



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

SOLDAGEM ROBOTIZADA COM
ELETRODO REVESTIDO

EDUARDO JOSÉ LIMA II

Belo Horizonte, 28 de março de 2006

Eduardo José Lima II

SOLDAGEM ROBOTIZADA COM ELETRODO REVESTIDO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense

(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006

Agradecimentos

Agradeço a Deus, Nossa Senhora e a todos Aqueles que olham por mim.

Aos meus pais, Eduardo e Neide, pelo enorme apoio e incentivo.

A minha esposa Neo, pelo carinho e incentivo.

A meus irmãos, Pedro e Alexandre, pelo companheirismo.

Ao meu orientador, Alexandre Bracarense, pelo estímulo e liberdade para criar.

Aos membros do Grupo de Robótica, Soldagem e Simulação, por toda a ajuda e companheirismo, em especial ao Alexandre Rizzuto, pelo apoio técnico para a realização dos testes.

A todos do SENAI CIMATEC e aos companheiros da MANET, em especial ao Renato Henriques, pelo incentivo.

À KUKA Roboter pelo empréstimo do robô, à FAPEMIG pela aquisição da máquina de solda e à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo

O presente trabalho mostra o desenvolvimento e validação de uma metodologia para a soldagem robotizada com eletrodo revestido (SMAW) utilizando variação do modelo do TCP (*Tool Center Point*) e controle em malha fechada do comprimento do arco elétrico. O eletrodo revestido passa a fazer parte do modelo cinemático do manipulador como uma junta prismática adicional, cujo deslocamento pode ser determinado por meio da determinação do consumo do eletrodo, ou medição indireta do comprimento do arco elétrico. A matriz de transformação entre o último eixo do manipulador e o TCP é então atualizada a cada período de amostragem do controlador. Isso permite que a trajetória a ser soldada seja programada de maneira semelhante aos processos de soldagem com alimentação contínua de arame (GMAW ou FCAW), em que os pontos de início e final de cada seção da junta são marcados pelo programador e o robô realiza a trajetória predefinida do TCP entre esses pontos, enquanto o arame é alimentado independentemente do movimento do manipulador. No presente trabalho, o manipulador é quem realiza a alimentação do eletrodo revestido fazendo o movimento de mergulho enquanto realiza o movimento de avanço ao longo da junta. O trabalho propõe ainda o controle em malha fechada do comprimento do arco elétrico utilizando a medição da tensão fornecida pela máquina de solda com compensação da variação da queda de tensão no eletrodo em função de seu comprimento e temperatura, de modo a manter o comprimento do arco constante durante toda a realização do cordão. Com a metodologia apresentada para a soldagem robotizada com SMAW, o TCP estará sempre posicionado na ponta do eletrodo revestido (frente de fusão), e o robô realizará o movimento de mergulho do eletrodo de forma a manter o comprimento do arco elétrico constante, o que possibilita produzir um cordão de solda homogêneo.

Palavras-chave: Soldagem robotizada, TCP, SMAW, eletrodo revestido, geração de trajetórias, controle de processos

Abstract

This work presents a methodology for robotic Shielded Metal Arc Welding (SMAW) using variable Tool Center Point (TCP) model and electric arc length closed loop control. The covered electrode is included in the manipulator kinematic model as an additional prismatic joint, whose displacement can be determined by the electrode consumption or by indirect measurement of the electric arc length. The homogeneous transform matrix, relating the last manipulator joint and the TCP is recalculated at each control sampling period. This allows the user to program the weld trajectory in a similar way as other arc welding processes with continuous wire feed (GMAW or FCAW). The starting and end points of each section of the groove are given by the user. The robot makes the predefined TCP trajectory between the defined points while the wire is feed independently the manipulator movement. In this work, the manipulator makes the covered electrode feeding though the diving movement of the electrode holder while moving the fusion front over the place to be welded. This work also proposes the electric arc length closed loop control by measuring the welding power source voltage and compensating the voltage drop over the electrode as a function of its temperature and length. This keeps the arc length constant during all the weld extension. With this methodology, the TCP will always be located in the tip of the covered electrode (melting front), and the manipulator makes the electrode diving movement, keeping constant the electric arc length allowing to produce an homogeneous weld bead.

