

# ROBOTIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM ORBITAL DE TUBOS<sup>(1)</sup>

*Eduardo José Lima II*<sup>(2)</sup>  
*Guilherme Campelo Fortunato Torres*<sup>(3)</sup>  
*Ivanilza Felizardo*<sup>(4)</sup>  
*Frederico Allevato Ramalho Filho*<sup>(5)</sup>  
*Alexandre Queiroz Bracarense*<sup>(6)</sup>

O presente trabalho apresenta a robotização do processo de soldagem de tubos (com costura ou sem costura), conhecida como Soldagem Orbital, utilizando o processo de soldagem com arame sólido – GMAW (*gas metal arc welding*) e tubular - FCAW (*flux cored arc welding*). O trabalho descreve o levantamento de uma tabela de referência a ser utilizada na soldagem e que contém os melhores parâmetros encontrados para cada posição (plana, sobre-cabeça, vertical ascendente ou vertical descendente). Em seguida é mostrado o desenvolvimento de um robô com quatro graus de liberdade, permitindo todos os movimentos necessários à tocha para soldagem. O robô é ainda capaz de controlar os parâmetros de soldagem (tensão e corrente), através da atuação direta do sistema de controle na máquina de solda. É mostrado ainda o desenvolvimento de um sensor que viabiliza o senso de posicionamento do robô ao sistema de controle para a seleção dos parâmetros a partir da tabela. Mostra-se que a robotização do processo da soldagem orbital permite obter ganho na qualidade do produto final, aumento considerável da repetibilidade, diminuição do retrabalho e diminuição do tempo de execução da solda. No mínimo, o robô é capaz de reproduzir o trabalho (a solda) do melhor soldador humano, através da utilização dos mesmos parâmetros contidos na tabela de referência. Além disso, utilizando o robô, é possível otimizar tais parâmetros a fim de aumentar a qualidade e as taxas de deposição de material e, por fim, aumentar a velocidade da soldagem, diminuindo ainda mais o tempo gasto em cada cordão.

Palavras-chave: Soldagem orbital, robotização, controle, otimização da soldagem

- (1) *VIII Seminário de Automação de Processos – 6 a 8 de Outubro de 2004 – Belo Horizonte – MG*
- (2) *Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Doutorando*
- (3) *Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Controle e Automação, Graduando*
- (4) *Rotech Tecnologia Robótica Ltda, Enga Mecânica, Dra.*
- (5) *Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Graduando*
- (6) *Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Professor, Ph.D*

# 1 Introdução

Na fabricação de gasodutos é feita a união de tubos metálicos que possuem em média 12 metros de comprimento de forma a compor um duto completo. O processo utilizado para a soldagem dos tubos é chamado de soldagem orbital. O grande desafio desse processo está no fato de que cada cordão de solda possui basicamente 4 posições de soldagem distintas: plana, sobre-cabeça, vertical ascendente e vertical descendente (Figura 1). Para cada uma dessas posições os parâmetros ótimos de soldagem são diferentes.

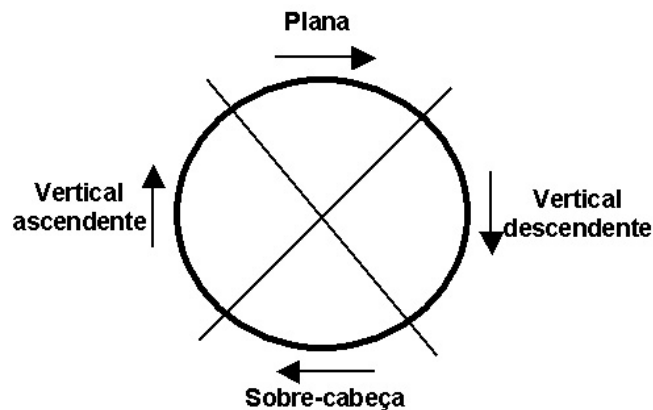


Figura 1: Posições de soldagem

No Brasil, a soldagem de tubos que são utilizados principalmente para distribuição de gás e óleo, é toda realizada manualmente com o processo TIG (GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*) (AWS, 1991) para passe de raiz e eletrodo revestido – SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) (AWS, 1991) para passes de enchimento e acabamento. A soldagem manual, além de ser ergonomicamente dificultada, pois os tubos são soldados *in loco* e a poucos centímetros do chão, não garante a produtividade e repetibilidade desejadas. O presente trabalho mostra o desenvolvimento de um robô para a soldagem orbital de tubos, com o objetivo de melhor atender a esses requisitos.

