

# SOLDAGEM ROBOTIZADA COM ELETRODO REVESTIDO UTILIZANDO CONTROLE DE COMPRIMENTO DO ARCO ELÉTRICO COM COMPENSAÇÃO DA TEMPERATURA DO ELETRODO

Eduardo José Lima II <sup>1</sup>  
Alexandre Queiroz Bracarense <sup>2</sup>

## Resumo

Nesse trabalho são mostrados os resultados obtidos na soldagem com eletrodo revestido utilizando robôs antropomórficos. A robotização da soldagem com eletrodo revestido alia os benefícios da robotização, como qualidade, repetibilidade, rastreabilidade e flexibilidade às particularidades inerentes ao processo, como o controle da composição química e da microestrutura da junta soldada por meio das diferentes variações de eletrodos e revestimentos. O movimento de mergulho deve ser realizado na poça de fusão mantendo constante o comprimento do arco, independentemente da velocidade de soldagem. Para a determinação do comprimento do arco, a tensão da máquina de solda e a temperatura no eletrodo são monitoradas, de forma a compensar o aumento da taxa de fusão e da resistividade elétrica do material. Observa-se que, controlando apenas a tensão, apesar de o robô conseguir mantê-la constante, o comprimento do arco aumenta significativamente no final do cordão, pois a queda de tensão sobre o eletrodo diminui durante o seu consumo. Para compensar esse efeito, essa queda de tensão foi modelada considerando a diminuição do comprimento do eletrodo e o aumento da resistividade elétrica com a temperatura. Dessa forma, foi possível manter o comprimento do arco constante até o final do cordão.

**Palavras-chave:** Soldagem; Eletrodo revestido; Robotização; Controle.

## COVERED ELECTRODE ROBOTIC WELDING WITH ARC LENGTH CONTROL USING COMPENSATION OF DROP VOLTAGE ALONG THE ELECTRODE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE

## Abstract

The objective of this work is to show the results obtained with the shielded metal arc welding (SMAW) using an anthropomorphic robot. The procedure allies the robotization benefits such as quality, repeatability, traceability and flexibility to the ones inherent of the SMAW process, such as the chemical composition and microstructure control by using different electrodes and coatings. The diving movement must be done into the weld pool, maintaining the arc length constant, independently of the translation speed. To determine the arc length, the welding voltage and the electrode temperature are monitored, in order to compensate the melting rate and the material electric resistivity increase. It is observed that, controlling only the voltage, although the robot is able to keep it constant, the arc length significantly increases at the end of the weld bead, because the voltage drop on the electrode diminishes during electrode consumption. To compensate this effect, the voltage drop is modeled considering the electrode length reduction and the electric resistivity increase with the temperature. It is possible to keep the arc length constant during the entire welding.

**Key words:** Shielded metal arc welding; Robotization; Control.

## I INTRODUÇÃO

A soldagem com eletrodo revestido (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*) é um processo predominantemente manual, que tem como maior benefício a facilidade de controle da micro-

estrutura e da composição química do cordão de solda devido à possibilidade de se variar a formulação do revestimento. Esse processo oferece vantagens em relação a outros processos de soldagem a arco elétrico, uma vez que é menos

<sup>1</sup> Professor Doutor, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha CEP 31270-901 Belo Horizonte – MG, Brasil, (eduardo@demec.ufmg.br)

<sup>2</sup> Ph.D Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 31270-901 Belo Horizonte – MG, Brasil, (bracarense@ufmg.br)

sensível a correntes de ar e é mais apropriado para a maioria dos metais e ligas comumente usadas. Dependendo da aplicação, como soldagem subaquática, a soldagem com eletrodo revestido é normalmente a mais indicada. Um dos problemas do SMAW tem sido, contudo, quanto à qualidade do cordão de solda, no que diz respeito à homogeneidade. A mecanização do processo já existe e auxilia esta homogeneidade, porém traz limitações quanto à geometria do cordão. Uma possível solução é a robotização do processo.

