

ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DO TUBO DE CONTATO À PEÇA DE TRABALHO NA SOLDAGEM MIG/MAG (GMAW)

Salvador Alves de Melo Júnior
Guilherme Caribe de Carvalho
Sadek C. Absi Alfaro

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, GRACO (Grupo de Automação e Controle), 70910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail: sadek@graco.unb.br.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para estimação da distância entre o tubo de contato elétrico e o metal base (“stand-off”) no processo de soldagem GMA (“Gas Metal Arc”). A metodologia proposta baseou-se na medição da resistência elétrica entre o tubo de contato e o metal base durante os períodos de extinção do arco de soldagem no modo de transferência de metal por curto-circuito. Tais períodos foram determinados nas curvas de evolução temporal da tensão e da corrente de soldagem através da identificação dos ciclos positivos da derivada temporal do sinal de corrente e dos ciclos de baixa tensão correspondentes ao curto circuito. Utilizando técnicas estatísticas de seleção de variáveis e de regressão múltipla, obteve-se como resultado um modelo linear relacionando a velocidade de alimentação do arame de soldagem, a corrente média obtida do experimento e interações dessas com a resistência média de curto-circuito (variáveis independentes) à estimativa do “stand-off” (variável dependente). Durante os testes de validação, observaram-se erros de estimação da ordem de 4% em relação aos valores esperados.

Palavras-chave: Soldagem, Modelagem, Monitoramento.

1. METODOLOGIAS DE MONITORAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem *GMAW* (*Gas Metal Arc Welding*) é um dos processos de fabricação e reparo que tem sido cada vez mais utilizado nas linhas de montagem industriais, devido à sua versatilidade e produtividade. Entretanto, há certa dificuldade em se utilizar os parâmetros adequados na automação deste processo, devido ao conjunto de variáveis envolvidas e controle das mesmas. Além disto há sempre o erro inerente aos equipamentos e métodos utilizados, mesmo no caso de sistemas autônomos.

Para tentar sanar este tipo de problema, diversos trabalhos têm sido propostos para automação e controle dos processos de soldagem, tais como: A investigação do padrão de som emitido durante o processo *GMAW* proposto por Saini e Floyd, (1998) visando o controle on-

line deste processo a partir de informações das características do arco, da poça de metal e do modo de transferência do material; Uma metodologia de controle através da aquisição de dados visuais sincronizados com sensores eletrônicos para determinar o modo de transferência, o qual tem um grande efeito sobre a penetração, fluxo de calor e faixas de parâmetros e posições disponíveis para soldagem Johnson et al., (1991).

Entretanto, para efetivação do controle de qualquer processo, é necessário analisar as variáveis de controle do mesmo. Há na literatura diversas possibilidades. Carvalho, (1997) citou em seu trabalho algumas propostas, dentre elas destacam-se o monitoramento da tensão do arco, corrente de curto-circuito e tempos de arco e curto-circuito, proposto por Norrish (1992); A análise quantitativa do desvio padrão e do coeficiente de variação para quantificar a estabilidade do processo, o qual foi proposto por Ogunbiyi e Norrish, (1996); Tem-se ainda um estudo proposto por Needham, (1985), no caso de transferência de material por curto-circuito, que a taxa entre o tempo de arco e tempo de curto-circuito deva ser mantida, dentro de certa faixa, tão constante quanto possível; Outra possibilidade é a medição da área sob o gráfico (I x V) correspondente a cada ciclo de curto-circuito, calculando-se o desvio padrão destas áreas de um número específico de ciclos, proposta por Ditley et al., (1996). Ou ainda o próprio trabalho de Carvalho que propõe uma análise da estabilidade do processo utilizando os valores de tensão abaixo da média.

Propõem-se então com este trabalho uma metodologia para medir indiretamente o “*stand-off*”, por meio dos sinais de corrente e tensão de soldagem durante o processo *GMAW*, os quais serão utilizados para calcular a derivada temporal da corrente durante o tempo de curto-circuito. O modelo matemático e estatístico será então obtido por meio da regressão múltipla, o qual pode ser utilizado em uma metodologia de controle do processo de soldagem.

