

Desenvolvimento e validação de algoritmos para emprego de sensores na soldagem robótica orbital de tubulações**(Development and validation of algorithms for sensor guided robotic arc welding of pipelines)****Renan Medeiros Kindermann¹, Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.¹, Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr.¹**¹*Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica - LABSOLDA, Florianópolis, SC, Brasil, renan.kindermann@labsolda.ufsc.br***Resumo**

Sob a proposta de aumentar a eficiência de desenvolvimento da automação da soldagem orbital de tubulações do setor de petróleo e gás, uma metodologia foi desenvolvida e validada. Nesta, sensores para correção em tempo real da trajetória programada em um manipulador robótico comercial do tipo antropomórfico foram propostos. Um sensor a arco para seguimento de junta e um sensor baseado no contato elétrico para determinação da posição inicial da junta foram investigados. As considerações a respeito da utilização destes sensores na soldagem orbital são descritas neste trabalho. Para permitir a utilização dos sensores, um programa em forma de algoritmos para geração de trajetória orbital e alocação dos parâmetros de soldagem foi desenvolvido. O programa é baseado na definição de alguns argumentos como o raio do tubo (R_{tubo}) e o ângulo de ataque da tocha (ξ_{tocha}). Para validação do sistema proposto e do controle da trajetória orbital, depósitos sobre o tubo foram soldados alterando-se o argumento ξ_{tocha} . O controle da posição da tocha pelo sensor a arco é avaliado com base em análise da corrente no tempo e os depósitos com base nas suas características geométricas, tais como: largura (l), penetração (p), convexidade (C) e área da zona fundida (A_f). Recomendações quanto aos parâmetros de soldagem e ao ξ_{tocha} para cada posição de soldagem são formuladas. O estudo da trajetória e a preparação virtual do aparato experimental foram executados inicialmente com a ajuda de um software de simulação off-line. Os resultados deste trabalho servirão futuramente para o desenvolvimento de estratégias na forma de algoritmos para controle dos parâmetros e variáveis da soldagem orbital (soldagem adaptativa), empregando um manipulador robótico antropomórfico dedicado à soldagem orbital de tubulações.

Palavras Chave: Soldagem orbital, Soldagem robótica, Sensor a Arco, MIG/MAG CCC.

Abstract: *As an attempt to increase the development efficiency of automation in circumferential welding of pipelines, in a methodology was developed and validate in this work. This methodology proposes the use of sensors for correction in real time of the programmed path by an 3D robot. Arc sensor for seam tracking and electrical contact sensor for seam finding were investigated. 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. And the weld beads based on its geometric characteristics, such as: width (l), penetration (p), convexity (C) and fusion zone (A_f). Recommendations regarding the welding parameters and the (ξ_{tocha}) for each welding position are formulated. The development of the circumferential welding program and the virtual arrangement of the test facility were initially executed using a 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 circumferential welding (adaptive welding), using a dedicated anthropomorphous robot for pipeline welding.*

1 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. A gama de variáveis que interferem na qualidade final da solda é grande.

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 os desafios e possíveis sugestões quanto ao emprego de sensores na soldagem de tubulações automatizada.

Este trabalho visa, sobretudo, gerar amparo científico e tecnológico para o desenvolvimento de um manipulador robótico destinado a soldagem de tubulações. A princípio, o sensor a LASER será utilizado para adquirir informações da junta e corrigir a trajetória de soldagem. Estas informações servem de base para correções dos parâmetros e variáveis da soldagem. Isto é denominado de soldagem adaptativa.

O programa para soldagem orbital foi desenvolvido com base em argumentos como o raio do tubo (R_{tubo}), o ângulo de ataque da tocha (β_{tocha}) e uma posição inicial. Uma função para alocação dos parâmetros de soldagem de acordo com a posição do tubo foi escrita no programa. O sensor a arco corrige variações da trajetória inicial programada com base apenas no R_{tubo} (não há necessidade de posicionamento manual do robô). Diferentemente de manipuladores robóticos lineares sobre trilhos que precisam ser manualmente posicionado sobre a junta, no sistema orbital desenvolvido, uma rotina para detecção automática da posição inicial da junta foi inserida. Um sensor a toque foi para este fim empregado. Com base em observações em campo e depoimentos de engenheiros, o correto posicionamento do trilho é uma dificuldade na utilização de sistemas orbitais convencionais (linear sobre trilho).

Os algoritmos do programa orbital servirão de base para o desenvolvimento do robô-protótipo. O aparato experimental foi previamente desenvolvido e analisado com a utilização de um simulador. A utilização de um ambiente virtual reduz o risco de colisões do sistema físico, não impacta a disponibilidade do sistema e permita a disposição dos subsistemas da bancada de forma mais eficiente. Os algoritmos e controle da trajetória foram validados com base em ensaios sobre o tubo; O parâmetro do programa orbital β_{tocha} foi alterado para estudar a sua influência nas características geométricas do cordão. Para avaliação dos resultados, análises metalográficas e das características dinâmicas do arco (corrente) são apresentadas e relacionadas para cada posição de soldagem. Por fim, recomendações quanto ao controle dos parâmetros na soldagem orbital são sugeridas.

2 Simulação do aparato experimental e definição dos sistemas de coordenadas

Para estudar a trajetória a ser realizada pelo manipulador robótico no translado da tocha de soldagem sobre o tubo, realizou-se uma simulação do aparato experimental. Erros de posicionamento dos componentes, possíveis colisões ou posições desconfortáveis das juntas e elos do braço robótico foram detectados nesta etapa do projeto. A Figura 1 mostra o resultado visto pela interface do simulador.

