

DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE SOLDAGEM, LARGURA DA POÇA E ASPECTOS DO CORDÃO DE SOLDA UTILIZANDO CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

Eduardo José Lima II
ejlima2@hotmail.com

Carlos Alberto Carvalho Castro
carlosjapao@yahoo.com.br

Alexandre Queiroz Bracarense
bracarense@ufmg.br

Mario Fernando Montenegro Campos
mario@dcc.ufmg.br
Universidade Federal de Minas Gerais.
Av. Antônio Carlos, 6627. CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG

Resumo: *Dos vários sensores utilizados em processos de soldagem, ainda não há uma opção eficaz capaz de identificar, diretamente, as características do cordão obtido durante o processo. Esse é um fator limitante no controle do processo, pois somente é possível determinar as características do cordão após a realização da solda através de ensaios (destrutivos ou não), quando nenhuma ação de controle pode ser tomada. No presente trabalho propõe-se estudar relações entre parâmetros de qualidade e variáveis observáveis, como tensão, corrente, velocidade de avanço e geometria da poça de solda, com foco na última, para determinar matematicamente se a geometria da poça traz informações relevantes para a determinação da qualidade do cordão, ou se são suficientes as medições de corrente, tensão e velocidade de soldagem. É mostrado ainda o levantamento de um modelo matemático que permite inferir parâmetros de qualidade do cordão (como largura, reforço, penetração e zona termicamente afetada) a partir dos parâmetros de soldagem e largura da poça de solda. Para o levantamento do modelo, foram realizados vários cordões sobre chapa variando-se a tensão, corrente e velocidade de soldagem as respectivas poças foram monitoradas por uma câmera de alta velocidade. Para a medição da largura da poça foi utilizado um algoritmo computacional baseado em técnicas de visão computacional. As medições da geometria do cordão foram realizadas através de metalografia. O modelo obtido se mostrou bastante preciso e permite concluir que a medição da largura da poça de solda traz informações relevantes para a determinação dos parâmetros de qualidade do cordão.*

Palavras –chave: *poça de fusão, visão computacional, parâmetros de soldagem, metalografia*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a inspeção de cordões de solda resume-se a ensaios não-destrutivos (tais como visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, radiografia e ultra-som) e ensaios destrutivos (tais como ensaios de tração, impacto, dobramento, fadiga e dureza) que são empregados no desenvolvimento da engenharia e no procedimento de soldagem, nos testes de qualificação da solda e do soldador. Além disso, muitas vezes deseja-se que os cordões possuam determinada geometria, como valores determinados de largura, reforço e penetração. Assim, vários cordões são realizados com diferentes parâmetros de soldagem (tensão, corrente, velocidade, *stick-out*, etc.) até que se chegue a um conjunto de parâmetros que gerem cordões com a geometria desejada e de preferência isentos de descontinuidades (tais como fusão incompleta, mordedura, porosidade, penetração incompleta na junta soldada, fusão excessiva, trincas no metal de solda e trinca na zona termicamente afetada, etc.).

A maioria dos sistemas de controle em malha fechada de processos de soldagem se concentram em apenas uma saída, como largura do cordão, temperatura ou estimativa da penetração⁽¹⁾. Porém, para um controle completo do processo, as variáveis devem ser reguladas simultaneamente. Por exemplo, a geometria do cordão de solda não é bem definida apenas pela largura, mas também pelo reforço e penetração.

Praticamente não existem sensores para detectar todas as características da solda e suas propriedades⁽²⁾. Esse é um fator limitante no controle do processo de soldagem, ou seja, não é possível determinar as características finais da solda durante o processo, e sim posteriormente, através de ensaios (destrutivos ou não).

2. REVISÃO TEÓRICA

Sensores para soldagem a arco são definidos como⁽³⁾: “Um detector, que seja capaz de monitorar e controlar uma operação de soldagem baseando-se em sua própria capacidade de detectar situações internas e externas que afetam os resultados da solda e transmitir um valor detectado como um sinal, é chamado de sensor. Além disso, o sistema de controle, como um todo, é definido como um sistema de sensoriamento (sistema de controle).” As “situações externas” se referem à presença de obstáculos, mudanças nas dimensões e posições do chanfro e presença de outros cordões de solda. Já as “situações internas” são relacionadas ao processo em si e se referem à forma do arco elétrico, dimensões da poça de fusão, penetração, distribuição de temperaturas e potência sonora do arco.

