

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Desenvolvimento e validação de algoritmos para emprego de sensores na soldagem robótica orbital de tubulações

AUTORES:

Renan Medeiros Kindermann
Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.
Prof. Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr.

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Soldagem LABSOLDA, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE ALGORITMOS PARA EMPREGO DE SENSORES NA SOLDAGEM ROBÓTICA ORBITAL DE TUBULAÇÕES

Abstract

As an attempt to increase the development efficiency of automation in circumferential welding of pipelines, a methodology was developed and validated in this work. This methodology proposes the use of sensors for correction in real time of the programmed path of an anthropomorphic commercial robot. Arc sensor for seam tracking and electrical contact sensor for seam finding were employed. The considerations regarding the employment for such sensors on circumferential welding were described in this work. To enable the use of a sensor for circumferential welding a program in form of algorithm for path generation and welding parameters allocation was developed. The program is based on definition of some arguments, such as: pipe radius (R_{tubo}) and the torch angle (ξ_{tocha}). To validate the proposed system, the control of torch position performed by the arc sensor is analyzed based in current measurement over time. The program development and the virtual arrangement of the test facility were initially executed using simulation software. The results from this work will be used in the future as a basis for the development of strategies in form of algorithms to control the parameters and variables of orbital welding (adaptive welding), using a dedicated anthropomorphic robot for pipeline welding.

Key-words: Robotic orbital welding, Arc sensor, MIG/MAG CCC.

Introdução

A soldagem das tubulações do setor de petróleo e gás brasileiro é realizada quase que exclusivamente de forma manual. Principalmente em tubos de grandes dimensões, ela torna-se uma tarefa demorada e exaustiva para o ser humano. O soldador precisa conduzir a tocha de soldagem com precisão ao redor do tubo para adicionar o metal de união adequadamente na junta. Devido à baixa produtividade e ao aumento da construção das linhas dutoviárias, sobretudo com a recente descoberta do pré-sal, presencia-se uma crescente demanda em tecnologias para automação da soldagem de tubos e dutos.

Estas tecnologias, entretanto, geralmente se confrontam com alguns desafios. Primeiramente, têm-se as diferentes posições de soldagem ao redor do tubo. Em cada uma a gravidade interfere de forma distinta na poça de fusão. Além disto, há na prática um posicionamento impreciso dos tubos e uma preparação precária do chanfro. Como resultado há um desalinhamento da junta ou uma abertura excessiva do chanfro. Estes fatores influenciam diretamente o processo de soldagem, e como forma de compensação, os parâmetros e variáveis do processo precisam ser ajustados em tempo real. Neste ponto, o soldador, com a sua percepção sensorial e experiência, consegue controlar o processo de forma a sobrepujar estas dificuldades. Seja controlando o direcionamento da tocha de soldagem ou ajustando os parâmetros elétricos do arco em tempo real, de acordo com a condição atual da junta.

Sob a proposta de aumentar a eficiência de desenvolvimento da automação da soldagem orbital, uma metodologia foi desenvolvida e validada. Nesta, sensores para correção em tempo real da trajetória descrita por um manipulador robótico comercial do tipo antropomórfico foram empregados. Para tanto se utilizou um sensor a arco para seguimento de junta e um sensor baseado no contato elétrico para determinação da posição inicial da junta. Atualmente, embora existam sensores baseados, por exemplo, no escaneamento a laser, estes possuem um preço mais elevado se comparado aos sensores empregados neste trabalho. Um dos objetivos foi apontar as dificuldades de emprego dos sensores na soldagem orbital automatizada.

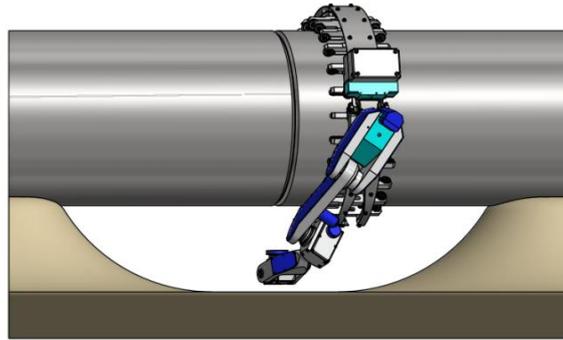


Figura 1. Protótipo do robô antropomórfico para soldagem de tubos e dutos com sensoriamento de junta a LASER.

