



MONITORAÇÃO DA POÇA DE FUSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

Carla Cavalcante Koike

Maria H. I. Lindgren Barros

Guilherme Caribé de Carvalho

Sadek Crisóstomo Absi Alfaro

Universidade de Brasília, Engenharia Mecânica, GRACO

Brasília, DF, Brasil

Resumo. *Este trabalho descreve a primeira fase de desenvolvimento de métodos de monitoração da poça de fusão no processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) utilizando técnicas de visão computacional e algoritmos de processamento de imagem. O método de monitoração utilizado baseia-se na análise da imagem da poça de forma a extrair parâmetros tais como largura máxima do cordão, largura da abertura na raiz da junta ("gap") e seu alinhamento em relação ao arame. Esses parâmetros podem ser relacionados com os parâmetros de soldagem (tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame e distância do tubo de contato ao metal base - "stand-off"), produzindo uma estimativa da qualidade do cordão resultante. Os testes práticos mostraram que o ajuste da câmara afeta a qualidade da imagem obtida e, conseqüentemente, influencia os resultados produzidos na análise. O algoritmo desenvolvido nesta primeira fase apresenta bons resultados, sendo porém ainda sensível à qualidade da imagem.*

Palavras-chave: Soldagem MIG/MAG, Formato da Poça de fusão, Monitoração

1. INTRODUÇÃO

A demanda por maior produtividade e a escassez de operadores experientes têm promovido um aumento significativo na utilização de robôs nos processos de soldagem por resistência e a arco. Dentre os processos de soldagem a arco, destaca-se o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), cuja utilização vem aumentando nos últimos anos devido à flexibilidade inerente ao processo (Parmar, 1995). Entretanto, tem-se observado limitações quanto a sua automatização sobretudo no caso de cordões contínuos, principalmente devido à dificuldade de se garantir perfeito alinhamento entre o caminho percorrido pela tocha de soldagem e o eixo da junta a ser soldada e ainda garantir a geometria do cordão de solda, mesmo com variações da junta (Parmar, 1995; Nissley, 1983). No processo GMAW, os níveis de tolerância para preparação de juntas bem como para posicionamento das mesmas para efetiva soldagem são bem superiores àqueles exigidos para o caso de soldagem manual (Kuk, 1985; Kurkin, 1990; Wadsworth, 1987). Desta forma faz-se necessário utilizar sistemas de monitoração do processo de forma a garantir que a qualidade das soldas produzidas estejam em conformidade com padrões pré-estabelecidos, cujas características satisfazem requisitos de continuidade, dimensões, resistência e em alguns casos requisitos estéticos (AWS, 1979).

Dentre os principais problemas que influenciam na qualidade da solda, podem-se citar (Carvalho, 1997):

- Preparação da junta a ser soldada;
- Posicionamento da junta para efetiva soldagem em uma célula robotizada;
- Combinação inadequada dos parâmetros de soldagem.

Outros problemas tecnológicos tais como escorregamento do arame, sujeira no bocal de gás, proteção inadequada de gás, falha na fonte de soldagem etc, podem também afetar a estabilidade do processo e, em consequência, a qualidade do cordão. Entretanto, estes dependem de manutenção adequada do equipamento, o que já não ocorre nos problemas citados anteriormente, em que a qualidade da solda depende de cada junta individual e um ajuste rigoroso daquelas variáveis torna-se muitas vezes economicamente inviável (Carvalho, 1997).

Por meio da monitoração da poça de solda durante o processo, pode-se identificar a presença de um ou mais desses problemas, gerando-se sinais que podem ser utilizados para corrigir desvios de qualidade antes que possam comprometer o cordão de solda.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um método de monitoração da poça de fusão por meio da visualização e análise da sua imagem, medindo parâmetros tais como largura máxima da poça e largura e posição da abertura da raiz. Estes dados podem ser relacionados com os parâmetros de soldagem (tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame e distância entre o tubo de contato e o metal de base), de forma a obter informações que possibilitem a previsão da formação de defeitos que venham comprometer a qualidade do cordão (Adolfsson, 1999).

2. POÇA DE FUSÃO NO PROCESSO GMAW

A formação da poça de fusão é de extrema importância para a qualidade do cordão de solda, especialmente no caso de solda em chapas finas, em que as tolerâncias do processo são menores. Devido a dificuldade de se monitorar todas as variáveis do processo e relacioná-las à geometria da poça, a correlação entre a geometria da poça e as características da solda resultante ainda são objeto de estudo (Norrish, 1992). De uma maneira simplificada, pode-se afirmar que os parâmetros da poça que interferem na qualidade do cordão de solda são:

- Largura da poça e abertura da raiz, que influenciam na geometria do cordão resultante;
- Alinhamento entre o eixo da junta e o eletrodo, que determina a assimetria do cordão de solda resultante.

