

# **SISTEMA DE MONITORAÇÃO (EM TEMPO REAL) DA QUALIDADE DA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO POR ESPECTROSCOPIA DE EMISSÃO**

**Marcelo S. Matos**

Universidade de Brasília  
Depart. Eng. Mecânica  
Cep. 70910 – 900  
Brasília – DF  
e-mail: msmatos@unb.br

**Sadek C. A. Alfaro**

Universidade de Brasília  
Depart. Eng. Mecânica  
Cep. 70910 – 900  
Brasília – DF  
e-mail: sadek@unb.br

**Resumo.** *O presente trabalho descreve a implementação de um sistema de monitoração (não intrusivo e em tempo real) da qualidade da soldagem utilizando a emissão eletromagnética da coluna de plasma no arco de soldagem GMAW, através da espectrometria de emissão. A monitoração da soldagem é feita através do cálculo da temperatura dos elétrons dos elementos Fe e Mn, presentes na coluna do arco da solda, admitindo que a região observada encontra-se em equilíbrio termodinâmico local. O método empregado para obter o valor da temperatura eletrônica foi o da razão das intensidades relativas, advinda das Leis de Boltzmann, Saha e da definição de intensidade das linhas de emissão. Os resultados dos sinais de temperatura eletrônica dos dois elementos foram correlacionados com a posição ao longo do cordão de solda dos defeitos pontuais que foram previamente simulados, evidenciados com a mudança abrupta no valor médio do sinal de temperatura indicada pela monitoração do desvio padrão do sinal.*

**Palavras-chave:** *Espectroscopia, Soldagem, Plasma, Monitoração da Soldagem.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Há vários anos, uma série de novas técnicas de monitoração vem sendo estudadas com o propósito de fazer frente à complexidade inerente dos processos de soldagem a arco, bem como oferecer alternativas mais viáveis aos processos de inspeção hoje empregados, quase sempre onerosos e demorados.

Tais inovações se pautam no estudo mais aprofundado dos fenômenos físicos envolvidos em cada um dos processos, principalmente sobre o arco plasma e sua interação com a poça de fusão (Degout et al, 1986), e envolvem desde a simulação numérica do arco (Haidar et al, 1996), análise de imagens (Kim et al, 1987), análise da emissão sonora (Saini et al, 1998), análise de emissão eletromagnética (Lacorix et al, 1999; Ancona et al, 2001; Sforza et al 2002), até a utilização de sistemas “inteligentes”, empregando redes neurais e lógica fuzzy (Moon et al, 1996).

O presente trabalho descreve a implementação de um sistema de monitoração da qualidade da soldagem (detecção de defeitos) utilizando a emissão eletromagnética da coluna de plasma no arco

de soldagem, para o cálculo da temperatura eletrônica através da espectrometria de emissão, cujas vantagens são: ser não intrusivo e poder ser implementado em tempo real.

### 1.1. Espectroscopia de Emissão e Caracterização do Plasma

Dos postulados da teoria quântica temos que, a existência de átomos e moléculas apenas podem existir em certos estados, caracterizados por quantidades discretas de energia. Quando um átomo ou molécula muda de estado, ele absorve ou emite uma quantidade de energia exatamente suficiente para levá-lo ao outro estado.

Quando átomos ou moléculas absorvem ou emitem luz ao passarem de um estado energético para outro, o comprimento de onda  $\lambda$  da luz está relacionado com as energias dos dois estados pela Eq. (1).

$$E_i - E_n = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1)$$

Onde  $E_i$  é a energia no estado inferior,  $E_n$  a energia no estado superior,  $h$  é a constante de Planck e  $c$ , é a velocidade da luz, Masterton et al (1996).

A espectroscopia é um conjunto de técnicas experimentais, relacionadas com a absorção, emissão ou espalhamento da radiação eletromagnética de átomos ou moléculas. E por se tratar de técnicas analíticas, fornecem uma série de dados relevantes para a análise dos processos de soldagem, Hollas (1996). A espectrometria de emissão é empregada, então, na identificação dos respectivos comprimentos de onda, a partir de onde se obtém os parâmetros termodinâmicos e quânticos para o cálculos das propriedades de interesse, veja Fig. (1). No caso da soldagem a análise qualitativa (identificação dos elementos) permite detectar a contaminação da solda (Onsoien et al, 1995), selecionar e qualificar métodos de proteção gasosa ( Tusek et al, 2000) e estudar o grau de dissolução de solda com metais dissimilares (Lacroix et al, 1999). Já a análise quantitativa, medição da intensidade de cada um dos comprimentos emitidos pela radiação do plasma, permite o diagnóstico das principais propriedades do plasma, sua temperatura eletrônica e densidade.

