

DETECÇÃO DE DEFEITOS EM SOLDAGEM TIG UTILIZANDO SENSOR INFRAVERMELHO¹

*Fernand Díaz Franco²
Daniel Flavio Bebianó³
Sadek C. Absi Alfaro⁴*

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação do sensoriamento infravermelho para o monitoramento da temperatura da poça de fusão em processos TIG. O propósito do estudo é desenvolver um sistema capaz de detectar, em tempo real, a presença de defeitos na solda. A temperatura da poça, medida por meio de um sensor infravermelho, está relacionada com a penetração da solda. Desta forma, quando se monitora a temperatura da poça, a penetração é também monitorada. Vários experimentos foram desenvolvidos, em alguns dos quais se variou a corrente e as mudanças na temperatura foram registradas; em outros, para correntes fixas, alguns defeitos foram introduzidos no caminho do cordão de solda. Estes defeitos simulados ocasionaram mudanças abruptas no valor da média da temperatura. A variação da temperatura é avaliada por um algoritmo de detecção de mudança que indica a presença ou não do defeito. Para identificar os defeitos nas amostras de emissões infravermelhas, estas foram analisadas por gráficos em função do tempo e por métodos estatísticos. Nos experimentos onde a corrente sofreu variação observou-se uma mudança proporcional na temperatura registrada pelo sensor. Algoritmos de detecção de mudança foram utilizados. Eles permitem, dada a sua simplicidade, a detecção e localização de defeitos em tempo real.

Palavras-chave: Sensoriamento; Infravermelho; TIG; Detecção de mudança.

DEFECTS DETECTION IN TIG WELDING USING INFRARED SENSOR

Abstract

This paper presents an evaluation of the use of an infrared sensor for monitoring the welding pool temperature in TIG processes. The purpose of this study is to develop a system capable of detecting, in real time, defects in welding. The welding pool temperature, measured by an infrared sensor, is related to the weld penetration depth. Therefore, by monitoring the weld pool temperature, the penetration depth is also monitored. Various experiments were performed, some in which the current was varied and the temperature changes were registered; others in which defects were introduced throughout the path of the weld bead with a fixed current. These simulated defects resulted in abrupt changes in the average temperature values. The temperature change is evaluated by a change detection algorithm which indicates the presence or absence of defects. To identify defects in the samples under infrared emissions, they were analyzed through graphics as a function of time and statistic methods. In the experiments in which current varied, a proportional change in temperature measured by the sensor was observed. Change detection algorithms were used. They allow, given its simplicity, the detection and localization of defects in real time.

Key words: Sensoring; Infrared; TIG; Change detection.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Engenheiro Físico. Universidade de Brasília, ENM-FT, GRACO.*

³ *Engenheiro Mecatrônico. Universidade de Brasília, ENM-FT, GRACO.*

⁴ *Ph.D. Universidade de Brasília, ENM-FT, GRACO.*

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos caminham no sentido de aprimorar os produtos melhorando a qualidade e o desempenho e reduzir custos. Muitos pesquisadores buscam aperfeiçoar as aplicações relacionadas à soldagem e reduzir custos.

A utilização de testes não destrutivos e a reparação de defeitos são processos demorados e dispendiosos. Para prevenir isto, o monitoramento online e o controle do processo de soldagem podem favorecer a correção e a redução de muitos defeitos antes da solidificação do metal, reduzindo o custo da produção.

Com os contínuos avanços na tecnologia digital e de sensores, novos métodos, com uma precisão relativamente alta para identificação de perturbações durante o processo de soldagem, têm sido possíveis. Posicionamento do arco, controle da corrente, contaminações na superfície e penetração da solda são algumas variáveis-chaves que devem ser controladas para assegurar uma soldagem satisfatória.⁽¹⁾

As técnicas relacionadas com a otimização dos processos de soldagem são baseadas em metodologias experimentais. Estas técnicas são fortemente relacionadas a provas experimentais e buscam estabelecer relações entre os parâmetros de soldagem e a geometria do cordão de solda.

A introdução do controle em malha fechada ou controle adaptativo aos processos de soldagem devem ser feitos pelo monitoramento de uma variável ou um conjunto de variáveis que possam identificar uma alteração no processo. Para a implementação de um sistema adaptativo a processos de soldagem deve-se identificar um “envelope” ou um conjunto de variáveis monitoráveis. Estas variáveis devem ser usadas como valor de referência no processo de controle, fazendo com que o sistema de controle inicie com um parâmetro ajustável (corrente de soldagem, voltagem, etc.) e garanta as características do cordão com valores desejáveis. Uma vez que os parâmetros da solda variam em concordância com o material, tipo de processo escolhido, dimensões da placa e geometria do cordão de solda, o ajuste do valor de referência da variável monitorada vai depender do estabelecimento do conjunto de parâmetros otimizados; os quais dão as especificações desejáveis do cordão de solda.