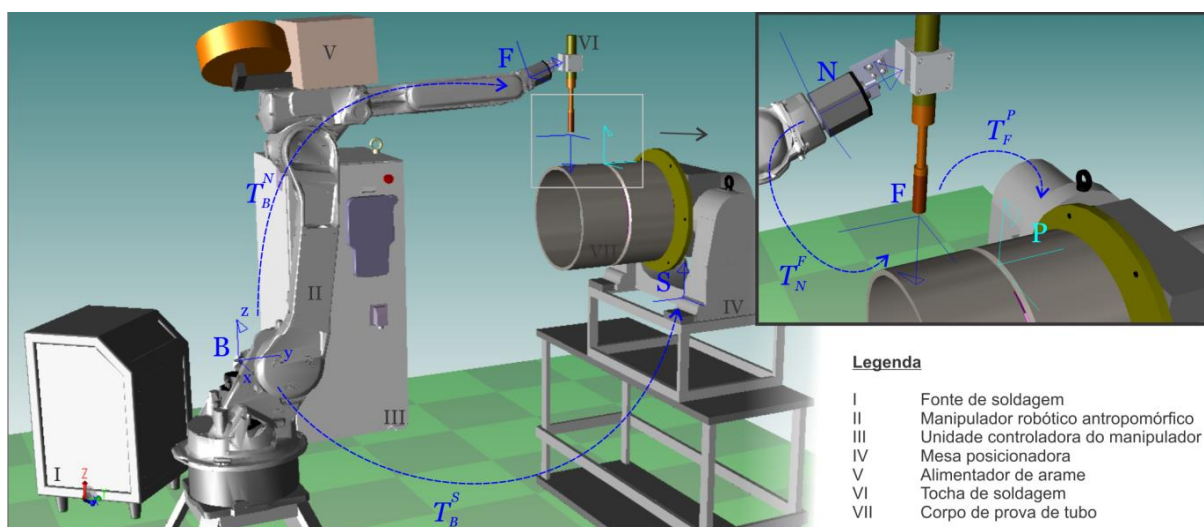


Figura 1. Simulação da bancada de ensaios com sistemas de coordenadas e transformações para soldagem orbital automática.

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 do arco por sinal digital. O tubo utilizado nos ensaios era um aço comum ao carbono de baixa liga. 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, com movimentos de translação e rotação. 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*”). Para tanto ocorrem transformações entre os sistemas de coordenadas descritos na Figura 1. Uma transformação descreve a localização (posição e orientação) de um SC com respeito a um SC referencial. Transformações são indicadas pelo símbolo T com o sobrescrito que define o SC de referência. O sobrescrito define o SC que está sendo descrito.

Na Figura 1 os seguintes sistemas de coordenadas (SC) são definidos:

B: Base. Este SC está referenciado na base do robô e não se movimenta em relação ao ambiente.

S: Mesa posicionadora. O SC S diz respeito à base da mesa posicionadora, que no presente trabalho possui 2 graus de liberdade. Como a soldagem em campo não permite a rotação do tubo, a mesa posicionadora só atuou na fixação deste e permanecia, portanto, estática durante o processo. A transformação T_B^S descreve o SC da mesa posicionadora com respeito à base do robô.

N: Flange. Sistema de coordenadas localizado no fim da flange do robô. A transformação T_B^N relaciona a flange à base do robô.

F: Ferramenta/tocha. O SC F é localizado na extensão livre do arame de adição de uma tocha automática do processo MIG/MAG. Esta extensão é conhecida como sendo a distância do bico de contato à peça (DBCP). A transformação T_N^F descreve o SC F em relação ao N . Este procedimento é executado por uma calibração, onde o eixo z da tocha é posicionado verticalmente para baixo em direção ao solo. Isto faz com o SC F seja paralelo ao eixo z da base só que com direção oposta.

P: Peça. O SC P está localizado em uma região do tubo a ser definida pelo usuário. Ele é importante para que todos os movimentos de um determinado programa fiquem referenciados a um sistema na própria peça. Desta forma, independente da posição do robô no espaço (ou, em outras palavras, do SC B), será possível executar o mesmo movimento. A transformação T_F^P descreve o SC P relação ao F .

Outra importante definição é o ângulo de ataque da tocha de soldagem, ξ_{tocha} , conforme mostra a Figura 2. Este é definido como sendo a rotação em torno do eixo y do SC F . Na tecnologia da soldagem, quando este ângulo é maior que 90° diz-se que a tocha de soldagem “empurra” a poça de fusão. Quando menor, a tocha “puxa” a poça.

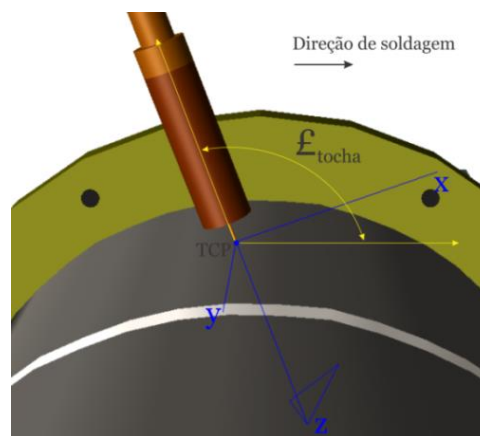


Figura 2. Definição do ξ_{tocha} . Corresponde à rotação em torno do eixo y do SC F . O ponto central da ferramenta (TCP) permanece estático durante os movimentos de rotação.