Keywords: Robotic welding, TCP, SMAW, covered electrode, trajectory generation, process control

Sumário

Lista de Símbolos	vii
Glossário	ix
Lista de Figuras	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Validação da metodologia	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Soldagem com eletrodo revestido	4
2.1.1 Descrição do processo	4
2.1.2 Aplicações especiais	6
2.1.3 Mecanização do processo	8
2.1.4 Modelagem da variação da taxa de fusão	10
2.1.5 Soldagem com eletrodo revestido utilizando manipulador de 2 GDL	14
2.2 Soldagem robotizada	18
3 Metodologia	21
3.1 Geração de trajetória para soldagem com eletrodo revestido	21
3.2 Controle do comprimento do arco elétrico	31

4	Implementação da Metodologia Proposta	40
4.1	Equipamentos e materiais	40
4.1.1	Robô industrial	40
4.1.2	Sistema de aquisição de dados	41
4.1.3	Máquina de solda	43
4.1.4	Porta-eletrodo	43
4.1.5	Consumíveis	44
4.2	Implementação da metodologia	45
5	Resultados e Discussões	56
5.1	Regulagem manual do mergulho do eletrodo	56
5.2	Ajuste do controlador PI	58
5.3	Implementação da compensação da queda de tensão no eletrodo revestido	63
5.4	Testes de repetibilidade e flexibilidade	67
5.5	Soldagem de cordões em trajetórias não lineares	69
5.6	Soldagem multipasses	71
6	Conclusões	73
7	Sugestões para Trabalhos Futuros	75
	Apêndice A - Modelagem Cinemática e Geração de Trajetórias	77
A.1	Cinemática direta e inversa de robôs industriais	77
A.1.1	Descrições e transformações espaciais	79
A.1.2	Ângulos de rotação	81
A.1.3	Modelagem cinemática	83
A.2	Geração de trajetórias	85
A.2.1	Geração de trajetórias no espaço de juntas	86

A.2.2	Geração de trajetórias no espaço cartesiano	91
A.2.3	Realização da trajetória	92
Apêndice B - Controle de Processos		94
B.1	Sistemas de controle em malha aberta	94
B.2	Sistemas de controle em malha fechada	95
Apêndice C - Listagem do Programa		97
Índice Remissivo		103
Referências Bibliográficas		104

Lista de Símbolos

$\{A\}$	Sistema de coordenadas
${}^A P$	Posição do ponto P em relação ao sistema de coordenadas $\{A\}$
$\hat{X}_A, \hat{Y}_A, \hat{Z}_A$	Vetores unitários da base do sistema de coordenadas $\{A\}$
${}^A_B R$	Matriz rotação que define a orientação do sistema $\{B\}$ em relação ao $\{A\}$
${}^A P_{BORG}$	Posição da origem do sistema $\{B\}$ em relação ao $\{A\}$
${}^A_B T$	Matriz transformação homogênea que define o sistema $\{B\}$ em relação ao $\{A\}$
θ	Ângulos das juntas de um manipulador
$\dot{\theta}$	Velocidades angulares das juntas de um manipulador
$\ddot{\theta}$	Acelerações angulares das juntas de um manipulador
e	Erro entre a referência e o valor medido
I	Corrente elétrica
$INTEG_0$	Valor inicial do integrador do erro do controlador PID
K_P	Constante proporcional de um controlador PID
K_I	Constante integral de um controlador PID
K_D	Constante derivativa de um controlador PID
l_a	Comprimento do arco elétrico
l_{elet}	Comprimento do eletrodo
R	Resistência elétrica
T	Temperatura
TF	Taxa de fusão ou taxa de consumo
TF_c	Taxa de fusão calculada por modelos
t	Tempo
V	Tensão
V_{arco}	Tensão do arco elétrico