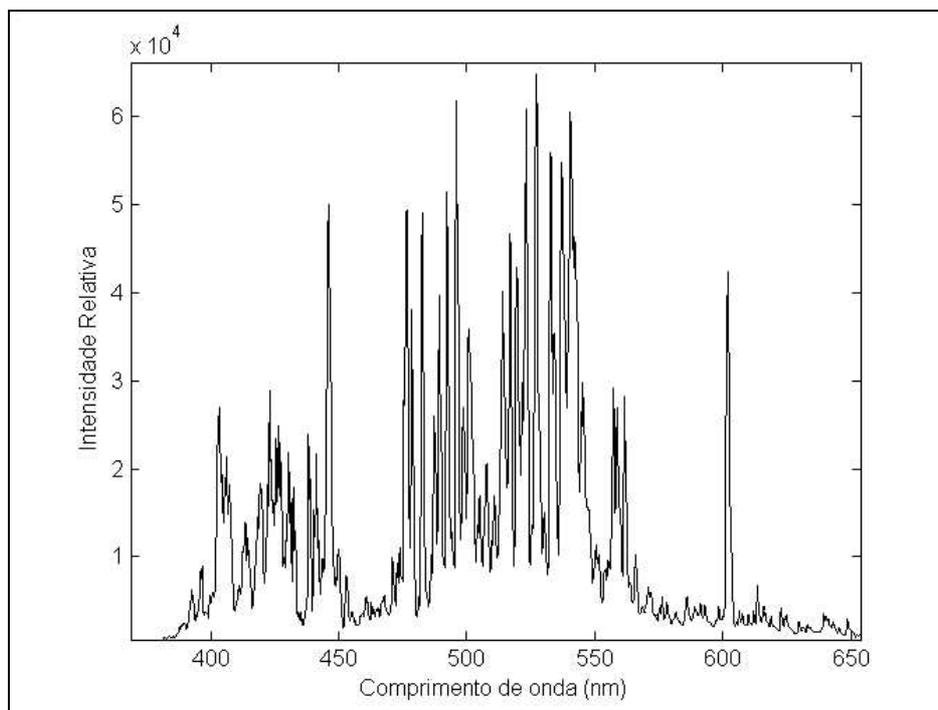


Figura 1. Espectro emitido por solda MAG sobre uma placa de aço.

## 1.2. Cálculo da Temperatura do Plasma

A temperatura do plasma é calculada através da temperatura dos elétrons (temperatura cinética dos elétrons), admitindo a hipótese de equilíbrio termodinâmico local (LTE, sigla em inglês), isto significa que as partículas tem distribuição energética dada pela equação de Maxwell e que os processos de colisão são dominantes sobre os radiativos. Ou seja, a temperatura dos elétrons e das partículas pesadas são similares, Griem (1964).

A hipótese de LTE pode ser verificada através da Eq. (2), dada por Griem (1964), onde  $N_e$  é a densidade eletrônica em ( $m^{-3}$ ),  $T_e$  é a temperatura do elétron em (K) e  $\Delta E$  é a diferença entre os intervalos energéticos da transição em (eV).

$$N_e \geq 1,6 \times 10^{12} \sqrt{T_e} (\Delta E)^3 \quad (2)$$

Vilarinho (2003), analisou diversos trabalhos sobre a validade da hipótese de LTE onde se conclui que a região de validade se limita ao centro do arco, o que define a região a ser observada pelo arranjo ótico.

O valor típico da Eq. (2) calculado por Lacroix et al (1999), para o valor da densidade na soldagem MAG é  $N_e \geq 1,81 \times 10^{19} m^{-3}$  e será utilizado neste trabalho.

No caso de LTE, verifica-se as leis de Maxwell, Boltzmann e Saha. A lei de Boltzmann permite o cálculo da temperatura do plasma, e a lei de Saha o cálculo de sua densidade eletrônica, Chen (1977).

A temperatura dos elétrons na coluna de plasma é estabelecida usando a intensidade relativa de várias linhas de emissão, Griem (1964). Por um lado tem-se a intensidade de uma linha de emissão para a transição “m” para “n” ( $I_{mn}$ ) Eq. (3), que depende de  $A_{mn}$  a probabilidade de transição em ( $s^{-1}$ ),  $N_m$  a densidade no nível superior em ( $m^{-3}$ ),  $h$  a constante de Planck em (Js) e  $\nu_{mn}$  a frequência em ( $s^{-1}$ ).

$$I_{mn} = N_m A_{mn} h \nu_{mn} \quad (3)$$

Do outro lado temos a lei de Boltzmann:

$$N_m = \left( \frac{N}{Z(t)} \right) g_m \exp\left( \frac{-E_m}{kT} \right) \quad (4)$$

Onde  $N$  é a densidade total do nível,  $g_m$  é o peso estatístico e  $Z$  é a função de partição,  $k$  é a constante de Boltzmann ( $k=8,6173 \times 10^{-5} eVK^{-1}$ ), a Eq. (3) fica da seguinte forma,

$$\ln\left( \frac{I_{mn} \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m} \right) = \ln\left( \frac{Nhc}{Z} \right) - \frac{E_m}{kT} \quad (5)$$

Fazendo o gráfico do primeiro termo da Eq. (5) em função da energia do nível superior ( $E_m$ ) para um conjunto de linhas de emissão, onde os valores  $A_{mn}$  e  $g_m$  são tabelados (neste trabalho serão usados dados do NIST - National Institute of Standards and Thechnology, disponíveis pela internet - [http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/lines\\_form](http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/lines_form)). A inclinação da curva do ajuste linear é igual a  $-1/kT$ , onde  $k$  é a constante de Boltzmann, Lacroix (1999).

