



COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA E REDES NEURAS NA OBTENÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO MIG SINÉRGICO PULSADO

José H. F. Silva

Centro Federal de Ensino Tecnológico – CEFET - PB

Coordenação de Mecânica - COMEC

CEP. 58015-430 Fax.: (083) 241 1434

João Pessoa, Pb, Brasil

Sadek C. A. Alfaro

Universidade de Brasília - UnB

Departamento de Engenharia Mecânica

CEP.: 70910-900 Brasília, DF, Brasil

Resumo. Neste trabalho propõe-se comparar parâmetros geométricos de cordões de solda, obtidos aplicando-se uma rede neural do tipo back-propagation, com parâmetros geométricos obtidos por análise de regressão múltipla. Os parâmetros usados como referência foram obtidos experimentalmente. O planejamento experimental foi realizado usando-se a técnica do projeto fatorial. Foram analisados 4 parâmetros de soldagem (corrente, ajuste de tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça) em 3 níveis, utilizando-se um projeto fatorial 3^4 . Assim utilizaram-se 81 cordões de solda. O processo de soldagem MIG sinérgico pulsado foi utilizado numa célula de soldagem robotizada para soldar os corpos de prova. Os parâmetros de soldagem foram utilizados como entrada do sistema e os parâmetros geométrico dos cordões de solda como resposta. Para a rede neural adotou-se o treinamento supervisionado. Os resultados obtidos e comparados através de gráficos, mostram que a rede neural é mais eficiente, ao prever valores para a geometria dos cordões, do que os modelos matemáticos desenvolvidos aplicando-se Análise de Regressão Múltipla. Assim, com base nos resultados se verifica que é bastante útil e promissor o uso de redes neurais como ferramenta computacional em soldagem, para otimização de processos.

Palavras-chaves: Soldagem MIG pulsado, Parâmetros de soldagem, Controle sinérgico, Redes neurais, Análise de regressão múltipla

1. INTRODUÇÃO

Dentre os processos de soldagem à arco, o interesse e a utilização do processo MIG/MAG tem crescido muito nos últimos anos, tendo inclusive suplantado, em utilização o processo

manual com eletrodo revestido nos países europeus. Estas mudanças ainda não atingiram o nosso país de forma apreciável, onde o processo manual ainda domina largamente as aplicações da soldagem. Contudo, a necessidade de se aumentar a eficiência das operações de soldagem e, também, a sua interação com as outras etapas de um processo de fabricação deverão eventualmente incentivar uma maior utilização do processo MIG/MAG no Brasil. Um grande avanço obtido neste processo foi a introdução da corrente pulsada com o objetivo de se obter um arco mais estável através da atuação sobre o modo de transferência de metal (Dutra et al., 1992). Embora possa se ter vantagens formidáveis da utilização da corrente pulsada, introduz-se uma dificuldade no que tange a correta seleção dos parâmetros de soldagem, a qual já é uma tarefa árdua para os operadores. Quando se utiliza corrente pulsada, cinco novos parâmetros, denominados parâmetros de pulso, devem ser controlados. Isto tudo torna o processo incomodo para uma aplicação industrial adequada. Assim, para melhor viabilizar a aplicação desta versão do processo MIG/MAG, se tem procurado desenvolver controles que fazem automaticamente a seleção destes parâmetros a partir de informações que o operador fornece ao equipamento. A estes sistemas se tem dado frequentemente o nome de controle sinérgico. O nome sinérgico significa ação simultânea de varias grandezas para o cumprimento de uma determinada função. Esta ação simultânea deve permitir que todas as grandezas, num esforço comum, atuem no sentido de permitir a variação da corrente média de soldagem, mantendo o controle sobre a transferência metálica.

Redes neurais são caracterizadas por sua capacidade em reconhecer padrões. O que se buscou neste trabalho foi utilizar essa capacidade das redes neurais para prever parâmetros e compará-los com outros valores obtidos por modelos matemáticos desenvolvidos por análise de regressão múltipla e melhorados por transformação da resposta, usando-se como referência parâmetros obtidos experimentalmente, para o processo MIG sinérgico pulsado.