V_{c1} e V_{c2}	Quedas de tensão no cabeamento, peça e porta-eletrodo
V_{eletro}	Queda de tensão sobre o eletrodo
V_{fonte}	Tensão fornecida pela fonte de soldagem
V_{ref}	Tensão de referência para o controlador
v	Velocidade de soldagem
v_m	Velocidade de mergulho do eletrodo
v_{mr}	Velocidade de mergulho de referência para o robô
ρ	Resistividade elétrica

Glossário

FCAW	Flux Cored Arc Welding
GDL	Graus de Liberdade
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
KCP	KUKA Control Panel
KRL	KUKA Robot Language
LBW	Laser Beam Welding
PAW	Plasma Arc Welding
RSW	Resistance Spot Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TCP	Tool Center Point

Lista de Figuras

2.1	Soldagem com eletrodo revestido.	5
2.2	Preparação de tubo para a realização de trepanações e cordão de solda realizado com SMAW.	7
2.3	Mecanismo utilizado para soldagem por gravidade.	8
2.4	Ferramenta com alimentação mecanizada de eletrodo revestido utilizada para soldagem subaquática.	9
2.5	Distribuição da temperatura do eletrodo ao longo de seu comprimento.	11
2.6	Comprimento consumido em função do tempo de soldagem [Batana and Bracarense, 1998].	13
2.7	Sistema com manipulador de 2 GDL utilizado para soldagem com eletrodo revestido.	14
2.8	Fixação do termopar à alma do eletrodo.	15
2.9	Comprimento consumido em função do tempo de soldagem [Oliveira, 2000].	16
2.10	Cordões obtidos utilizando o manipulador de dois graus de liberdade.	17
2.11	Cordão de solda depositado pelo sistema utilizando velocidade de mergulho constante.	18
3.1	Fluxograma do controlador para a soldagem com eletrodo revestido.	22
3.2	Porta-eletrodo genérico e sistemas de coordenadas anexos.	23
3.3	Exemplo de porta-eletrodo.	25
3.4	Posições inicial e final do manipulador durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 90°.	26
3.5	Posição do TCP da ferramenta durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 90°.	27

3.6	Posição da última junta do manipulador durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 90°.	27
3.7	Trajétórias do TCP e do porta-eletrodo para soldagem com ângulo de 90°.	28
3.8	Posições inicial e final do manipulador durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 45°.	29
3.9	Posição da última junta do manipulador durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 45°.	29
3.10	Trajétórias do TCP e do porta-eletrodo para soldagem com ângulo de 45°.	30
3.11	Velocidades de soldagem e de mergulho do eletrodo.	30
3.12	Trajétórias do TCP e do porta-eletrodo para soldagem de tubos com ângulo de soldagem de 90° e de 45°.	31
3.13	Controle do comprimento do arco elétrico em malha aberta.	32
3.14	Controle do comprimento do arco elétrico em malha fechada.	33
3.15	Circuito elétrico da soldagem com eletrodo revestido.	33
3.16	Resistividade elétrica do aço baixo carbono em função da temperatura.	35
3.17	Queda de tensão no eletrodo em função do tempo de soldagem para corrente de 120A.	36
3.18	Controle da tensão do arco elétrico em malha fechada.	38
4.1	Robô industrial antropomórfico KUKA KR16 utilizado para validação da metodologia proposta.	40
4.2	Módulo de comunicação DeviceNet 750-306 para sistema de E/S.	41
4.3	Cartão de entradas analógicas modelo 750-456.	42
4.4	Esquema de ligação para medição da tensão fornecida pela máquina de solda.	42
4.5	Fonte de soldagem MasterTig 2500W.	43
4.6	Robô industrial com porta-ferramentas segurando um eletrodo completo e outro já fundido.	44