A temperatura dos elétrons também pode ser estimada pelo uso da razão das intensidades relativas de um par de linhas de emissão (subíndices 1 e 2 na Eq. (6)) do mesmo elemento químico, como proposto por Marotta (1994), que leva em conta a diferente distribuição de densidade ao longo do eixo da coluna de soldagem, mas que não necessita do cálculo da transformada de Abel.

$$Te \approx \frac{E_{m(1)} - E_{m(2)}}{k \ln \left[ \frac{E_{m(1)} g_{m(2)} I_{(1)} A_{mn(2)} \lambda_1}{E_{m(2)} g_{m(1)} I_{(2)} A_{mn(1)} \lambda_2} \right]} \quad (6)$$

Onde I é a intensidade relativa obtida pelo sistema de medição,  $f_{mn}$  é a força de amortecimento da transição  $m - n$ , que é tabelado. Este método é mais vantajoso para o propósito de se estabelecer uma monitoração em tempo real. As linhas a serem selecionadas devem respeitar a condição de que  $E_{m(1)} - E_{m(2)} > kT$  nos níveis energéticos superiores, Ancona et al (2001).

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Cordões de solda foram obtidos com o processo MAG com fonte inversora e os parâmetros utilizados estão na Tab. (1). Uma outra fonte de soldagem foi utilizada para a abertura do arco TIG sobre uma placa de cobre resfriada a água. O posicionamento da tocha TIG e a execução dos cordões de solda com o processo MAG foram executados com o auxílio de um robô de seis graus de liberdade. A Fig. (2) mostra o esquema da montagem.

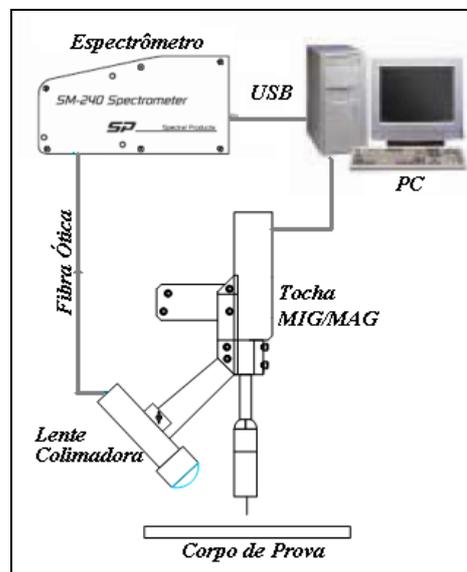


Figura 2. Montagem experimental

Tabela 1. Parâmetros de soldagem

<b>Soldagem MAG</b>	
Posição	Solda de topo
Corpos de prova (mm)	300x150x6,5 – AISI 1020
Gás	F34 –(66% Ar, 34% CO <sub>2</sub> )
Corrente (A)	140, 150, 200
Tensão (v)	18, 24, 26
Velocidade de soldagem (mm/s)	10
Comprimento Eletrodo, “Stick-out” (mm)	20
Fluxo de gás (l/min)	10
Diâmetro do arame (mm)	0,8

Para captar a emissão eletromagnética do arco, foi acoplado ao suporte da tocha um lente colimadora com distância focal de 11mm, conectada por uma fibra ótica de 2mm de diâmetro no núcleo com conector SM905, a um espectrômetro CCD compacto SM240-USB da Spectral Products com resolução de 0,3nm no intervalo de 300 a 575nm, grade de difração de 1200 g/mm a 400nm e obturador de 10 $\mu$ m.

Todo o procedimento de aquisição é feito através de um programa feito em Matlab<sup>®</sup> que controla o espectrômetro e uma placa de aquisição de sinais PC30-D, da Eagle Technologies, que registra o início e o fim da abertura do arco através de sua entrada digital conectada à saída digital do robô IRB.

Inicialmente foram realizadas as medições do espectro de emissão do arco TIG sobre uma base de cobre resfriada a água, como não há fusão e evaporação do material da base, o espectro obtido só contém linhas de emissão do argônio. Esse procedimento foi adotado para facilitar a identificação das linhas dos outros elementos do arco no momento de selecionar as que seriam monitoradas. O resultado para o arco TIG pode ser visto na fig. (3).