2. CONTROLE DO PROCESSO "GMAW"

O sistema de alimentação do arame é projetado para manter a velocidade do arame constante, a um valor pré estabelecido, independente das variações do arco de soldagem. Processos convencionais de soldagem utilizam fontes do tipo tensão constante que proporcionam um auto ajuste e estabilização do comprimento do arco Norrish, (1992) e Carvalho, (1997). Assim, um aumento no comprimento do arco causa um aumento da tensão no mesmo, desse modo a corrente de saída da fonte se reduz de acordo com a maior demanda de tensão. Com isso a taxa de fusão se reduz e assim, menos arame é consumido e o comprimento do arco é reduzido. Algo semelhante acontece quando se diminui o comprimento do arco, o qual produz um aumento da corrente; portanto, há um aumento da taxa de fusão e novamente o arco volta a crescer para o valor original Norrish, (1992).

Entretanto este controle descrito acima não é suficiente para se obter uma solda com boa aparência e propriedades físicas. Portanto, para se obter melhores resultados em termos da qualidade de solda, é necessário controlar as variáveis para estabilizar o processo, de modo a prever a performance deste, ou seja, é necessário adquirir o sinal de entrada, processá-lo e atuar no sinal de saída. Além disto, é preciso monitorar o sistema para garantir que este esteja sempre operando dentro de certos limites definidos Norrish, (1992).

3. PROCEDIMENTO

Para realizar este trabalho foi preciso seguir certos passos para se chegar ao resultado pretendido. Estes são descritos a seguir:

- a) Programa para adquirir e tratar os dados de soldagem;
- b) Definição da área de trabalho;

- c) Equação para estimar o *stand-off*, utilizando-se a resistência de curto-circuito, a velocidade de alimentação do arame (*wire feed speed* – WFS) e a corrente de soldagem;
- d) Experimentos de validação do modelo.

3.1 Determinação da área de trabalho

O primeiro passo foi entender como o sistema funciona durante a soldagem, e definir a faixa de parâmetros iniciais e as variáveis com as quais se trabalharia. Então por meio da revisão bibliográfica *Welding Handbook*, (1942) e da atenção de um técnico experiente em soldagem, determinaram-se estes valores conforme é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de valores utilizados durante o experimento.

| Tensão de soldagem ¹ | WFS | “Stand-off” |
|---------------------------------|--------------------|---------------------------|
| Entre 17 e 30V | 4, 6, 8 e 10 m/min | 8, 10, 12, 14, 16 e 18 mm |

3.2 Aquisição dos dados

Para esta aquisição de dados utilizou-se um aplicativo de programação gráfica, o qual era compatível com a placa de aquisição² do laboratório. Neste programa, configurou-se um “gatilho” (*trigger*) para iniciar a aquisição quando a corrente de soldagem ultrapassasse 10A, durante a qual eram mostrados os gráficos de tensão e corrente de cada “janela” contendo 1024 amostras. Terminado o processo de soldagem, encerra-se a aquisição e os seguintes resultados são enviados para um arquivo do tipo texto:

- Tamanho da janela (1024 amostras por janela)
- Frequência de amostragem (2500 Hz)
- *Stand-off* ajustado na fonte de soldagem (SO)
- Velocidade de alimentação do arame ajustada na fonte de soldagem (WFS)
- Tensão ajustada na fonte de soldagem (Vset)
- Média da Tensão obtida da fonte de soldagem (Vmfnt)
- Média da Corrente obtida da fonte de soldagem (Imfnt)
- Sinais do canal 0 (Tensão)
- Sinais do canal 1 (Corrente)

1 A faixa de valores da tensão ajustada na fonte de soldagem é dependente da estabilidade do processo GMAW e do tipo de transferência de material, a qual só é verificada durante o experimento.

2 Características da placa de aquisição: Entradas analógicas de 12-bit: 16 (terra comum); Saídas analógicas: 4; Linhas programáveis digitais: 24; Faixa da tensão de entrada: 0V a 10V / -5V a 5V.

3.3 Análise dos dados de soldagem

Após a coleta dos dados, elaborou-se outro programa para análise dos dados. Este programa lê os arquivos gerados na etapa anterior, analisando cada uma das “janelas” de dados, calculando as médias da tensão e corrente de soldagem e da resistência. A seguir são mostrados os gráficos destes valores em função do tempo. No caso, o tempo de cada janela é de 0.4096 segundos. Se os gráficos supra citados apresentarem uma frequência de curto-circuito regular, inicia-se a próxima etapa deste programa que é o calculo da primeira derivada da corrente de soldagem.