Este trabalho visa, sobretudo, gerar amparo científico para o desenvolvimento de um manipulador robótico destinado a soldagem de tubos e dutos, conforme ilustra a Figura 1. A princípio, o sensor a LASER será utilizado para adquirir informações da junta e corrigir a trajetória de soldagem neste sistema. As informações servirão de base para correções dos parâmetros e variáveis da soldagem. Isto é denominado de soldagem adaptativa.

Uma estratégia para geração de uma trajetória circunferencial na forma de algoritmos foi proposta neste estudo com base em argumentos iniciais, como o raio do tubo (R_{tubo}) e o ângulo de ataque da tocha (β_{tocha}). Estes algoritmos servirão de base para o desenvolvimento do robô-protótipo. O aparato experimental foi previamente desenvolvido e analisado com a utilização de um simulador. O sistema foi validado com base em ensaios sobre o tubo, alterando o β_{tocha} , um dos parâmetros disponíveis no programa proposto. Para avaliação dos resultados, análises das características dinâmicas do arco (corrente) são apresentadas e relacionadas para cada posição de soldagem.

Simulação do aparato experimental

Para estudar a trajetória a ser realizada pelo manipulador robótico no traslado da tocha de soldagem sobre o tubo, realizou-se uma simulação do aparato experimental. A Figura 2 mostra o resultado visto pela interface do simulador. A prévia simulação auxilia no projeto da bancada de ensaios física. Erros de posicionamento dos componentes, possíveis colisões ou posições desconfortáveis das juntas e elos do braço robótico são visualizados nesta etapa do projeto.

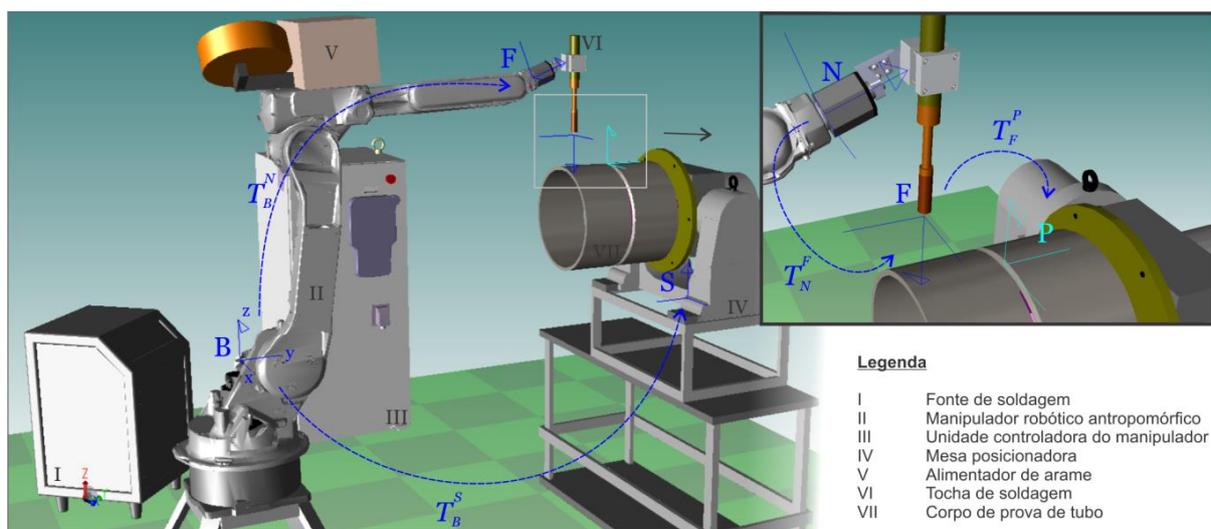


Figura 2. Simulação da bancada de ensaios com sistemas de coordenadas e transformações para soldagem orbital automática.