Os pesquisadores usam sistemas adaptativos para melhorar as características do cordão de solda com técnicas de monitoramento direto ou indireto. Os sistemas de monitoramento indireto são mais usados buscando o relacionamento de elementos como vibrações da poça de fusão, distribuição de temperatura e emissões acústicas com o tamanho, geometria ou penetração da solda.⁽²⁾ Hong⁽³⁾ descreve: “As variáveis mais usadas no controle da soldagem são: monitoramento infravermelho, monitoramento acústico, vibrações da poça de fusão e depressões da poça de fusão”

Visando aperfeiçoar a análise humana durante a identificação de defeitos no processo, muitos pesquisadores foram levados a desenvolver técnicas alternativas para a identificação automática de defeitos considerando diferentes classes de sinais, como o espectro do plasma,⁽⁴⁾ ultra-som,⁽⁵⁾ visão computacional.⁽⁶⁾

A soldagem por arco é um método basicamente térmico. Desta forma, o registro do sinal infravermelho é uma escolha natural para o monitoramento do processo. O sensoriamento infravermelho é uma medida de não contato de emissões na região infravermelha do espectro eletromagnético.

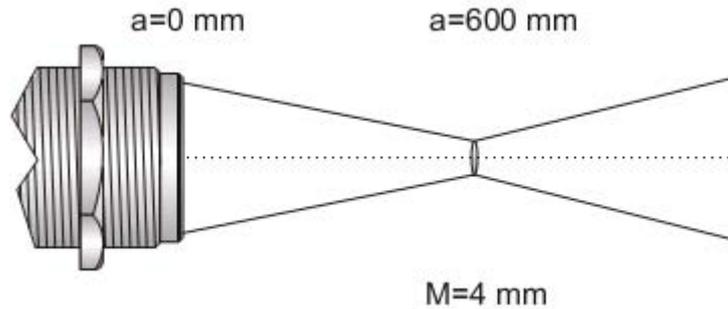
1.1 Monitoramento Infravermelho

Durante um processo de soldagem, a alta temperatura e as propriedades termofísicas, como a difusividade térmica, causa enormes gradientes de temperatura na região da poça de fusão. A convecção na poça, forma da poça e a transferência térmica entre os metais sólidos e líquidos, determinam a distribuição de temperatura na placa e sobre a superfície. Numa solda ideal, estas temperaturas superficiais podem apresentar padrões regulares e repetitivos. As perturbações na penetração da solda podem ser claramente detectadas nas variações na distribuição de temperatura superficial.⁽⁷⁾

É necessário medir a temperatura com um sensor que não seja invasivo, para evitar gerar defeitos com a alteração dos parâmetros da solda. Dado isto, o sensor de temperatura de não contato é o adequado. Um termômetro infravermelho mede a temperatura pela detecção da energia infravermelha emitida por todos os materiais que tem temperatura acima de zero absoluto, (0° Kelvin).

As técnicas de monitoramento infravermelho para a poça de fusão são: scanner superficial e monitoramento de ponto. O scanner superficial mostra uma visão bidimensional da distribuição de temperatura na superfície da placa, tornando possível uma análise completa dos processos de transferência durante a soldagem.^(1,7) Levando-se em consideração que se trabalha com imagens bidimensionais, a aplicação do scanner superficial demanda uma estrutura computacional melhor (hardware e software), tomando um tempo de processamento maior.⁽⁸⁾ Por outro lado, a técnica de monitoramento num ponto demanda uma estrutura computacional menor, requerendo também um tempo de processamento mais curto que o processamento de imagens, o que a torna mais apropriada para o controle em tempo real.^(9,10) Estudos recentes apresentam controles adaptativos para soldagem usando o monitoramento infravermelho de uma pequena área (ponto) da poça de fusão.⁽¹¹⁾ O esquema mais simples consiste numa lente que focaliza a energia infravermelha no detector, que converte a energia infravermelha num sinal elétrico. Esta configuração facilita a medição de temperatura sem precisar do contato com o material a ser medido.⁽¹²⁾

Para fazer uma correta medição com este tipo de sensores, é preciso focalizar a área que se deseja medir; isto é possível uma vez que se conheça a distância focal da lente usada. A Figura 1 mostra a distância focal de um sensor infravermelho. Neste caso, a distância focal encontra-se num comprimento de 600 mm e tem radio de 4 mm.



Fonte: Manual sensor TL-S-25.

Figura 1. Distância focal de um sensor infravermelho.

1.2 Detecção de Falha

Este trabalho compara dois algoritmos para detecção de defeitos. No primeiro é usado um filtro Kalman convencional junto ao cálculo da distância de Mahalanobis para avaliar a presença de falhas. No segundo algoritmo é usada uma regressão linear do filtro Kalman – LRKF e o teste de verossimilhança generalizada⁽¹³⁾ para determinar a distância entre o modelo autoregressivo e o sinal lido.