Sabe-se que uma função crescente ou decrescente tem a sua derivada positiva ou negativa respectivamente e que durante o curto-circuito a corrente de soldagem cresce rapidamente conforme pode ser visto na Figura 1. Além disto, durante o tempo de curto-circuito o arco praticamente deixa de existir e com isso a resistência à passagem de corrente tende a diminuir bastante e assim ocorre um aumento da corrente de curto-circuito. Com base nisto, quando a derivada da corrente de soldagem for positiva, calculam-se os valores da resistência de curto-circuito e sua média, caso contrário faz-se a derivada e a resistência de curto-circuito iguais a zero. Os resultados desta análise são enviados para um arquivo texto na forma matricial.

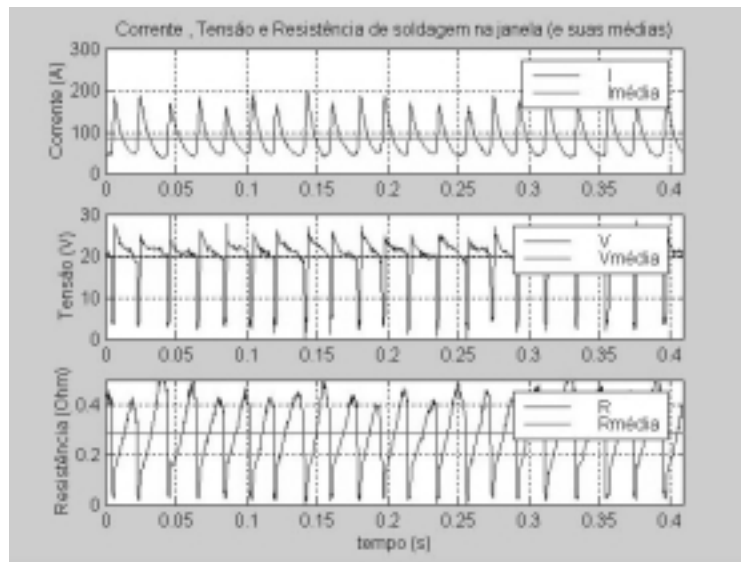


Figura 1. Gráfico de tensão, corrente e resistência durante o curto-circuito.

3.4 Análise Estocástica

Nesta fase foi utilizado um programa específico para análise estatística dos resultados, o qual permite realizar diversas análises até chegar a modelagem matemática do processo em estudo. As etapas seguidas foram as seguintes:

- Determinação das variáveis importantes para a modelagem do processo;
- Verificação da independência das variáveis selecionadas;
- Determinação da equação para estimar o “*stand-off*”.

Para determinar quais variáveis teriam maior influência no processo, utilizou-se um método de análise chamado método de regressão linear por eliminação adiantada (“*Stepwise Regression Forward*”), que consiste de incluir e excluir variáveis até se encontrar o conjunto que tem a maior razão de F (Distribuição de Fisher).

Os resultados encontrados na etapa acima, envolviam variáveis que não apresentavam uma independência muito evidente e para uma análise estatística clássica, as variáveis devem

ser: a) Independentes; b) Aleatórias e c) O erro deve ter uma distribuição normal. Com base nisto utilizou-se o “*Ridge Regression*” para verificar se estas variáveis tendiam a ser independentes. Como resultados desta ferramenta de análise estatística temos o gráfico “*Coefficient x theta*”, o qual deve indicar que o nível de correlação tende a zero.

A etapa seguinte foi encontrar a equação matemática estatística para estimar o “*stand-off*” por meio da regressão múltipla, tendo a análise de variância como parâmetro de escolha, onde o principal critério utilizado foi a maior razão de F possível.

3.5 Validação do modelo

Para validação do modelo encontrado foram necessários novos testes, utilizando-se as mesmas variáveis, equipamentos e procedimentos daqueles utilizados para determinação da equação de regressão, porém com valores diferentes daqueles utilizados para gerar o modelo (dentro da faixa de trabalho). Estes testes seguirão um projeto fatorial (“*factorial design*”) 2³. Os resultados encontrados pelo modelo foram comparados com os valores de “*stand-off*” ajustados antes de iniciar o processo de soldagem.