2.1 Monitoração da Poça de Fusão

A monitoração da poça de fusão é geralmente realizada utilizando-se sistemas de visão e algoritmos de reconhecimento de imagem. A figura 1 mostra uma imagem frontal da poça de fusão, onde podem ser visualizados seus principais componentes: o arco, na parte mais luminosa; o arame, nitidamente escuro na parte central da imagem; a poça, em tons de cinza intermediários; e a abertura da raiz, que se torna visível devido ao metal fundido que escorre para preenchê-la.

Na monitoração da poça por visualização, vários aspectos devem ser considerados, dentre eles destacam-se:

Iluminação. Responsável direta pela qualidade dos dados de entrada, a correta iluminação é um parâmetro essencial em um sistema de visão computacional. No caso da visualização de qualquer processo de soldagem, a excessiva luminosidade do arco voltagem constitui um dos principais problemas. Uma das maneiras de se reduzir esse problema é por exemplo utilizar iluminação a laser e capturar a imagem através de um filtro ótico passa-banda com centro no comprimento de onda do laser (Johnson, 1991). Outra maneira seria

utilizar um filtro passa alta com frequência de corte próximo do infra-vermelho. A luminosidade do arco tem maior intensidade próximo da faixa do ultra-violeta e a poça de soldagem emite luz com frequências em torno do infra vermelho (Chen, 1990); e

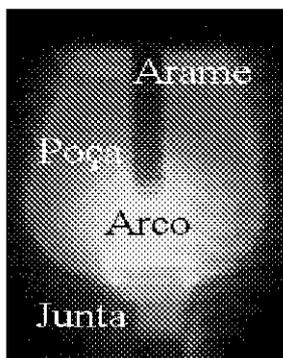


Figura 1: vista frontal da poça de fusão, com indicação dos principais componentes.

Posição da Câmera em Relação a Tocha. A forma da poça na imagem depende da posição e orientação da câmera. A posição ideal seria uma visualização do topo, de forma coaxial à tocha (Richardson, 1984). Para isso, entretanto, seria necessário utilizar um tipo de tocha especial de soldagem, o que tornaria o sistema mais complicado e caro. Já que os parâmetros desejáveis são a largura da poça, a largura da abertura da raiz e a distância do arame ao eixo da junta, a posição mais apropriada para realizar essa visualização é a vista frontal (figura 2), que permite a visualização do bocal de gás, arame, poça líquida e junta.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a execução deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- Camera CCD Sony XP-999P, com lentes de 50 mm e anéis de extensão utilizados para aumentar a distância focal;
- Filtro ótico passa-alta com comprimento de onda de corte próximo do infravermelho;
- Placa digitalizadora de imagem Coreco, modelo Oculos TCX;
- Fonte inversora de soldagem;
- Gás de proteção (Ar+25%CO₂) a 12 l/min;
- Arame de soldagem de 0.8 mm de diâmetro;
- Robô ABB IRB2000AW;
- Corpos de prova em chapas de aço AISI 1020 com 3,2 mm (1/8") de espessura;

O ajuste dos parâmetros da câmera, como abertura, velocidade do obturador e a distância focal da lente, foi cuidadosamente estudado para reduzir os reflexos do arco e obter um enquadramento adequado.

A figura 2 mostra a disposição final dos diversos equipamentos utilizados.

O suporte para câmara foi projetado e executado especificamente para esse trabalho, permitindo que se altere o ângulo da câmara em relação a tocha de soldagem, bem como aproximar ou afastar a câmara para permitir melhor enquadramento e focalização.

Os ensaios foram executados em seqüência, variando parâmetros de soldagem tais como velocidade de alimentação de arame, tensão e distância entre o tubo de contato e o metal de base. Estes foram variados com o objetivo de mudar a largura do cordão de solda. Foram escolhidos parâmetros que resultaram em cordões de diversas larguras. O objetivo era determinar o desempenho de algoritmos de reconhecimento de imagem nos casos extremos de cordão muito estreito ou muito largo. Outros parâmetros tais como velocidade de avanço da tocha (3,5 mm/s), vazão de gás de proteção (12 l/min), orientação e posição da câmera

relativa à tocha, distância focal e a abertura da lente foram mantidos constantes durante todos os testes.