A fonte de soldagem, do tipo DigiPlus de 450 A da empresa IMC, estava integrada com a unidade controladora do robô por intermédio de entradas/saídas analógicas e digitais. O controle de ajuste da velocidade de arame e da altura do arco é realizado por intermédio de sinais analógicos e o comando de liga/desliga o arco por sinal digital. O tubo utilizado nos ensaios era um aço comum ao carbono de baixa liga, que apresenta boa soldabilidade. As suas dimensões são de 404 mm de diâmetro externo e espessura de parede de 12,7 mm.

Diferentemente de manipuladores robóticos lineares que se movimentam em translação, manipuladores robóticos antropomórficos trabalham em um espaço tridimensional. Para manipulação precisa do robô e interpolação dos pontos de uma trajetória é necessário que o robô reconheça o sistema de coordenadas (SC) da ponta da ferramenta, onde fica localizado o TCP (ponto central da ferramenta, do inglês “*tool center point*”).

Seguimento de junta a arco

Dentre as inúmeras opções disponíveis de sensores para a soldagem a arco robotizada [1], é necessário escolher o que mais se adequaria para a soldagem circunferencial de tubulações. Em termos de preparação para a soldagem MIG/MAG, a usinagem da extremidade do tubo é geralmente na forma de um chanfro em V. É usual também a utilização de um movimento oscilatório da tocha de soldagem. A função da oscilação é diminuir a chance de perfuração do metal fundido no passe de raiz e nos outros passes depositar o metal fundido de forma mais homogênea dentro do chanfro.

Com base nestas características do processo de soldagem, o sensor para seguimento de junta que utiliza as informações das próprias características físicas do arco combinadas com movimentos oscilatórios seria uma boa opção. Comparado com sensores ópticos, por exemplo, seu princípio de funcionamento é relativamente simples e seu custo de fabricação mais baixo.

O princípio deste sensor se baseia na premissa de que durante um movimento oscilatório da tocha de soldagem, quando esta avança em direção aos flancos do chanfro, é provocado uma variação da corrente média de soldagem. Por meio de comparação entre os valores da corrente elétrica nas extremidades do movimento oscilatório, é realizada uma verificação quanto à presença de desalinhamento entre o conjunto tocha-peça. A partir da diferença obtida pela comparação, é realizada a correção. Uma explicação mais detalhada pode ser encontrada em [2].

Desenvolvimento dos algoritmos

Os algoritmos que calculam a trajetória orbital e controlam os parâmetros processuais, foram divididos em subtarefas. Primeiramente, uma função para enumerar as diferentes posições do tubo foi programada (variável I). Neste caso, variáveis, como a inclinação da tocha de soldagem, velocidade de avanço, amplitude do movimento oscilatório, etc. podem ser inter-relacionadas durante a soldagem. Além disto, a trajetória foi dividida em segmentos de arco conforme mostra a Figura 3.

Na soldagem circunferencial com o processo MIG/MAG o processo transcorre tradicionalmente somente em dois quadrantes do tubo, iniciando em 0° e indo até 180°. O outro lado é soldado na sequência ou para aumento de produtividade, simultaneamente, utilizando, entretanto, dois sistemas orbitais.