Em se tratando da robotização da soldagem com eletrodo revestido, é necessário que, além de movimentar a ferramenta ao longo da junta a ser soldada, o manipulador robótico realize o movimento de mergulho do eletrodo à medida que esse é fundido. Porém, dependendo do diâmetro do eletrodo e da corrente de soldagem, a taxa de fusão do eletrodo revestido não é constante durante toda a extensão do cordão. Isso se deve ao fato de que a corrente de soldagem atravessa todo o comprimento ainda não fundido do eletrodo, provocando aquecimento do mesmo por efeito Joule. Esse aquecimento, de uma forma direta, facilita a fusão do eletrodo, que aumenta à medida que o mesmo se funde. Assim, se a soldagem for realizada com velocidade de mergulho constante, obtém-se um cordão de solda com características dimensionais não homogêneas.<sup>(1)</sup> Sua espessura (largura e reforço) aumenta à medida que o material é depositado, já que a taxa de fusão, e conseqüentemente de deposição de material, aumenta ao longo do cordão. Resultados experimentais<sup>(2)</sup> mostram que, além de se obter um cordão irregular e sem penetração, uma velocidade de mergulho constante pode levar à extinção do arco em pouco tempo após o início da soldagem.

A grande dificuldade da aplicação de robôs industriais no SMAW é a impossibilidade de se programar diretamente a trajetória para soldagem com eletrodo revestido, já que o movimento de mergulho do eletrodo e, conseqüentemente, a trajetória do porta-eletrodos, não são previamente conhecidos. Como para a soldagem com eletrodo revestido, é essencial o controle da velocidade de mergulho, foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia para a geração de trajetória em tempo de execução e sua implementação no controlador do robô. O presente trabalho apresenta a metodologia e os resultados da implementação da soldagem robotizada com eletrodo revestido.

### 1.1 Soldagem com Eletrodo Revestido

O processo de soldagem com eletrodo revestido é, dentre todos os processos de soldagem a arco, o mais simples em termos de equipamentos, regulagem e aplicação.<sup>(3)</sup> É aplicado em manutenção, construção e outras atividades que necessitam de soldagem. Além disso, é o processo mais utilizado em soldagem subaquática.

Como o comprimento do arco é controlado manualmente, é natural que ocorram variações durante a realização do cordão. Por essa razão, as fontes de energia utilizadas são do tipo “corrente constante”. Nesse tipo de fonte, a corrente de soldagem fornecida pela máquina é aproximadamente constante, sofrendo pouca influência da variação do comprimento do arco. Contudo, mesmo utilizando máquinas de corrente constante, um ponto crítico para se obter uma solda de qualidade é o controle do

comprimento do arco elétrico.<sup>(4)</sup> Quando a solda é feita em ambiente seco, o soldador é capaz de regular a velocidade de alimentação através da observação visual do comprimento do arco e da audição do som emitido, procurando manter o comprimento do arco constante. Contudo, na soldagem subaquática, por exemplo, o soldador perde a capacidade de ver e ouvir o arco elétrico, tornando sua execução ainda mais difícil.

### 1.2 Robótica Industrial

Um robô industrial é composto basicamente por um manipulador e um controlador. O movimento do manipulador entre dois pontos no espaço é determinado pela geração da trajetória.<sup>(5)</sup> O controlador do robô calcula, a cada período de amostragem, um ponto da trajetória (seja utilizando interpolação linear, circular ou junta a junta). Dados o ponto de posicionamento da ponta da ferramenta e o modelo do manipulador, o controlador calcula a posição de cada uma das juntas e envia o comando para o controlador de cada atuador.

Além de conhecer o modelo do manipulador, é necessário ao controlador o conhecimento da ferramenta para o cálculo das posições das juntas em cada ponto da trajetória. No caso da soldagem com eletrodo revestido, o modelo da ferramenta deve levar em consideração o eletrodo em si: seu comprimento e orientação.