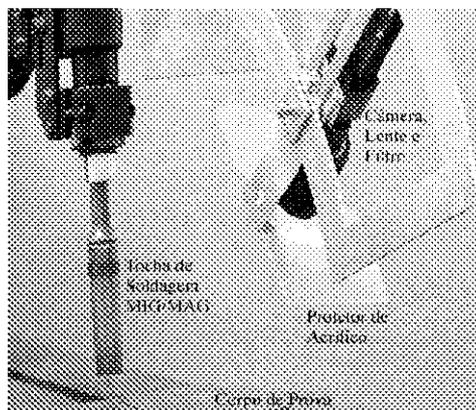


Figura 2: Disposição final da câmera em relação à tocha de soldagem.

Alguns cordões foram realizados sobre a chapa com o intuito de ajustar a câmera e a lente para os níveis de luminosidade encontrados. Outros foram realizados com juntas de topo, com abertura da raiz variando de 0 a duas vezes o diâmetro do arame, com o objetivo de determinar os limites de detecção da existência de junta a partir da imagem.

Tabela 1. Tensão e Velocidade de Alimentação do Arame e Largura do Cordão Resultante.

Ensaio	Tensão (Volts)	Velocidade de Alimentação de Arame (mm/s)	Stand-Off (mm)	Largura do Cordão (mm)	Largura da Raiz (mm)
I	18	5	13	2	Sem junta
II	16	4	13	-	Sem junta
III	18	5	13	2.5	Sem junta
IV	19	6	13	3	Sem junta
V	21	7	13	5	Sem junta
VI	23	8	13	6	Sem junta
VII	25	8	13	7	Sem junta
VIII	27	8	13	6.5	Sem junta
IX	28	10	13	6	Sem junta
X	18	5	10	3	1
XI	21	7	10	4	1
XII	23	8	10	5.5	1
XIII	25	8	10	6.5	1
XIV	24.5	10	14	7.6	0.8
XV	24.5	8	14	7.5	0.8
XVI	24.5	8	14	7.4	1.5-0
XVII	24.5	8	14	7.5	1.5-0

A tabela 1 mostra a relação entre os parâmetros escolhidos e a largura dos cordões realizados. A coluna "Largura da Raiz" refere-se a experimentos em que a solda foi realizada em juntas de topo. A observação "sem junta" indica os cordões realizados sobre a chapa.

Durante os ensaios, imagens das peças de soldagem foram adquiridas para o desenvolvimento do algoritmo de extração dos parâmetros geométricos desejados.

3. ALGORITMO DESENVOLVIDO

O algoritmo de processamento de imagem consiste de duas fases: (a) pré-processamento e (b) algoritmo de busca e cálculo.

O algoritmo de pré-processamento (*zoom*) é utilizado para selecionar na imagem a região de interesse e tem por objetivo reduzir a quantidade de *pixels* a serem analisados, diminuindo desta forma o tempo de processamento de cada quadro.

O algoritmo de busca e cálculo tem por objetivo determinar parâmetros geométricos da poça (largura máxima) e da abertura da raiz (largura e alinhamento com o arame).

3.1 Pré-Processamento – Zoom

Nessa fase, é realizado um *zoom* na região de interesse dentro da imagem. Considerando que a posição relativa entre a câmera e a tocha é mantida constante, o *zoom* é somente calculado para o primeiro quadro adquirido. Esses cálculos são baseados nas curvas de perfis nas direções X e Y da imagem, conforme definido em Galbiati (1990) e Hall (1979). Deve-se observar que a direção X corresponde às linhas na imagem sendo os pixels contados a partir da esquerda e a direção Y corresponde às colunas na imagem sendo os pixels contados a partir do topo.

Na figura 3 podem ser vistos os perfis para um dos quadros adquiridos. As curvas apresentam pontos de máximo, os quais podem ser interpretados com sendo correspondentes à região de maior intensidade luminosa que ocorre no arco elétrico. A partir do ponto de máximo de cada curva, são localizadas as coordenadas em ambas direções onde a intensidade é reduzida a um valor mínimo constante. Essas coordenadas definem os limites da janela que deve ser processada. O *zoom* reduz significativamente a quantidade de bits a ser tratada pelo algoritmo de busca, o que reduz o tempo de processamento.