1.2.1 Detecção de mudança

É uma técnica estatística que pode detectar mudanças abruptas nos sinais. Dado que a soldagem é um processo estocástico,⁽¹⁴⁾ algumas propriedades e algoritmos podem ser aplicados. A Figura 2 mostra o esquema básico de detecção.



Figure 2. Esquema básico de detecção de mudança.⁽¹⁵⁾

Em certas suposições, os filtros adaptativos tomam o sinal lido e a transformam numa seqüência de resíduos que resultam num ruído branco antes que a mudança ocorra.⁽¹⁵⁾

Se não tiver mudanças no sinal e o modelo for correto, os resíduos serão a seqüência de variáveis independentes com média zero e variância conhecida. Quando uma mudança acontece, pode refletir na variação da média, a variância ou ambas que fazem com que o resíduo seja maior. O ponto principal é estabelecer quão grande é este valor para assumir que uma mudança aconteceu. O teste estatístico decide onde o desvio é significativo ou não. A avaliação é usualmente feita em quatro situações, mudança na média, na variância, na correlação e mudança no sinal de correlação. Neste trabalho a avaliação foi feita na média e na base dos resíduos.

A regra de parada ou *Stopping rule* é baseada na distância medida. Muitos algoritmos de detecção de mudança decidem entre duas hipóteses:

$$\begin{aligned} H_0 : E(s_t) &= 0, \\ H_1 : E(s_t) &> 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Esta regra é realizada pelo valor calculado do filtro passa baixa s_t e a compara com o limite. Se o valor é maior, o alarme é ativado.

1.2.2 Filtro Kalman

Uma simples descrição do comportamento do sinal infravermelho como uma serie discreta no tempo pode ser feita em termos de um modelo autoregressivo (AR) de ordem m . O valor da amostra presente é representado por uma combinação linear de m amostras passadas, acrescido por um parâmetro de incerteza. Para a temperatura de uma componente $z[t]$, segundo Pollock⁽¹⁶⁾ o modelo AR de ordem m é dado pela equação 2.

$$Z[t] = \sum_{i=1}^m a_i z[t-i] + \varepsilon[t] \quad (2)$$

Onde $a_i = \{a_1, \dots, a_m\}$ são os coeficientes do modelo AR e $\varepsilon[t]$ é a componente do ruído que representa a imprecisão do sinal lido durante a soldagem. Assume-se que a seqüência $\varepsilon[1 : t] = \{\varepsilon[1], \dots, \varepsilon[t]\}$ é independente e identicamente distribuída (i.i.d) Gaussiana com media $E\{\varepsilon[n]\} = 0$, e variância $E\{(\varepsilon[n])^2\} = \sigma^2$.

A partir da observação das diferentes características estatísticas entre os resíduos do ruído e da presença de um defeito num modelo AR de ordem m , é possível estabelecer um sistema de estimação recursiva valendo-se de técnicas de filtragem estocástica para observar e rastrear o intervalo na temperatura, no qual, a gaussianidade da seqüência é preservada. Uma destas ferramentas é o filtro Kalman. O vetor de estados é dado pela equação (3).⁽¹⁷⁾

$$x[k] = A[k]x[k-1] + w[k] \quad (3)$$

$x[k]$ é o vetor de estados de dimensão n . $A[k]$ é uma matriz quadrada de transição de estado, $w[k]$ é uma seqüência de dimensão n de ruído branco Gaussiano de média nula. O modelo de observação é dado pela equação 4.

$$z[k] = H[k]x[k] + v[k] \quad (4)$$

$z[k]$ é um vetor de observação de dimensão m , $H[k]$ é a matriz de medição e $v[k]$ representa ruído branco Gaussiano de média nula. Supõe-se que os processos w e v são decorrelacionados e:

$$\begin{aligned} E\{w[k]w[i]^T\} &= \begin{cases} Q[k], & \text{if } k = i \\ 0, & \text{if } k \neq i \end{cases} \\ E\{v[k]v[i]^T\} &= \begin{cases} R[k], & \text{if } k = i \\ 0, & \text{if } k \neq i \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

Para este sistema, o estado inicial $x[0]$ é uma variável aleatória Gaussiana de média $\hat{x}[0]$ e matriz de covariâncias $P[0]$. $x[0]$ se supõe estar decorrelacionado dos

processos \mathbf{w} e \mathbf{v} . O problema básico do filtro de Kalman consiste em obter estimativas $\hat{x}[k|k]$ de $x[k]$ a partir de medições $\{z[1], z[2], \dots, z[k]\}$, de forma a minimizar uma métrica de erro métrico quadrático. Esta métrica é dada pelo traço da matriz de covariâncias do erro *a posteriori* apresentado na equação 6.