Em processos de soldagem com alimentação mecanizada, o robô realiza o movimento seguindo a trajetória a ser soldada, mantendo constante a distância entre a ferramenta e a peça, enquanto o alimentador fornece o arame na poça de fusão. Na soldagem com eletrodo revestido, o robô é quem deve realizar a alimentação do eletrodo na poça por meio do movimento de mergulho.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Geração de Trajetórias para SMAW

A metodologia desenvolvida para geração de trajetórias para SMAW permite a programação do movimento do TCP (*Tool Center Point*) de forma semelhante à utilizada no GMAW (*Gás Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), ou seja, é necessário programar apenas os pontos inicial e final do cordão, sem se preocupar com o consumo do eletrodo.

O eletrodo é considerado como uma junta prismática da ferramenta. Assim, considerando como comprimento da junta o próprio comprimento do eletrodo, o TCP realiza o movimento ao longo da trajetória a ser soldada e, a cada período de amostragem, o novo valor da junta é calculado e atualizado no modelo cinemático do manipulador. O sistema de coordenadas da última junta do robô é representado por  $\{N\}$  e o TCP da ferramenta é representado por  $\{T\}$ . O TCP é o ponto da ferramenta que é movimentado para o ponto comandado durante a geração de trajetória. Definindo um sistema de coordenadas auxiliar como o ponto de consumo máximo do eletrodo (sistema  $\{I\}$ ), à medida em que o eletrodo é consumido, o modelo da ferramenta é atualizado de forma que o sistema de coordenadas  $\{T\}$  posicionado na frente de fusão se movimenta na direção do sistema de coordenadas auxiliar (na direção  $-\hat{Z}_T$ ). Essa metodologia permite que a velocidade de soldagem seja programada independentemente da variação da velocidade de mergulho, já que a trajetória é gerada de forma a movimentar o sistema de coordenadas  $\{T\}$  com uma velocidade constante ao longo da junta (Figura 1) e o TCP é atualizado a cada período de amostragem do controlador.

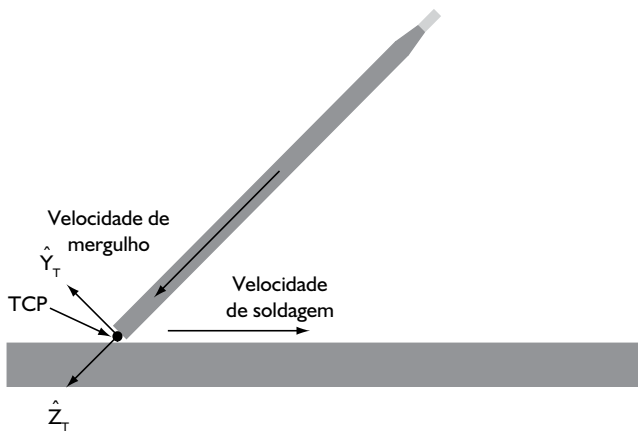


Figura 1. Velocidades de soldagem e de mergulho do eletrodo.

## 2.2 Controle de Comprimento do Arco Elétrico

Para implementar a soldagem com eletrodo revestido, utilizando a metodologia apresentada, é necessário determinar a taxa de fusão do eletrodo para que o controlador possa atualizar, a cada instante, o novo modelo cinemático da ferramenta. Para isso, poderiam ser adotadas duas soluções:

**Solução 1:** Utilizar modelos com base na temperatura do eletrodo correlacionando a temperatura e corrente com a taxa de consumo.<sup>(2)</sup> O problema dessa abordagem é que qualquer erro no modelo, assim como diferenças entre eletrodos, poderiam fazer o arco elétrico aumentar ou diminuir ao longo do cordão. Além disso, essa abordagem não considera que distúrbios externos poderiam também alterar a taxa de fusão, como fluxos de ar, irregularidades na superfície e composição da peça a ser soldada, etc.