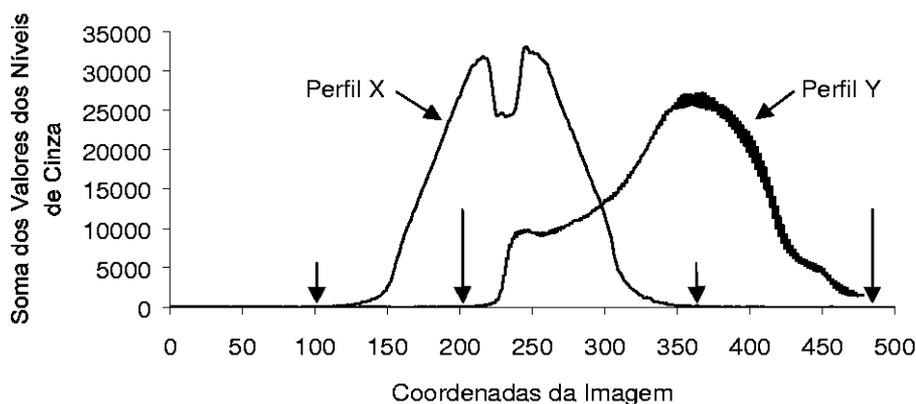


Figura 3: Perfil X e Y da Imagem completa, com indicação dos pontos em que a imagem é cortada.

3.2 Busca e Cálculo

Os padrões a buscar na imagem são mostrados na figura 4, em que pode-se identificar facilmente a largura máxima da poça, a largura da junta e o alinhamento entre o eixo do arame e o eixo da junta (centralização). Entretanto, dependendo da fase no ciclo de transferência de metal em que o quadro é adquirido pela placa digitalizadora, pode haver variação na distribuição de intensidade luminosa nas diversas regiões de interesse. Isso impossibilita o uso da técnica de limiar (*threshold*) (Ekstrom,1984) para detecção da geometria da poça. Como a iluminação é irregular dentro da imagem (a região do arame é mais escura, a poça, mais brilhante e a junta, uma região de brilho médio), são necessários diversos valores de limiar para cada quadro e esses variam de quadro a quadro.

Analisando o formato do gráfico do perfil Y e suas derivadas primeira e segunda, é possível identificar as coordenadas Y dos componentes de interesse na imagem: o arame, a poça e a junta. Deve-se observar, entretanto, que o perfil Y mostrado na figura 5 corresponde

ao perfil Y mostrado na figura 3 após aplicado um filtro passa-baixa, o qual teve por objetivo reduzir o ruído intrínseco à captura da imagem.

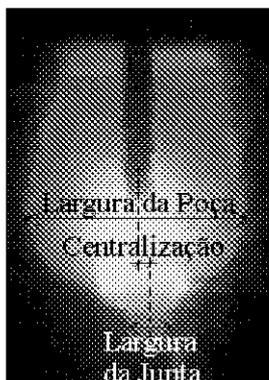


Figura 4: Imagem com medidas a serem calculadas.

Observando a curva filtrada (figura 5), pode-se perceber uma mudança de concavidade na posição Y correspondente a uma linha da imagem em que se pode assegurar a existência da sombra do arame. Para detectar essa mudança de concavidade, basta determinar o ponto onde a segunda derivada do perfil muda de sinal. O pico da curva do perfil Y (figura 5) indica a posição onde a poça tem sua maior largura. A coordenada Y a partir da qual a junta torna-se visível na imagem pode ser obtida pela mudança de concavidade observada após a coordenada Y correspondente à poça. Uma vez que as linhas de localização do arame, poça e gap na imagem são conhecidas, pode-se proceder a análise da curva de distribuição de níveis de cinza em cada uma dessas linhas e determinar as coordenadas X dos elementos desejados.

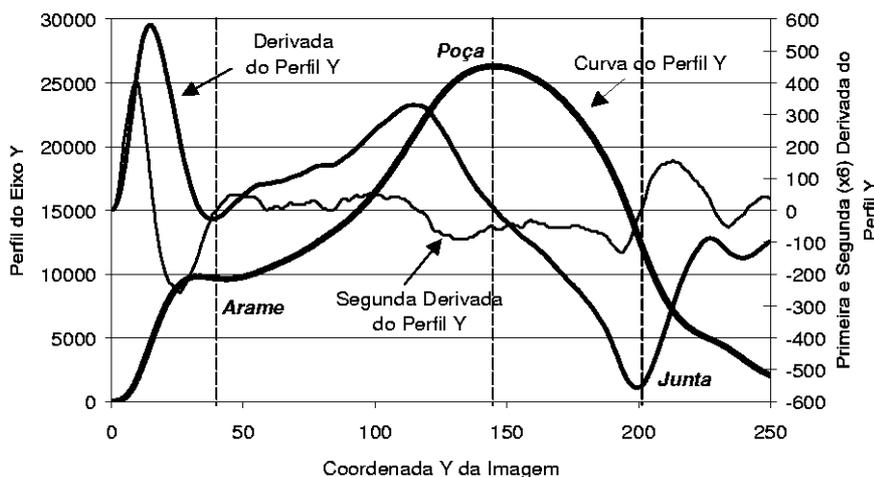


Figura 5: Perfil Y da Imagem Reduzida com Indicação da Localização do Arame, Poça e Gap.

