejam observadas em suas superfícies. Entretanto, recentemente, Santos (2004), fabricando dentes de engrenagens com fresas caracóis de aço-rápido,

observou trincas de origem térmica na superfície dessas ferramentas, que eram fabricadas pelo processo de metalurgia do pó. Essas trincas, normalmente, ocorrem perpendicularmente à aresta de corte, nas superfícies de saída e folga das ferramentas. Essas trincas, que são, portanto, de origem térmica, por um processo de erosão se transformam em sulcos, conhecidos por “sulcos desenvolvidos em forma de pentes” (*combracks*, da literatura inglesa).

Em um trabalho interessante, cujo principal objetivo foi verificar a real influência da temperatura no processo de geração de trincas de origem térmica, Lehewald, citado por Ferraresi (1977), desenvolveu um sistema especial de aquecimento da ferramenta de corte por meio de uma resistência elétrica. Em seus experimentos, a temperatura da pastilha, cujo controle foi feito por um termoelemento posicionado bem próximo à aresta de corte, atingiu 400°C. Com a ferramenta aquecida, e torneando uma peça descontínua, ele registrou o número de sulcos em forma de pente em função do tempo de corte e do percurso de corte. Observou-se que quando o teste foi feito sem aquecimento, com 8 min de corte (30 cm de percurso de corte), 11 sulcos em forma de pente já haviam sido registrados, e que, com pouco mais de 40min de corte (próximo de 200 cm de percurso de corte), este número subiu para 17. O aquecimento da pastilha em 300°C fez reduzir os números de sulcos, de maneira que o quinto sulco só foi aparecer após 75 min de corte (aproximadamente 325 cm de percurso de corte). Quando o aquecimento foi a 400°C, praticamente eliminou os sulcos. O único sulco registrado só apareceu após 68 min de corte (300 cm de percurso de corte). Os resultados mostraram que a variável mais importante no processo de geração de trincas de origem térmica foi a variação de temperatura ΔT . O aquecimento levou a uma redução do resfriamento da pastilha, diminuindo a diferença de temperatura ΔT , reduzindo proporcionalmente a variação de tensão superficial, e conseqüentemente restringindo a geração de trincas de origem térmica na superfície da ferramenta.

Wang *et al* (1996) apresentaram um estudo teórico-experimental que, em princípio, contraria a análise do processo de formação dos sulcos em forma de pente, apresentada anteriormente por Ferraresi (1977). O trabalho promoveu uma simulação do ciclo térmico do corte interrompido, usando pulsos de laser em ferramentas de metal duro, medindo simultaneamente os valores de temperaturas dinâmicos. Eles concluíram que a queda de temperatura durante o tempo inativo foi muito pequena e insuficiente para induzir tensões de tração na superfície de saída da ferramenta. Deste modo, as trincas térmicas não aconteceriam durante o tempo do ciclo térmico. Os pesquisadores sugeriram que as trincas térmicas se desenvolveriam ciclicamente pelo aumento do gradiente de temperatura a cada entrada da ferramenta na peça.

3 - REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As redes neurais artificiais podem ser definidas como uma rede de elementos de processamento baseada na estrutura neural do cérebro, sendo capazes de resolver problemas matemáticos complexos. Em processos de usinagem, devido ao grande número de variáveis envolvidas e sua complexidade, a confiabilidade do monitoramento do processo feito usualmente por meio de modelos analíticos é muito baixa. Neste contexto, a utilização de técnicas de inteligência artificial, como as RNA's, vem se destacando para a identificação e estimação de parâmetros e no reconhecimento, classificação e otimização de modelos ou sistemas altamente não lineares, como o fresamento.

O procedimento neurocomputacional empregado nas RNA's tem duas diferenças básicas que o caracteriza e que o diferencia em relação aos algoritmos seqüenciais convencionais. A primeira é a capacidade de aprendizado através de exemplos e sem percepção prévia e explícita do comportamento físico do processo, exceto pelo tratamento adequado dos dados de entrada. A segunda é a capacidade, após o treinamento, de generalizar durante a operação, fazendo com que ela seja capaz de responder corretamente a novos e desconhecidos estímulos, desde que pertencente ao mesmo domínio de estímulos empregados no treinamento (Braga *et al.*, 1998).