Essa definição, por ser muito genérica, acaba por incluir todo o sistema de controle no sensor, apesar de outras definições tratarem o sensor apenas como o elemento de realimentação do sistema de controle.

Vários tipos de sensores projetados para detectar a luz visível ou LASER são utilizados como sensores em soldagem. Tais sensores são classificados como sensores pontuais, sensores lineares e sensores de área (ou de imagem), baseado no padrão de luz recebida.

Para se utilizar tais sensores em soldagem é necessário resolver alguns problemas relacionados a distúrbios, como a radiação do arco elétrico e ruídos eletromagnéticos. Pesquisas relacionadas à soldagem a arco por curto-circuito e corrente pulsada introduziram algumas soluções para tais problemas⁽⁴⁾:

- Captura da imagem durante o período de curto-circuito (no qual se tem a extinção do arco elétrico) ou durante o período de corrente de base;
- Determinação do comprimento de onda dos elementos luminescentes e utilização de filtros;
- Controle da quantidade de luz capturada pela câmera, utilizando um disco perfurado rotativo diante da câmera;
- Redução do efeito de fumos e respingos fazendo o gás de soldagem fluir na frente da câmera.

Em Alfaro *et al*, 2003⁽⁵⁾, é mostrado um esquemático da montagem de uma câmera (sensor de área) equipada com CCD em uma tocha de soldagem GMAW, de modo a se mover juntamente com a tocha. Nessa posição a câmera é capaz de adquirir imagens do arco, do eletrodo e da poça de fusão, além da abertura do chanfro, de modo a possibilitar a utilização de algoritmos para seguimento de junta.

Em Nomura and Middle, 1994⁽⁶⁾, é analisada qualitativamente uma imagem adquirida no processo GMAW pulsado. É mostrada, ainda, a distribuição de brilho dos pixels ao longo das linhas vertical e horizontal. A distribuição de brilho ao longo da linha vertical mostra a simetria da poça. É importante observar que a ocorrência da saturação em alguns dos elementos do CCD deve ser evitada, sob pena de perda de informação.

Em Song, 1993⁽⁷⁾, um sistema de visão é utilizado para observar a largura do cordão com base em imagens obtidas da poça de fusão. Nesse trabalho as velocidades de alimentação do arame e de avanço da tocha são controladas de modo a se obter uma largura de cordão e penetração desejadas. Assim, o sistema de visão é utilizado como dispositivo de *feedback* do sistema de controle de largura do cordão. Como não se dispõem de sensores para medição da penetração, Song⁽⁸⁾ utiliza um método para estimar em tempo real a penetração da solda a partir de medições da temperatura na parte inferior da chapa.

No presente trabalho o sensor utilizado é um sensor de área equipado com câmera CCD para adquirir imagens, o que permite a obtenção de uma grande quantidade de informação através do processamento das imagens. A desvantagem de sensores de área é o grande tempo necessário ao processamento das imagens, dificultando ações de controle em tempo real, mas, como será mostrado, é um passo em prol do desenvolvimento do sensoramento da soldagem para otimização do processo.

3. METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é obter um modelo matemático que relacione parâmetros e variáveis mensuráveis com outros não mensuráveis durante o processo de soldagem GMAW, de modo a ser possível inferir parâmetros de qualidade como penetração, reforço, largura do cordão e zona termicamente afetada a partir da medição de outros parâmetros, como tensão e corrente de soldagem, velocidade e largura da poça de fusão.

Assim, são definidos dois vetores:

$$P = [V \quad I \quad v \quad L]^T \quad (1)$$

$$Q = [D \quad W \quad H \quad Z]^T \quad (2)$$

Onde o vetor P é o vetor de parâmetros mensuráveis: V é a tensão de soldagem, I é a corrente de soldagem, v é a velocidade de avanço da ferramenta e L é a largura da poça. O vetor Q é o vetor de parâmetros de qualidade e possui como dimensões: D , a penetração; W , a largura do cordão; H , o reforço e Z , o tamanho da zona termicamente afetada.