A figura 6 mostra a variação dos níveis de cinza com a coordenada X na linha identificada para o arame. Pelo formato da curva, pode-se localizar facilmente o arame e determinar sua largura, a qual é calculada com base nas mudanças de concavidade da curva entre os picos, marcada com as legendas *Início do Arame* e *Final do Arame*.

A figura 7 mostra a variação dos níveis de cinza na linha correspondente à máxima largura da poça na imagem. A mudança de concavidade da curva no seu início e final permitem identificar o início e o final da poça na linha, marcados com as legendas *Início da Poça* e *Final da Poça*.

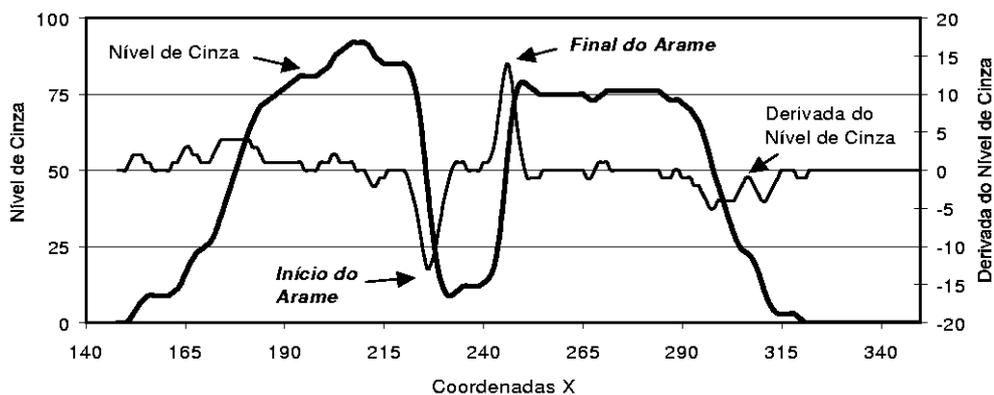


Figura 6: Nível de Cinza na linha onde foi detectada a presença do arame, com indicação das coordenadas X das posições inicial e final do arame.

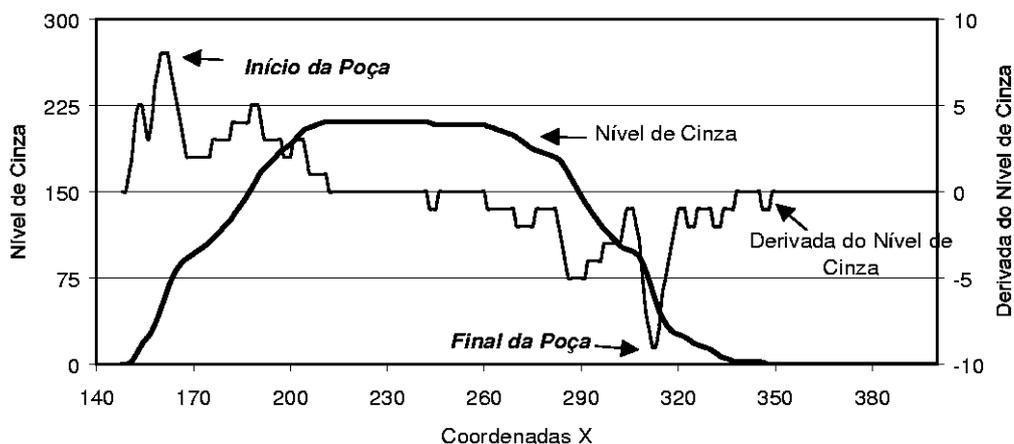


Figura 7: Nível de Cinza na linha onde foi detectada a presença da poça, com indicação das coordenadas X das posições inicial e final da poça.

A figura 8 mostra a variação dos níveis de cinza na linha correspondente à junta na imagem. A curva apresenta uma região de máximo em que a intensidade é aproximadamente constante. O centro desta região indica a localização da junta e sua extensão determina a abertura da raiz. Esta é obtida identificando na curva os pontos de mudança de concavidade.