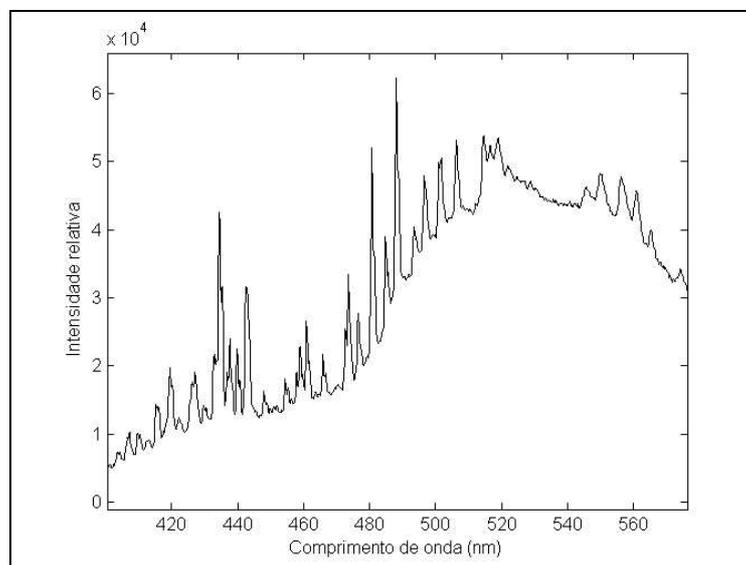


Figura 3. Espectro do arco TIG sobre placa de cobre resfriada.

O passo seguinte foi escolher os pares de linhas de emissão a serem monitorados para o cálculo da temperatura. A primeira escolha foi, obviamente, o Ferro (Fe). O segundo elemento escolhido foi o Manganês (Mn) devido a sua maior concentração, tanto no arame de adição como no corpos de prova, relativamente aos outros elementos, e por não sofrerem auto-absorção na coluna de plasma, os valores escolhidos estão na tab. (2).

Tabela 2. Comprimentos de onda para monitoração.

Elemento*	Comprimento de onda (nm)
FeI	561,5644
FeI	537,1490
MnI	482,3524
MnI	403,3062

\* O índice corresponde ao nível de ionização: I estado fundamental, II primeira ionização, etc.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma aferição do procedimento experimental adotado foi realizada a medição da temperatura eletrônica média, utilizando o método de Boltzman. A Fig. (4) mostra os resultados de temperatura para cada um dos elementos selecionados e a Tab. (3) mostra uma comparação com valores encontrados na literatura. A aparente disparidade nos valores de temperatura na Tab. (3) se deve a diferenças nos parâmetros de soldagem adotados em cada trabalho, bem como da diferença nas regiões do arco observadas .

Tabela 3. Comprimentos de onda para monitoração.

Trabalho	Temperatura FeI (K)	Temperatura MnI (K)
Ancona et al	9400	11700
Lacroix et al	11400	-
Vilarinho	7650	-
Experimentos	7145	18000

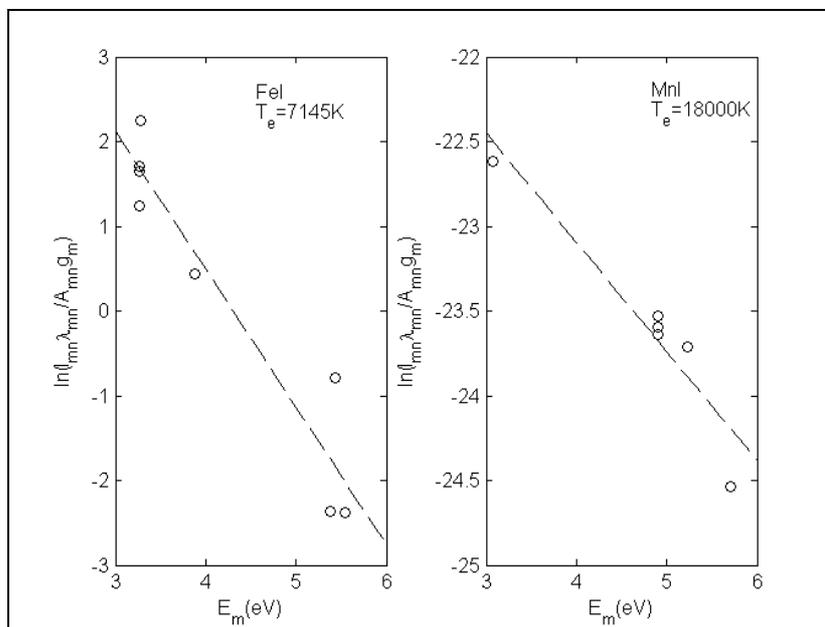


Figura 4. Gráfico de Boltzman para o cálculo da temperatura eletrônica do Fe e Mn, para solda MAG:118A, 24V.