4. RESULTADOS ENCONTRADOS

Resultados obtidos pela análise dos sinais de tensão e corrente durante o processo de soldagem *GMAW* estão mostrados na tabela 2.

Tabela 2. Sinais do Processo de Soldagem *GMAW*

| NRO | SO | WFS | Vset | Vmfnt | Vmexp | Imfnt | Imexp | Rccmedia |
|-----|------|---------|------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | [mm] | [m/min] | [V] | [V] | [V] | [A] | [A] | [Ohm] |
| 1 | 8 | 4 | 21 | 20,0 | 20,0 | 83 | 83,8 | 0,308384 |
| 2 | 8 | 4 | 23 | 20,2 | 20,0 | 85 | 85,3 | 0,290929 |
| 3 | 8 | 6 | 22 | 20,0 | 20,6 | 120 | 122,7 | 0,218371 |
| 4 | 8 | 6 | 23 | 21,8 | 21,6 | 121 | 124,2 | 0,222263 |
| 5 | 8 | 8 | 25 | 23,5 | 23,2 | 147 | 155,4 | 0,187302 |
| 6 | 8 | 10 | 26 | 24,5 | 23,8 | 188 | 190,3 | 0,145768 |
| 7 | 10 | 4 | 20 | 19,1 | 19,1 | 77 | 79 | 0,323084 |
| 8 | 10 | 6 | 22 | 20,8 | 20,6 | 115 | 117,2 | 0,238729 |
| 9 | 10 | 6 | 24 | 22,7 | 22,7 | 118 | 119,7 | 0,237201 |
| 10 | 10 | 8 | 24 | 22,7 | 22,3 | 139 | 141,9 | 0,201521 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 29 | 18 | 6 | 22 | 21,5 | 20,9 | 93 | 95,7 | 0,276575 |
| 30 | 18 | 8 | 24 | 22,8 | 22,6 | 117 | 119,3 | 0,239869 |
| 31 | 18 | 10 | 24 | 22,6 | 22,4 | 133 | 135,8 | 0,209656 |

Onde:

- SO = Valor do “*Stand-off*” ajustado no programa de movimentação de robô.
- WFS = Velocidade de alimentação do arame (“*wire feed speed*”).
- Vset = Tensão ajustada na fonte de soldagem.
- Vmfnt = Média da tensão de soldagem obtida da fonte de soldagem.
- Vmexp = Média da tensão de soldagem obtida dos sinais de tensão do experimento.
- Imfnt = Média da corrente de soldagem obtida da fonte de soldagem.
- Imexp = Média da corrente de soldagem obtida dos sinais de corrente do experimento.
- Rccmedia = Média da resistência de curto-circuito do experimento.

Na Tabela 3, usando regressão múltipla obtemos as variáveis significantes:

Tabela 3. Resultado obtido com o "*Stepwise Variable Selection Forward*".

| Variáveis Independente | Coefficiente | Erro Padrão | Valor - t | Nível de significância |
|------------------------|--------------|-------------|-----------|------------------------|
| CONSTANTE | 23,270702 | 4,133501 | 5,6298 | 0,0000 |
| WFS | -8,071033 | 0,896089 | -9,0070 | 0,0000 |
| Imexp | 0,401666 | 0,050576 | 7,9418 | 0,0000 |
| WFS * Rccmedia | 53,008483 | 4,158347 | 12,7475 | 0,0000 |
| Imexp * Rccmedia | -3,174132 | 0,295681 | -10,7350 | 0,0000 |

Na Tabela 4 a e b, mostra-se, respectivamente, o resultados da análise de variância para o modelo linear e não linear e a tabela 5, os resultados obtidos com "*Ridge Regression*"

Tabela 4a. Resultados da análise de Variância (ANOVA) do modelo linear.

| Tipo | Soma dos quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | Razão F ³ | Valor P |
|--------|--------------------|--------------------|----------------|----------------------|---------|
| Modelo | 273,43300 | 4 | 68,358300 | 197,779 | 0,0000 |
| Erro | 6,56697 | 19 | 0,345630 | | |

Tabela 4.b. Resultados da análise de Variância (ANOVA) do modelo não linear.

| Tipo | Soma dos quadrados | Graus de Liberdade | Média dos quadrados | Razão F | Valor P |
|--------|--------------------|--------------------|---------------------|---------|---------|
| Modelo | 63,41320 | 4 | 15,8533000 | 200,375 | 0,0000 |
| Erro | 1,50324 | 19 | 0,0791180 | | |