$$P[k|k] = E\{(x[k] - \hat{x}[k|k])(x[k] - \hat{x}[k|k])^T\} \quad (6)$$

Felizmente este problema de estimação apresenta solução recursiva. Esta solução é dada por duas etapas. Primeiramente tem-se a etapa de predição (entre observações. Equação 7).

$$\hat{x}[k|k-1] = A[k]\hat{x}[k-1|k-1] \quad (7)$$

$$P[k|k-1] = A[k]P[k-1|k-1]A[k]^T + Q[k] \quad (8)$$

A seguir, tem-se a etapa de correção em que a observação atual é usada para corrigir a predição $\hat{x}[x|k-1]$:

$$\hat{x}[k|k] = \hat{x}[k|k-1] + H[k](Z[k] - H[k]\hat{x}[k|k-1]) \quad (9)$$

$$P[k|k] = P[k|k-1] - K[k]H[k]P[k|k-1] \quad (10)$$

Em que:

$$K[k] = P[k|k-1]H[k]^T [H[k]P[k|k-1]H[k]^T + R[k]]^{-1} \quad (11)$$

É denominado de ganho Kalman.

A idéia principal na identificação do defeito está no uso de um teste estatístico que, em conjunto com a filtragem estocástica, verifica se as propriedades da amostra infravermelha correspondem às estimativas do modelo AR fornecidas pelo filtro de Kalman. Caso o teste falhe, assume-se que a amostra atual corresponde à presença do defeito.⁽¹⁸⁾

A comparação entre o sinal infravermelho e a estimação recursiva consiste na hipótese probabilística qui-quadrática através da distância de Mahalanobis.⁽¹⁹⁾ Esta distância é uma medida que indica num senso probabilístico, o quanto a mostra atual do registro é compatível com o modelo do sinal infravermelho, estimado pelo filtro Kalman.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Todos os experimentos apresentados neste artigo foram feitos usando *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) sobre a chapa. As placas usadas foram SAE 1020 de dimensões de 6.35mm de espessura e tamanho 30x20 cm. As superfícies foram preparadas para a soldagem usando técnicas padrões. Outros parâmetros importantes das experiências apresentam-se na Tabela 1.

A fonte de soldagem usada para realizar as experiências foi a *Inversal 450*. A máquina foi configurada para operar no modo remoto. Para impedir que a tocha se movimentasse para realizar a solda, uma mesa posicionadora linear foi usada. A mesa foi controlada por um microcontrolador que se comunicava com o computador

usando o protocolo RS-232. O computador enviava ao microcontrolador parâmetros de solda como a velocidade de soldagem, tempo da experiência e o sinal de início.

Tabela 1. Condições de soldagem.

Velocidade de soldagem (Mesa posicionadora)	2.5 mm/s
Gás de proteção	Argônio 10 L/min
Corrente	90 A DC
Eletrodo	Negativo EWTh-2, 1.6mm
Stand-Off	5 mm

A radiação infravermelha foi capturada por um sensor infravermelho modelo TL-S-25 que gera uma corrente entre 4 mA– 20 mA que é proporcional à temperatura registrada (Rango de medição 800°C – 2.500°C). Um filtro infravermelho foi usado para prevenir a saturação do sensor quando foram usadas correntes acima de 150 A. Finalmente, se utilizou um conversor de corrente/tensão. Para digitalizar o sinal usou-se uma placa de aquisição modelo PCI703S-16.

Para localizar a posição a ser medida, o modelo TL-S-25 provê uma ferramenta de posicionamento do sensor. Esta ferramenta é um laser incorporado ao sensor, que mostra o foco da lente usada no sensor; que para o modelo utilizado, encontra-se o foco a 600 mm. A figura 3 mostra o posicionamento do sensor.

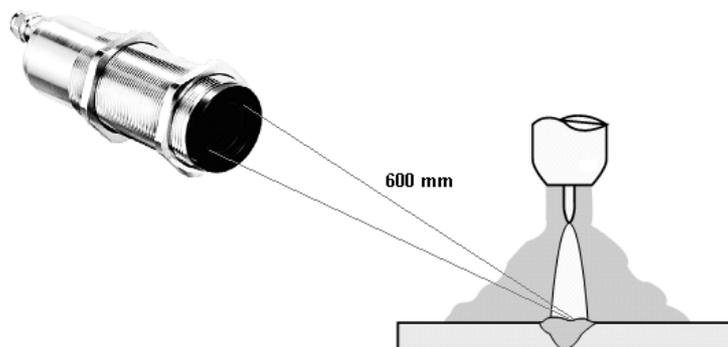


Figura 3. Posicionamento do sensor de temperatura.