O modelo deverá relacionar cada um dos valores do vetor Q com os parâmetros do vetor P . Assim será possível inferir, para cada conjunto de parâmetros de soldagem e de largura da poça, como se comportará a qualidade do cordão de solda.

Inicialmente é considerado um vetor P_1 de parâmetros ideais para a solda, definidos experimentalmente e aqui considerados como parâmetros ótimos, já que produzem um cordão com as características desejadas. Um cordão de solda realizado com o vetor P_1 resulta em um vetor de qualidade Q_1 .

A partir do vetor P_1 são gerados outros vetores P_x , variando-se a tensão, a corrente a velocidade de soldagem. Para cada vetor P_x é feita a monitoração da poça para se definir o valor de L_x , que é a largura da poça medida através de técnicas de visão computacional. Apesar de nesta etapa L ser considerado como um parâmetro de saída do experimento, posteriormente será considerado como

um parâmetro de entrada para o modelo, ou seja, a medição da largura da poça será utilizada para inferir os parâmetros de qualidade do cordão.

3.1. Ensaios

Após determinados os vetores P_x , um cordão de solda foi realizado utilizando cada vetor. Para realização dos ensaios utilizou-se um robô SK-6, do fabricante Motoman. A utilização do robô garante que os outros parâmetros considerados constantes (como *stick-out*, ângulo de soldagem, vazão de gás), permanecem realmente constantes durante o ensaio. Como metal de base foram utilizados chapas de aço A-36 e como consumíveis arame sólido de aço de 0,8 mm de diâmetro e gás argônio com 25% de CO₂.

Para diminuir possíveis trepidações da câmera durante os ensaios, optou-se por mover a peça e manter a ferramenta e a câmera fixas. Para isso, utilizou-se uma mesa posicionadora de 1 grau de liberdade, à qual é fixa a peça. A câmera foi posicionada de modo a focalizar o arco elétrico a um ângulo de 30° do plano da peça. A mesa movimentada a peça com a velocidade v , de acordo com o vetor de parâmetros.

Após realizados os testes, todos os cordões foram cortados, preparados e fotografados, para a obtenção dos parâmetros de qualidade. Foram, então, feitas medidas de largura, penetração, reforço e tamanho da zona termicamente afetada, de modo a se obter os vetores Q_x .

Durante a soldagem de cada um dos cordões, a poça foi monitorada por uma câmera de alta velocidade, marca Olympus. Essa câmera possui um sensor CCD capaz de gerar imagens de 480x420 *pixels* (*picture elements*), com níveis de cinza de 0 a 255. As imagens podem ser capturadas a taxas de 60 a 8000 quadros por segundo. A utilização da câmera de alta velocidade possibilita se realizar a captura da imagem da poça durante o período de curto-circuito (no qual o arco é momentaneamente extinto), evitando que a radiação do arco elétrico impeça a sua visualização.

Após a filmagem da poça de cada cordão a uma taxa de 250 quadros por segundo, uma imagem foi transferida para um microcomputador, de acordo com a posição em que seria feito o corte na peça. Para a detecção automática das bordas utilizou-se o algoritmo de Canny⁽⁹⁾. Em resumo, o algoritmo de Canny utiliza o cálculo do gradiente de intensidade dos *pixels* da imagem para determinar onde se localizam as bordas dos elementos da cena. São considerados elementos de borda, ou *edgels* (*edge elements*), os pontos em que o módulo do gradiente de intensidade é um máximo local na direção do vetor gradiente.

3.2. Obtenção do modelo

Kim, 1996⁽¹⁰⁾, utiliza um modelo quadrático para descrever a relação entre os parâmetros de soldagem e a geometria do cordão. Nesse caso, são utilizadas como entrada do modelo apenas variáveis controláveis (como corrente e tensão).

No presente trabalho, utilizaram-se como entrada do modelo variáveis observáveis: corrente, tensão, velocidade de soldagem e largura da poça de fusão. Apesar de essa última normalmente ser utilizada como variável de saída dos modelos, nesse caso foi utilizada como uma informação adicional como entrada do modelo, já que é possível observar seu valor através da utilização de uma câmera e técnicas de visão computacional.