2. REDES NEURAIS

As Redes Neurais Artificiais são modelos matemáticos baseados nos sistemas neurais humanos, onde unidades elementares de processamento, chamadas neurônios, estão densamente interconectados através de dentritos, que são elementos responsáveis pela propagação dos sinais de entrada, os quais contêm a informação a ser processada (Kovács, 1996). Nos dentritos, ocorre a sinapse, que é a consolidação do processo de aprendizado propriamente dito. Semelhante ao sistema natural encontramos um denso paralelismo caracterizando a performance da rede. Uma rede neural consiste em um conjunto de neurônios dispostos em camadas. As redes neurais podem apresentar diversas arquiteturas, que são planejadas, em função do número de camadas, do número de neurônios em cada camada e da forma como estes neurônios estão conectados entre si. A camada de entrada consiste em um conjunto de neurônios que recebe sinais de amostras provenientes do ambiente externo, isto é, os neurônios da camada de entrada recebem os valores de entrada. Enquanto, camada de saída consiste de um conjunto de neurônios que fornecem respostas ao ambiente. Dentre as diversas arquiteturas disponíveis para redes neurais, empregou-se neste trabalho um modelo do tipo back-propagation. Este tipo de rede neural é o de aplicação mais comum em diversas categorias de problemas (Silva, 1996). Numa rede neural do tipo back-propagation, os neurônios são arranjados em camadas. Obrigatoriamente, existem a camada de entrada de dados, as camadas escondidas (ocultas) e a camada de saída de dados.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental foi realizado usando a técnica do projeto fatorial. Foram analisados 4 parâmetros de soldagem (fatores), a corrente (I), o ajuste de tensão (V), a

velocidade de soldagem (V_{sold}) e a distância bico de contato peça (DBCP). O ajuste de tensão é uma forma de regulagem da voltagem, uma vez que, durante a soldagem sinérgica a voltagem é controlada pelo próprio equipamento através de uma curva sinérgica. Logo o ajuste de tensão é um parâmetro que determina o número de volts pelo qual a curva pode ser ajustada. O parâmetro ajuste de tensão pode ser usado também para regular o comprimento do arco do mesmo modo que a voltagem pode ser regulada durante a soldagem MIG/MAG convencional. Isso o torna viável para compensar variações na espessura do material, na posição de soldagem, etc. Cada fator foi analisado em 3 níveis, assim usou-se um projeto fatorial 3. O número de experimento (corridas) realizado, combinando-se todos os níveis dos fatores, foi 81 corridas ou seja foram realizados 81 cordões de solda, obtendo-se assim 81 conjuntos de dados formados pelos parâmetros de soldagem e as respectivas geometrias dos cordões, os quais foram utilizados para treinamento e teste da rede neural.

Os parâmetros geométricos do cordão de solda medidos foram a penetração (p), a largura (b) e o reforço (r). A Tabela 1 apresenta os valores (níveis) usados para os parâmetros de soldagem e a Fig.1 mostra a seção transversal de um cordão de solda com os parâmetros geométricos medidos.

Tabela 1. Valores usados para os parâmetros de soldagem

Parâmetros de soldagem	Valores dos parâmetros de soldagem		
	Mínimo	Médio	Máximo
I (amp.)	100	125	150
V (volt.)	1	3	5
V_{sold} (mm/s)	5	10	15
DBCP (mm)	10	15	20

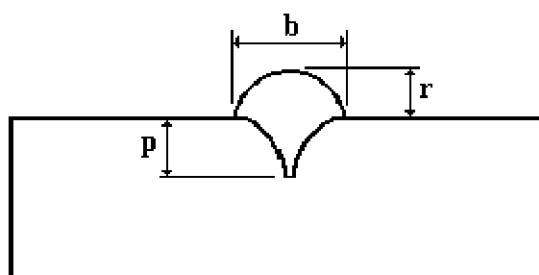


Figura 1 - Seção transversal de um corpo de prova e geometria do cordão de solda.