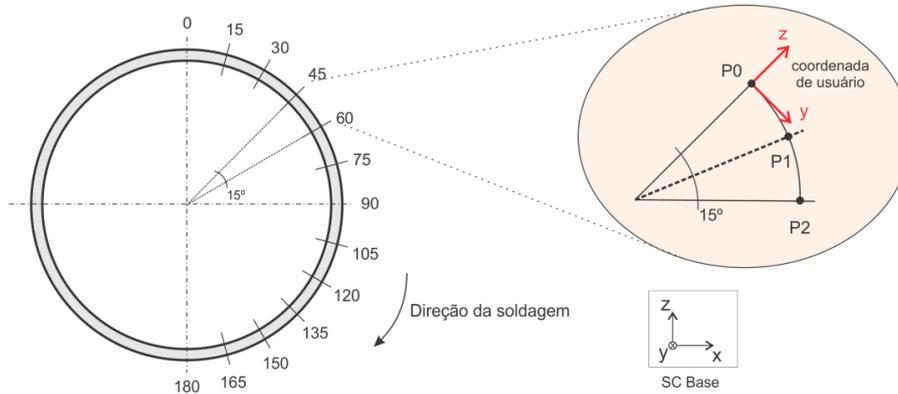


Figura 3. Estratégia de divisão em segmentos da trajetória circular, definidos pelo parâmetro β_{seg} . Para cada segmento um SC da peça é atualizado.

Um movimento circular é descrito pelo controlador robótico por intermédio da interpolação de no mínimo três pontos. Logo, para cada segmento são programados três pontos, P0, P1 e P2, que correspondem, respectivamente, ao ponto inicial, ponto médio e ponto final do segmento em questão. Na Figura 3 eles foram divididos para um ângulo de 15°, que é definido no programa pelo parâmetro β_{seg} . Além disto, em cada posição P0 é atualizado um SC da peça (P), cuja direção z é perpendicular à superfície do tubo e direção y tangente a ela. A referência dos pontos a um SC próprio por segmento facilita a programação dos pontos do próximo segmento.

O fluxograma apresentado na Figura 4 descreve o funcionamento do programa para soldagem orbital automatizada empregando sensores. Para a inicialização do programa é necessário definir alguns parâmetros de entrada, como o ângulo de ataque da tocha de soldagem, ξ_{tocha} , o ponto inicial da rotina de procura de junta, $P_{inicial}$, o raio do tubo, R_{tubo} e o ângulo de divisão da trajetória, β_{seg} .

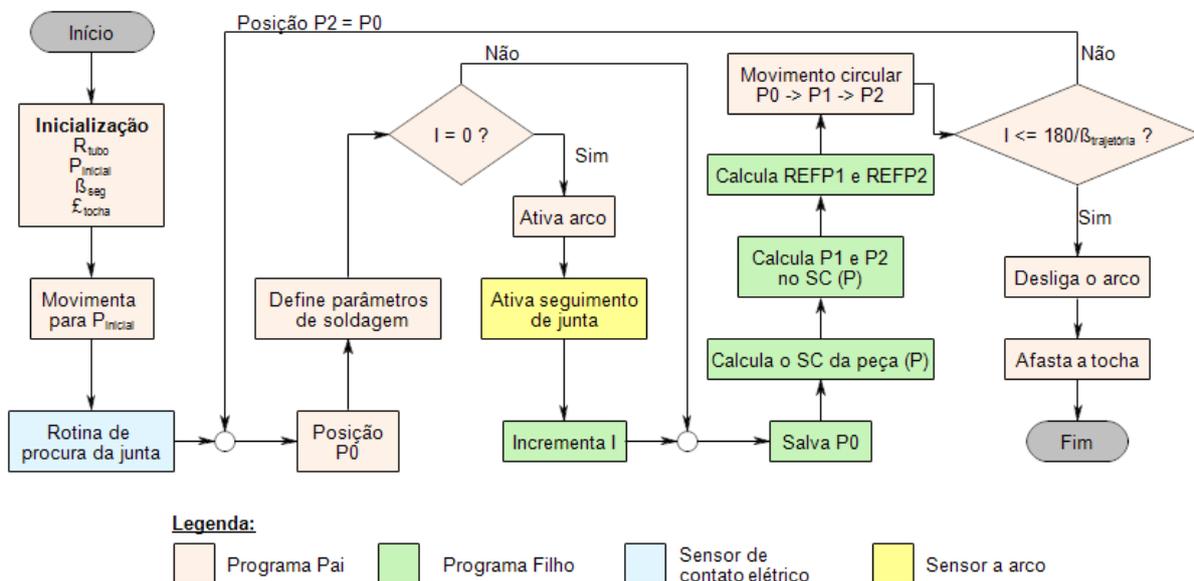


Figura 4. Fluxograma das subtarefas dos algoritmos para soldagem orbital automatizada com sensor de seguimento de junta a arco e de procura de junta com contato elétrico.