Assim, é utilizado o modelo quadrático da forma:

$$\begin{aligned}
 D &= a_{11}V + a_{12}V^2 + a_{13}I + a_{14}I^2 + a_{15}v + a_{16}v^2 + a_{17}L + a_{18}L^2 + a_{19} \\
 W &= a_{21}V + a_{22}V^2 + a_{23}I + a_{24}I^2 + a_{25}v + a_{26}v^2 + a_{27}L + a_{28}L^2 + a_{29} \\
 H &= a_{31}V + a_{32}V^2 + a_{33}I + a_{34}I^2 + a_{35}v + a_{36}v^2 + a_{37}L + a_{38}L^2 + a_{39} \\
 Z &= a_{41}V + a_{42}V^2 + a_{43}I + a_{44}I^2 + a_{45}v + a_{46}v^2 + a_{47}L + a_{48}L^2 + a_{49}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Essas equações podem ser montadas na forma matricial:

$$[D \ W \ H \ Z]^T = A [V \ V^2 \ I \ I^2 \ v \ v^2 \ L \ L^2 \ 1]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} & a_{29} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} & a_{39} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} & a_{49} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Os coeficientes do modelo são obtidos através de mínimos quadrados, a partir dos dados experimentais.

3.3. Resultados preliminares

Para avaliar a aplicabilidade do algoritmo de Canny para identificar as bordas da poça de fusão, foram feitos dois cordões sobre chapa utilizando velocidades de 16mm/s e 20mm/s. A Figura 1 mostra as imagens obtidas das duas poças de fusão.

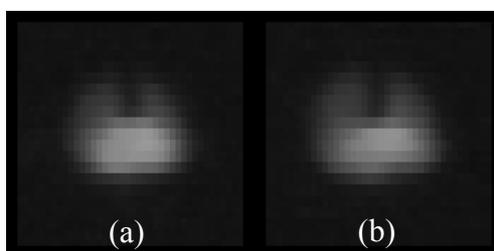


Figura 1. Poça de fusão utilizando velocidades de soldagem de 20mm/s (a) e 16mm/s (b).

Aparentemente, não há grandes diferenças entre as duas poças. A Figura 2 mostra um gráfico dos níveis de cinza dos pixels em cada coluna, na linha em que se tem maior largura da poça. Não se observam, também, grandes diferenças entre a poça utilizando 20mm/s (linha pontilhada) e 16mm/s (linha contínua).

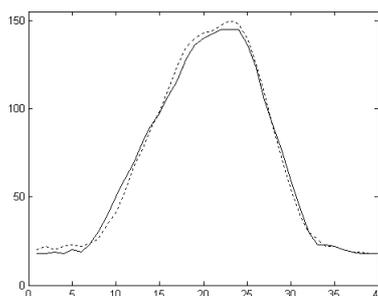


Figura 2. Níveis de cinza das duas poças de fusão utilizando 20mm/s (linha pontilhada) e 16mm/s (linha contínua) na linha de maior largura da poça.

Para o processamento das imagens, foi implementado o algoritmo de Canny utilizando Matlab. O programa tem como parâmetros de entrada a imagem, a largura da máscara para o filtro gaussiano e os limiares superior e inferior para histerese. A Figura 3 mostra as bordas detectadas pelo algoritmo para as poças de fusão utilizando as velocidades de soldagem de 20mm/s e 16mm/s. É possível observar que, para a poça de 20mm/s, obteve-se uma largura de 16 pixels. Já para a poça de 16mm/s, a largura obtida é de 19 pixels. Esse resultado era esperado, já que quanto maior a velocidade de soldagem, mantendo-se constantes a tensão e a corrente, menor é o aporte térmico (energia fornecida por unidade de comprimento de metal de base) e, portanto, menor a largura da poça de fusão.