Segundo a definição da RIA (*Robotics Industries Association*): “Um robô é um manipulador reprogramável, multifuncional, projetado para mover materiais, peças, ferramentas e dispositivos especializados através de movimentos programáveis variáveis a fim de desempenhar uma variedade de tarefas”. Por essa definição, pode-se dizer que os dispositivos para a soldagem orbital mostrados na literatura (Blackman, 1999; YAPP, 2004) não são robôs, pois não permitem a programação de trajetórias ou de parâmetros de soldagem. Além disso, tais dispositivos não são multifuncionais. Por essas razões, diz-se que o processo de soldagem orbital atualmente é mecanizado, e não robotizado. A soldagem *in loco* de tubos, utilizando robôs industriais antropomórficos seria possível porém inviável, devido ao grande peso a ser deslocado a cada novo cordão da tubulação. O dispositivo mostrado nesse trabalho torna possível a programação tanto de trajetórias, como de parâmetros de soldagem para a soldagem orbital de tubos.

Dessa maneira, tal dispositivo pode ser chamado de robô, por ser completamente programável e realizar todas as atividades da soldagem automaticamente: abertura e fechamento do arco elétrico, movimentação da tocha de soldagem (controle da velocidade de soldagem, do ângulo da tocha e do *stick-*

*out*) e controle da corrente de soldagem e da tensão do arco elétrico. Porém, por não ser completamente multifuncional (não poderia ser utilizado para uma tarefa genérica, por estar limitado a movimentos ao redor do tubo), tal mecanismo pode ser definido como um “robô para tarefas especiais” (ROMANO, 2002).

## **2 Material e Métodos**

### **2.1 Levantamento da tabela de parâmetros**

Com o objetivo de se obter os parâmetros ótimos para soldagem orbital (SORAGI, 2004), vários testes foram realizados por um soldador qualificado utilizando o processo GMAW e FCAW. Foram realizados cordões sobre chapa nas quatro posições de soldagem existentes em um cordão completo na soldagem orbital: (plana, sobre-cabeça, vertical ascendente e vertical descendente). Em todas as posições foram feitos ensaios por ultra-som e metalografia dos cordões, para determinar os melhores parâmetros.

A partir dos resultados obtidos foram geradas tabelas de parâmetros indicando os parâmetros ótimos (tensão, corrente, velocidade de soldagem, ângulo e *stick-out*) para cada posição de soldagem. Nas regiões do tubo em que a soldagem muda de uma posição para outra (ex. de sobre-cabeça para vertical ascendente) os parâmetros devem então ser interpolados em um pequeno intervalo.

Observou-se porém, que os parâmetros ótimos para a soldagem vertical descendente diferem substancialmente daqueles para a soldagem plana e sobre-cabeça. Isso traz dificuldades nas regiões do tubo em que os parâmetros devem ser alterados de uma posição para outra. Optou-se, então, por realizar a soldagem apenas na seqüência: sobre-cabeça → vertical ascendente → plana. Assim, o robô deve soldar um dos lados do tubo, fechar o arco, descer pelo outro lado e realizar o outro cordão na mesma seqüência. Isso traz o inconveniente de se ter um período de arco elétrico fechado enquanto o robô se posiciona para o cordão seguinte. Porém devido aos cabos que ligam o robô ao controlador e à máquina de solda, não seria possível se fazer vários cordões em seqüência em uma só direção.