A fonte de soldagem foi controlada por um computador que gera um sinal analógico entre -5 e +5 volts e dois sinais digitais. Se o sinal analógico tem um valor dentro desta região, a fonte gera uma corrente entre -450 A e 450 A; enquanto os sinais digitais controlam a abertura e fechamento do gás de proteção e a ignição da fonte. LabVIEW foi usado para adquirir os dados de corrente, tensão e temperatura além de controlar a fonte de soldagem. Um controle aberto foi implementado para ajustar os parâmetros da solda. A corrente, voltagem e a temperatura foram digitalizadas usando uma placa de aquisição (PCI703S-16). A taxa de amostragem foi de 15.000 amostras por segundo para cada canal lido. Os dados foram filtrados usando um filtro Butterworth com frequência de corte de 100 Hz. As variáveis observadas foram apresentadas em função do comprimento do cordão para uma melhor visualização. Experiências foram feitas para correntes fixas e os defeitos foram inseridos ao longo do comprimento da solda. O esquema experimental se apresenta na Figura 4.

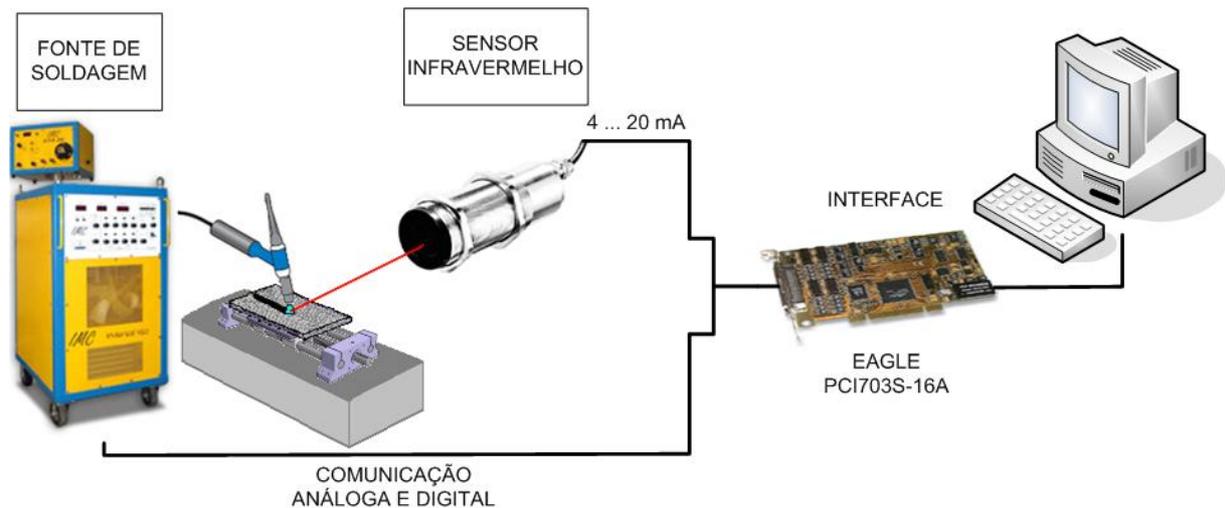


Figura 4. Esquema experimental. Diagrama de blocos da aquisição e controle.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 mostra uma experiência na qual a corrente foi mudada no transcurso do processo. O propósito destas variações é mostrar a dependência da temperatura a mudanças na corrente, dado que mudanças inesperadas na corrente podem produzir defeitos durante a soldagem. Observa-se que incrementos na corrente correspondem mudanças no sinal da temperatura com igual proporção. Como se esperava, igual comportamento se apresenta para reduções na corrente.

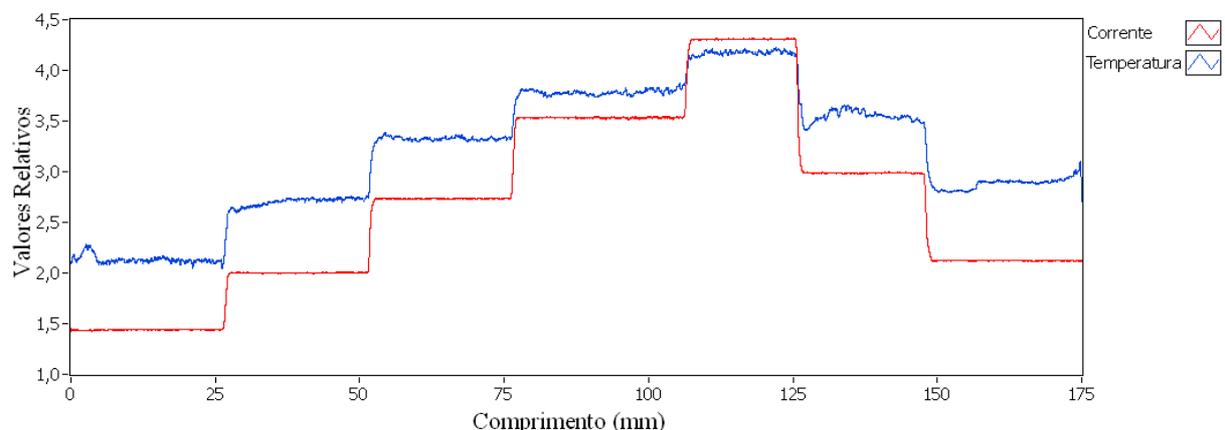


Figura 5. Comportamento da temperatura com variações na corrente.