A diferença de temperatura do plasma entre as medições simultâneas pelos gráficos de Boltzman, através dos dois elementos na coluna de plasma, era esperada, já que a distribuição de temperatura no plasma não é uniforme, como mostra Vilarinho (2003), tal como a distribuição dos vapores metálicos dos diversos elementos presentes na coluna de plasma. Este fato suscita uma série de possibilidades quanto a capacidade de um sistema de monitoração utilizando espectrometria, em fornecer informações sobre as diferentes regiões da solda como o infravermelho para a poça de fusão e o ultravioleta para o comportamento do eletrodo, dentro da região de LTE, Sforza et al (2002) .

Os resultados seguintes dizem respeito ao processo de monitoração numa tentativa de evidenciar a correlação entre o comportamento da temperatura eletrônica e o surgimento de defeitos.

Foi realizada uma série de cordões de solda utilizando os parâmetros que garantissem um cordão considerado com “boa solda”, e em seguida, foram simuladas pontualmente condições impróprias de soldagem para induzir o surgimento de defeitos no cordão. Em um primeiro momento os valores de temperatura para os elementos selecionados foram registrados a uma taxa de 45 Hz, o que dá

uma amostragem espacial de 0,22 mm ao longo do cordão de solda, para a velocidade de soldagem escolhida (10 mm/s).

Neste trabalho, o espectro foi observado na região do ultravioleta ao infravermelho próximo (320-575nm), focando uma região da solda que englobasse a poça de fusão e o arco, obtendo valores integrados de temperatura.

A Fig. (5), mostra o comportamento do sinal da temperatura eletrônica (em eV) calculadas para as linhas de emissão do ferro e do manganês, para um cordão de solda sem defeitos.

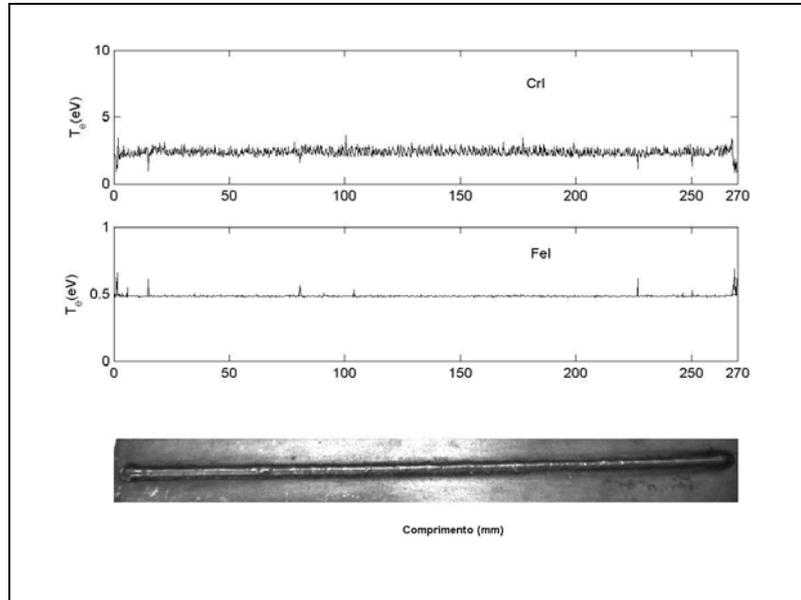


Figura 5. Comportamento da temperatura eletrônica ao longo de um solda sem defeitos.

A Fig. (6) mostra o comportamento do sinal de temperatura ao longo de um cordão de solda, onde foram induzidos alguns defeitos.