**Solução 2:** Controlar o comprimento do arco por meio do seu valor de tensão, considerando que, para uma fonte de corrente constante, o valor de tensão sobre o arco elétrico aumenta com

o aumento de seu comprimento. Nesse caso, o problema é que não é possível medir diretamente a tensão sobre o arco elétrico. Pode-se, por sua vez, medir a tensão em todo o circuito elétrico da soldagem, como apresentado na Figura 2, o que inclui a queda de tensão no cabeamento, no porta-eletrodos, na peça e, principalmente, no eletrodo.

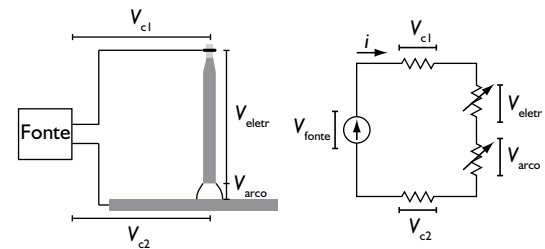


Figura 2. Circuito elétrico da soldagem.

Pode-se considerar que a queda de tensão no cabeamento e no porta-eletrodos ( $V_{c1} + V_{c2}$ ) é constante durante todo o cordão, já que a corrente de soldagem é mantida constante pela máquina de solda. Porém, a queda de tensão sobre o eletrodo ainda não fundido ( $V_{elettr}$ ) não é constante. Assim, mesmo que o controlador mantenha  $V_{fonte}$  constante pela regulagem da velocidade de mergulho, não se garante que  $V_{arço}$  será constante durante todo o cordão, o que não garante, portanto, um comprimento de arco constante.

Considerando-se  $V_{fonte} = V_{arço} + V_{elettr} + V_{c1} + V_{c2}$ , o movimento do robô durante a solda deverá ser de tal forma que se tenha  $V_{arço} = V_{fonte} - V_{elettr} - V_{c1} - V_{c2} = cte$ . Os valores de  $V_{c1}$  e  $V_{c2}$  podem ser determinados experimentalmente para cada montagem do sistema, pois dependem da peça, cabos e contatos elétricos. Como a área do eletrodo é constante e a corrente é mantida praticamente constante pela fonte, os parâmetros variáveis são o comprimento  $L$  e a resistividade elétrica  $\rho$ . A resistividade não pode ser considerada constante, pois durante a soldagem há um aumento significativo da temperatura do eletrodo, o que provoca um aumento da resistividade elétrica do material. Tem-se, então:

$$V_{elettr}(t, T) = R(t, T)I = \rho(T) \frac{L(t)}{A} I \quad (1)$$

em que  $t$  é o tempo de soldagem e  $T$  é a temperatura média no eletrodo.

De acordo com o Metals Handbook,<sup>(6)</sup> a resistividade do aço baixo carbono em função da temperatura é dada pela função:

$$\rho_e = 1,22003 \times 10^{-7} + 4,54533 \times 10^{-10} T + 9,2253 \times 10^{-13} T^2 \quad [\Omega] \quad (2)$$

na faixa de temperaturas alcançadas pelo eletrodo (20 a 800°C).<sup>(7)</sup> Dessa forma, conhecendo o comportamento da temperatura do eletrodo em função do tempo, a área de sua seção, a corrente de soldagem e o comprimento em função do tempo, é possível calcular a queda de tensão no mesmo.

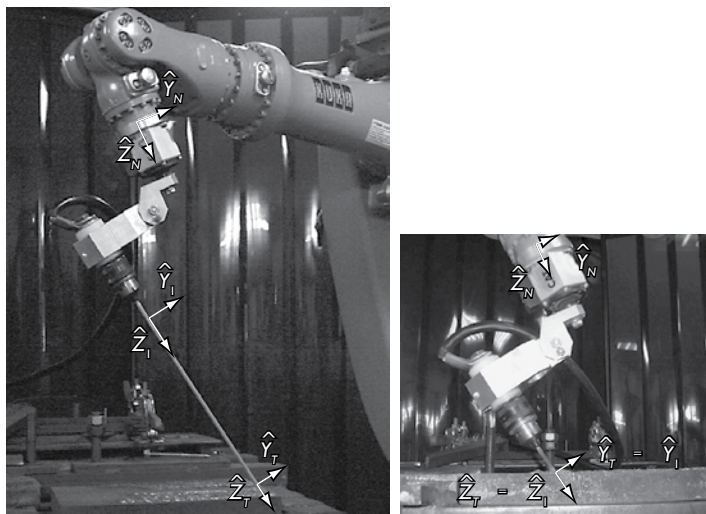
Para controlar a tensão do arco, utilizou-se um controlador PID, implementado no robô. O controlador calcula a diferença entre o valor de tensão de referência e o valor de tensão fornecido pela máquina, medido por um módulo de aquisição de dados e regula a velocidade de mergulho do porta-eletrodos. O valor de referência é dado pelo valor desejado para o arco elétrico somado à queda de tensão no cabeamento, peça e eletrodo.