Para se realizar os ensaios necessários para obtenção dos dados experimentais usados para treinamento da rede neural e posterior comparação com os valores obtidos pela rede e pelos modelos matemáticos, utilizou-se uma célula de soldagem que consistia, basicamente, de uma fonte de energia inversora de soldagem automática sinérgica, que solda 3 processos distintos (MIG/MAG, TIG e Eletrodo revestido), e que oferece ainda as opções de operação manual e pulsada, para esses processos, como também a operação sinérgica para o processo MIG/MAG. Para deslocamento da tocha foi utilizado um robô industrial de grande porte, articulado, com seis graus de liberdade (eixos).

O gás de proteção utilizado foi uma mistura a base de argônio (75% Ar + 25% de CO_2), comercialmente conhecida como C25, a 15 l/min. A tocha foi posicionada verticalmente fazendo um ângulo de 90^0 com a peça de trabalho. O arame eletrodo utilizado foi um arame AWS ER70S6, com uma bitola de 1,00 mm. Foram utilizados corpos de provas de aço

comum ao carbono *ABNT* 1020, caracterizados por uma chapa de 160 x 80 x 3,2 mm. Os cordões de solda consistiram de uma simples deposição sobre as chapas na posição plana.

3.1 A rede neural

A rede neural empregada era composta por três camadas, a camada de entrada, composta por 4 neurônios cada um referente a um parâmetro de soldagem, uma camada oculta, constituída por 3 neurônios e uma camada de saída que consistia de 3 neurônios referentes a penetração, largura e reforço. A fig. 2 apresenta esquematicamente a rede empregada neste trabalho.

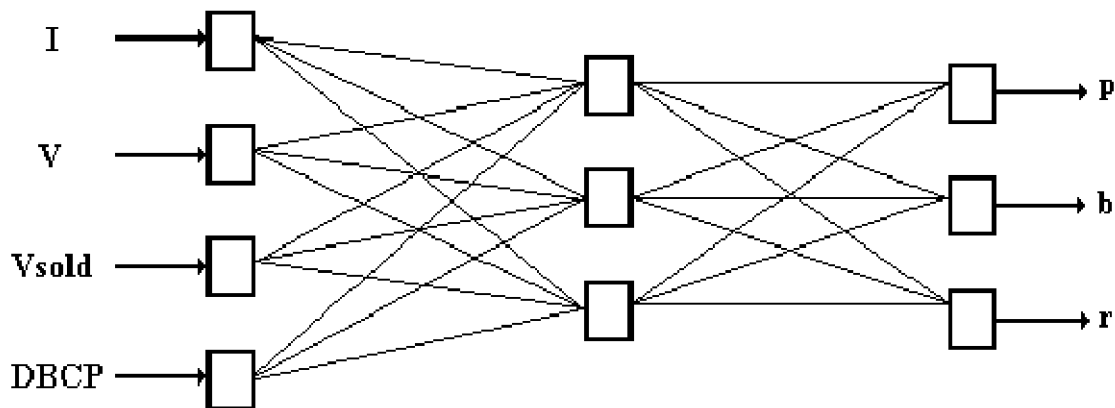


Figura 2 – Esquema da rede neural empregada

O processo de treinamento empregado para a rede foi o treinamento supervisionado que consiste em apresentar a rede um conjunto de dados de entrada (parâmetros de soldagem), bem como os respectivos valores esperados (geometria dos cordões) de resposta da rede. A determinação dos ganhos (pesos) durante o treinamento é feito segundo uma regra de aprendizado. Aqui foi adotado a regra do delta generalizado na qual durante o treinamento os valores obtidos como saída são comparados àqueles esperados. O erro quadrático é calculado e os valores dos pesos são calculados de maneira que o erro quadrático tenda a zero. A monitoração do erro cometido permite avaliar se está havendo convergência no treinamento da rede. O teste da rede neural consistiu em apresentar à rede novos valores de entrada, distintos daqueles utilizados no treinamento. Para o treinamento da rede foram utilizados 41 conjuntos de dados obtidos experimentalmente e escolhidos aleatoriamente entre os 81 conjuntos existentes. Os 40 conjuntos restantes foram utilizados para testar a rede.