3 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 orbital 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.

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 [1].

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].

3.1 Seguimento de junta a arco na soldagem robotizada

Quando o sensor a arco é empregado na soldagem robótica é importante que se compreenda os sistemas de coordenadas envolvidos. A Figura 3 os mostra esquematicamente. As direções de um movimento oscilatório são referenciadas por um SC ortornormal próprio, aqui denominado $\{h, t, w\}$. Os eixos deste SC podem diferir do SC cartesiano \mathbf{P} . As suas direções são, na verdade, definidas pela programação de pontos de referência (REFP). No caso da Figura 3, o eixo w seria definido pela programação do REFP 1 e o eixo h pelo REFP 2. O eixo t seria a direção para onde a tocha está indo.

As correções a serem efetuadas pelo sensor a arco são referenciadas ao SC do movimento oscilatório $\{h, t, w\}$. Quando é interpretada uma variação na corrente elétrica, o controlador comanda o manipulador para ajustar o TCP para cima/baixo na direção do eixo w ou esquerda/direita na direção do eixo h . Este seguimento de junta, mesmo em manipuladores robóticos 3D, é atualmente somente conduzido em 2D (em duas direções), por intermédio de um constante movimento em y e compensações de erros nas direções x e z .

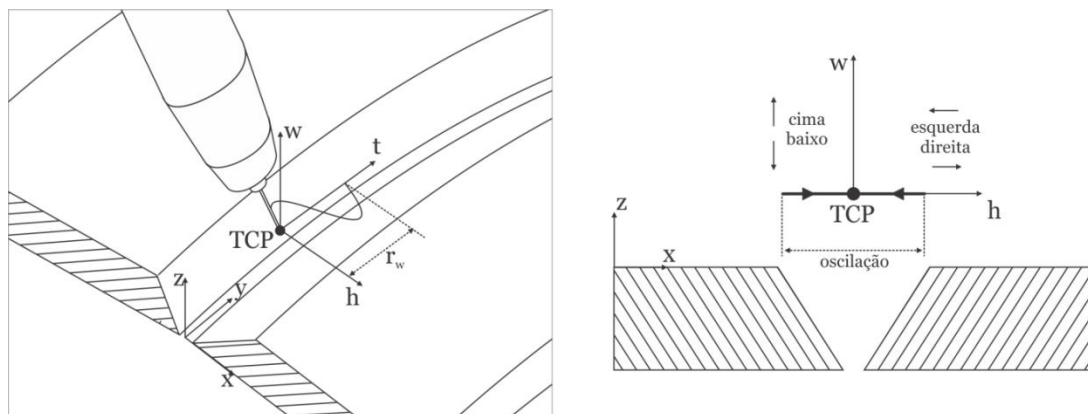


Figura 3. Esquerda: Definição do TCP e do sistema de coordenadas ortornormal $\{h, t, w\}$. A oscilação é conduzida na direção do eixo h . $\{x, y, z\}$ é um sistema de coordenadas local, definido na peça. Direita: Direção das correções conduzidas pelo sensor a arco para um chanfro em V.

4 Procura da junta com sensor de contato

Em operações automáticas a funcionalidade de seguimento de junta é usualmente combinada com uma rotina de procura de junta. Neste caso o operador não precisa determinar com precisão o ponto inicial da solda. No sensor de procura de junta estudado, a posição do tubo no espaço é determinada por intermédio do avanço da tocha de soldagem em direção ao tubo, até o momento em que um contato elétrico seja detectado. Um sinal elétrico de 220 V é empregado para este fim. A Figura 4 mostra um esquemático para entendimento da rotina de procura da junta.

O único ponto programável pelo usuário é o ponto onde se inicia a rotina de detecção, $P_{inicial}$. A partir deste ponto o robô avança linearmente a tocha de soldagem em direção à superfície do tubo. Este primeiro ponto de contato, $P_{peça}$, é salvo na memória do controlador. A partir da posição $P_{peça}$ a rotina de detecção toca o tubo mais duas vezes, com deslocamentos programados nas direções dos eixos x e y . Com base nestas três posições, é calculado um vetor v que aponta para a provável direção do início da junta. Isto é realizado para que haja uma compensação caso o tubo esteja levemente rotacionado em torno da coordenada y .

Em seguida, o robô movimenta-se em direção ao início da junta em movimentos denominados de “dente-de-serra”. Este tipo de movimento é utilizado devido às características geométricas do chanfro que está se procurando. Neste caso, ele é detectado quando a profundidade em relação à linha base da superfície de procura ultrapassa um valor pré-determinado. Depois da detecção inicial, o robô toca linearmente as duas extremidades do chanfro. O ponto médio destas duas extremidades corresponde ao ponto inicial da junta, P_0 . Quando o ponto

P_0 é encontrado, é calculado no programa um deslocamento D , que corresponde à distância em coordenadas cartesianas entre a posição de $P_{peça}$ e P_0 . Todos os pontos da trajetória serão deslocados com relação à D .