4.7	Implementação do controlador PI.	46
4.8	Declaração e inicialização dos dados no arquivo “DAT”.	47
4.9	Função para o cálculo da distância entre pontos.	49
4.10	Definição do vetor passo.	49
4.11	Cálculo do vetor unitário variação da ferramenta.	50
4.12	Cálculo do ponto seguinte da trajetória.	51
4.13	Cálculo do modelo da ferramenta durante a soldagem.	52
4.14	Código para o cálculo do modelo da ferramenta.	52
4.15	Distância percorrida pelo TCP.	53
4.16	Cálculo da velocidade comandada e comando para execução do movimento.	54
4.17	Marcação de pontos para programação do cordão de solda.	55
5.1	Valores de tensão de soldagem, mergulho do eletrodo e tensão do potenciômetro para soldagem com regulagem manual de velocidade de mergulho.	57
5.2	Cordões de solda obtidos com a regulagem manual do mergulho do eletrodo.	58
5.3	Valores de tensão de soldagem e mergulho do eletrodo para soldagem com regulagem automática de velocidade de mergulho ($K_P = 20 \text{ mm}/(\text{s.V})$, $K_I = 7 \text{ mm}/(\text{s}^2.\text{V})$ e $V_{ref} = 25\text{V}$).	59
5.4	Valores de tensão de soldagem e mergulho do eletrodo para soldagem com regulagem automática de velocidade de mergulho ($K_P = 30 \text{ mm}/(\text{s.V})$, $K_I = 4 \text{ mm}/(\text{s}^2.\text{V})$ e $V_{ref} = 25\text{V}$).	59
5.5	Valores de tensão de soldagem e mergulho do eletrodo para soldagem com regulagem automática de velocidade de mergulho ($K_P = 40 \text{ mm}/(\text{s.V})$, $K_I = 5,5 \text{ mm}/(\text{s}^2.\text{V})$ e $V_{ref} = 25\text{V}$).	60
5.6	Cordões de solda obtidos durante os experimentos para regulagem do controlador.	60
5.7	Cordões de solda obtidos durante a regulagem dos parâmetros de soldagem (corrente, tensão de referência e velocidade).	61

5.8	Aspecto do cordão de solda utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 150A e tensão de referência de 20V.	62
5.9	Valores de tensão de soldagem e mergulho do eletrodo utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 150A e tensão de referência de 20V.	62
5.10	Aspecto do cordão de solda utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 180A e tensão de referência de 21V.	62
5.11	Valores de tensão de soldagem e mergulho do eletrodo utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 180A e tensão de referência de 21V.	63
5.12	Temperatura média dos eletrodos em função do tempo durante a soldagem para uma corrente de 175A.	65
5.13	Implementação da compensação da queda de tensão em KRL.	65
5.14	Valores de tensão total no circuito e de referência e tensão sobre o eletrodo. . .	66
5.15	Comprimento consumido e taxa de fusão do eletrodo.	67
5.16	Cordões de solda sobre chapa utilizando eletrodos E6013 comprovando a repetibilidade do processo.	68
5.17	Cordões de solda sobre chapa utilizando eletrodos E7018 comprovando a flexibilidade e repetibilidade do processo.	68
5.18	Posições de soldagem no tubo durante a soldagem orbital.	69
5.19	Posicionamento do manipulador com o eletrodo no momento de abertura do arco elétrico e após o afastamento do eletrodo para a extinção do arco.	70
5.20	Cordões de solda depositados sobre tubo.	70
5.21	Vista lateral da deposição de cordões múltiplos.	71
5.22	Valores de tensão de soldagem e mergulho do eletrodo para soldagem de cordões múltiplos.	72
A.1	Espaços utilizados para definir o posicionamento de um robô.	78
A.2	Exemplo de uma junta rotativa e os sistemas de coordenadas anexados aos elos. . .	84

A.3	Sistemas de coordenadas do manipulador, da ferramenta, fixo e posições inicial e final da ferramenta.	86
A.4	Geração de trajetória utilizando polinômio cúbico.	88
A.5	Geração de trajetória utilizando função linear com extremidades suaves.	90
A.6	Fluxograma do controlador para realização de trajetórias.	93
B.1	Controle em malha aberta.	94
B.2	Controle em malha fechada.	95

Capítulo 1. Introdução

1.1 Motivação

O processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW - *Shielded Metal Arc Welding*) encontra suas grandes aplicações na soldagem subaquática e na trepanação de dutos. Sua maior qualidade é a facilidade de controle da microestrutura e da composição química do cordão de solda devido à possibilidade de se variar a formulação do revestimento, além de ser mais robusto a correntes de ar e para a soldagem molhada e mais apropriado para a maioria dos metais e ligas comumente usadas.