### 2.3 Equipamentos e Materiais

Para implementar a metodologia desenvolvida, foi utilizado um robô industrial antropomórfico, modelo KR-16, do fabricante KUKA Roboter, com seis graus de liberdade rotativos, capacidade de carga de 16 kg e um alcance máximo de 1.610 mm. Esse manipulador utiliza um controlador KR C2, cuja linguagem de programação KRL permite desde a simples programação de movimentos junta a junta, lineares e circulares até a criação de programas complexos, incluindo alterações de parâmetros em tempo de execução. Essas características tornaram possível a implementação da metodologia proposta para geração de trajetória durante a soldagem e controle do comprimento do arco elétrico.

Para os testes de soldagem foi utilizada uma máquina MasterTig AC/DC 2.500 W.

Como porta-eletrodos foi utilizado um mandril adaptado em um porta-ferramentas.<sup>(7)</sup> A Figura 3 apresenta o porta-eletrodos segurando um eletrodo completo e outro já fundido.



**Figura 3.** Ferramenta utilizada para soldagem SMAW robotizada antes e após a deposição de um eletrodo.

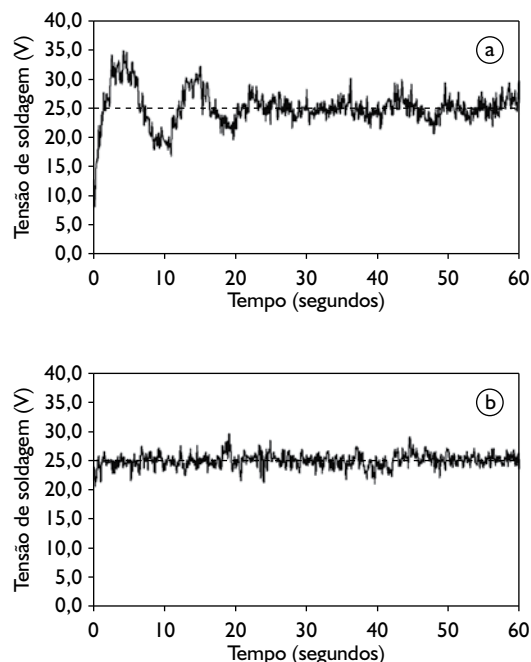
A metodologia proposta permite a soldagem com eletrodos revestidos de qualquer tamanho, diâmetro e revestimento, já que realiza o controle em malha fechada do processo. Nos testes realizados, foram utilizados eletrodos dos tipos rutilico (E6013), de

4 mm de diâmetro e básico (E7018), de 3,25 mm de diâmetro, utilizando correntes de soldagem na faixa de 150 A a 180 A. Como metais base foram utilizadas chapas de aço carbono de 15 mm de espessura. As soldas foram realizadas na posição plana, com um ângulo de 45° entre eletrodo e chapa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