Com o início do processo, o robô movimenta-se para $P_{inicial}$, onde a rotina de procura de junta é executada. Quando o chanfro é encontrado, a posição P0 é atualizada. Os parâmetros são na sequência definidos e o arco aceso, ativando o seguimento de junta. Até este momento os algoritmos são executados por um programa Pai. O programa Pai é responsável pelas ações de execução dos movimentos e do acionamento de determinados comandos. Em contrapartida, para o cálculo do SC P,

dos pontos de referência do movimento oscilatório (REFP) e dos pontos da trajetória P0, P1 e P2, um programa Filho é executado no início de cada segmento. Na sequência, retorna-se para o programa Pai para executar os movimentos calculados pelo programa Filho. No final do segmento a variável I é incrementada e a posição P2 corresponde ao P0 do próximo segmento. Os parâmetros de soldagem são organizados com relação à variável I.

Metodologia para validação do programa

Para validação e avaliação da metodologia de controle da trajetória, inicialmente foram soldados cordões sobre o tubo. Diferentes ângulos de ataque da tocha de soldagem foram estudados, onde bastou alterar o parâmetro ξ_{tocha} do programa orbital. Os parâmetros e variáveis da soldagem foram mantidos constantes para todos os cordões. Um grupo de sete cordões foram soldados no total, com os seguintes ξ_{tocha} : 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 110° e 120°. Nos três primeiros cordões, a tocha “puxa” a poça de soldagem, em um nível decrescente da esquerda para a direita. No cordão de 90° a tocha está normal à junta. E nos três últimos a tocha “empurra a poça”, em um nível crescente da esquerda para a direita. A definição do ξ_{tocha} é mostrada na Figura 5

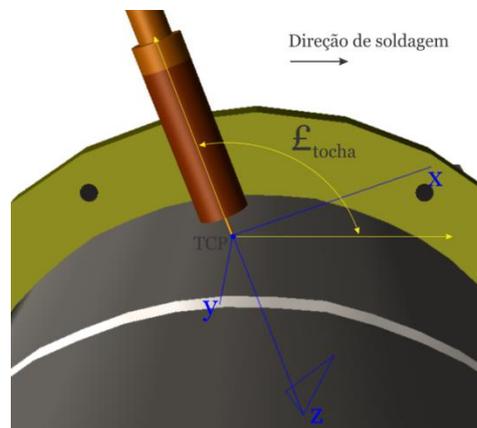


Figura 5. Definição do ângulo de ataque da tocha, ξ_{tocha} .

O processo de soldagem empregado é o MIG/MAG na versão CCC (Curto-circuito controlado). Ele é caracterizado por ser de controle de corrente na faixa de operação do curto-circuito. Para ser possível isto, uma leitura da tensão no processo se faz necessária. Um maior entendimento a respeito do funcionamento do CCC pode ser encontrado na dissertação de Silva [3] e Direne [4].

Análise do processo

A Figura 6 mostra a análise do comportamento da variação da corrente com o tempo em uma frequência de amostragem de 5 kHz. O gráfico da corrente na esquerda está mais expandido, para mostrar a definição das variáveis definidas do programa sinérgico da fonte de soldagem. No caso, não cabe ao usuário final alterá-las manualmente. Isto é realizado pelo programa, que dependendo da velocidade de arame e altura do arco selecionada, carrega estas variáveis automaticamente.