Contudo, sua qualidade e repetibilidade são questionáveis por se tratar de um processo tipicamente manual. A qualidade do cordão de solda é extremamente dependente da habilidade do soldador, no que diz respeito à homogeneidade da microestrutura e ao seu aspecto físico e dimensional, bem como não é possível se obter uma série de cordões semelhantes, já que o ser humano não é capaz de realizar todos os movimentos exatamente da mesma forma. Além disso, os processos de soldagem subaquática e de trepanação de dutos são extremamente perigosos para o ser humano.

Visando a melhoria da qualidade e repetibilidade dos cordões de solda, surgem como possíveis soluções a mecanização ou a robotização do processo. A mecanização já existe [Marques et al., 2005] e auxilia o aumento da repetibilidade, porém traz limitações quanto à geometria do cordão, que é determinada pela montagem do mecanismo.

O grande problema para a robotização do processo é que a taxa de fusão do eletrodo revestido não é constante durante toda a realização do cordão de solda. Isso se deve ao fato de que a corrente de soldagem atravessa todo o comprimento ainda não fundido do eletrodo revestido, 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 [Bracarense, 1994]. Resultados preliminares de robotização [Oliveira, 2000] mostraram que, além de se obter um cordão irregular e sem penetração, uma velocidade de mergulho constante pode levar à extinção do arco elétrico em pouco tempo após o início da soldagem.

Para se realizar a robotização do processo de soldagem com eletrodo revestido, alguns parâmetros devem ser controlados, como por exemplo a distância entre o eletrodo e a peça, a tensão elétrica, a orientação do eletrodo etc. Esse controle deve ser feito de maneira a manter os parâmetros em níveis ótimos, que não são necessariamente constantes. Dessa forma, torna-se necessário ao sistema um controle total sobre a variação dos parâmetros e movimentos.

Contudo, as interfaces de programação de robôs industriais normalmente permitem a programação de apenas três tipos de movimentos: junta a junta, linear e circular. Movimentos junta a junta são utilizados para aproximação, por não garantirem uma trajetória previamente conhecida pelo programador. Os movimentos linear e circular são utilizados quando se deseja programar uma determinada trajetória do manipulador.

Assim, a grande limitação das interfaces de robôs industriais é a impossibilidade de se implementar algoritmos desenvolvidos para o cálculo em tempo real da trajetória e de parâmetros de soldagem (especificamente para o eletrodo revestido, a taxa de fusão do eletrodo e, conseqüentemente a velocidade de mergulho). Como para a soldagem com eletrodo revestido o controle da velocidade de mergulho é essencial, é necessário que se disponha de um robô industrial com arquitetura aberta e flexibilidade de programação suficiente para que tais tipos de algoritmos possam ser implementados.

1.2 Objetivos

O presente trabalho apresenta uma metodologia para a robotização do processo SMAW utilizando um robô manipulador industrial com programação flexível. Nessa metodologia, o eletrodo revestido é considerado como uma junta (prismática) adicional do manipulador.

O comprimento dessa junta varia de acordo com a taxa de fusão do eletrodo, de forma que o movimento de mergulho seja realizado na poça de fusão mantendo constante o comprimento do arco elétrico, independentemente da velocidade de soldagem. O comprimento do arco elétrico é controlado utilizando a tensão da máquina de solda para fechar a malha de controle. Para compensar a variação da queda de tensão sobre o eletrodo revestido, é utilizado um modelo de sua resistência elétrica em função do comprimento ainda não fundido e sua temperatura.

A metodologia proposta permite ao operador programar a trajetória do TCP ao longo do cordão de solda a ser depositado de forma transparente, simplesmente marcando os pontos do cordão do mesmo modo que na programação de processos de soldagem com alimentação contínua de arame, sem a necessidade de conhecer como se comporta a taxa de fusão, ou seja, não é necessário programar o mergulho do eletrodo, já que isso é realizado automaticamente pelo controlador durante a própria realização do cordão por meio da monitoração do processo. A metodologia proposta permite que, utilizando o mesmo programa, seja possível soldar materiais diferentes e com eletrodos diferentes (tanto em diâmetro como em composição), possibilitando ao processo de soldagem com eletrodo revestido toda a flexibilidade permitida pela robótica.