3.1 Detecção de Defeitos

As Figuras 6, 7 e 8 mostram experimentos que incorporaram defeitos artificiais ao longo do cordão de solda, visando registrar o comportamento da temperatura. A temperatura apresenta variações na vizinhança dos defeitos e sobre eles.

A Figura 6 mostra o resultado de uma experiência na qual defeitos de pequenas peças de ferro foram introduzidos nos comprimentos 7 mm, 60 mm, 100 mm, 149 mm. Esta figura mostra o sinal lido pelo sensor junto com o sinal filtrado segundo o LRKF. Podemos observar os valores produzidos pelo algoritmo de detecção de mudança, que junto com a regra de parada mostra o defeito. Observa-se que todos os defeitos cumpriram com o valor mínimo da regra de parada, mas foram observadas outras regiões onde o algoritmo também mostra a presença de

uma anomalia. No comprimento 46 mm mostra-se uma mudança na largura do cordão de solda, demonstrando que se apresentou uma mudança involuntária na fonte que causou a anomalia.

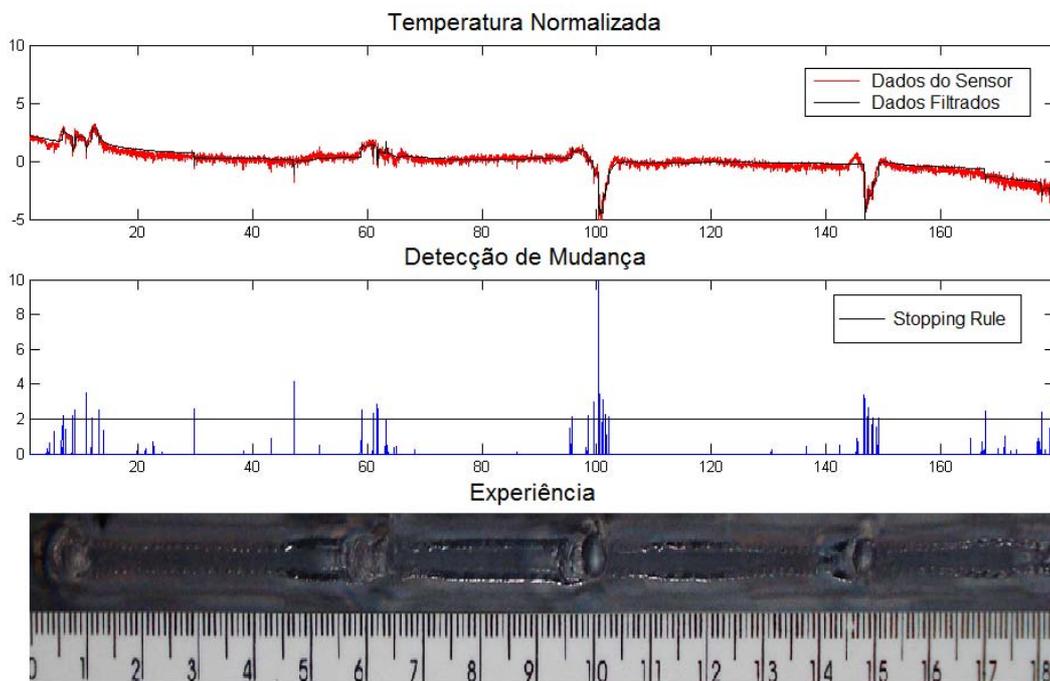


Figura 6. Placa com defeitos de ferro.

As Figuras 7 e 8 mostram experiências nas quais os defeitos gerados foram causados pela presença de água durante a soldagem. A Figura 7 mostra a análise feita com o teste de verossimilhança generalizada e a Figura 8 mostra a análise feita segundo a distância de Mahalanobis. Na Figura 7 observamos claramente 4 defeitos, os dois últimos ficaram no limite proposto pela regra de parada (Stopping Rule) e outras duas anomalias foram detectadas perto dos comprimentos 108 mm e 110 mm. Em só um deles (108) observa-se a variação da forma do cordão.