Tabela 5. Resultado obtido com o "*Ridge Regression*".

| Theta | WFS | Imexp | WFS* Rccmedia | Imexp* Rccmedia |
|-------|-----------|-----------|---------------|-----------------|
| 0,00 | -5,28E+00 | 3,872946 | 3,646088 | -1,21E+00 |
| 0,05 | -1,33E-01 | -0,389771 | 1,053827 | -3,48E-01 |
| 0,10 | -5,44E-02 | -0,433889 | 0,933635 | -2,88E-01 |
| 0,15 | -3,23E-02 | -0,42937 | 0,854666 | -2,49E-01 |
| 0,20 | -2,31E-02 | -0,41456 | 0,792151 | -2,21E-01 |
| 0,25 | -1,84E-02 | -0,397148 | 0,739737 | -1,99E-01 |
| 0,30 | -1,56E-02 | -0,379518 | 0,694578 | -1,81E-01 |
| 0,35 | -1,38E-02 | -0,362534 | 0,655023 | -1,66E-01 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 0,80 | -7,93E-03 | -0,252167 | 0,435993 | -9,64E-02 |
| 0,85 | -7,60E-03 | -0,243668 | 0,420507 | -9,21E-02 |
| 0,90 | -7,29E-03 | -0,235702 | 0,406096 | -8,82E-02 |
| 0,95 | -7,01E-03 | -0,228222 | 0,39265 | -8,46E-02 |
| 1,00 | -6,74E-03 | -0,221188 | 0,380075 | -8,13E-02 |

³ A razão "F" (Coeficiente de Fisher), indica a variância do modelo em torno da sua média.

Onde:

- Theta = Parâmetro do “ridge regression” ;
- WFS = Velocidade de alimentação do arame;
- Imexp = Média da corrente de soldagem obtida do experimento;
- Rccmedia = Resistência de curto-circuito média.

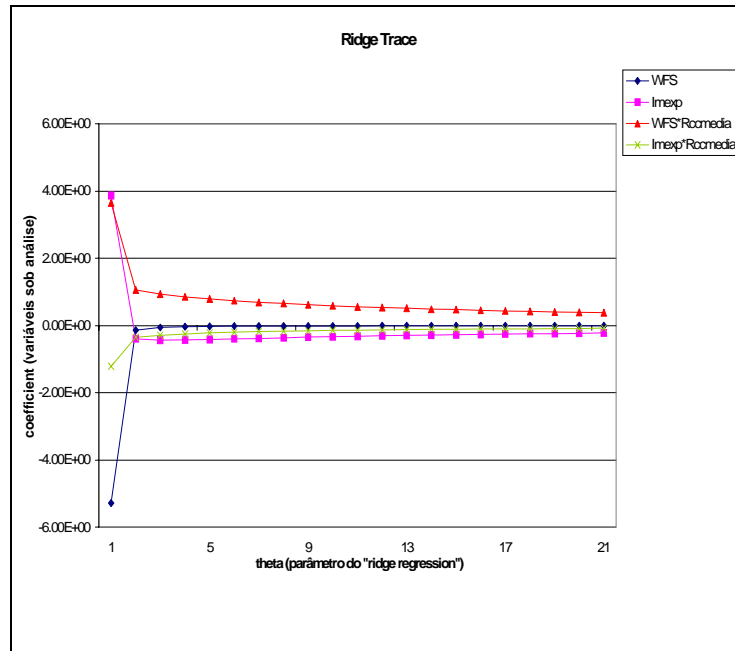


Figura 2. "Ridge Trace"

Assim, o resultado da Regressão Múltipla nos leva ao seguinte equacionamento do “Stanf Off”:

$$SO = 23.270702 - 8.071033*WFS + 0.401666*Imexp + 53.008483 *WFS * Rccmedia - 3.174132*Imexp*Rccmedia$$

Resultados encontrados na validação do modelo estão mostrados na tabela 6,

Tabela 6. Resultado da validação do modelo.