1.3 Validação da metodologia

Para a implementação da metodologia desenvolvida, foi utilizado um robô do fabricante KUKA, modelo KR16 com um controlador KR C2. Esse controlador utiliza a linguagem de programação KRL (*Kuka Robot Language*) [KUKA Roboter GmbH, 2003], que permite uma flexibilidade maior de programação que a maioria dos controladores industriais.

O trabalho foi validado pela produção de cordões homogêneos, de qualidade e com repetibilidade, mostrando que a técnica desenvolvida permite a soldagem com maior qualidade e repetibilidade que a manual, mantendo os benefícios desse processo, como o controle da composição química e da microestrutura da junta soldada.

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica

2.1 Soldagem com eletrodo revestido

2.1.1 Descrição do processo

O processo de soldagem com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW) é definido como um processo que produz coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça [Welding Handbook, 1991, Marques et al., 2005]. O SMAW é, dentre todos os processos de soldagem a arco elétrico, um dos mais simples em termos de equipamentos, regulagem e aplicação [Juers, 1993]. É aplicado em manutenção, construção e outras atividades que necessitam de soldagem. A sua maior qualidade é a facilidade de controle da microestrutura e da composição química do cordão de solda devido à possibilidade de se variar a formulação do revestimento. Este processo oferece vantagens em relação a outros processos de soldagem a arco elétrico uma vez que este é menos sensível a correntes de ar e é mais apropriado para a maioria dos metais e ligas comumente usadas. Além disso, é o mais utilizado na soldagem subaquática [Pessoa, 2003]. Na Figura 2.1 são mostrados o eletrodo revestido e o arco elétrico entre o eletrodo e a peça.

A alma do eletrodo revestido consiste de uma vareta de metal sólido recoberto por uma camada de pós metálicos. O eletrodo conduz a corrente elétrica para o arco e fornece metal de adição para a solda.

Além de ajudar a estabilizar o arco elétrico, o revestimento do eletrodo traz também outros benefícios, como permitir ajustar a composição química do cordão pela adição de elementos de liga, proteger a poça de fusão e o metal de solda da contaminação pela atmosfera e conferir características operacionais, mecânicas e metalúrgicas ao eletrodo e ao cordão de solda.

O processo de soldagem se inicia quando o soldador toca a peça com a ponta do

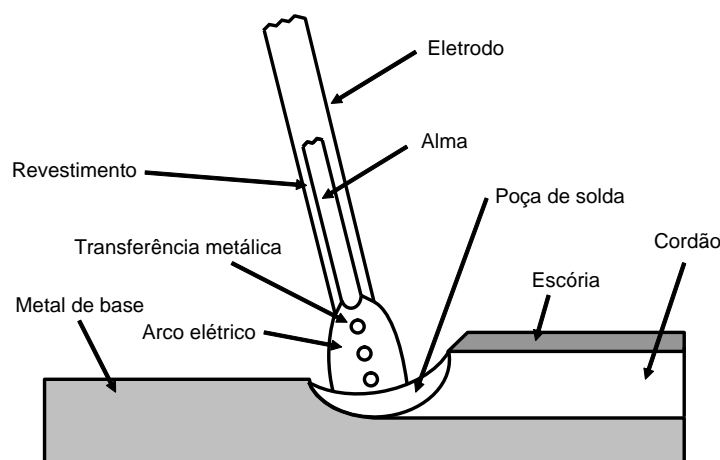


Figura 2.1: Soldagem com eletrodo revestido.

eletrodo energizado, estabelecendo o arco elétrico. A face descoberta do eletrodo é aquecida e queima o revestimento, induzindo a ionização de alguns elementos, que estabilizam o arco elétrico. O soldador, então, inicia o movimento de translação do eletrodo ao longo da junta a ser soldada. À medida em que o eletrodo é fundido pela temperatura do arco e o material é depositado sobre a peça, o soldador deve realizar também o movimento de mergulho do eletrodo, aproximando-o da peça, procurando manter o comprimento do arco constante.