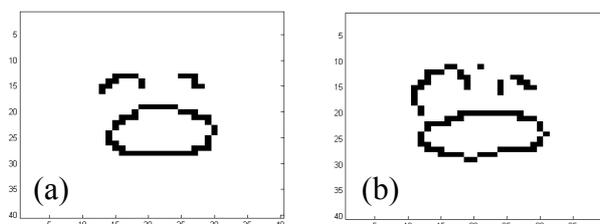


Figura 3. Detecção de bordas resultante do algoritmo de Canny ($v = 20\text{mm/s}$ (a) e 16mm/s (b)).

A Figura 4 mostra as bordas detectadas sobre as imagens originais. Observa-se que as bordas detectadas não compreendem toda a poça de fusão, já que o algoritmo de Canny considera como borda o pixel em que o gradiente de intensidade é um máximo local.

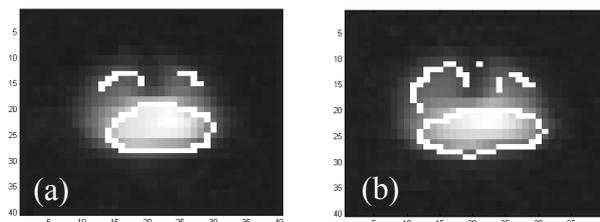


Figura 4. Bordas detectadas pelo algoritmo de Canny sobre as imagens originais ($v = 20\text{mm/s}$ (a) e 16mm/s (b)).

Observando o gráfico da Figura 2, pode-se concluir que a largura da poça de fusão poderia ser melhor obtida pela utilização da segunda derivada da intensidade. O programa implementado foi então alterado de modo a considerar a segunda derivada da intensidade, em lugar da primeira derivada. A Figura 5 mostra as bordas identificadas pelo programa modificado, enquanto a Figura 6 mostra as bordas identificadas sobre as imagens originais.

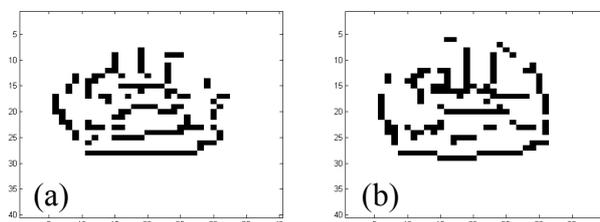


Figura 5. Detecção de bordas resultante do algoritmo de Canny modificado ($v = 20\text{mm/s}$ (a) e 16mm/s (b)).

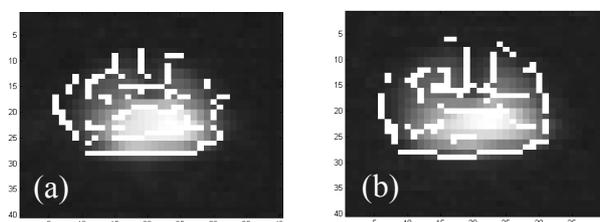


Figura 6. Bordas detectadas pelo algoritmo de Canny modificado sobre as imagens originais ($v = 20\text{mm/s}$ (a) e 16mm/s (b)).

Observa-se que, agora, apesar de a segunda derivada ter introduzido uma taxa de ruído maior, a localização das bordas identificadas foi mais fiel à real.

4. AQUISIÇÃO DE DADOS PARA LEVANTAMENTO DO MODELO

Para levantar o modelo, foram feitos 14 cordões de solda, utilizando como parâmetros vetores P_1 a P_{14} , definidos conforme descrito anteriormente. Utilizou-se variações de corrente de 75A a

105A, tensão de 16V a 20V e velocidade de soldagem de 16mm/s a 20mm/s. Foram obtidas larguras de poça entre 21 e 30 pixels na imagem. A Figura 7 mostra as imagens das poças de fusão de alguns dos cordões após processadas pelo algoritmo de Canny modificado.

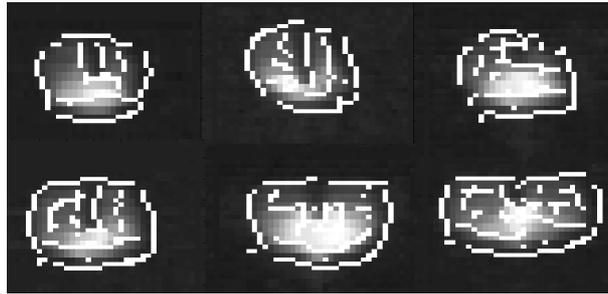


Figura 7. Imagens das poças de fusão de alguns dos cordões após processamento pelo algoritmo de Canny modificado.