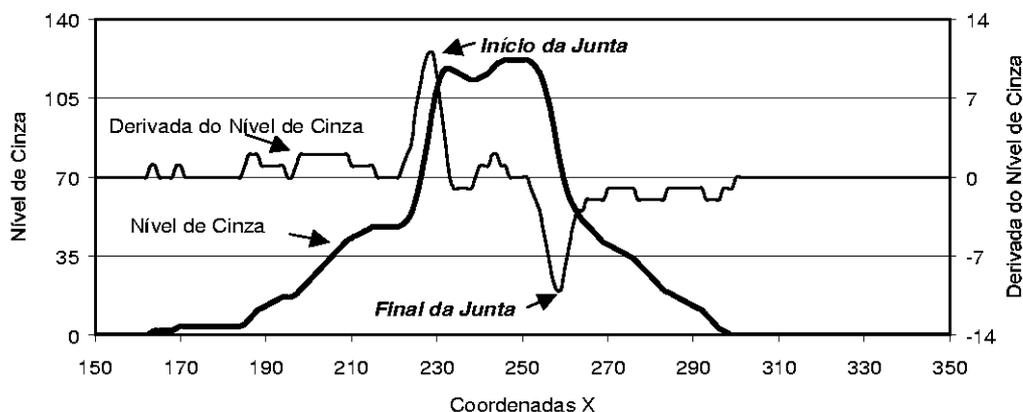


Figura 8: Nível de Cinza na linha onde foi detectada a presença da junta, com indicação da coordenada X.

4. RESULTADOS

O algoritmo desenvolvido foi aplicado para identificar os parâmetros de interesse (largura da poça, largura da abertura da raiz e centralização) a partir das imagens coletadas nos ensaios. Além desses parâmetros, foram também medidos o diâmetro do arame e o tempo de processamento para cada quadro. Os resultados mostrados a seguir referem-se aos 47 quadros adquiridos durante o ensaio XI da tabela 1. Os quadros foram adquiridos em seqüência com período de amostragem variável.

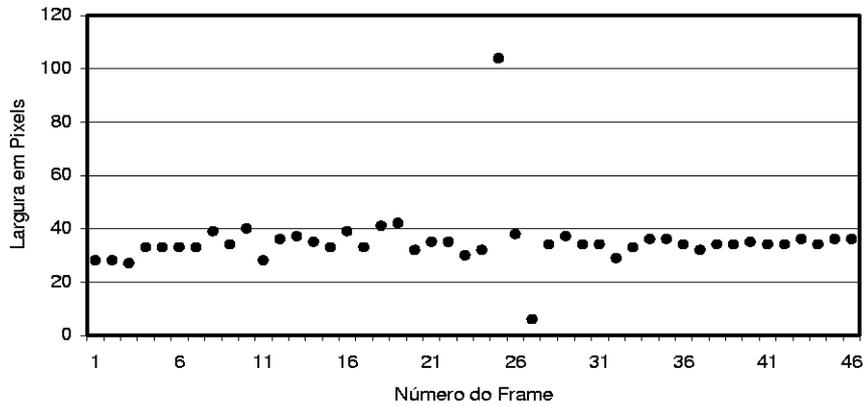


Figura 9: Diâmetro do arame calculado para o ensaio XI.

4.1 Diâmetro do Arame

Como o diâmetro do arame é fixo em todos os ensaios (0,8 mm), medindo-se esse parâmetro por meio do algoritmo desenvolvido, pode-se avaliar seu desempenho. A figura 9 mostra os resultados dessas medições. A análise estatística da distribuição de frequências das leituras de diâmetro do arame mostra um índice de 47% de leituras dentro do intervalo de 33 a 35 pixels, que é o intervalo definido para 3,7% de erro em relação à média aritmética dos valores lidos para o diâmetro do arame (34 pixels). Esta média representa o valor esperado de leitura para 0,8 mm (para a distância focal utilizada). Para dimensões maiores que o diâmetro do arame (ex.: largura da poça) espera-se atingir um índice de acerto maior que 47%.

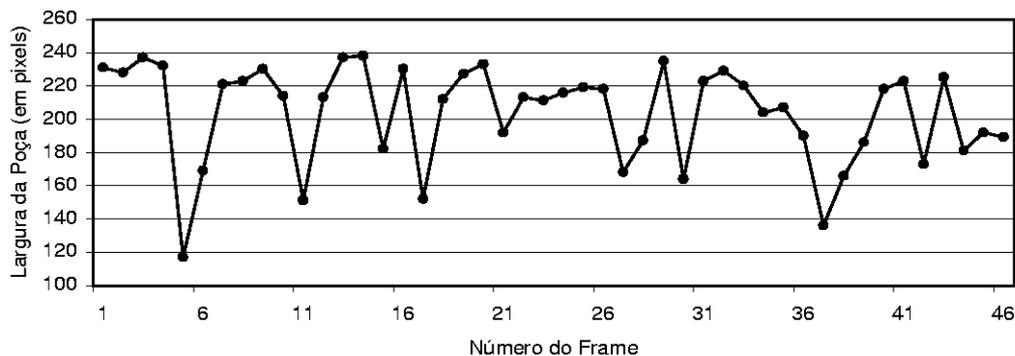


Figura 10: Largura da Poça calculada para o ensaio XI.