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. Mesmo no caso de curto-circuito, quando o eletrodo toca a peça, a corrente sobe até um valor relativamente baixo, suportável pela máquina durante um pequeno intervalo de tempo.

Mesmo utilizando máquinas do tipo corrente constante, um ponto crítico para se obter uma solda de qualidade é o controle do comprimento do arco elétrico. Quando a solda é feita em ambiente seco, o soldador é capaz de regular a velocidade de alimentação pela observação visual do comprimento do arco e da audição do som emitido, procurando manter o comprimento do arco constante. Contudo, na soldagem subaquática o soldador perde a capacidade de ver e ouvir o arco elétrico, tornando o processo ainda mais difícil [Kang, 1996].

2.1.2 Aplicações especiais

Dentre outras aplicações para o SMAW, a soldagem subaquática e a trepanação de dutos se destacam por utilizarem predominantemente esse processo de soldagem.

A soldagem subaquática pode ser subdividida em duas categorias: a soldagem hiperbárica e a soldagem molhada [Mazzafarro, 1998].

Soldagem Hiperbárica é um método no qual a região a ser soldada é envolvida por uma câmara hiperbárica e a água é expulsa da câmara por meio da injeção de um gás especial. A soldagem é então realizada em ambiente seco, porém sujeita à pressão da coluna d'água. Desde que os parâmetros de soldagem sejam ajustados a essa pressão, este método permite obter juntas soldadas com propriedades mecânicas comparáveis às soldas realizadas na pressão atmosférica. As desvantagens desse método são os longos tempos de preparação do equipamento e os altos custos envolvidos.

Na soldagem molhada, a solda é realizada em contato direto com a água. Processos como soldagem por fricção e a arco elétrico com eletrodo tubular têm sido aplicados [Rowe and Liu, 2001]. No entanto, o principal processo ainda aplicado na soldagem subaquática molhada é o de eletrodo revestido [Welding Handbook, 1996]. As vantagens que justificam a preferência por esse processo são a simplicidade do equipamento (fonte de energia, cabos, porta-eletrodo e eletrodos impermeabilizados), baixo custo, mobilidade, fácil uso e rapidez de reparo que permitem sua aplicação em locais de clima instável (é o processo mais independente do clima) [Wernicke and Pohl, 1998]. Além disso, com os parâmetros corretos, pode-se conseguir altas penetrações e taxas de deposição com o processo SMAW [Cotton, 1977].

Apesar das vantagens do SMAW, a soldagem subaquática molhada manual nem sempre resulta em cordões satisfatórios, já que o soldador, na maioria das vezes, é incapaz de visualizar o arco, o cordão e a trajetória a ser soldada. Além disso, o processo sofre rápido resfriamento e inclusão de hidrogênio causados pelo ambiente molhado, e variações no comprimento do arco podem causar um arco instável e excessivas variações do aporte térmico

[Kang, 1996].

A trepanação de dutos consiste em realizar uma derivação em um duto condutor de petróleo e gases combustíveis (oleodutos e gasodutos). Essa derivação é feita com a soldagem de um tubo perpendicular ao principal sem, contudo, esvaziar a linha. Como, muitas vezes os fluidos conduzidos são combustíveis, a realização dessa operação é extremamente perigosa para seres humanos, pois caso a temperatura interna do tubo principal atinja valores elevados, é grande o risco de explosões.

Pelas vantagens da soldagem com eletrodo revestido descritas anteriormente, a trepanação de dutos geralmente é realizada utilizando esse processo (Figura 2.2).