Como anteriormente comentado, o processo CCC tem seu controle baseado em corrente. Sendo assim, as variáveis de corrente da linha sinérgica I_p (corrente de pulso), I_{pm} (corrente de patamar médio) e I_B (corrente de base) não se alteram ao longo da soldagem. Assim como as variáveis de tempo: t_p (tempo de pulso) e t_{pm} (tempo de patamar médio). Entretanto, determinadas variáveis, como I_{CC} (corrente de curto-circuito) e t_{CC} (tempo de curto-circuito), não podem ser estipuladas com base em um valor único. Isto é explicado pela física do arco em curto-circuito e a dinâmica da poça de fusão durante os períodos de abertura e reabertura do arco. Uma explicação mais detalhada deste fenômeno pode ser encontrada em [3] e [4]. Da mesma forma, a variável de tempo t_B também depende das características

do processo. Ela é a responsável por permitir o uso de sensor a arco com um processo MIG/MAG controlado em corrente.

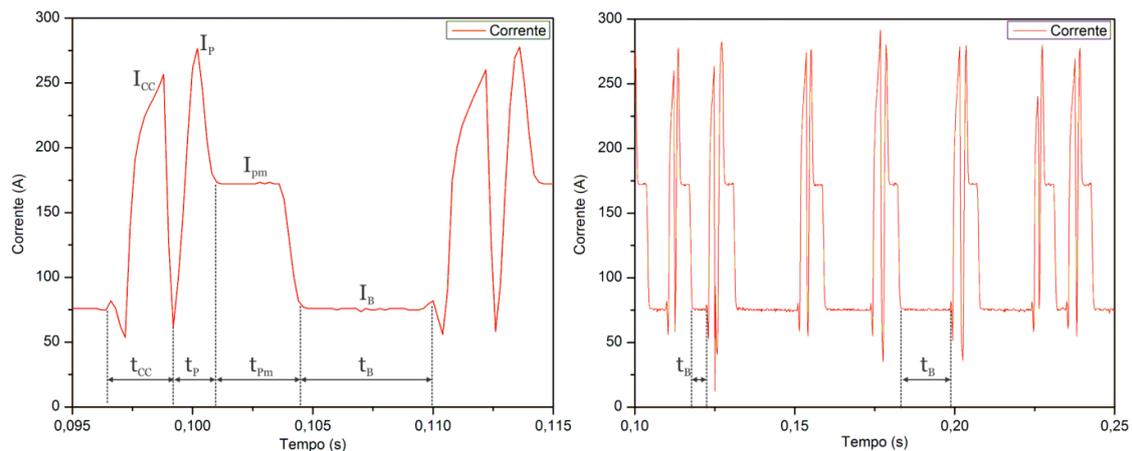


Figura 6. Esquerda: Gráfico da variação de corrente com o tempo para o processo MIG/MAG CCC com a definição das variáveis do programa sinérgico. Direita: Mesmo gráfico só que num tempo de aquisição maior para evidenciar a variação do tempo de base (t_B).

As correções do sensor a arco são baseadas nas variações de corrente média, conforme anteriormente explicado. Quando a tocha de soldagem se afasta ou se aproxima da peça, ou avança contra os flancos do chanfro V em um movimento oscilatório, o que ocorre na verdade é um aumento da frequência de curtos-circuitos. Isto é necessário para que o aumento da corrente compense a diminuição da DBCP. Sendo a recíproca também válida. Fisicamente o processo se desestabilizaria caso o t_B permanecesse fixo. O gráfico na esquerda da Figura 6 mostra esta variação do t_B . Portanto, um aumento da frequência de curtos-circuitos provoca um aumento da corrente média. O sensor a arco interpreta esta variação, e atua nas correções da mesma forma que atuaria para um processo MIG/MAG controlado em tensão.