3.2 Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos apresentados a seguir foram obtidos aplicando a análise de regressão múltipla. Esses modelos quantificam a correlação entre os parâmetros de soldagem (entrada) e os parâmetros geométricos dos cordões de solda (saída) (Montgomery e Peck, 1982).

Os índices estatísticos utilizados para avaliar a adequacidade do modelo estão apresentados logo após os modelos. Quanto maior o índice Razão-F e menor o Valor-P, mais representativo é o modelo em relação ao fenômeno estudado, considerando o grau de liberdade. Já o coeficiente de correlação (R^2), que indica o quanto o modelo se adequa aos pontos com que eles foram gerados, deve ser próximo da unidade. E o erro padrão (EP), dá a

idéia do tamanho do desvio esperado entre os valores preditos e observados. A tabela 2 apresenta os valores obtidos para esses índices, correspondente aos modelos matemáticos.

$$p = 1,2443 + 0,4880 \bullet I - 0,7475 \bullet Vsold - 0,1541 \bullet DBCP - 0,2681 \bullet (I \bullet Vsold) \quad (1)$$

$$b = 7,3365 + 1,1004 \bullet I + 0,2109 \bullet V - 2,0442 \bullet Vsold - 0,3745 \bullet DBCP - 0,4950 \bullet (I \bullet Vsold) \quad (2)$$

$$r = 1,7034 + 0,1694 \bullet I - 0,0308 \bullet V - 0,3047 \bullet Vsold + 0,0480 \bullet DBCP + 0,0333 \bullet (V \bullet Vsold) - 0,0369 \bullet (V \bullet DBCP) - 0,0774 \bullet (Vsold \bullet DBCP) - 0,0420 \bullet (I \bullet Vsold \bullet DBCP) \quad (3)$$

Tabela 2. Índices estatísticos dos modelos

Índices estatísticos	Valores dos índices Estatísticos		
	p	b	r
Razão-F	170,4250	185,9960	105,3010
Valor-P	0,0000	0,0000	0,0000
R ²	0,8944	0,9204	0,9212
EP	0,2623	0,5772	0,0917

3.3 Análise de melhoria por transformação da resposta

A análise de melhoria, dos modelos, investigada consistiu de transformações nas respostas (penetração, largura e reforço). A classe de transformação usada foi a transformação da potência para a resposta Y^λ , onde Y representa a resposta estudada e λ é o parâmetro a ser determinado. Ao se usar $\lambda = -1/2$, significa usar $\frac{1}{\sqrt{Y}}$ como resposta e para $\lambda = 0$ usar-se a transformação logaritma $\ln(Y)$ (Montgomery e Peck, 1982).

O valor ótimo de λ foi determinado ajustando o modelo Y^λ , para vários valores de λ , e em seguida analisando-se o valor de λ que maximize o índice Razão-F, mantendo o índice Valor-P mínimo. Neste trabalho, λ variou de -2 a 2 em passos de $0,25$, o que resultou em 17 valores analisados.

O modelo que melhor representa a penetração é obtido para $\lambda = 0$, por ser o valor que deu o maior Razão-F, o qual implica na transformação $\ln(Y)$. Para a largura o modelo que melhor a representa foi obtido para $\lambda = -1$, ou seja a transformação Y^{-1} e para o reforço determinou-se $\lambda = 0$, sendo a transformação $\ln(Y)$. A seguir são apresentados os novos modelos obtidos pela transformação da resposta.