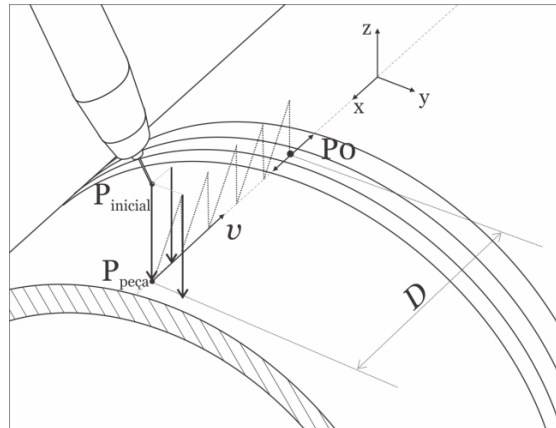


Figura 4. Rotina de detecção do início da junta utilizando o sensor de contato elétrico.

5 Desenvolvimento dos algoritmos para controle da trajetória orbital

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 ξ_{tocha} , velocidade de avanço, amplitude do movimento oscilatório, etc. podem ser organizadas para cada posição de soldagem. Além disto, a trajetória foi dividida em segmentos de arco conforme mostra a Figura 5.

Na soldagem orbital 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.

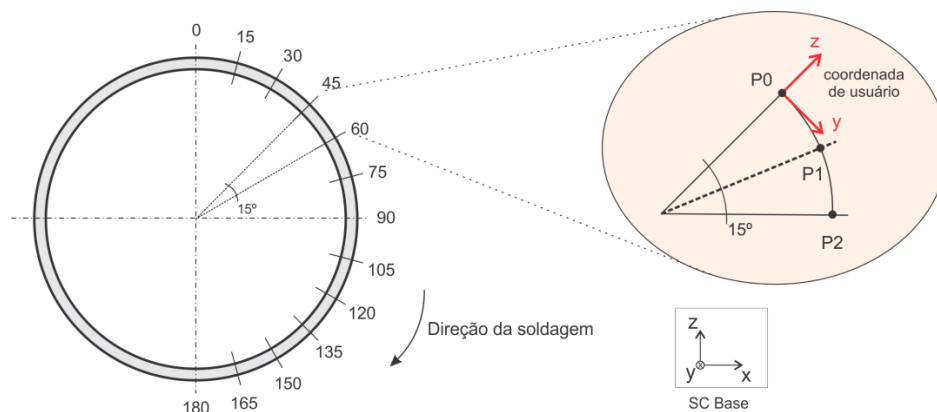


Figura 5. Estratégia de divisão em segmentos da trajetória circular, definidos por β_{seg} . Para cada segmento um SC P é atualizado.

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, P_0 , P_1 e P_2 , que correspondem, respectivamente, ao ponto inicial, ponto médio e ponto final do segmento em questão. Na Figura 5 eles foram divididos para um ângulo de 15° , que é definido no programa orbital pelo parâmetro β_{seg} . Além disto, em cada posição P_0 é atualizado um SC 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 6 descreve o funcionamento do programa orbital empregando sensores. Para a inicialização do programa é necessário definir alguns parâmetros de entrada, como o 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} .

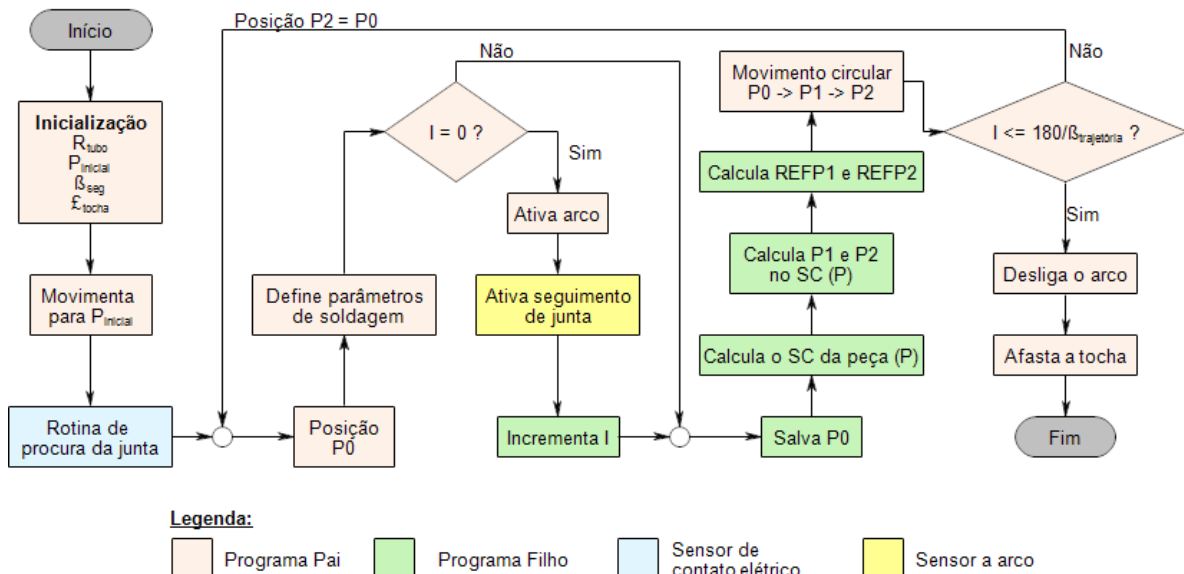


Figura 6. Fluxograma do programa orbital empregando sensores.