4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Montagem e calibração do sistema de aquisição de sinais

Previamente à realização dos ensaios experimentais para a determinação dos valores de temperaturas de corte, promoveu-se a calibração do equipamento utilizado nas medições de temperatura, um sensor de infravermelho marca Raytek®, modelo RAYTXSLTCF1, pertencente ao Laboratório de Transferência de Calor e Massa da FEMEC-UFU. A calibração do aparelho se deu pela determinação da emissividade da ferramenta de corte usada nos testes de fresamento. Para isto, soldou-se um termopar "padrão" na face inferior da mesma e pôs-se a face contrária em contato com uma fonte de calor (placa plana aquecida). Monitorando-se a temperatura com o uso do sensor infravermelho acoplado a um sistema de aquisição e gerenciado por um programa específico (DataTemp® TX), pôde-se encontrar o valor médio da emissividade da ferramenta de corte, $\epsilon = 0,437$, o qual foi utilizado nos testes de fresamento para a obtenção das temperaturas durante o processo de usinagem. Após a calibração, o sistema foi montado na fresadora para realização de pré-testes de fresamento visando determinar as posições mais adequadas para a colocação do sensor de temperatura e ajuste do sistema.

4.2 Pré-testes de fresamento para ajuste do sistema

Para a execução dos pré-testes, primeiramente foi projetado e construído um dispositivo de fixação do sensor de temperatura na fresadora, conforme mostrado na Figura 1.

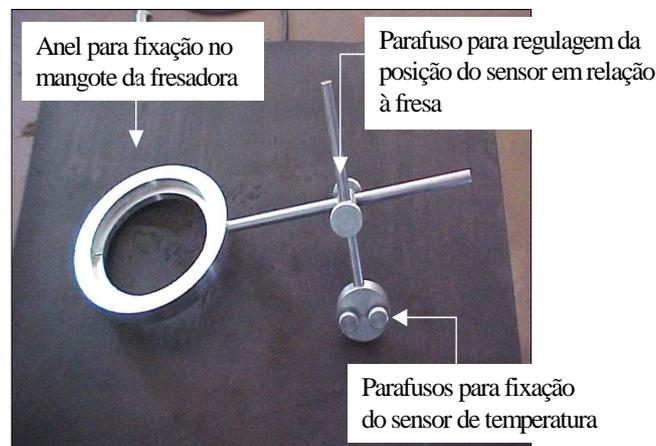


Figura 1 - Dispositivo de fixação projetado e construído para os testes de medição da temperatura no fresamento.

A Figura 2 mostra o dispositivo montado na máquina ferramenta com o sensor posicionado para medir a temperatura de corte.

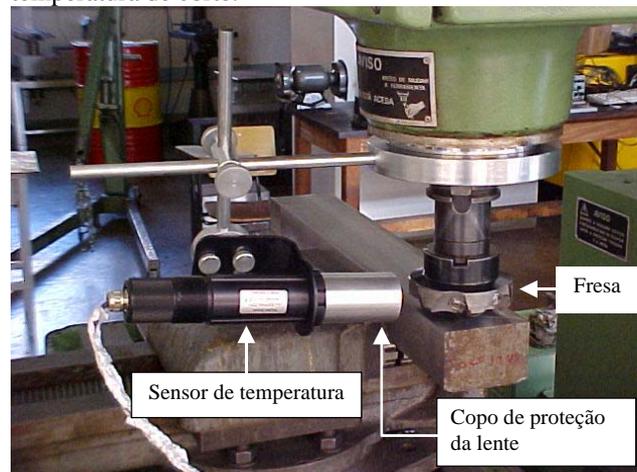


Figura 2 - Dispositivo de fixação com o sensor de temperatura montado na fresadora.

Este dispositivo, assim como construído (com quatro graus de liberdade), se fez necessário para que se tivesse a máxima flexibilidade possível para movimentação do sensor em relação à ferramenta de corte, uma vez que a área circunferencial de medição da temperatura dependia da distância relativa entre o equipamento e o corpo onde a medição deveria ser feita, como mostra a Figura 3. Assim, durante o "set-up" do sistema, manteve-se a lente do sensor a uma distância de 76 mm da ferramenta de corte para se garantir um "spot" de 2,5 mm (menor possível com o uso do instrumento).