Com o objetivo de otimizar ainda mais o processo, podem-se utilizar dois robôs simultaneamente para a soldagem de uma única junta em tubos de maiores diâmetros. Nesse caso, enquanto um dos robôs sobe realizando a soldagem, o outro desce ocioso, reduzindo o tempo de arco elétrico fechado no processo, já que a todo momento um dos robôs estará soldando.

### **2.2 O Sensor inclinômetro**

Para realizar a mudança de parâmetros durante o processo de soldagem, é necessário conhecer a posição do robô em relação à posição plana. Esse senso de posicionamento pode ser proporcionado por um sensor que informe a inclinação em que o sistema robótico se encontra a cada instante. Sensores que medem inclinação são chamados inclinômetros.

Inclinômetros são sensores atualmente muito utilizados em diversos setores, dos quais destacam-se o agrícola, de equipamentos de precisão (centros de usinagem), de robótica móvel, aeroespacial e automotivo. Todavia, para cada

aplicação existem necessidades de inclinômetros distintos, seja pelo princípio de operação mais adequado, pela faixa de operação linear necessária, pelo invólucro externo, pelo tipo, quantidade e forma dos dados da saída, pelas condições nominais de operação (temperatura, umidade, emissões eletromagnéticas etc), pela máxima resolução, pela exatidão ou pela repetibilidade.

No caso do robô para soldagem orbital, optou-se por projetar um inclinômetro que possuísse o tamanho adequado para ser embarcado no sistema robótico; a robustez pertinente ao agressivo ambiente de soldagem; saída mais imune possível ao ruído eletromagnético proveniente do arco elétrico de soldagem; capacidade de operação de 360°; erro mínimo admissível; e resolução pertinente ao controle dos parâmetros de soldagem.

Encapsulando todas as qualidades descritas, o inclinômetro desenvolvido é composto, basicamente, por um encoder incremental de alta resolução, um pêndulo especialmente projetado e uma unidade eletrônica. O funcionamento baseia-se no centro de gravidade do pêndulo e no vetor peso (suas componentes), Figura 2. Acoplado ao pêndulo encontra-se o encoder. À medida que o sensor é inclinado (Figura 3), o vetor peso, através de sua componente x, proporciona um torque que tende a alinhar o pêndulo com o vetor normal (vetor ortogonal ao plano da terra). Dessa forma, é produzido um movimento rotacional relativo no encoder. Esse movimento é, então, enviado à unidade eletrônica que adequa a informação, e proporciona uma saída digital de 11 bits que é enviada ao controlador do robô, além de enviar informações ao meio externo por meio de um visor de cristal líquido.

O sensor projetado possui uma resolução de 0,18°, é mecanicamente robusto (por ser construído em aço inox) e possui faixa operacional linear de 360°.

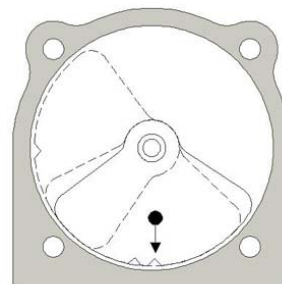
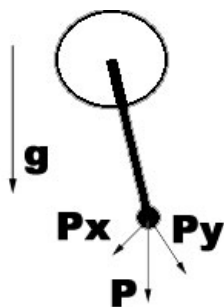


Figura 2: Decomposição Vetor Peso      Figura 3: Inclinômetro projetado para o robô

### 2.3 Estrutura do Robô

O robô projetado possui 4 graus de liberdade: movimento em torno do tubo, ângulo da tocha, *stick-out* e movimento lateral da tocha. Apresenta-se a seguir, cada um desses movimentos, assim como as soluções mecânicas adotadas para a implementação dos mesmos.

A fim de proporcionar o movimento de translação em torno do tubo (Figura 4), uma estrutura eletro-mecânica, composta por um par de correntes, pinhões, e conjunto de engrenagens em redução foi idealizada. O funcionamento desse subsistema pode ser explicado da seguinte forma: o atuador aciona um conjunto de engrenagens, que tracionam, por meio de pinhões, duas correntes. As correntes envolvem o tubo a fim de manter o robô preso ao mesmo sob quaisquer condições e

viabilizar a movimentação do robô por meio de atrito. O conjunto de engrenagens amplifica o torque do motor, garantindo a controlabilidade do sistema robótico.