Cada um dos cordões foi então seccionado e preparado para procedimento padrão para observação metalográfica. Foram então feitas imagens utilizando um microscópio para a determinação dos vetores Q (geometria do cordão). A Figura 8 mostra os cortes de dois cordões obtidos com $P=[20V \ 105A \ 16mm/s \ 30pixels]^T$ e $P=[16V \ 105A \ 16mm/s \ 27pixels]^T$, respectivamente e a Figura 9 mostra como são medidos cada um dos 4 parâmetros de geometria do cordão.



Figura 8. Análise metalográfica de dois cordões obtidos.

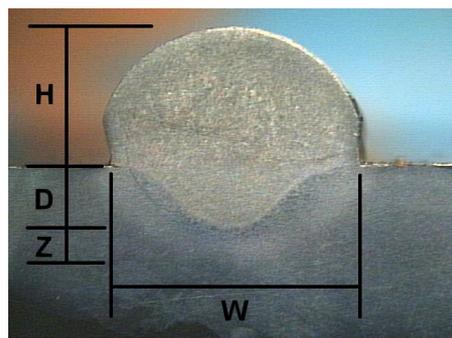


Figura 9. Parâmetros de qualidade medidos através das imagens dos cordões.

A Figura 10(a) mostra as bordas da imagem de um dos cordões identificadas pelo algoritmo de Canny. Observa-se a correta identificação das bordas do metal de base, do reforço e da penetração. Para a identificação da ZTA, porém, são necessários valores de limiares para histerese de gradiente muito baixos, o que leva a um grande número de bordas identificadas, devido a imperfeições na peça e a ruídos como mostrado na Figura 10(b).

Para obter medidas em milímetros de D , W , H e Z de cada cordão, utilizou-se uma escala milimétrica nas direções horizontal e vertical na mesma imagem da seção do cordão. A escala foi

utilizada para determinar aproximadamente a correspondência de cada pixel com as medidas reais. A Figura 11 mostra uma imagem do cordão com a escala milimétrica.

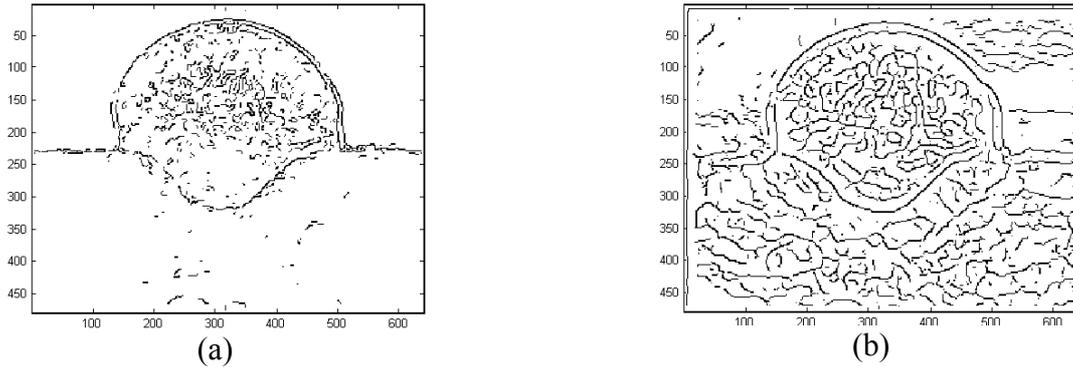


Figura 10. Bordas da imagem do cordão identificadas pelo algoritmo de Canny (a) e bordas identificadas com a diminuição dos limiares de histerese para identificação da ZTA (b).

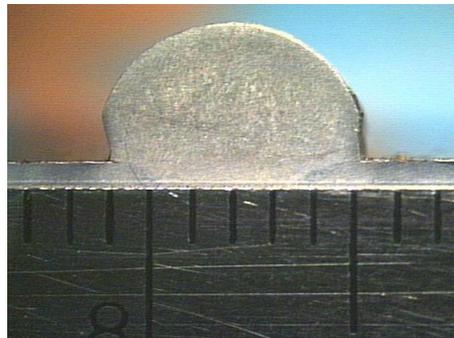


Figura 11. Escala milimétrica utilizada para medição dos parâmetros de geometria dos cordões.