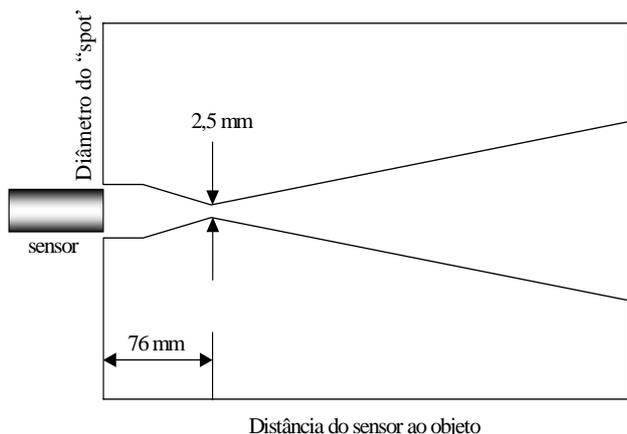


Figura 3 - Representação esquemática mostrando a variação do diâmetro do "spot" de medição do sensor infravermelho em função da distância ao objeto a ser medido.

Parafusos de regulagem constantes no dispositivo de fixação garantiram a flexibilidade de posicionamento do sensor em relação à ferramenta de corte e o copo de proteção da lente (fabricado em alumínio), garantiu a proteção desta contra os choques dos cavacos.

Os pré-testes foram realizados com o objetivo de se fazer os ajustes necessários para a realização dos testes considerados finais. Neste caso, estudou-se, principalmente, o posicionamento final do sensor com relação à ferramenta de corte, de modo a determinar a correta superfície de incidência do infravermelho.

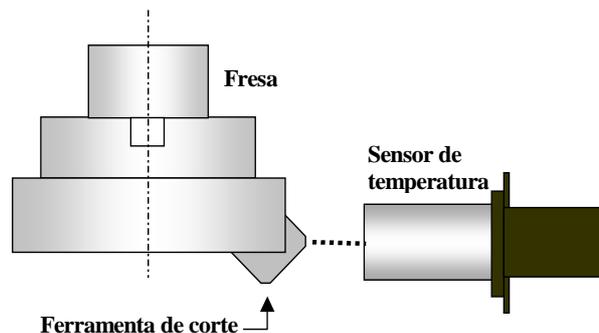


Figura 4 - Posicionamento do sensor de temperatura em relação à ferramenta de corte.

O posicionamento escolhido e indicado na Figura 4 foi aquele que melhor evitou a captação de qualquer radiação emitida por outros corpos próximos ao campo de detecção do sensor infravermelho, a não ser aquela emitida pela ferramenta de corte e, inevitavelmente, pela fresa. Para a minimização de possíveis interferências, a fresa foi pintada na cor da ferramenta de corte.

4.3 Determinação dos Valores da Temperatura de Corte no Fresamento Frontal

Para a determinação dos valores de temperatura gerados durante os ensaios experimentais, foram realizados testes de fresamento onde foram variados os parâmetros velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte, como mostrado na Tabela 1. Foram determinadas as temperaturas em função da condição de corte utilizada em cada teste, tanto na entrada, como na saída da ferramenta de corte da peça de trabalho.

Tabela 1. Testes de fresamento realizados para medição da temperatura de corte.

Parâmetro variado	Valor	Demais parâmetros
Velocidade de corte (m/min)	190	$a_p = 1,0$ mm $f_z = 0,1$ mm/dente $L_f = 500$ mm $a_e = 78$ mm
	280	
	370	
Avanço por dente (mm/dente)	0,125	$v_c = 190$ m/min $a_p = 1,0$ mm $L_f = 500$ mm $a_e = 78$ mm
	0,200	
	0,275	
Profundidade de corte (mm)	0,50	$v_c = 190$ m/min $f_z = 0,1$ mm/dente $L_f = 500$ mm $a_e = 78$ mm
	2,00	
	2,75	

a_p = profundidade de corte; f_z = avanço por dente; L_f = percurso de avanço; a_e = penetração de trabalho

O material de trabalho utilizado foi o aço ABNT 1045, previamente cortado em tarugos e preparado com as seguintes dimensões: 500 mm de comprimento e seção transversal de 78 x 78 mm.

Utilizou-se em todos os testes uma fresa R260 22-080-15 (diâmetro externo de 80 mm) e pastilhas de metal duro sem revestimento da classe H13A (SEMN 12 04 AZ) da Sandvik-Coromant.