Um dos parâmetros principais a serem controlados pelo robô é o ângulo da tocha de soldagem em relação à peça (Figura 5). Esse ângulo determina a forma como o arame será alimentado na poça de fusão, e seu controle é fundamental para que se obtenha com sucesso as soldas nas posições sobre-cabeça e vertical ascendente. Projetou-se então uma estrutura, que acionada por um motor de passo, propicia a variação do ângulo da tocha. Esse subsistema é composto por um conjunto de engrenagens em redução que proporciona o ganho de torque ideal à controlabilidade do mesmo.

O *stick-out* é mais um dos parâmetros de soldagem a serem controlados pelo sistema (Figura 6). No robô, esse movimento é realizado por um motor que aciona um fuso, e faz movimentar linearmente a tocha de soldagem aproximando-a e afastando-a da peça, de modo a diminuir e aumentar o comprimento do arco elétrico.

O controle da posição lateral da tocha (Figura 7) é necessário para se garantir o perfeito alinhamento entre o arco elétrico e o chanfro, principalmente no passe de raiz, em que um pequeno desalinhamento pode causar falta de fusão em um dos lados do mesmo. O desalinhamento é medido através de um sensor de trilha, especialmente projetado para a aplicação.

O movimento lateral da tocha é também realizado por um motor de passo que faz girar um fuso.

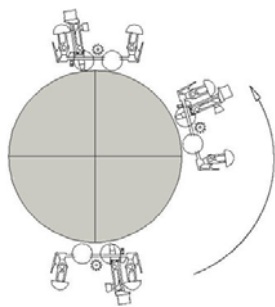


Figura 4: Translação

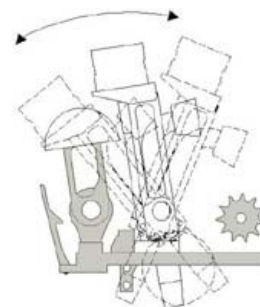


Figura 5: Ângulo de Tocha

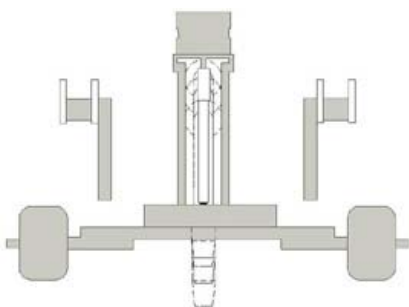


Figura 6: *Stick-Out*

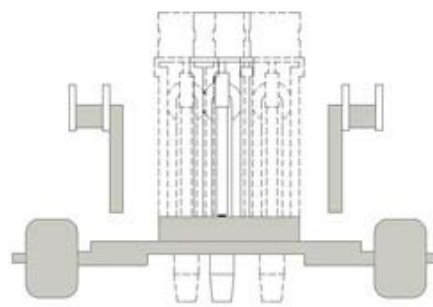


Figura 7: Posição Lateral da Tocha

## 2.4 Acionamento, Controle e Supervisão do robô

Para acionar o grau de liberdade de movimentação do robô ao redor do tubo e controlar sua velocidade, foi selecionado um motor de corrente contínua, acionado por PWM (modulação por largura de pulso). Já para os graus de liberdade de aproximação da ferramenta, sua inclinação e movimento lateral, foram selecionados motores de passo, devido às suas reduzidas dimensões, proporcionando, porém, um alto torque. Além disso, para esses movimentos, deve-se ter um controle preciso de posição, o que torna os motores de passo perfeitamente adequados.

O controlador do robô é implementado em um PC, ao que foram adicionadas placas de entradas e saídas digitais e analógicas, de modo a ser possível acionar e controlar os eixos do robô, assim como a máquina de solda.