4.2 Largura da Poça

A figura 10 mostra os valores calculados para a largura da poça. Como esta varia durante a soldagem, não é possível avaliar a precisão dos valores individuais medidos, podendo-se entretanto identificar uma tendência de redução em sua dimensão. Essa tendência reflete o fenômeno físico, uma vez que os quadros aqui mostrados correspondem ao início da soldagem realizada em uma junta de topo com abertura na raiz. Como nesta fase inicial as

chapas ainda se encontram em uma temperatura baixa, há um resfriamento mais rápido do metal fundido, o que dificulta o preenchimento da junta. Com o aquecimento das chapas, o resfriamento do metal fundido torna-se mais lento, o que propicia um melhor preenchimento da raiz, reduzindo desta forma o volume de metal de reforço e, em consequência, a largura do cordão.

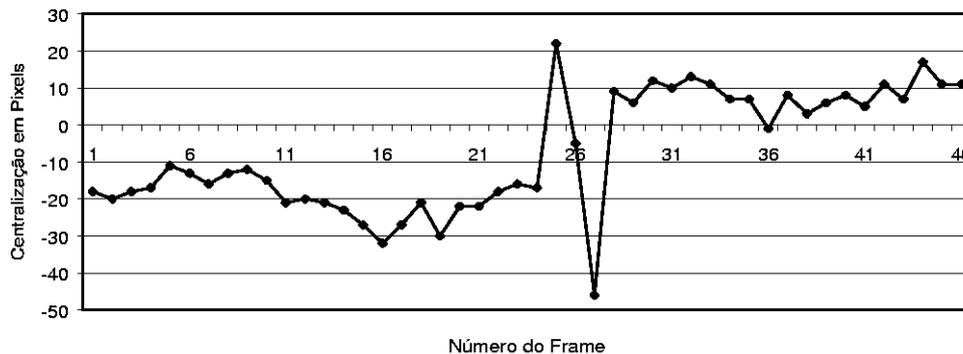


Figura 11: Centralização do arame em relação à junta em número de pixels.

4.3 Centralização

A figura 11 mostra os valores calculados para a centralização do arame em relação à junta. Deve-se observar que o robô foi intencionalmente programado para cruzar o eixo da junta durante a solda. Conseqüentemente, a curva correspondente ao alinhamento entre o arame e o eixo da junta também cruza o valor zero no gráfico. Valores negativos indicam que a tocha está situada à direita da junta, na imagem adquirida.

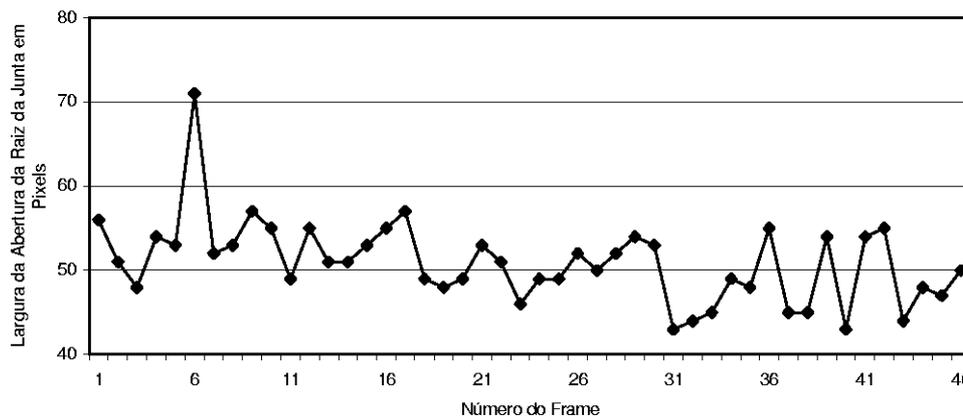


Figura 12: Largura da Abertura da Raiz da Junta em número de Pixels

4.4 Largura da abertura da Raiz da Junta

A figura 12 mostra os valores calculados da abertura da junta da raiz. Observa-se uma grande variação nos valores medidos, o que pode ser explicado pelo fato de a medição ser baseada no volume de metal fundido que escorre para dentro da raiz e não na distância real entre as duas bordas. Apesar disso, obtém-se uma indicação dessa dimensão, a qual pode ser utilizada para controlar a taxa de deposição de metal, garantindo o preenchimento da abertura.