Para cada ensaio uma aresta nova era utilizada, sendo montada na fresa apenas uma pastilha, ainda que a fresa tivesse capacidade para seis insertos. Esse procedimento teve o objetivo de se reduzir o consumo de arestas. Durante os ensaios, o sensor de infravermelho foi posicionado de duas maneiras diferentes, como mostra a Figura 5, de modo que pudesse captar os sinais de temperatura tanto na entrada como na saída do corte.

A frequência de aquisição dos sinais de temperatura foi feita em função da rotação da ferramenta de corte para

cada condição de velocidade de corte utilizada nos ensaios experimentais, para que a aquisição da temperatura coincidisse com a passagem da ferramenta frente ao sensor. Todos os testes foram realizados a seco, sendo que as medições de temperatura na entrada e saída foram realizadas de forma independente e não simultânea. Ou seja, uma vez que apenas um sensor de temperatura foi usado, cada teste foi repetido pelo menos uma vez para que a medição na entrada e saída fosse feita de forma individual.

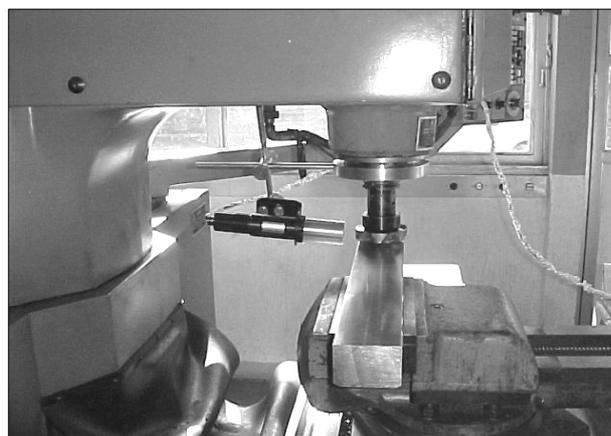
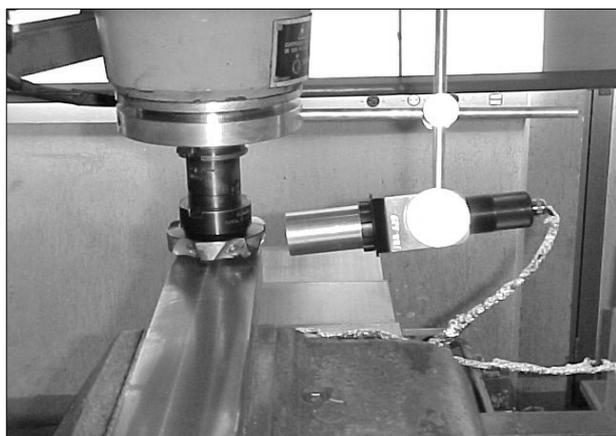


Figura 5 - Posicionamento do sensor de temperatura na entrada (a) e na saída (b) do corte.

5 – RESULTADOS

5.1 Treinamento da rede neural para validação e certificação das temperaturas estimadas pela rede

Os valores experimentais de temperatura medidos, na entrada e na saída da ferramenta de corte, foram então utilizados em um procedimento via redes neurais com o objetivo de se estimar a temperatura de corte e a variação da temperatura de corte (ΔT) em cada ciclo de trabalho das ferramentas de metal duro no processo de fresamento frontal, estabelecendo-se assim, uma relação experimental entre estas variáveis e os principais parâmetros do processo de fresamento: velocidade de corte " v_c ", avanço por dente " f_z ", profundidade de corte " a_p " e penetração de trabalho " a_e ".

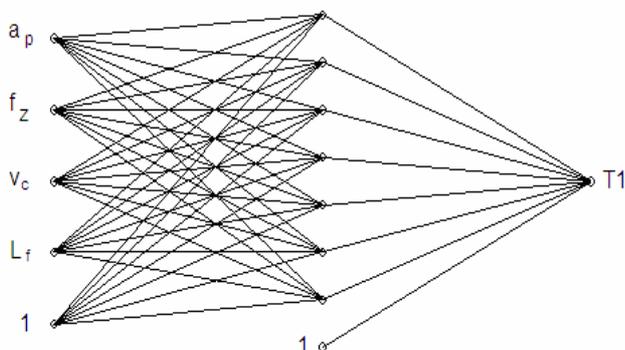


Figura 6 - Estrutura da rede neural utilizada para a modelagem da temperatura observada na entrada da ferramenta no material de trabalho ($T1$).

Foram treinadas duas redes, uma para a estimativa dos valores de temperatura na entrada e outra para a estimativa dos valores de temperatura na saída da ferramenta do corte, ambas redes neurais multicamadas e com controle de erro por "*back-propagation*".