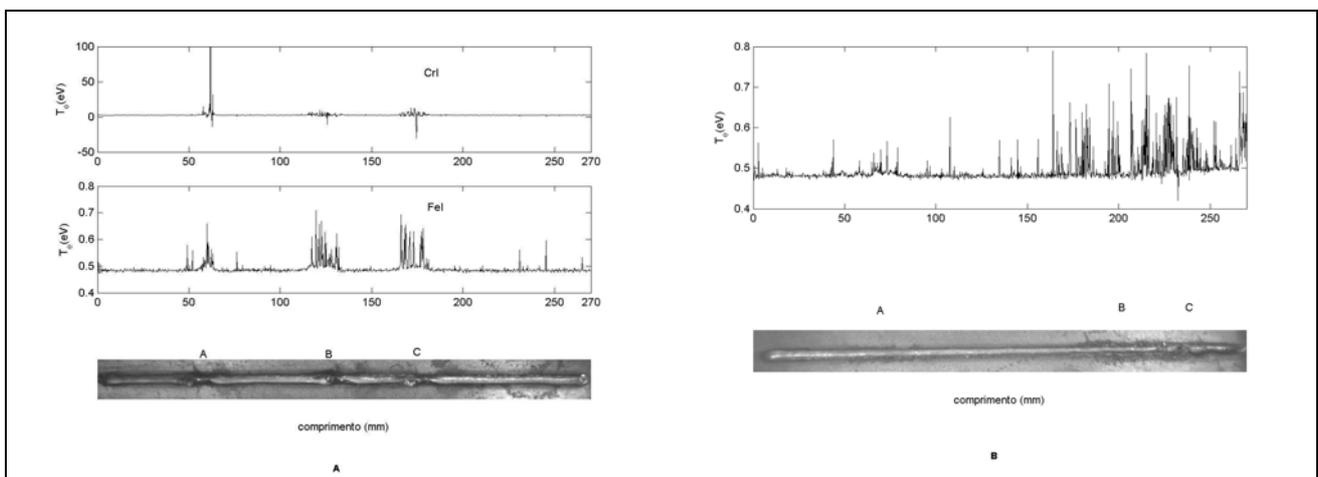


Figura 6. Comportamento da temperatura eletrônica ao longo de cordões de solda defeituoso.

Na Fig. (6a) os defeitos induzidos foram: A- contaminação por graxa, B – oxidação da solda, C – inclusão de escória. Na Fig. (6b), A - inclusão de metal (tungstênio), B – porosidade superficial, C – falta de penetração.

Outros defeitos foram simulados, como ondulação da chapa e vazios (furos na chapa com diâmetro de 1mm), obtendo-se resultados semelhantes, onde o desvio da temperatura média fica evidente nos pontos onde se apresentam os defeitos.

Numa segunda série de ensaios foram realizados cordões menores (150mm), novamente cordões com solda considerada sem defeitos e outras com defeitos induzidos pontualmente, à uma taxa de 12Hz . O resultado em termos dos valores médios e dos valores de seu desvio padrão podem ser vistos da Fig. (7).

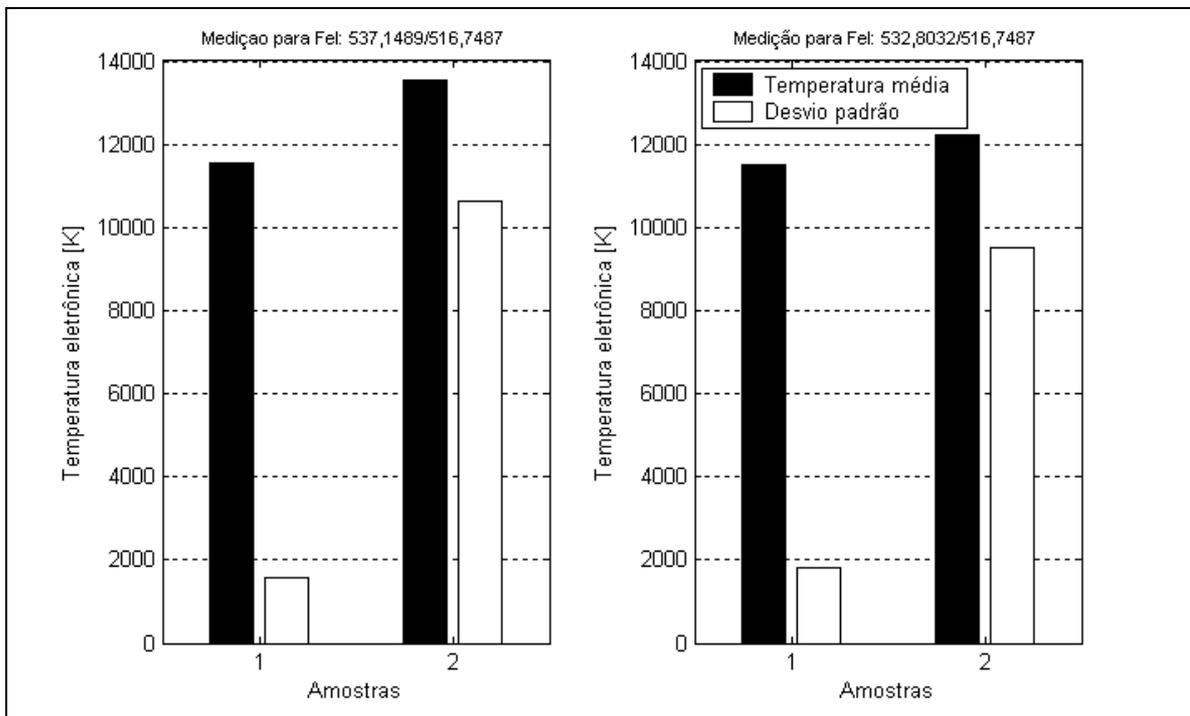


Figura 7. Média e desvio padrão para medidas da temperatura eletrônica.

Na Fig. (7), amostras com índice 1 indicam a respectiva média e desvio padrão para a solda sem defeitos, enquanto as de índice 2, as soldas com defeitos induzidos para dois pares de comprimentos de onda do FeI. O comportamento indicado na Fig. (7) mostra a menor sensibilidade do valor médio de temperatura à presença de defeitos, relativamente ao comportamento dos valores de desvio padrão, sendo este um método valioso na otimização dos parâmetros de soldagem e na detecção de defeitos pontuais.