| Ensaio | SO (mm) | SO estimado | Erro | SO ^(0.8) estimado | erro |
|----------------------|---------|-------------|------|------------------------------|------|
| 1 | 9 | 9,7 | 7,3% | 9,6 | 6,4% |
| 2 | 17 | 17,4 | 2,0% | 17,4 | 2,2% |
| 3 | 9 | 9,3 | 3,0% | 9,2 | 2,7% |
| 4 | 13 | 13,4 | 3,1% | 13,3 | 2,3% |
| 5 | 17 | 16,4 | 3,6% | 16,4 | 3,7% |
| 6 | 13 | 12,9 | 0,8% | 12,8 | 1,6% |
| 7 | 9 | 9,7 | 7,8% | 9,7 | 7,7% |
| 8 | 13 | 12,8 | 1,8% | 12,6 | 2,7% |
| 9 | 17 | 17,9 | 5,1% | 18,0 | 5,7% |
| Média | | | 3,8% | | 3,9% |
| Desvio Padrão | | | 2,4% | | 2,2% |

Onde:

- SO Estimado = “*stand-off*” obtido do modelo linear.
- SO^(0.8) Estimado = “*stand-off*” obtido do modelo não linear.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da seleção das variáveis indicou uma interação entre a velocidade de alimentação do arame (WFS) e a corrente média do processo de soldagem com a resistência de curto-circuito média, pois como a velocidade de alimentação do arame esta relacionada com a corrente de soldagem⁴ e esta com a resistência, fez-se necessário a utilização do “*ridge regression*” para determinar se estas variáveis tendiam a ser independentes, o que pela tabela 5 e pela Figura 2, nota-se que o erro relacionado à correlação destas variáveis tem uma distribuição normal, ou seja, este erro não afetará significativamente os resultados.

O uso de um modelo não linear não promoveu melhoria dos resultados de validação do modelo linear, apesar daquele apresentar um valor da razão de F superior a este (Tabela 4b).

Pelo resultado da análise de variância, nota-se que o valor da razão F encontrado (197.779), indica que esta relação entre as variáveis é válida para representar o sistema em análise, pois conforme pode ser visto na tabela D do Apêndice do livro do George Box, (1972), para esta situação o valor tabelado de F é 7.26, ou seja, muito menor que o valor encontrado para o modelo. Além disto, pela análise da tabela 6, a distribuição do erro é gaussiana, e indicou uma boa qualidade do modelo.

O modelo é limitado às condições em que foram realizados os ensaios (tipo de processo de soldagem, gás utilizado, fluxo do mesmo, modo de transferência, tipo e diâmetro do eletrodo, etc.), ao cilindro de gás utilizado e à região de trabalho (WFS, SO).

6. CONCLUSÕES

Com base neste trabalho chegou-se às seguintes conclusões:

- Os resultados obtidos com a metodologia proposta, indicaram que esta pode ser válida no contexto do controle do processo de soldagem, como uma etapa anterior ao controle propriamente dito.
- O erros encontrados podem ser devido: (a) Em parte pelo modelo; (b) Ao ruído quando da transmissão dos sinais de soldagem; (c) Ao erro durante o posicionamento do robô para ajustar o “*stand-off*”; (e) Ao erro do mecanismo de alimentação do arame e deslocamento do “braço” do robô.
- No caso da implementação do controle, deve-se elaborar um programa específico para este fim, que faça a aquisição e análise dos dados, evitando-se assim a necessidade de uso de diversos programas e a perda de dados por tempo de processamento.
- O modelo matemático por regressão múltipla linear é um modelo mais simples e indica resultados melhores que o modelo não linear.

4 Quanto maior a velocidade de alimentação do arame, maior a corrente de soldagem.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PADCT/Finep, CNPq, FAP-DF e RHAE/MCT, pelo apoio a este e outros trabalhos do grupo.

8. REFERÊNCIAS

- CARVALHO, G. C., **An Adaptive Control System for Off-line Programming in Robotic Gas Metal Arc Welding**. Cranfield, 1997. Ph.D. Thesis – School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University.
- NORRISH, J., **Advanced Welding Process**. Bristol – UK, 1992.
- SAINI D. e FLOYD S., An Investigation of Gas Metal Arc Welding Sound Signature for On-line Quality Control, **Welding Journal**, p. 172s-179s, Apr. 1998.
- **Welding Handbook**, 6^a edição, parte 2, AWS, United States of America, 1942
- BOX, George, et al., **Statistics for Experimenters, An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building**, John Wiley & Sons, NY – USA, 1972.