A equação (5) (modelo de câmera perspectiva) mostra a relação entre as medições feitas em *pixels* na imagem (Δx e Δy) e as medidas reais na cena (ΔX e ΔY).

$$\Delta x S_x = f \frac{\Delta X}{Z} \quad \Delta y S_y = f \frac{\Delta Y}{Z} \quad \Rightarrow \quad \Delta X = \frac{S_x Z}{f} \Delta x \quad \Delta Y = \frac{S_y Z}{f} \Delta y \quad (5)$$

Utilizando as imagens da escala, é possível determinar os valores de $S_x Z / f$ e $S_y Z / f$. Essas relações representam a correspondência entre cada pixel e medidas em milímetros na cena. Em média, obteve-se uma relação de 0,0174mm por *pixel* na direção horizontal e de 0,0176mm por *pixel* na direção vertical. Observa-se que esses valores representam a precisão máxima de medição das características do cordão.

Foram obtidos valores entre 0,84mm e 1,72mm para a penetração (D), 3,72mm a 7,10mm para a largura (W), 2,08mm a 3,49mm para o reforço (H) e 0,59mm a 0,94mm para a ZTA (Z).

5. RESULTADOS

Utilizando mínimos quadrados após normalizados os valores dos vetores P_x , obteve-se um modelo para cada um dos parâmetros de geometria do cordão (vetor Q):

$$\begin{aligned} D &= 30,69V - 16,92V^2 - 0,92I + 1,78I^2 - 22,24v + 12,41v^2 + 12,70L - 7,37L^2 - 8,58 \\ W &= -6,71V + 5,82V^2 + 0,33I - 1,84I^2 - 101,69v + 57,53v^2 + 48,39L - 21,09L^2 + 26,82 \\ H &= -20,80V + 10,70V^2 + 3,07I - 0,33I^2 + 18,63v - 11,63v^2 - 14,71L + 8,40L^2 + 9,51 \\ Z &= 4,76V - 3,14V^2 + 6,30I - 5,00I^2 - 39,98v + 22,99v^2 + 18,25L - 8,16L^2 + 5,20 \end{aligned} \quad (6)$$

Para avaliar a fidelidade do modelo, calculou-se o erro entre os valores medidos da geometria dos cordões e os valores calculados pelo modelo, obtendo-se um erro médio de 0,020mm para D ; 0,138mm para W ; 0,034mm para H e 0,053mm para Z . Observa-se que para a penetração (D) o erro médio é aproximadamente a precisão de medida obtida pelo microscópio, e para os valores de reforço (H) e zona termicamente afetada (Z) o erro médio é respectivamente da ordem de 2 e 3 vezes tal precisão (o que equivale a 2 e 3 pixels na imagem). Para a largura do cordão (W), o erro médio é de 8 vezes a precisão máxima de medida (8 pixels).

Outros modelos foram experimentados para as mesmas amostras, porém para os valores de D , H e Z o melhor modelo obtido foi o mostrado pelas equações (6).

O melhor modelo para a largura do cordão (W), contudo, é obtido pela substituição do termo I^2 por Iv . Nesse caso, o erro médio diminui para 0,096mm (o equivalente a 5 pixels) e a equação passa a ser:

$$W = -6,21V + 6,81V^2 + 17,39I - 17,87Iv - 58,19v + 39,69v^2 + 40,52L - 21,26L^2 + 5,28 \quad (7)$$

Em todas as equações observa-se que os coeficientes de L e L^2 (largura da poça de solda) possuem valores bastante significativos (observe-se que os valores de V , I , v e L foram normalizados), permitindo-se concluir que tal informação é importante para se inferir os parâmetros de geometria do cordão de solda.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou a utilização de técnicas de visão computacional para a determinação de parâmetros de qualidade do cordão de solda (geometria) sem a necessidade de se realizarem ensaios destrutivos.