Durante a execução do programa, o controlador gera valores de referência para a velocidade do primeiro eixo e posição dos três eixos seguintes. Os valores de velocidade de soldagem, do ângulo da tocha e do *stick-out* são informados através da tabela de parâmetros. Assim, para cada posição do robô ao redor do tubo, lida através do sensor inclinômetro, é possível gerar as referências com os valores ótimos para tais parâmetros (Figura 8).

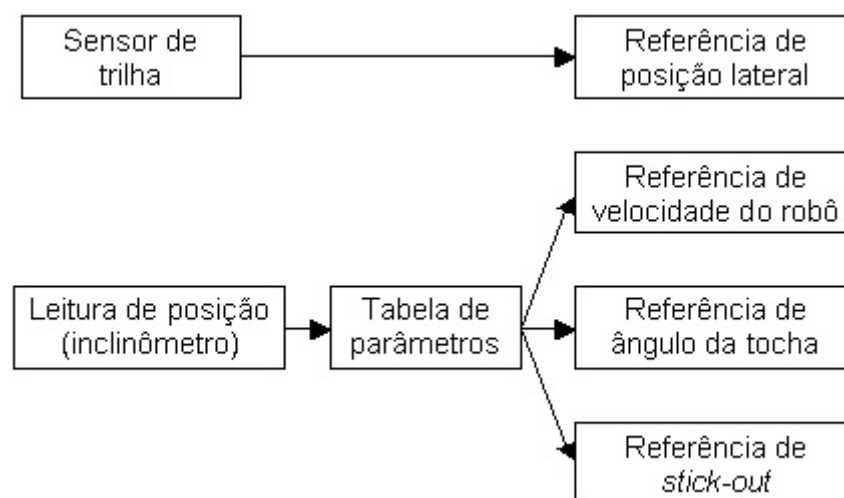


Figura 8: Geração de referências para atuadores

De posse dos valores de referência, o controlador implementa o controle de velocidade de movimentação ao redor do tubo (Figura 9). A leitura da velocidade é realizada por meio de um encoder posicionado no eixo dos pinhões de acionamento. Através da frequência de pulsos do encoder, determina-se com precisão a velocidade real do robô. Caso exista algum erro entre a referência e a velocidade real, a tensão de alimentação do motor de acionamento é alterada de forma a procurar zerar o erro. Após calcular a nova tensão de alimentação, um sinal analógico é gerado através da placa D/A, e enviado para o PWM, que amplifica a potência do sinal e alimenta o motor CC.

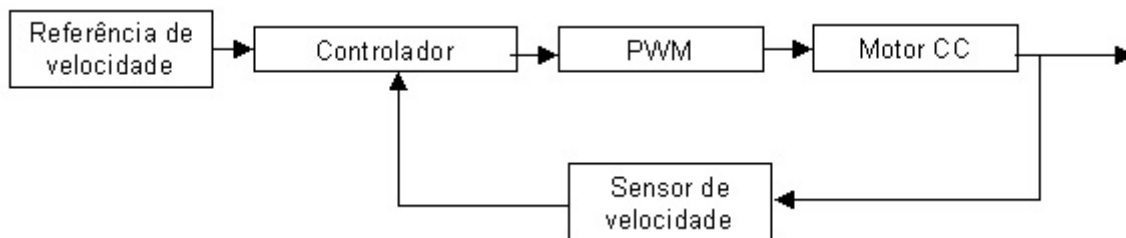


Figura 9: Controle da velocidade em malha fechada

Já para o controle de posição dos motores de passo, são utilizados *drivers* que alimentam as bobinas na ordem adequada, de modo a movimentá-los de acordo com os sinais enviados pelo PC.

A fonte de soldagem utilizada foi modificada de modo a possuir dois alimentadores de arame independentes, permitindo a utilização simultânea de dois robôs. Originalmente, a fonte possuía um potenciômetro para regulagem da tensão de soldagem. Cada um dos alimentadores possuía um potenciômetro para regulagem da corrente de soldagem (velocidade de alimentação do arame). Ambos os potenciômetros eram manuais, ou seja, o operador deveria regular uma tensão e corrente antes de ser iniciada a soldagem. A robotização do processo, porém, exige que os parâmetros (corrente e tensão) sejam regulados pelo próprio robô. Assim, desenvolveu-se uma placa eletrônica para realizar a interface entre o controlador do robô e a máquina de solda.