É possível observar analisando e comparando os valores da Tabela 3 com os da Tabela 2, que os valores do Razão-F são maiores do que aqueles obtidos para os modelos das Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3), o que indica que os modelos apresentados pelas Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6), dão maior representatividade para o fenômeno que se estuda.

$$\ln(p) = 0,0139 + 0,4297 \bullet I - 0,6189 \bullet Vsold - 0,1483 \bullet DBCP - 0,0232 \bullet (I \bullet Vsold) \quad (4)$$

$$b^{-1} = 0,1461 - 0,0211 \bullet I - 0,0033 \bullet V + 0,0376 \bullet Vsold + 0,0071 \bullet DBCP - 0,00204950 \bullet (I \bullet Vsold) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Ln}(r) = & 0,5167 + 0,1017 \cdot I - 0,0156 \cdot V - 0,1773 \cdot Vsold + 0,0227 \cdot DBCP + \\ & 0,0154 \cdot (V \cdot Vsold) - 0,0199 \cdot (V \cdot DBCP) - 0,03825 \cdot (Vsold \cdot DBCP) - \\ & 0,01960 \cdot (I \cdot Vsold \cdot DBCP) \end{aligned} \quad (6)$$

Tabela 3. Índices estatísticos dos modelos obtidos por transformação da resposta

Índices estatísticos	Valores dos índices Estatísticos		
	Ln(p)	b ⁻¹	Ln(r)
Razão-F	248,8740	292,4010	117,1280
Valor-P	0,0000	0,0000	0,0000
R ²	0,9253	0,9480	0,9286
EP	0,1786	0,0084	0,0504

4. RESULTADOS

São apresentados a seguir sob a forma de gráficos, os resultados obtidos pela rede neural e pelos modelos matemáticos melhorados. O gráfico da Fig. 3 mostra o resultado obtido plotando-se os valores preditos com o teste da rede neural, versus os valores obtidos experimentalmente para a penetração. O gráfico da Fig. 4 mostra o mesmo resultado para a largura e o gráfico da Fig. 5 faz o mesmo para o reforço do cordão de solda.

Nas ordenadas de cada gráfico, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, estão os valores obtidos experimentalmente e nas abscissas os valores preditos pela rede neural. O gráfico da Fig. 6 mostra os valores preditos pelo modelo matemático, obtido por transformação da resposta, Eq. (4), plotados versus os valores obtidos experimentalmente, para a penetração. Os gráficos da Fig. 7 e Fig. 8 fazem o mesmo para a largura, Eq. (5) e reforço, Eq. (6), respectivamente.

Analisando os resultados apresentados nas figuras abaixo, pode-se afirmar que a rede neural utilizada neste trabalho foi capaz de reconhecer padrões entre os dados (entrada e saída) de treinamento e prever valores para a penetração, largura e reforço dos cordões de solda. Assim, a rede neural obteve um desempenho satisfatório. Vale ressaltar que resultados mais precisos podem ser obtidos com redes neurais de maior capacidade, uma vez que neste trabalho utilizou-se um dos modelos back-propagation, outros modelos mais capacitados existem e podem ser testados. Outra forma de se obter melhores resultados é utilizar, principalmente, mais dados de treinamento.