A poça de fusão foi monitorada por uma câmera de alta velocidade e medida através de visão computacional e os dados de tensão, corrente elétrica, velocidade de soldagem e largura da poça foram então utilizados para o levantamento de um modelo para o cálculo de largura do cordão, penetração, reforço e tamanho da zona termicamente afetada. O modelo se mostrou muito fiel aos dados reais, apresentando-se em uma faixa de erro próxima da própria precisão de medida utilizando o microscópio.

Os coeficientes relacionados à largura da poça de solda no modelo obtido são significativos, o que leva à conclusão de que a obtenção tal informação é significativa para uma modelagem adequada dos parâmetros de geometria do cordão.

7. REFERÊNCIAS

1. HALE, M.; HERDT, D. **Multi-Output Process Dynamics of GMAW: Limits to Control**. In: PROC. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS IN WELDING RESEARCH, 1993. p. 1015-1020
2. SMARTT, H. **Intelligent Sensing and Control of Arc Welding**. In: PROC. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS IN WELDING RESEARCH, 1993. p. 843-851
3. MASUMOTO, I.; ARAYA, T.; IOCHI, A.; NOMURA, H. **Development and application of sensors and sensor systems for arc welding**. In: JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY, 52(4), 1983. p. 339-347
4. NOMURA, H.; MIDDLE, J. **Sensors and Control Systems in Arc Welding**. Chapman & Hall, 1994
5. ALFARO, S.; BAUCHSPIESS, A.; DREWS, P. **Intelligent Systems for Welding Process Automation**. In: PROCEEDINGS OF INSERT CONFERENCE ABBREVIATION, 2003

6. OHSHIMA, K. **Observation and control of weld pool phenomena in arc welding.** In: JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY, 58(4), 1989. p. 44-49
7. SONG, J.; HARDT, D. **Simultaneous Control of Bead Width and Depth Geometry in Gas Metal Arc Welding.** In: PROC. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS IN WELDING RESEARCH, 1993. p. 921-926
8. SONG, J.; HARDT, D. **A Thermally Based Weld Pool Depth Estimator for Real-Time Control.** In: PROC. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS IN WELDING RESEARCH, 1993. p. 975-980
9. CANNY, J. F. **A computational approach to edge detection.** In: IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, 8(6), 1986. p. 679-689
10. KIM, I. S.; KWON, W. H.; SIORES, E. **An investigation of a mathematical model for predicting weld bead geometry.** In: CANADIAN METALLURGICAL QUARTERLY, 1996.

DETERMINATION OF THE RELATION BETWEEN WELDING PARAMETERS, WELD POOL WIDTH AND WELD BEAD GEOMETRY USING HIGH SPEED CAMERA

Eduardo José Lima II
ejlima2@hotmail.com

Carlos Alberto Carvalho Castro
carlosjapao@yahoo.com.br

Alexandre Queiroz Bracarense
bracarense@ufmg.br

Mario Fernando Montenegro Campos
mario@dcc.ufmg.br
Universidade Federal de Minas Gerais.
Av. Antônio Carlos, 6627. CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG

***Abstract:** Among the various sensors used in welding processes, still do not have sensors capable to directly sense some of the weld characteristics during the process. This is a limiting factor in the process control due to the fact that the determination of the final weld characteristics can only be done at the end of the process, through destructive or non destructive tests, when no control law can be applied anymore. In this work it is shown the study of the relation among some weld quality parameters and observable variables, such as voltage, current, welding speed and weld pool geometry, focusing on the later one, in order to determine if the information about welding pool geometry is relevant on the determination of the weld bead geometry or if the information about voltage, current and welding speed is sufficient. It is also shown the development of a mathematic model which makes possible to calculate the weld bead geometry (width, height, depth and heat affected zone) from weld parameters and weld pool width. It was generated some welding parameter sets and, during the welding process using each set, the weld pool was monitored by a high-speed camera. So as to automatically detect the weld pool geometry, computer vision techniques were used. The bead geometry measures was obtained with metallographic assays. The obtained model shows that the observation of the welding parameters and the pool geometry makes possible the inference of the weld geometry, better than just observing the welding parameters.*

***Keywords:** weld pool, computer vision, welding parameters, metallography*