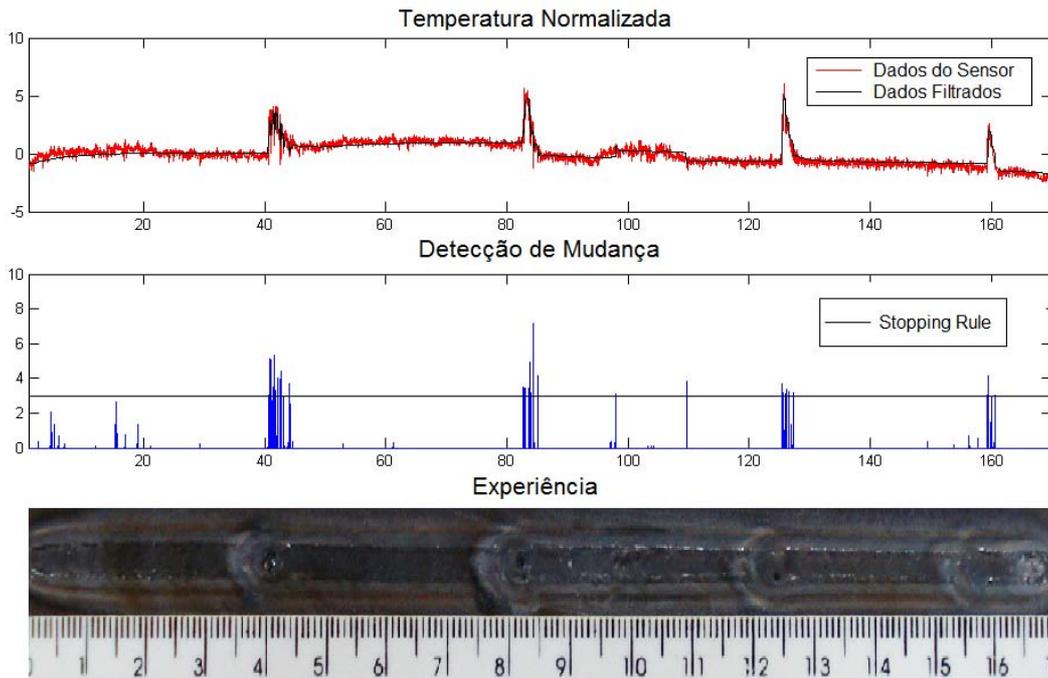


Figura 7. Placa com defeitos de água e análise de detecção de mudança.

A Figura 8 mostra a análise de acordo com a distância de Mahalanobis. Observa-se que na região que não tem defeitos (temperatura constante) a distância está localizada embaixo do limite proposto pelo teste estatístico. Durante a presença de defeitos, o resíduo entre a amostra real $z[k]$ e a amostra estimada pelo AR coeficiente aumenta de tal forma que a distância ultrapassa o limite estabelecido onde a presença do defeito é verificada. Observamos que este teste não detecta a presença de defeito no comprimento 105 mm.