Com base nessa evidência, foi adotado para o procedimento de monitoração em tempo real o cálculo dos “desvios padrões acumulados” ( $\sigma$ ), ou seja, o valor de  $\sigma_n$  (desvio padrão no ponto amostrado  $n$ ) é igual ao valor de  $\sigma_1^n$  (desvio padrão dos pontos de 1 até  $n$  da temperatura eletrônica). A Fig. (8) mostra as curvas dos valores de  $\sigma$  de temperaturas eletrônicas em soldagens com e sem defeitos. A linha vermelha ( $\sigma_t$ ) é o desvio padrão dos valores de temperatura registrados.

As regiões delimitadas pela linha vertical, indicadas pela letra A nas abscissas, correspondem aos pontos da ignição do arco de soldagem com sinais com grande perturbação, ignorados pela rotina de monitoração.

O primeiro gráfico mostra o comportamento típico de  $\sigma$  em uma soldagem sem defeitos, os valores de desvio padrão acumulados não ultrapassam o valor de desvio padrão do sinal adquirido, em contrapartida, no segundo gráfico pode-se ver que para alguns pontos os valores ultrapassam a linha de  $\sigma_t$  e aqui faz-se o uso também do valor de  $\sigma_a$  (média do desvio padrão acumulado) para efeito de cálculo na rotina de monitoração. O filtro de Kalman utilizado, fornece o valor estimado ótimo de  $\sigma_a$ , mostrado como  $\sigma_p$  no gráfico.

A rotina se utiliza dessas características do comportamento do desvio padrão para, a partir da estimativa obtida com o filtro, calcular os pontos que estão excedendo os valores de  $\sigma_p$  e inferir a ocorrência dos defeitos. As setas no segundo gráfico são as saídas gráficas da rotina de monitoração, indicando a posição dos defeitos encontrados.