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 P_0 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 P_0 , P_1 e P_2 , 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 P_2 corresponde ao P_0 do próximo segmento. Os parâmetros de soldagem são organizados com relação à variável I .

6 Metodologia de ensaios

Para validação e avaliação da metodologia de controle da trajetória, inicialmente foram soldados cordões sobre o tubo, onde as correções do eixo h do sensor a arco foram desativadas (ver Figura 3). Sendo assim, apenas corrigiram-se as variações da DCBP (eixo w) ao longo da trajetória.

Diferentes ângulos de ataque da tocha de soldagem foram estudados, alterando-se o parâmetro l_{tocha} do programa orbital. O l_{tocha} é conhecido por alterar as características geométricas do cordão de solda. Os soldadores, durante a soldagem orbital MIG/MAG de forma manual, utilizam estratégias baseadas na sua experiência para tentar contrabalançar os efeitos da força gravitacional. Uma destas estratégias é justamente a alteração do l_{tocha} .

Tabela 1. Parâmetros e variáveis de soldagem

Parâmetro/variável	Unidade	Valor
Velocidade de arame	m/min	3,5
Velocidade de soldagem	m/min	0,2
Corrente média*	A	130
Frequência do tecimento	Hz	2,0
Amplitude do tecimento	mm	4,0
Diâmetro do arame	mm	1,2
Gás	-	Ar + 15% CO2
Vazão média	l/min	15

Nota: * Corrente média de referência configurada no sensor a arco.

Os parâmetros e variáveis da soldagem foram mantidos constantes para todos os cordões, conforme mostra a Tabela 1. Um grupo de sete cordões foram soldados no total, com os seguintes l_{tocha} : 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 110° e 120°. De 60 a 80° a tocha “empurra” a poça, em 90° um ângulo reto é empregado e de 100 a 120° a tocha “puxa” a poça.

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].

7 Resultados e discussões

7.1 Correção da trajetória orbital 3D com um sensor a arco 2D

Analisando a Figura 1 é notório que durante o translado da tocha sobre a superfície do tubo, além dos movimentos de translação do SC F em $\{x, y, z\}$, são também necessário rotações destes eixos. Estes movimentos de rotação fazem com que a tocha possua sempre o mesmo ξ_{tocha} , tangenciando o tubo de forma constante (Figura 2). Para que se efetuem as correções de forma otimizada, o sensor deveria considerar estas rotações. Entretanto, o sensor a arco presente neste trabalho é essencialmente 2D com a adição de um grau de liberdade determinando por um vetor de direção (determinado pelo direção do REFP). O vetor modifica a direção da trajetória nominal. No caso, as correções são apenas de translação com respeito ao eixo h e ao w (Figura 4).

Sabe-se que as correções do sensor a arco na soldagem robótica tomam como base o SC do movimento oscilatório. E este não rotaciona em torno de seus eixos. Pela lógica do controlador, um SC é gerado no início do movimento e se mantém constante durante este. Esta particularidade do sensor foi apenas notória durante os ensaios, já que o manual do fabricante não deixa isto claro [5].

Com a elucidação sobre esta deficiência do sensor, o desenvolvimento dos algoritmos precisou ser reformulado, até se chegar ao resultado presente na Figura 6. A segmentação utilizando programas diferentes PAI/FILHO faz com que o SC do tecimento seja atualizado em cada nova rodada de processamento. No caso, diferentes posições de soldagem poderiam ser corrigidas em um mesmo programa. Mesmo assim, não foi possível utilizar o sensor a arco em posições críticas, como na posição vertical descendente (de 45 a 135°, conforme Figura 5). No caso, o mesmo foi desligado nestas posições e as correções são apenas realizadas na posição plana (de 0 a 45°) e na sobre cabeça (de 135 a 180°).

Para compensar esta incapacidade de correção, a última posição de cada segmento (P2) é tomada como base para o cálculo do próximo segmento (P0). No caso quando se desliga o sensor a arco, a posição da tocha esta correta e a partir de então, é considerada uma trajetória circular perfeita. O correto raio do tubo, R_{tubo} , na inicialização é, portanto para a metodologia empregada, indispensável.

A limitação de correção do sensor a arco para a soldagem robotizada já foi constatada previamente em uma tese de doutorado de Fridenkalk [6]. O autor desenvolveu um manipulador robótico equipado com um sensor a arco 6D (correção nos 3 eixos de translação e nos 3 eixos de rotação), num projeto europeu denominado ROWER-2. O manipulador é inteligente o suficiente para corrigir trajetórias de soldagem complexas para grandes estruturas, tais como cascos de embarcações.

7.2 Validação dos algoritmos de controle da trajetória

A Figura 7 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.