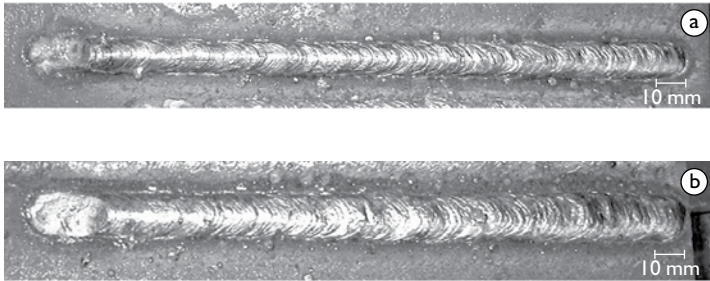
Inicialmente, foram realizados testes para a regulagem dos ganhos do controlador PID. Como a tensão do arco elétrico está sujeita a grandes flutuações, causadas pela agitação da poça de fusão,<sup>(8)</sup> podendo variar desde zero até o dobro do valor médio, durante a transferência metálica, é apropriado descartar a ação de controle derivativa, já que essa introduziria grandes ruídos na ação de controle, optando-se por um controlador PI.

A Figura 4a apresenta o valor de tensão medido em função do tempo, utilizando como constantes do controlador  $K_p = 20$  e  $K_i = 7$  e como valor de referência de 25 V. Observa-se que a tensão (e, conseqüentemente, o comprimento do arco) oscila algumas vezes até se estabilizar em torno do valor desejado. Após alguns experimentos,<sup>(9)</sup> chegou-se a uma regulagem de  $K_p = 40$  e  $K_i = 5,5$ . A Figura 4b apresenta o valor de tensão medido em função do tempo.



**Figura 4.** Valores de tensão medidos para: a)  $K_p = 20$  e  $K_i = 7$ ; e b)  $K_p = 40$  e  $K_i = 5,5$ .

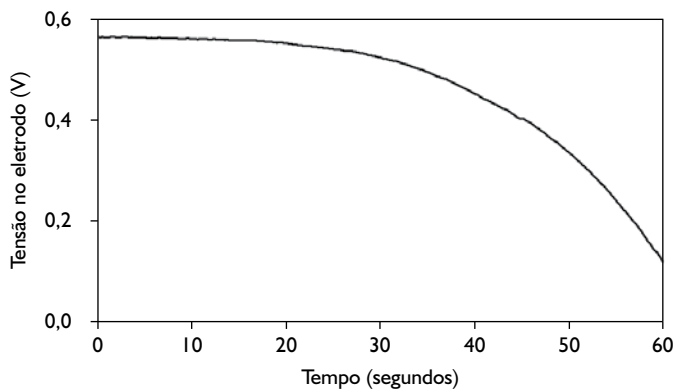
Foram feitos testes variando a corrente de soldagem, tensão de referência e velocidade de soldagem com o objetivo de se obter os melhores parâmetros. A Figura 5a apresenta o aspecto do cordão para uma velocidade de soldagem de 2,5 mm/s, corrente de 150 A e tensão de referência de 20 V. A Figura 5b apresenta o resultado utilizando velocidade de 2,5 mm/s, corrente de 180 A e tensão de referência de 21 V.



**Figura 5.** Aspecto do cordão de solda utilizando eletrodo E6013 com velocidade de 2,5 mm/s, a) corrente de 150 A e tensão de referência de 20 V; e b) corrente de 180 A e tensão de referência de 21 V.

Nos testes realizados, foi possível observar que, apesar de o robô conseguir manter a tensão constante, o comprimento do arco aumenta significativamente no final do cordão, já que a tensão sobre o eletrodo diminui com seu consumo. Para compensar esse efeito, foi utilizada a solução proposta anteriormente, em que  $V_{\text{eltr}}$  é modelada em função da temperatura do eletrodo. Para isso, foram feitos testes para obtenção da curva de temperatura em função do tempo. Termopares do tipo K foram utilizados para a monitoração durante as soldagens.

A Figura 6 apresenta a queda de tensão no eletrodo para uma corrente de 175 A.