A placa desenvolvida é capaz de variar a resistência elétrica entre 3 terminais, substituindo, então, um resistor tripot. A resistência desejada é informada pelo controlador através de sinais digitais de 8 bits, permitindo uma resolução de 256 passos entre a resistência mínima e a resistência máxima. A substituição do resistor que regula a tensão da máquina de solda permite, portanto, a regulagem de 256 níveis de tensão diferentes. O mesmo é feito para cada um dos alimentadores de arame, substituindo os resistores de regulagem de corrente pelo circuito da placa eletrônica. Os valores de corrente e tensão a serem utilizados são determinados através da tabela de parâmetros, de acordo com a posição do robô em torno do tubo. Os valores digitais para regulagem da máquina de solda são determinados através de uma curva de calibração da fonte de soldagem.

### 3 Resultados

A Figura 10 apresenta o robô desenvolvido. Pode-se observar a tocha de soldagem presa ao sistema de movimentação e as correntes de fixação e tração.

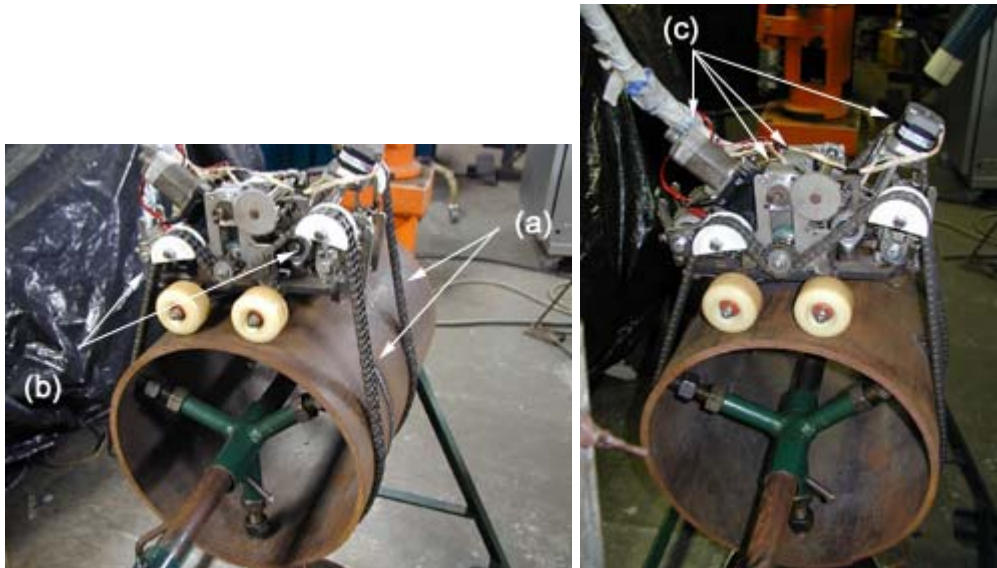


Figura 10: Robô para soldagem orbital indicando (a) correntes, (b) esticadores e (c) motores

A Figura 11 mostra um cordão de solda realizado pelo robô. Observa-se a homogeneidade do cordão, mesmo quando a posição de soldagem é alterada. Isso é obtido pela variação gradativa dos parâmetros da tabela durante a soldagem.



Figura 11: Cordão de solda sobre tubo realizado pelo robô orbital

## 4 Discussão

A robotização do processo de soldagem orbital traz inúmeras vantagens, entre elas:

- **Qualidade:** o controle dos parâmetros de soldagem durante o processo proporciona um cordão de solda mais homogêneo ao longo de todo seu comprimento, independente da posição de soldagem.
- **Repetibilidade:** a robotização proporciona soldas sempre similares, aumentando o grau de repetibilidade e rastreabilidade do processo, uma vez que um sistema robotizado é capaz de ajustar parâmetros e movimentos de modo a compensar variações em variáveis ambientais (melhor rejeição a distúrbios).
- **Economia:** diminuição de retrabalho através do aumento da qualidade e repetibilidade.
- **Redução do tempo para execução do cordão de solda:** a possibilidade de otimização dos parâmetros de soldagem, como corrente de soldagem, tensão



do arco elétrico e *stick-out*, permite trabalhar com velocidades de soldagem mais elevadas que as normalmente utilizadas na soldagem manual.