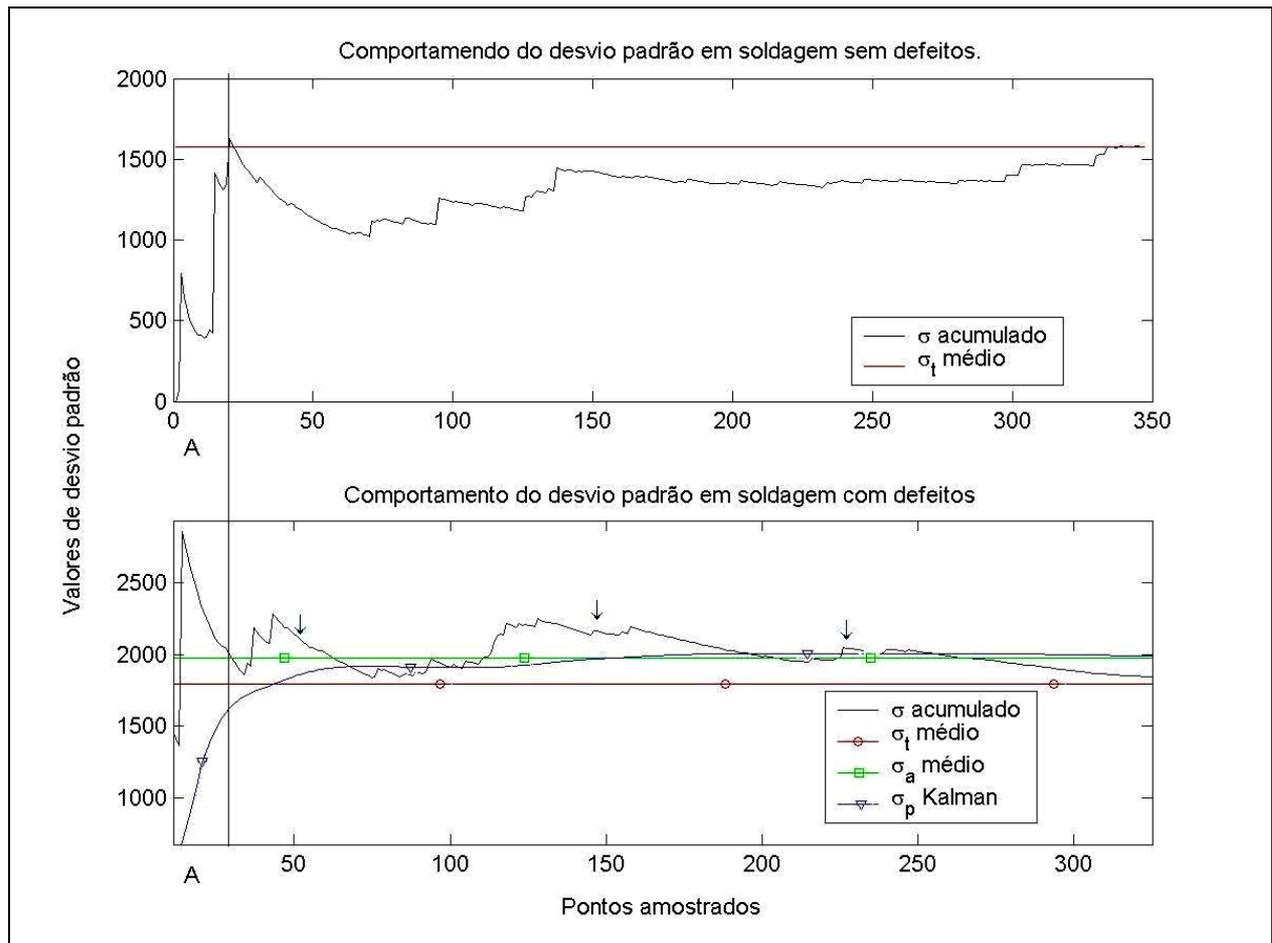


Figura 8. Comportamento dos valores de desvio padrão para as temperaturas amostradas.

#### 4. CONCLUSÃO

Foi proposto um sistema de monitoração para soldagem MIG/MAG, através da medição da temperatura eletrônica do arco plasma, pelo método da razão de linhas espectrais dos mesmos elementos, no mesmo estágio de ionização. Tendo sido confirmada a correlação entre os defeitos no cordão de solda e o comportamento do sinal de temperatura eletrônica.

As principais características desse sistema são:

- São bastante compactos, o espectrômetro e o sistema de focalização não pesam mais que 350g e ocupam um volume bastante reduzido;
- Vários defeitos puderam ser identificados: falta de penetração, ondulação na chapa, porosidade superficial, inclusão metálica e de escória.
- A taxa de amostragem permite a detecção de defeitos inferiores a 1mm;
- O sistema é não intrusivo e permite a utilização com qualquer metal de base, cuja composição seja conhecida.

A metodologia para localização dos defeitos pela análise do comportamento dos valores de desvio padrão se mostrou adequada, tanto pela acurácia alcançada, quanto pela velocidade de processamento o que não compromete a taxa de amostragem.

Uma análise estatística mais aprofundada está sendo realizada para a definição dos parâmetros para a monitoração bem como de experimentos com soldagem manual por operador especializado para a comprovação da funcionalidade do sistema nesse modo de aplicação.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ancona, A., Spagnolo, V., Lugarà M.P., 2001, "Optical Sensor for Real-Time Monitoring of CO<sub>2</sub> Laser Welding Process", *Applied Optics*, Vol. 40, N°33.
- Chen, F.F, 1977, "Introduction to Plasma Physics", Plenum Press, New York.
- Degout, D., Catherinot, A., 1986, "Spectroscopic Analysis of the Plasma Created by a Double-Flux Tungsten Inert Gas (TIG) Arc Plasma Torch", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 19, pp. 811-823.
- Griem, H.R., 1964, "Plasma Spectroscopy", New York: McGraw-Hill, Cap. 13 e 14.
- Haidar, J., Lowke, J.J., 1996, "Predictions of metal droplet formation in arc welding", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol 30, pp. 94.
- Hollas, J.M., 1996, "Modern Spectroscopy", 3°ed..
- Kim, W., Allemand, C., Eagar, T.W., 1987, "Visible Light Emissions during Gas Tungsten Arc Welding and its Application to Weld Image Improvement", *Welding Journal*, pp. 369-s – 377-s.
- Lacroix, D., Boudot, C., Jeandel, G., 1999, "Spectroscopic Studies of GTA Weldin Plasmas. Temperature Calculation and Dilution Measurement", *Eur. Phys. J., AP* 8, pp. 61-69.
- Marotta, A., 1994, " Determination of Axial Thermal Plasma Temperatures Without Abel Inversion", *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 27. Pp. 268-272.
- Masterton, Slowinski, Stanski, 1996, "Princípios de Química", Ed. LTC, Cap. 7, 6°ed..
- Moon H.S., Na, S.J., 1996, "A Neuro-Fuzzy Approach to Select Welding Conditions for Welding Quality Improvement in Horizontal Fillet Welding", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 15, N° 6.
- Onsoien, M., Peters, R., Olson, D.L., Liu, S., 1995, "Effect of hydrogen in na Argon GTAW Shielding Gas: Arc Characteristics and Bead Morphology", *Welding Journal*, pp. 10s-15s.
- Sforza, P., Blasiis, D., 2002, "On-Line Optical Monitoring System for Arc Welding", *NDT&E Internacional*, Vol. 35, pp. 37-43.
- Tusek, J., Suban, M., 2000, "Experimental Research of the Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas in Arc Welding of high-Alloy Satainless Steel", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 25, pp. 369-376.
- Vilarinho, L.O., 2003, "Development of Experimental and Numerical Techniques for TIG Arc Characterisation", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.