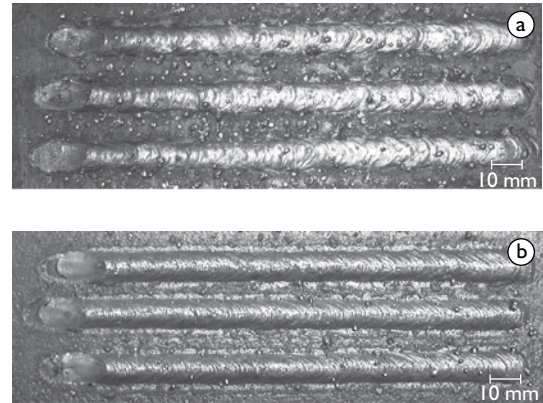


**Figura 6.** Queda de tensão no eletrodo.

Apesar da compensação da queda de tensão no eletrodo variar de apenas 0,5 V, observou-se que o comprimento do arco permaneceu constante durante toda a extensão do cordão, até o final do mesmo.

Para comprovar a repetibilidade alcançada com a robotização do processo, foram realizados vários cordões sobre chapa

utilizando eletrodos E6013 de 4 mm de diâmetro, corrente de soldagem de 175 A, tensão de referência de 21 V e velocidade de soldagem de 2,5 mm/s e eletrodos E7018 de 3,25 mm de diâmetro com corrente de 150 A, velocidade de 2,5 mm/s e tensão de referência de 26,5 V. A Figura 7 apresenta vários cordões realizados sobre chapa. Observa-se que os cordões são idênticos, o que comprova a repetibilidade e a flexibilidade obtida com a robotização do processo.



**Figura 7.** a) Cordões de solda sobre chapa utilizando eletrodos E7018; e b) eletrodos E6013, comprovando a flexibilidade e repetibilidade do processo.

## 4 CONCLUSÃO

O presente trabalho evidencia ser possível robotizar o processo de soldagem SMAW, um processo tipicamente manual. O mergulho do eletrodo é realizado pelo próprio manipulador, sem a necessidade da construção de mecanismos adicionais para a alimentação. O controle do comprimento do arco é realizado pela medição da tensão fornecida pela máquina de corrente constante. Porém, como a queda de tensão sobre o eletrodo varia durante a soldagem, sua resistência foi modelada em função do comprimento ainda não fundido e da temperatura média da alma. Foram mostrados cordões de solda realizados utilizando a metodologia proposta, comprovando a homogeneidade e repetibilidade dos cordões.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro e à KUKA Roboter pelo empréstimo do robô utilizado para a validação da metodologia.

## REFERÊNCIAS

- 1 BRACARENSE, A.Q. **Shielded metal arc welding electrode heating control by flux ingredients substitution**. 1994. 268 p. (Thesis - Doctor in Metallurgical and Material Engineering). Golden, Colorado: Colorado School of Mines, 1994.
- 2 BATANA, J.R. **Modelamento da taxa de fusão através da monitoração da temperatura do eletrodo revestido para soldagem robotizada**. 1998. 86p. (Dissertação de mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 1998.
- 3 JUERS, R.H. Naval surface warfare center. **Welding Brazing and Soldering, ASM Handbook**, 1993.
- 4 KANG, D., Development of an arc voltage control mechanism for underwater wet SMAW process, **M.Sc. thesis, Ohio State University**, 1996.
- 5 CRAIG, J. J., **Introduction to Robotics Mechanics and Control**, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989.
- 6 **Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels**, v. I. ASM International, Materials Park, Ohio, 1978.
- 7 DANTAS, C. M., LIMA II, E. J., BRACARENSE, A. Q., Análise da Viabilidade de Utilização de um Mandril Instrumentado com Termopares para a Soldagem Robotizada com Eletrodo Revestido, **XXXI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem**, São Paulo – SP, 2005.
- 8 BERG, J., LARIGALDE, A., Melting rate of coated electrodes. **Welding Journal**, v. 32, n. 5, p. 268-271, 1952.
- 9 LIMA II, E. J., **Soldagem Robotizada com Eletrodo Revestido**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

Recebido em: 4/10/07

Aceito em: 4/12/08

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro, RJ. São Paulo: ABM, 2006.