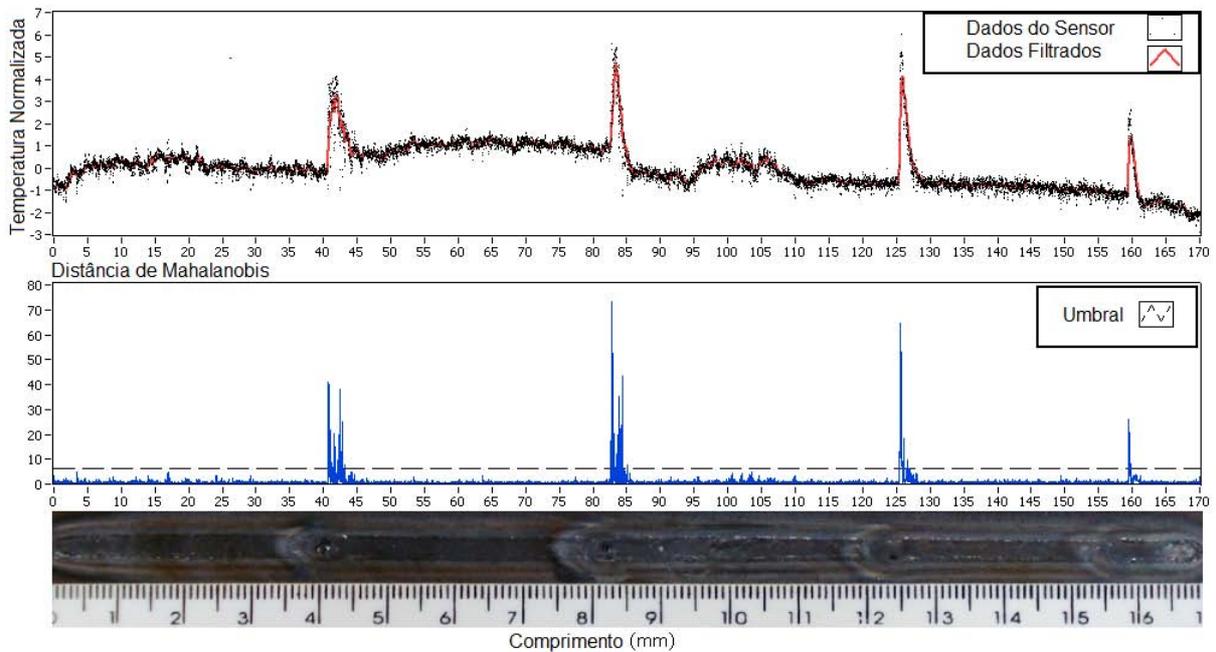


Figure 8. Placa com defeitos de água e análise segundo a distância de Mahalanobis.

4 CONCLUSÃO

Neste artigo foi discutida a viabilidade do uso dos sinais infravermelhos como indicador da presença de defeitos durante processos GTAW. Junto com o algoritmo de detecção de mudança, o sistema monitora o resíduo do algoritmo de detecção, procurando mudanças na média. O método proposto mantém o modelo de regressão onde os resíduos são filtrados pelo filtro Kalman. O algoritmo da distância de Mahalanobis monitora mudanças significativas na saída do filtro Kalman. O filtro Kalman possui bom desempenho na detecção de mudanças provenientes de dados ruidosos.

A simplicidade do algoritmo proposto permite sua implementação em sistemas de monitoramento, detecção e localização de defeitos em tempo real.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FINATEC.

REFERÊNCIAS

- 1 CHEN, W.; CHIN, B. A. Monitoring Joint Penetration Using Infrared Sensing Techniques, *Weld J.* (1990) 181s-185s.
- 2 KERR, H. W.; HELLINA, M. C.; HUISSOON, J. P. Identifying Welding Pool Dynamics for GMA fillet welds, University of Waterloo (2001).
- 3 HONG, L. et al., Vision Based GTA Weld Pool Sensing and Control Using Neurofuzzy Logic, SIMTech Technical Report (AT/00/011/AMP) (2000) 1-7.
- 4 MIRAPEIX, J. et al., Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis, *NDT&E International* (2006) 356–360.
- 5 FORTUNKO, C. M. Ultrasonic Detection and Sizing of Two-Dimensional Weld Defects in the Long-Wavelength Limit, *Ultrasonics Symposium* (1980) 862-867.
- 6 YUE, L. et al., Computer vision application for weld defect detection and evaluation, *Automated Optical Inspection for Industry: Theory, Technology, and Applications II* (1998) 354-357.
- 7 NAGARAJAN, S. W.; CHEN, H. B.; CHIN, A. Infrared Sensing for Adaptive Arc Welding, *Weld J.* (1989) 462s–466s.
- 8 VENKATRAMAN, B. et al., Thermography for Online Detection of Incomplete Penetration and Penetration Depth Estimation, *Asia-Pacific Conference on NDT* (2006).
- 9 CHIN, B. A.; ZEE, R. H.; WIKLE, H. C. A Sensing System for Weld Process Control, *Journal of Materials Processing Technology* (1999) 254-259.
- 10 WIKLE III, H. C. et al., Infrared Sensing Techniques for Penetration Depth Control of the Submerged Arc Welding Process, *Journal of Materials Processing Technology* (2001) 228-233.
- 11 ARAÚJO, C. F. B. Estudo da Monitoração por Infravermelho como Indicador de Penetração em Soldas Obtidas no Processo TIG, Master dissertation (2004).
- 12 MERCHANT, J. Infrared Temperature Measurement Theory and Applications, Mikron Instruments Company Inc, Application Notes.
- 13 APPEL, U.; BRANDT, A.V. Adaptive sequential segmentation of piecewise stationary time series, *Information Sciences*, (1983) 27-56.

- 14 ALFARO, S. C. A.; CARVALHO, G. C.; DA CUNHA, F. R. A statistical approach for monitoring stochastic welding processes, *Materials Processing Technology* (2006) 4-14.
- 15 GUSTAFSSON, F. *Adaptative Filtering and Change Detection*, John Wiley & Sons, New York, USA, 2000.
- 16 POLLOCK, D. S. G. *A Handbook of Time Series Analysis, Signal Processing and Dynamics*, Academic Press, 1st Ed, (1999), Vol 1.
- 17 JAZWINSKI, A. H. *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, 1st ed. (1970).
- 18 MELO, F. X.; BORGES, G. A.; SOARES, J. E. P. Identificação do tempo de quebra de onda sísmica P usando filtro de Kalman, *Congresso Brasileiro de Automática* (2006).
- 19 DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. *Pattern Classification*, John Wiley & Sons, 2 ed (2000).