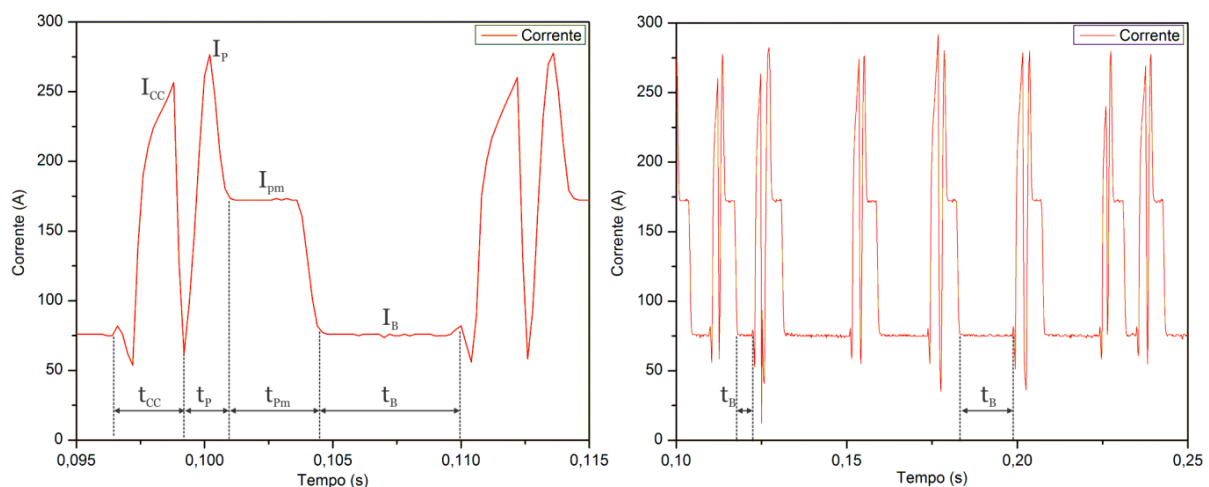


Figura 7. Esquerda: Gráfico da variação de corrente com o tempo para o processo MIG/MAG CCC com a definição das variáveis do programa sinérgico. Direita: Mesmo gráfico, só que num tempo de aquisição maior para evidenciar a variação do tempo de base (t_b).

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.

As correções do sensor a arco são baseadas nas variações de corrente média, conforme explicado no item 3.1. 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 7 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.

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 8. 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 (Tabela 1).

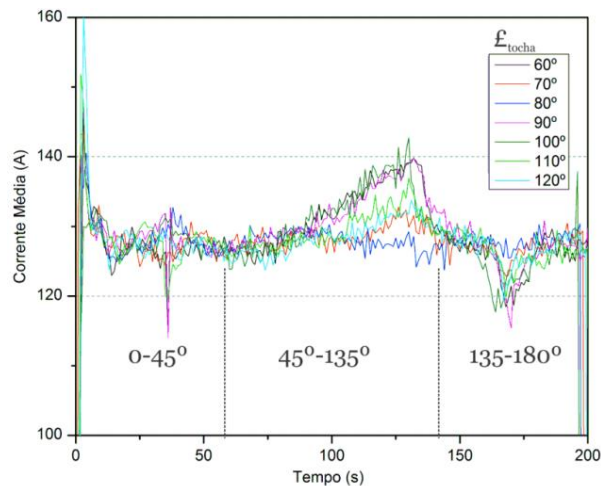


Figura 8. Variação da corrente média com o tempo ao longo da soldagem sobre o tubo para cada ξ_{tocha} estudado. 0-45°: Posição topo. 45-135°: Posição vertical-descendente. 135-180°: Posição sobre cabeça.

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, conforme explica o item 7.1. Há, para este corpo de prova, um aumento da corrente média (diminuição da DBCP), já que a geometria do tubo não é perfeita. No trecho de 135° a 180° o sensor a arco é novamente ativado, ajustando outra vez a posição da tocha.

7.3 Análise dos resultados dos cordões soldados sobre o tubo

Os cordões soldados foram seccionados em três diferentes posições de soldagem, conforme descreve a Tabela 2: na plana (caso 1), na vertical descendente (caso 2) e na sobre cabeça (caso 3). Uma análise metalográfica da secção transversal de cada cordão para os diferentes ângulos de ataque (ξ_{tocha}) em cada caso é mostrada na Figura 9. As características geométricas destes cordões foram avaliadas tomando como base os seguintes aspectos: a largura do cordão (l), a profundidade de penetração (p), a convexidade (C) e a área fundida (A_f). A definição de l e de p é apresentada na seção transversal do cordão com ξ_{tocha} de 90° no caso 1. A_f compreende a região da zona de fusão abaixo da linha base da superfície da amostra. A convexidade diz respeito à relação entre a altura do cordão (h) e a largura (l). Quanto maior este indicador mais convexo é o cordão.