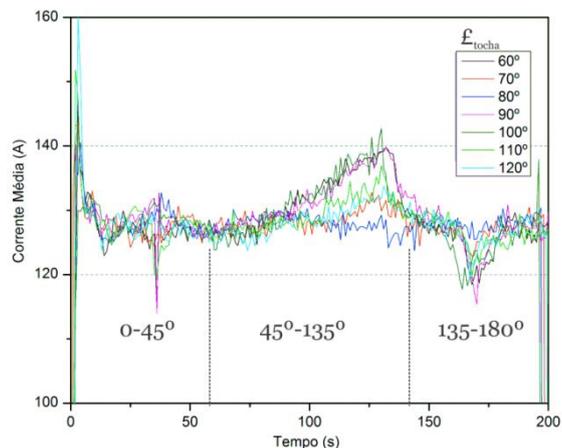


Figura 7. Variação da corrente média com o tempo ao longo da soldagem sobre o tubo para cada α_{tocha} estudado. 0-45°: Posição topo. 45-135°: Posição vertical-descente. 135-180°: Posição sobre cabeça.

Para averiguar a capacidade do controle de altura do sensor a arco, a variação da corrente média ao longo da soldagem foi mensurada, conforme mostra a

Figura 7. O tempo de aquisição foi de 1 s por amostragem. O sensor a arco foi configurado para que a altura da tocha de soldagem correspondesse a uma corrente de 130 A.

Pela análise da corrente média inicial é notório que a tocha de soldagem não estava perfeitamente posicionada com relação à superfície do tubo. No momento em que o processo é iniciado, o sensor a arco é ativado para que a posição da tocha seja àquela a se obter os 130 A configurados. Este ajuste demora em torno de 4 s. A corrente média permanece em um patamar controlado, até o momento em que se desliga o sensor a arco, no trecho de 45° até 135°. A partir de então se adota a estratégia de continuação da trajetória circular, considerando-a perfeita. Há, para este corpo de prova, um aumento da corrente média (diminuição da DCBP), já que a geometria do tubo não é perfeita. No trecho de 135° a 180° o sensor a arco é novamente ativado, controlando novamente a posição da tocha.

Conclusões

Este estudo desenvolveu e validou uma soldagem automática de tubos com base em um manipulador antropomórfico comercial. Um sensor a arco e outro de contato elétrico foram empregados. Os resultados deste trabalho podem ser resumidos conforme segue:

- O sensor a arco, no estado atual desenvolvimento, não é viável para uma soldagem orbital automática com robôs 3D. A sua utilização neste trabalho foi possível somente na posição plana e na sobre cabeça. De qualquer forma, devido a uma programação sofisticada para compensar a sua inaptidão de correções de rotação. O fato de este apenas corrigir em 2D inviabiliza a sua utilização para juntas não lineares e complexas.
- Neste trabalho foi mostrado que o emprego do sensor a arco é factível com fontes de soldagem sinérgicas sofisticadas com controle baseado na forme de onda da corrente. Em um manipulador robótico linear, como este translada o SC B sobre o tubo, seria viável a utilização do processo CCC (Curto-Circuito Controlado) com o sensor a arco.

Por fim, este estudo forneceu um embasamento científico inicial em direção à soldagem orbital adaptativa (com controle dos parâmetros e variáveis da soldagem) e para o desenvolvimento de um robô antropomórfico próprio com o uso de sensores.

Referências Bibliográficas

- [1] N.N, “Sensoren für das vollmechanische Lichtbogenschweißen,” DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren, Merkblatt DVS 0927-1, 2005.
- [2] F. KALIL, “Evolução da Técnica de Seguimento de Junta via Sensoriamento do Arco para Operações de Soldagem em Posições Forçadas,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [3] R. H. G. SILVA, “Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Aplicada ao Passe de Raiz,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [4] H. DIRENE, “MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Tansferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa CatarinaFlorianópolis, 2014.
- [5] MOTOMAN, “DX100 options: Instructions for Arc Sensor ComArc Function (P/N: 156897-1CD),” West Carrollton, EUA, 2007.
- [6] M. FRIDENFALK, “Development of intelligent robot systems based on sensor control,” PhD Tesis, Department of Mechanical Engineering, Division of Robotics, Lund University, Sweden, 2003.
- [7] D.W. CHO et al, “A study on V-groove GMAW for various welding positions,” Journal of Materials Processing Technology, 213, p. 1640– 1652, 2013.
- [8] A. SCOTTI, “Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho,” Artliber Editora, São Paulo, 2008