4.5 Tempo de Execução

O tempo de execução do algoritmo de busca é diretamente proporcional ao tamanho da imagem sendo processada: quanto maior a imagem, mais tempo é necessário para calcular o perfil em ambos os eixos e identificar os parâmetros desejados. Para os 17 ensaios realizados,

o menor tempo de execução foi 50 milisegundos, e o maior 220 milisegundos, com precisão de 10 milisegundos. Como o objetivo desse algoritmo é a monitoração da poça de fusão para fins de controle, é necessário assegurar que o tempo de execução do algoritmo seja o menor possível. Ainda assim, o tempo de execução do algoritmo parece razoável para uso em controle da qualidade do cordão de solda, se comparado à constante de tempo da poça (Carvalho, 1997).

6. CONCLUSÕES

O algoritmo desenvolvido apresenta bons resultados, perceptíveis quando se mede uma grandeza constante durante todo o ensaio: o diâmetro do arame. No entanto, esse algoritmo se mostra ainda muito sensível aos ajustes dos parâmetros da câmera necessários para reduzir os reflexos do arco. Considerando-se a grande variação observada nos tempos de processamento de imagem, verifica-se que existe um compromisso entre a precisão que pode ser conseguida com uma imagem de maior tamanho e o tempo necessário para processá-la.

Agradecimentos

Agradecimentos ao CNPq/RHAE, que financiam esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Adolfsson, S. et al., 1999, On line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding, *Welding Journal*, 78(2), pp. 59s-73s.
- AMERICAN WELDING SOCIETY - SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS
STANDARD: Specification for automotive frame weld quality - arc welding. AWS D8.8-79, SAE HS J1196.
- Carvalho, G.C., 1997, An adaptive Control System for Off-line Programming in Robotic gas metal arc Welding, PhD Thesis, Cranfield University.
- Chen, W., Chin, B.A., 1990, Monitoring Joint penetration Using Infrared Sensing Techniques, *Welding Journal*, vol. 69(4), pp. 181s-185s.
- Ekstrom, M., 1984, Digital Image Processing and Recognition, Academic Press Inc., Orland.
- Galbiati Jr., Louis J., 1990, Machine Vision and Digital Image Processing Fundamentals, Prentice-Hall, New Jersey.
- Hall, E. L., 1979, Computer Image Processing and Recognition, Academic Press INC., New York.
- Johnson, J. A., Carlson, N.M., Smartt, H.B., Clark, D.E., 1991, Process Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode, *Welding Journal*, April, pp. 91-s – 99-s.
- Kuk, K.A., 1985, Determining acceptable joint mislocation in systems without adaptive control. *Welding Journal*, 64(11), pp.65-66.
- Kurkin, N.S. and Driker, V.E., 1990, Evaluation of limiting deviations during robotised arc welding T joints. *Welding International*, 4(7), pp.553-555.
- Nissley, L., 1983, Understanding positioning errors in robotic arc welding system, *Welding Journal*, 62(11), pp.30-37.
- Norrish, J., 1992, Advanced Welding Processes, Institute of Physics, Bristol.
- Parmar, R.S., 1995, Welding Processes and Technology, Khana Publishers, Delhi.
- Richardson, R.W. et al., 1984, Coaxial arc weld pool viewing for process monitoring and control. *Welding Journal*, 63(3), 43-50.
- Wadsworth, P., 1987, Assessment of Weld Wire-to-joint Positional Tolerances for Robotic Arc Welding. Edison Welding Institute, Abstract of Report MR8703 (<http://www.ewi.org:2001/cgi-bin/cgicookie?dq3re.0.5jn0v9.0.1>).

WELD POOL MONITORING IN THE GMAW PROCESS

Abstract.

This work describes a weld pool monitoring technique, which is based on the weld pool image analysis. The proposed image analysis algorithm uses machine vision techniques to extract geometrical information from the weld pool image such as: maximum weld pool width, gap width and misalignment between the joint longitudinal axis and the welding wire. These can be related to the welding parameters (welding voltage and current, wire feed speed and stand-off) to produce control actions necessary to ensure that the required weld quality will be achieved. The experiments have shown that the algorithm is able to produce good estimates of the weld pool geometry, however the adjustment of the camera parameters affects the image quality and, consequently, has a great influence over the estimation.

Keywords: MIG/MAG Welding Process, Welding Pool Shape, Monitoring