Tabela 2. Posições de soldagem

	Posição de soldagem
Caso 1	Plana
Caso 2	Vertical descendente
Caso 3	Sobre cabeça

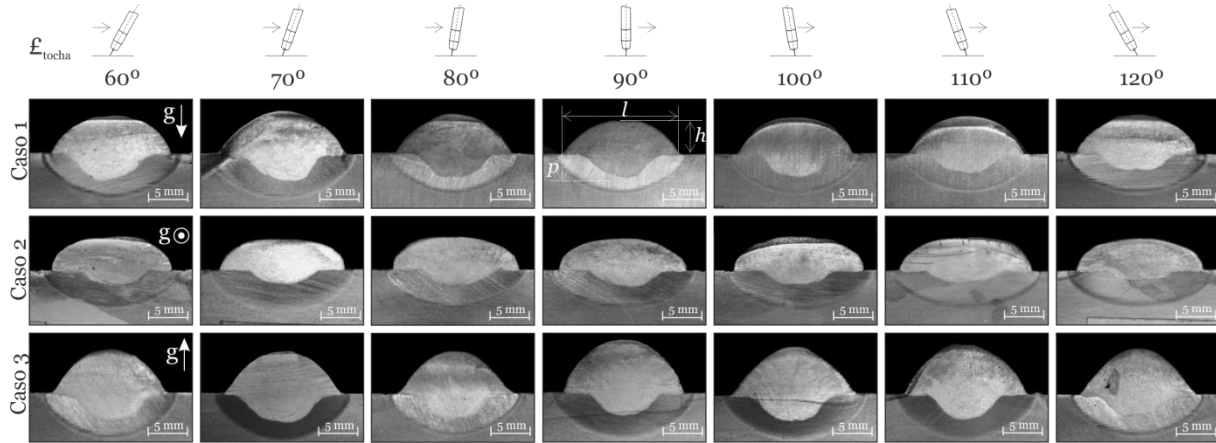


Figura 9. Análise macroscópica da região transversal dos cordões soldados sobre o tubo com variação do ângulo de ataque da tocha (ξ_{tocha}). A direção do vetor gravidade, g , é diferente para cada caso.

Os resultados das análises são apresentados comparativamente em forma de gráfico na Figura 10. No gráfico (a) tem-se a medida de p , no (b) a medida de l , no (c) a convexidade C e no (d) a A_f para cada caso. Orientando-se no desenvolvimento de uma soldagem orbital adaptativa do passe de raiz, os resultados dos cordões sobre tubo serão também analisados e comparados com possíveis cordões em um chanfro V.

É notório que a influência do vetor g altera mais significativamente as características geométricas dos cordões do que a escolha de diferentes ξ_{tocha} . De uma forma geral, a largura do cordão é menor e a penetração maior para o caso 3, ao passo que l aumenta e p diminui no caso 2. O caso 1 apresenta resultados intermediários destas duas medidas. Estes valores também ficam claros quando se analisa o gráfico de convexidade do cordão. O caso 3 possui um cordão mais convexo.

O trabalho de Choa [7] simulou a poça de fusão em um passe de raiz para o chanfro em V para diferentes posições de soldagem. No caso 1, a velocidade de solidificação da poça de fusão acontece de forma mais rápida do que no caso 3, devido aos efeitos da condução de calor. Esta maior velocidade faz com que a poça de fusão penetre menos no material de base. Logo, é explicável o menor A_f e o menor p para o caso 1 em relação ao caso 3.

No caso 3 a região da zona de fusão é mais larga e maior devido há uma maior permanência da poça em um estado mais fluido. As forças do arco, como a eletromagnética e a própria pressão deste, impedem, entretanto, que a poça de fusão escorra. Em [7] são apresentadas simulações onde se percebe as disparidades no regime de escoamento da poça de fusão para os três casos. O caso 3 apresenta um regime mais turbulento se comparado aos outros casos. As diferenças na velocidade de solidificação e perfil de escoamento justificam, portanto, um maior A_f para o caso 3. Ressalta-se, que o maior A_f , não implicaria necessariamente em um maior reforço da raiz. O vetor g se opõe à formação do cordão de raiz. Isto explica também os cordões do caso 3 apresentarem um aspecto mais convexo, já que o cordão é “puxado para fora” devido à ação do vetor g .

Seguindo a mesma linha de raciocínio, o vetor g nos cordões do caso 2 atua no sentido da direção de soldagem. Isto gera uma tendência de a poça de fusão se acumular na frente do arco voltaico, dificultando a penetração do metal fundido (a mesma velocidade de soldagem foi empregada nos três casos). A velocidade de solidificação da poça de fusão acontece de forma mais brusca para o caso 2 em relação aos outros dois casos. Logo, o A_f tende a ser menor. Neste caso haveria uma maior tendência em haver uma falta de penetração ou de fusão no passe de raiz. Para compensar o efeito da direção do vetor g , um aumento da velocidade de soldagem é sugerido a fim de reduzir a poça de fusão acumulada. Apesar de o vetor g atuar no sentido de diminuir a penetração dos cordões de solda do caso 2, há um aumento na molhabilidade do cordão. Que por sua vez é constatado pela diminuição da convexidade e aumento da largura em relação aos outros casos.