A primeira, uma rede neural composta por uma camada de entrada, uma camada de saída com um neurônio ($T1$) e uma camada intermediária com sete neurônios, cuja estrutura está representada pela Figura 6, foi utilizada para a modelagem da temperatura da ferramenta na entrada do corte.

O conjunto de dados para o treinamento dessa rede consistiu de um arquivo de dados composto por 110 valores experimentais normalizados dos parâmetros de entrada " v_c ", " f_z ", " a_p " e " a_e ", e seus correspondentes valores de saída " $T1$ ". Para a validação dos resultados estimados foi utilizado um arquivo de dados com 40 valores experimentais. Com relação às funções de ativação, foram utilizadas cinco funções do tipo TANSIG na camada oculta e uma função LOGSIG na camada de saída (Demuth et al, 1993). Usou-se como critério de parada do treinamento da rede neural o valor de erro médio quadrático de 0,20.

A Figura 7 apresenta os valores de temperatura $T1$ observados na entrada do corte nos diversos ensaios experimentais realizados, bem como o resultado obtido via Redes Neurais.

Os valores experimentais são representados no eixo das abscissas, T , enquanto que os valores estimados pela rede neural são representados no eixo das ordenadas, por A . A curva $A=T$, representada pela linha azul no gráfico,

representa então o resultado ideal, ou seja, os valores estimados iguais aos valores experimentais. Os pontos plotados no gráfico (Data Points), são os valores estimados através da rede neural. A reta $A = (0,861)T + (9,94)$, representada pela linha vermelha, é a reta que melhor

representa a correlação entre os valores estimados e os resultados experimentais (Best Linear Fit).

O índice de correlação calculado entre os valores foi de 0,915, com margem de erro de 4,38%, significando uma boa relação entre os valores teóricos e experimentais.

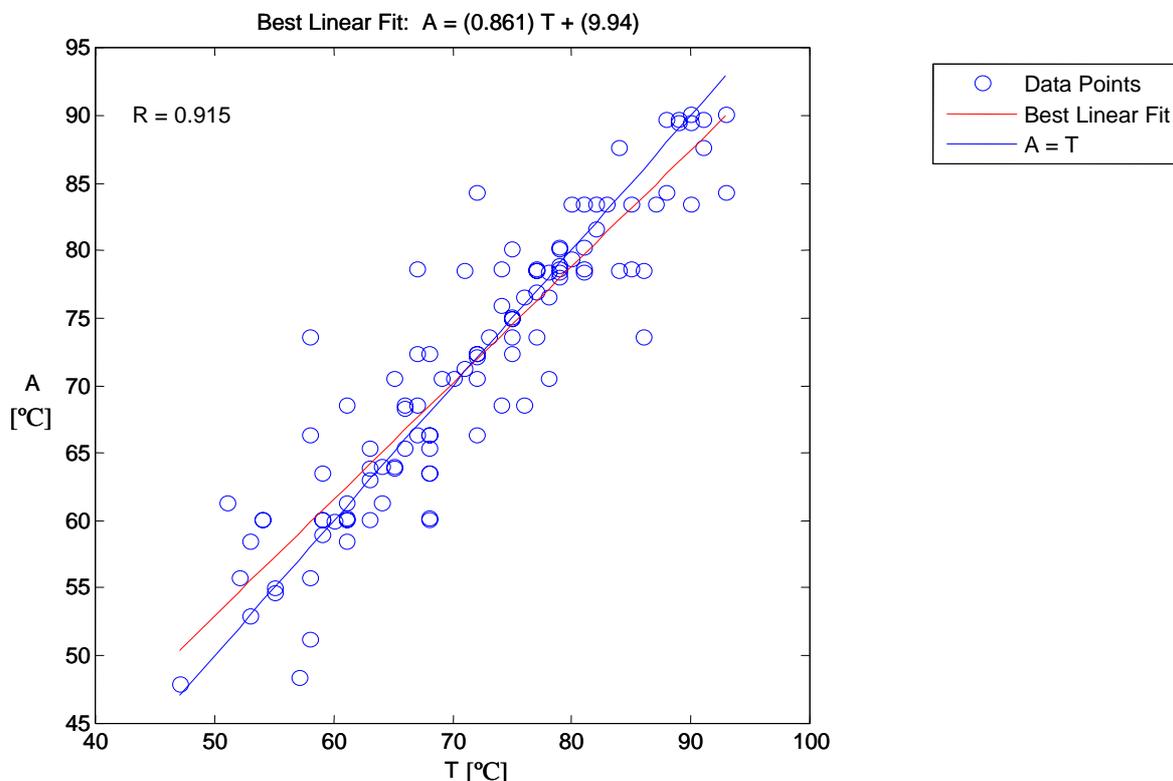
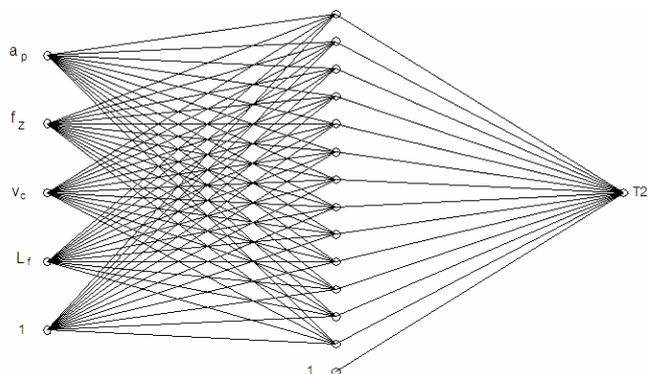