- Aumento do tempo de arco elétrico aberto, diminuindo o tempo total de realização da solda.

Além disso, a utilização de dois robôs para a soldagem de um só tubo evita o tempo de arco elétrico fechado no processo enquanto o robô desce, já que a todo momento um dos robôs estará soldando, o que aumenta ainda mais a produtividade.

## 5 Conclusão

A robotização do processo da soldagem orbital traz ganho na qualidade do produto final, aumento considerável da repetibilidade, diminuição do retrabalho e diminuição do tempo de execução da solda. No mínimo, o robô é capaz de reproduzir o trabalho (o cordão de solda) do melhor soldador humano, através da utilização dos mesmos parâmetros contidos em uma tabela de referência. Além disso, é possível otimizar tais parâmetros, a fim de aumentar a qualidade e reduzir o tempo gasto de execução do cordão de solda através do aumento da velocidade de soldagem.

A utilização do robô na soldagem com GMAW mostrou-se extremamente viável. Foi mostrado ainda que o aspecto do cordão não sofreu grandes variações de uma posição de soldagem para outra, pela utilização de uma mudança gradativa dos parâmetros (tensão, corrente, velocidade de soldagem, ângulo e *stick-out*).

Para tubos de diâmetros maiores, é possível ainda se utilizarem dois robôs simultaneamente, de modo a diminuir ainda mais o tempo de arco fechado e, conseqüentemente, aumentando o fator de trabalho.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem à COONAI Service Ltda e à Rotech Tecnologia Robótica Ltda pelo auxílio ao projeto, construção e implementação do robô para soldagem orbital.

## 7 Referências bibliográficas

1. AWS, **Welding Handbook**: Welding Processes, vol. 2, Eighth Edition. Miami: American Welding Society, 1991.
2. BLACKMAN, S. A., DORLING, D. V., Mechanized GMAW [MIG/MAG welding] for transmission pipelines. **Pipeline Welding and Technology. Proceedings, ICAWT '99, Columbus**, Oct, 1999. Session 5. Paper 1.
3. ROMANO, V. F., HENRIQUES, R. V. B., **Robótica Industrial**: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos. São Paulo: Edgard Blücher, 2002, v.1. p.255.
4. SORAGI, C. C. Estudo paramétrico de soldagem orbital de tubulações com o processo FCAW, **Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais**, 2004

5. YAPP, D., BLACKMAN, S. A. Recent Developments in High Productivity Pipeline Welding. **J. of the Brazilian Society of Mech. Sciences & Engineering**, v. XXVI, n. 1, p. 89-97, January-March 2004

## **8 Abstract**

This work presents the robotization of pipes welding process, called Orbital welding, using the Gas Metal Arc Welding (GMAW) and Flux Cored Arc Welding (FCAW) processes. The work describes the generation of a look-up table containing the best parameters for each one of the welding positions (flat, vertical up, vertical down and over-head). It's also shown the development of a 4 degree of freedom robot, which gives to the torch all the needed movements in order to get an optimal weld. The robot is also able to control the welding parameters (voltage and current) by directly actuating in the weld font controller. The work also shows the development of a sensor to inform to the controller the absolute robot position, in order to select the best welding parameters in the look-up table. It's shown that the orbital welding robotization improves the final product quality and repeatability and decreases the rework and the weld execution time. In the worst case, the robot is able to reproduce the work (the weld) of the best human welder, by using the same parameters in the look-up table. Moreover, using the robot, it is possible to optimize these parameters in order to improve the quality, the metal deposition rates and the welding speed, decreasing the time spent on each weld.

Key-words: Orbital welding, robotization, control, weld optimization