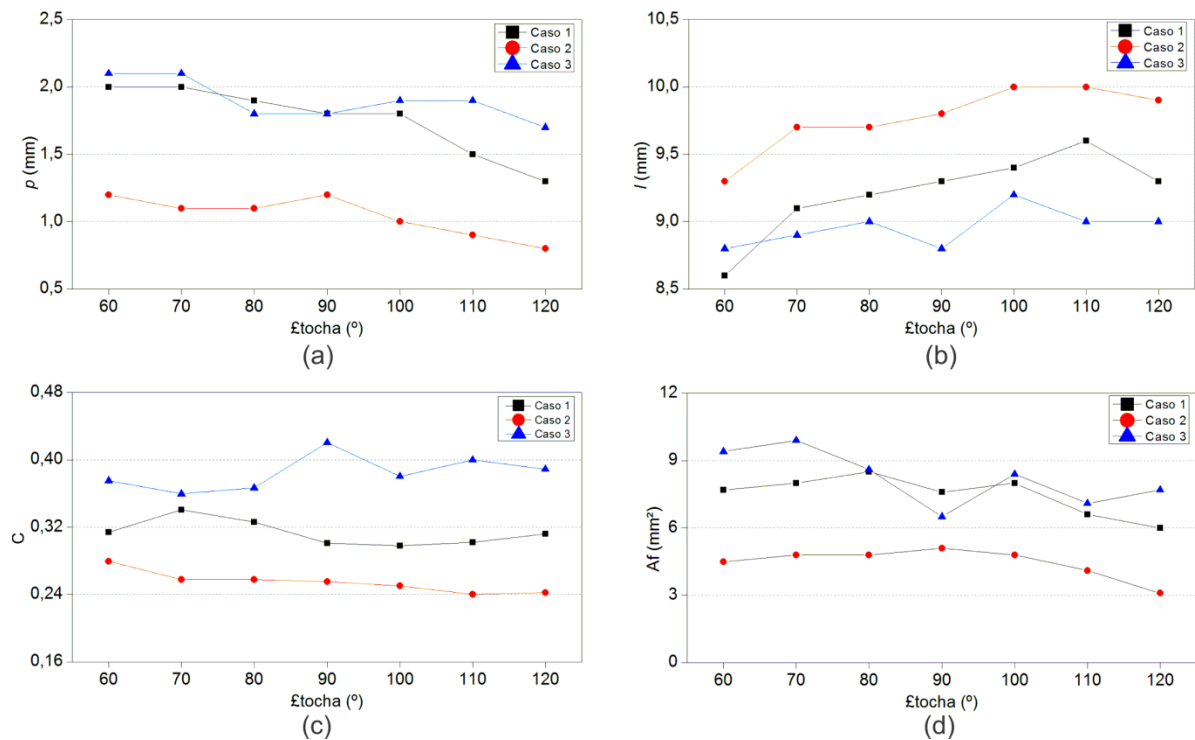


Figura 10. Análise das características geométricas dos cordões da Figura 9 em diferentes posições de soldagem e de ξ_{tocha} . (a): profundidade de penetração. (b): largura do depósito. (c): convexidade. (d): área da zona fundida.

Avaliando agora os diferentes ξ_{tocha} , é percebida uma tendência de controle das características geométricas dos cordões de acordo com o ξ_{tocha} utilizado. Quando a tocha de soldagem “puxa” a poça, aumenta-se p e A_f , ao passo que l fica menor. Já na condição de “empurrar” a poça, diminui-se p e A_f , sendo o l menor. Não se presenciou uma tendência significativa no fator de convexidade para os diferentes ξ_{tocha} .

Os resultados apresentados para os três casos estão de acordo com a literatura [8]. Segundo esta, quando a tocha “puxa” a poça de fusão, o jato de plasma empurra a poça para trás, facilitando o acoplamento arco-metal de base no fundo da poça. Já na soldagem com o arco empurrando, provoca-se um pré-aquecimento à frente da poça, o que aumenta a molhabilidade, mas em contrapartida, diminui-se p e A_f .

Para a soldagem do passe de raiz de tubulações, recomenda-se um ângulo de ataque com a configuração “puxando” para o caso 1. Quando as gotas do metal fundido impingem perpendicularmente a superfície da poça de fusão, a tensão superficial não consegue sustentar as outras forças como: o choque das gotas, a força eletromagnética e a pressão do arco. Assim, há um maior risco de perfurar a raiz. Em [7] é apresentado uma boa formação da raiz para um ξ_{tocha} de 45°. Pelo contrário, para o caso 3 recomenda-se uma configuração “empurrando” na tentativa de tornar o cordão menos convexo e diminuir A_f . Esta diminuição tornaria a poça menos fluida, reduzindo a influência do vetor g em “puxar” o reforço da raiz para baixo. Já para o caso 2, há o problema de a poça se acumular na frente do arco voltaico ao mesmo tempo em que a penetração é menor. Logo uma configuração próxima do ângulo de 90° seria mais recomendada.

8 Conclusões

Este estudo desenvolveu e validou uma soldagem robotizada de tubos com base no emprego de sensores. Um sensor a arco e outro de contato elétrico foram empregados. As considerações do trabalho são baseadas tanto na problemática dos sensores em si como em resultados reais de soldagem sobre o tubo. As conclusões deste trabalho podem ser resumidos conforme segue:

- O sensor a arco, no estado atual desenvolvimento, não é recomendável para a soldagem robótica orbital de tubulações. 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 e ao referencial das correções com base a um SC estático (o do movimento oscilatório). O fato de este apenas corrigir em 2D inviabiliza a sua utilização para juntas não lineares e complexas. Um sensor a arco capaz de corrigir trajetórias com rotações dos eixos (sensor 6D) precisa ainda ser desenvolvido comercialmente. Este sensor atenderia inúmeras aplicações com trajetórias mais sofisticadas, bastante presente no setor petrolífero e no naval, por exemplo.

- Entretanto, foi mostrado neste trabalho que o emprego do sensor a arco é factível com fontes de soldagem sinérgicas sofisticadas e 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.
- A alteração do ângulo de ataque da tocha de soldagem (ξ_{tocha}) para cada posição de soldagem é uma boa estratégia para o controle do reforço da raiz. Há uma significativa influência da variação do ξ_{tocha} com as características geométricas dos depósitos analisados para todas as posições de soldagem.
- Com base nas considerações a respeito da poça de fusão e física do arco, para a soldagem orbital na posição plana um ξ_{tocha} com a configuração “puxando” é recomendada. Na posição vertical descendente um ξ_{tocha} mais próximo do reto. E na posição sobre cabeça uma configuração “empurrando”.

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

9 Agradecimentos

Os autores agradecem a ANP/Petrobras pela concessão de bolsas.

10 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 Catarina Florianópolis, 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.