Figura 7 - Curvas da variação da temperatura na entrada do corte – Ensaios experimentais e redes neurais artificiais.

Para o modelamento dos valores de temperatura observados na saída da ferramenta do corte, foi utilizada uma rede composta por uma camada de entrada, uma camada de saída com um neurônio (T2) e uma camada intermediária com treze neurônios, cuja estrutura está representada pela Figura 8.

Analogamente ao procedimento adotado quando do treinamento da rede anterior, um conjunto de 110 valores experimentais normalizados dos parâmetros de entrada “ v_c ”, “ f_z ”, “ a_p ” e “ a_e ”, e seus correspondentes valores de saída “T2” foi utilizado para o treinamento da rede neural. Para a validação dos resultados estimados também foi utilizado um arquivo de dados com 40 valores experimentais.



Com relação às funções de ativação, foram utilizadas cinco funções do tipo TANSIG na camada oculta e uma função LOGSIG na camada de saída (Demuth et al, 1993). O critério adotado de parada do treinamento foi de 0,20 para o erro quadrático médio.

Utilizando a rede mostrada na Figura 8 foram estimados os valores da temperatura T2. O resultado é mostrado no gráfico da Figura 9. Assim como no caso da temperatura na entrada, a melhor reta de regressão é dada por: $A = (0,856)T2 + (11,3)$ e o índice de correlação entre os valores estimados e experimentais foi de 0,925, com margem de erro de 4,00%.

Figura 8 - Estrutura da rede neural utilizada para a modelagem da temperatura observada na saída do corte (T2).