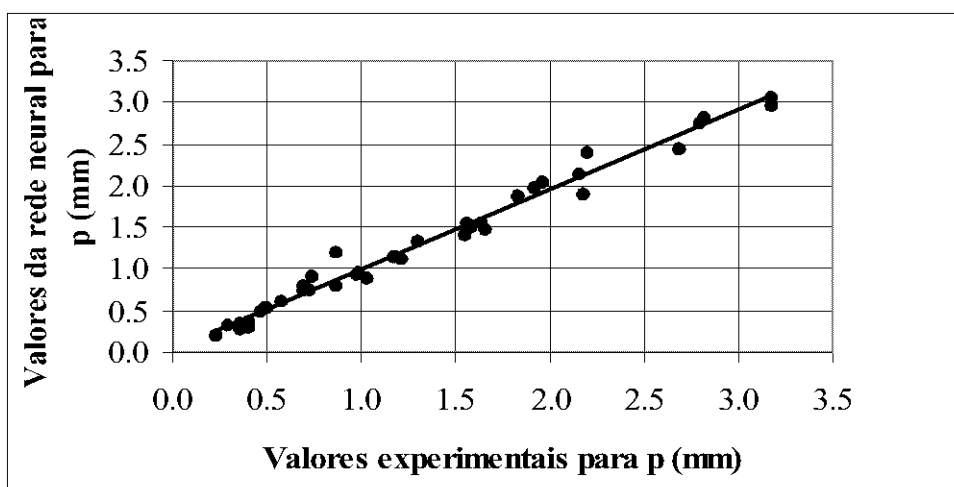


Figura 3 – Resultados obtidos do teste da rede neural para a penetração

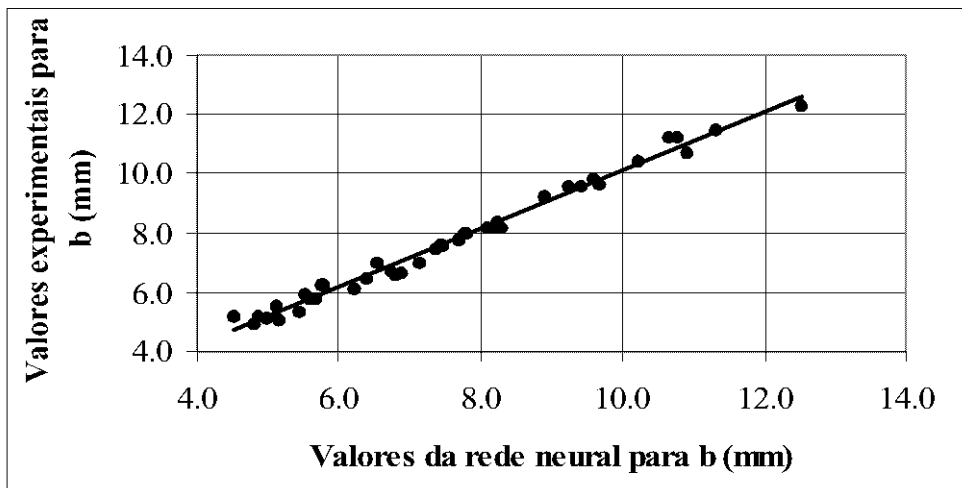


Figura 4 – Resultados obtidos do teste da rede neural para a largura

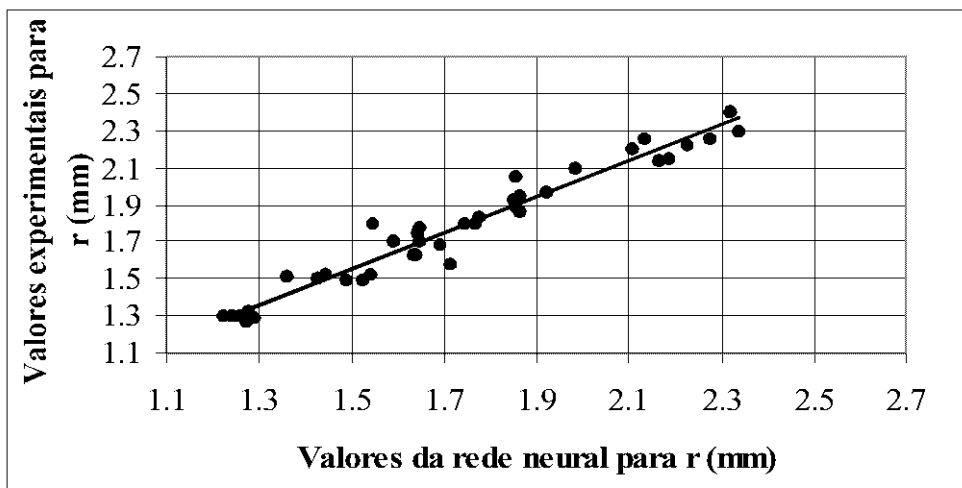


Figura 5 – Resultados obtidos do teste da rede neural para o reforço

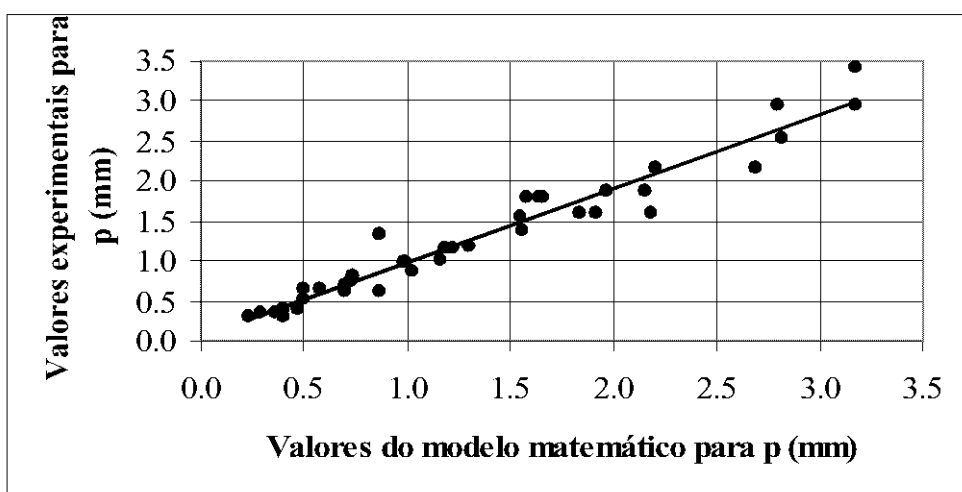


Figura 6 – Resultados obtidos pelo modelo matemático melhorado para a penetração

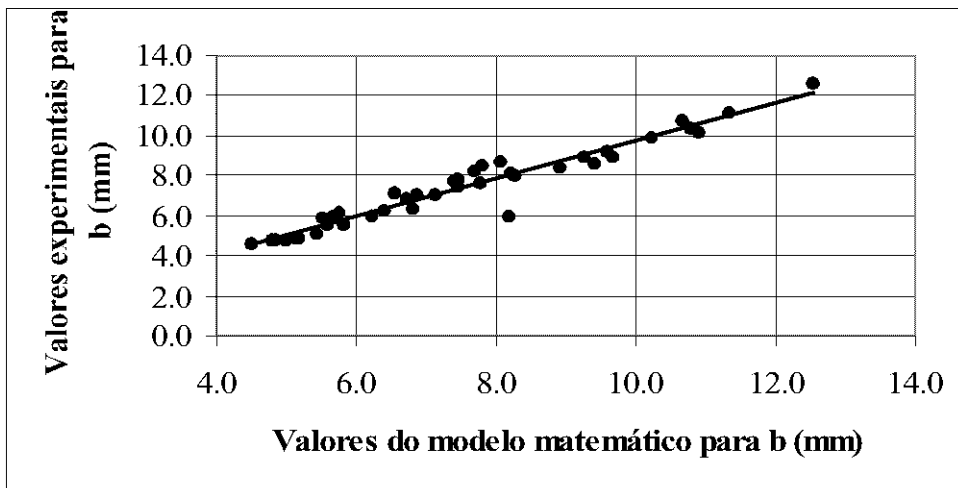


Figura 7 - Resultados obtidos pelo modelo matemático melhorado para a largura

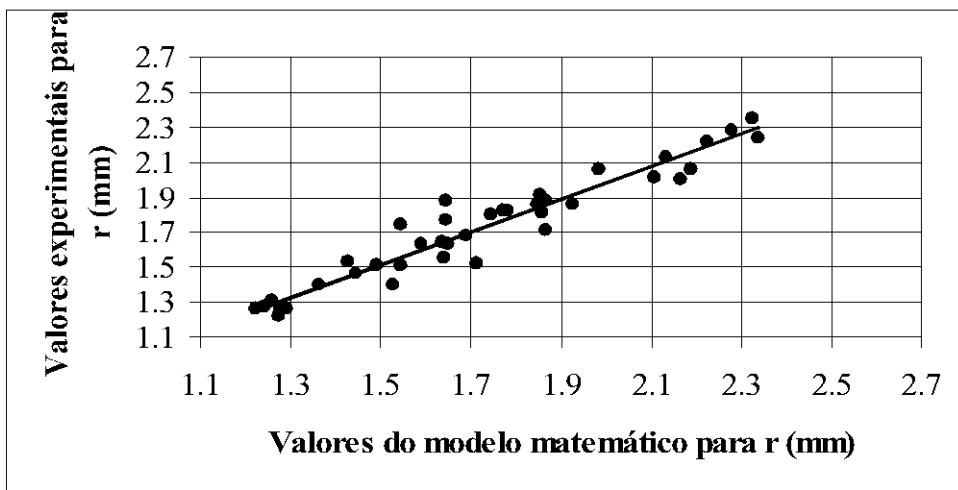


Figura 8 – Resultados obtidos pelo modelo matemático melhorado para o reforço

Foi possível observar, também, através dos índices estatísticos apresentados, que se conseguiu melhoria nos modelos matemáticos, ao se aplicar o método de transformação da resposta e que esses novos modelos obtidos são capazes de melhor representar o fenômeno estudado.

Comparando os gráficos das Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 (resultados da rede neural), com os gráficos das Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 (resultados dos modelos ajustados), observa-se que a rede apresentou um melhor desempenho, ao prever parâmetros geométricos para os cordões de solda do que os modelos matemáticos obtidos por análise de regressão múltipla, visto que, os pontos dos gráficos de resultados da rede estão mais próximos da reta, o que indica que eles estão melhores ajustados aos dados experimentais.