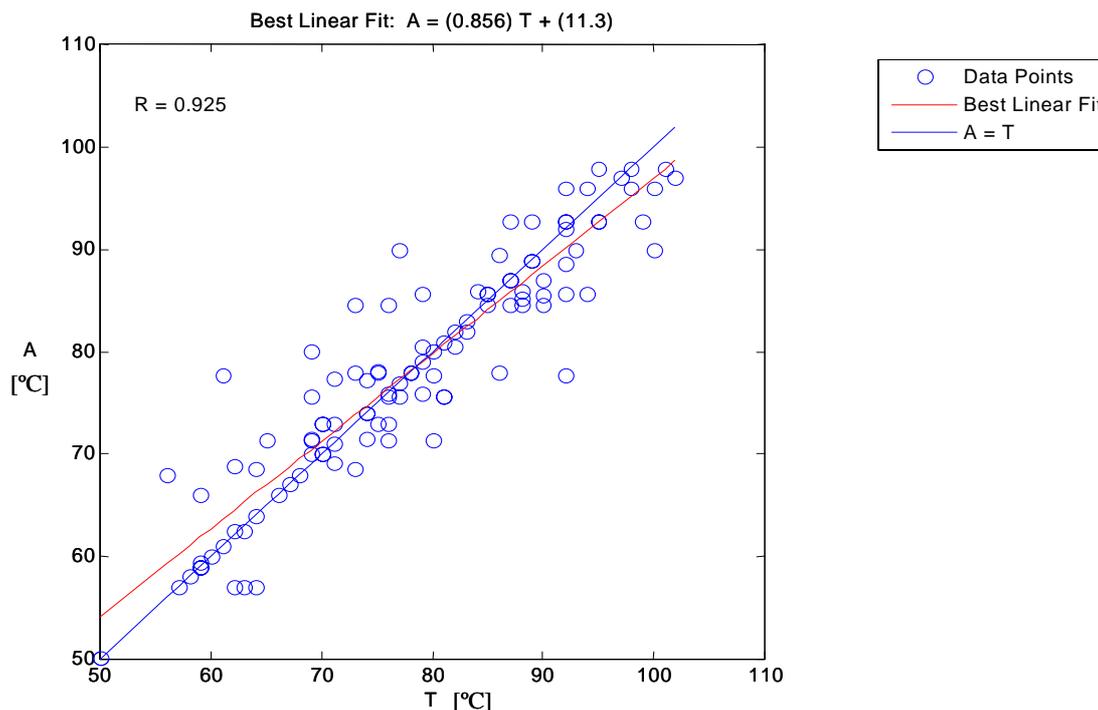


Figura 9 - Curvas da variação da temperatura na saída do corte – Ensaios experimentais e redes neurais artificiais.

6 - CONCLUSÕES

Pela análise das Figuras 7 e 9, verifica-se que o procedimento de Redes Neurais adotado foi bastante satisfatório em estimar as temperaturas de corte, tanto na entrada como na saída da ferramenta de corte no material de trabalho, uma vez que os índices de correlação entre os valores estimados e os valores experimentalmente medidos de temperatura foram de 0,915 e 0,925 respectivamente, com margens de erro calculadas de 4,38% e 4,00%. A metodologia utilizada para a estimativa dos valores de temperatura de corte também se mostrou poderosa e muito robusta, uma vez que foi capaz de mostrar a tendência de variação da temperatura em praticamente todo o espaço de estudo. Esta eficiência proporcionada pelo procedimento utilizado fica mais evidente ainda pelo fato da modelagem de redes neurais ter proporcionado margens de erro tão baixas para os valores de temperatura estimados, tanto na entrada como na saída da ferramenta de corte, em um processo de usinagem altamente não linear como o fresamento, com todas as implicações de um corte interrompido e com um grande número de variáveis não correlacionadas envolvidas. Os resultados levam a concluir que o procedimento de redes neurais poderia ser uma importante ferramenta no sentido de auxiliar no ajuste de parâmetros de corte para a otimização das variáveis do processo, de maneira a minimizar os inúmeros problemas ocasionados por altas temperaturas de corte à vida das ferramentas de corte. Pode-se dizer ainda que melhores resultados poderiam ter sido obtidos caso os experimentos usados para treinar e validar a Rede Neural fossem mais precisos e estatisticamente elaborados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a FAPEMIG e ao Instituto Fábrica do Milênio pelo apoio financeiro, assim como, ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, por ter tornado possível a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATHIA, S.M., PANDEY, P.C., SHAW, H.S., 1986, "The thermal condition of the tool cutting edge in intermittent cutting", *Wear*, Vol. 61, pp 21-30.
- BRAGA, A.P., CARVALHO, A.P.L.F., LUDEMIR, T.B., 1998, "Fundamentos de Redes Neurais Artificiais", 11^a Escola de Computação, UFRJ.
- CHAKRAVERTI, G.; PANDEY, P.C. AND MEHTA, N.K., 1984, "Proceeding of 5th international conference on production engineering", Tokyo, 1984, pp. 209-215.
- FERRARESI, D., 1977, "Fundamentos da usinagem dos metais", Editora Edgard Blücher Ltda., Vol. 1, SP, 751 pgs.
- PALMAI, Z., 1987, "Cutting temperature in intermittent cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 27(2), pp.261-274.
- SANTOS, J.A.B.O., 2004, "Estudo da aplicação de revestimentos superficiais em fresas caracóis", Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- WANG, K.K.; TSAO, K.C.; WU, S.M., 1969, "Investigation of face-milling tool temperatures by simulation techniques", *Journal of Engineering for Industry*, August, pp. 772-80.
- WANG, Z.Y.; SAHAY, C.; RAJURKAR, K.P., 1996, "Tool temperatures and crack development in milling cutters", *Int. Journal of Mach. Tools and Manufact.*, Vol. 36, n° 1, pp 129 - 140.