5. CONCLUSÃO

O emprego de Redes Neurais, como ferramenta computacional em soldagem MIG sinérgico pulsado, mostrou-se útil e bastante promissor, para aplicações em soldagem, por

conseguir prever valores para a geometria dos cordões de solda com maior velocidade do que quando se trabalha com modelos matemáticos.

Comparando os resultados previstos pela rede com resultados obtidos pelos modelos matemáticos melhorados, foi possível observar que a rede teve melhor desempenho para prever valores para a geometria do cordão de solda do que os modelos desenvolvidos. Logo, além de maior velocidade a rede apresentou maior precisão. Assim, com base nos resultados se verifica que é bastante útil e promissor o uso de redes neurais como ferramenta computacional em soldagem, para otimização de processos.

REFERÊNCIAS

- Dutra, J. C. Ollé, L. F. Kirst, E. R, Uma contribuição ao estudo da seleção de variáveis na soldagem MIG/MAG pulsada. In: Anais XVIII Encontro Nacional de tecnologia da Soldagem. Rio de Janeiro - RJ: ABS, p. 925-942, abr.1992.
- Kovács, Z. L. Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações. Edição acadêmica. São Paulo - SP.1996.
- Montgomery, D. C. & Peck, E. A., 1982, Introduction to Linear Regression Analysis, John Wiley & Sons, New York.
- Silva, J. H. F. Otimização de parâmetros em soldagem MIG sinérgico pulsado usando análise estatística e redes neurais. Dissertação de Mestrado, publicação 017, Universidade de Brasília, julho 1996.

COMPARISON BETWEEN MULTIPLE REGRESSION ANALYSE AND NETWORK TECHNIQUES ON WELDING GEOMETRY MATHEMATICAL MODELS USING SYNERGIC PULSED MIG PROCESS

Abstract. This paper aim to compare geometric welding bead models obtained by neural network back propagation type with those obtained by multiple regression analyse techniques. The technique of "Factorial design" was used for experimental design. It was analysed four welding parameter (current, voltage adjustment, welding speed and Stan off) at 3 levels, using the completely design 3^4 , having in total 81 welding runs. The synergic pulsed MIG process inside of robotic cell was used to weld the specimens. The independence variables was the welding parameters and the dependent variables or response was weld bead dimensions. The models was obtained by using stepwise regression analyses and compared graphically with these obtained by neural network. The results has shown, after the welding bead validation, that the neural network models are more precise in predicting welding geometry and could be considered as excellent tool for welding process optimise.

Key-words: Synergic pulsed MIG, Welding Parameters, Synergic Control, Neural network, Multiply regression analyse