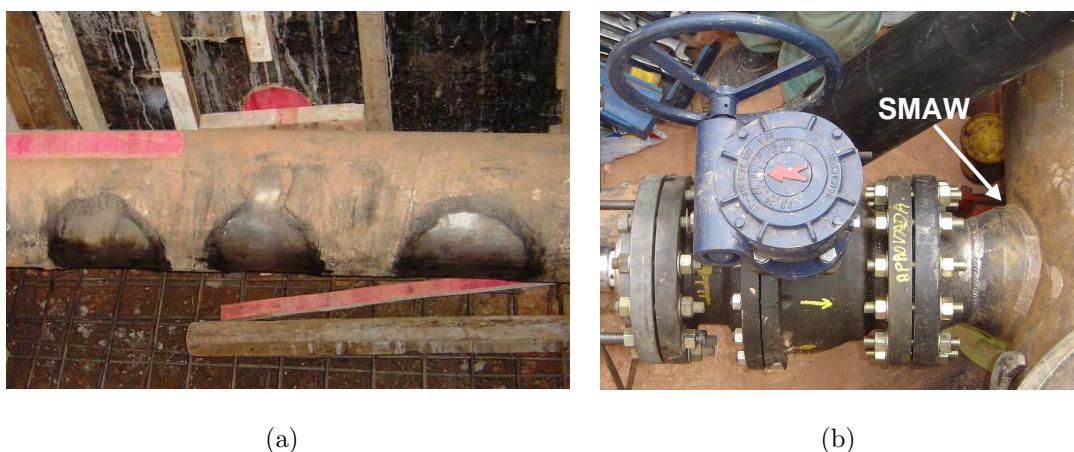


Figura 2.2: Preparação de tubo para a realização de trepanações (a) e cordão de solda realizado com SMAW (b).

Tanto na soldagem subaquática molhada como na trepanação de tubos, uma boa qualidade do cordão de solda é extremamente dependente da habilidade do soldador. Além disso, ambos os processos são altamente arriscados para o ser humano. Na soldagem subaquática, além de haver o risco de choques elétricos, as altas pressões envolvidas tornam o ambiente insalubre para o homem. No caso da trepanação, há sempre o risco de explosões durante a realização do cordão.

Esses problemas sugerem a utilização de processos menos dependentes do ser humano para a realização das soldas. Como será mostrado a seguir, existem técnicas

mecanizadas para o processo SMAW, porém elas não resolvem todos os problemas ou não satisfazem todas as necessidades do processo.

2.1.3 Mecanização do processo

É comum a utilização de dispositivos mecanizados para aumentar a produtividade e a repetibilidade da soldagem com eletrodo revestido. Dentre esses dispositivos, o mais comum é o que utiliza o método de soldagem por gravidade [Marques, 1991, Pessoa, 2003]. Nesse dispositivo, o eletrodo é preso a um carro que desliza por uma guia (Figura 2.3). Após aberto o arco elétrico, à medida em que o eletrodo é consumido, o carro se movimenta pela guia devido ao seu próprio peso, depositando o material sobre a chapa.

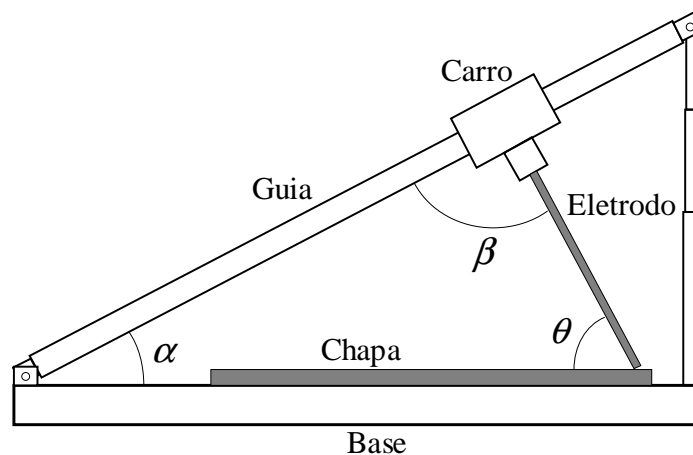


Figura 2.3: Mecanismo utilizado para soldagem por gravidade.

É possível variar a velocidade de soldagem com a variação da taxa de fusão e dos ângulos α e β mostrados na Figura 2.3. O ângulo de ataque do eletrodo (θ) pode também ser variado com os ângulos α e β .

Para cada configuração dos ângulos α e β existem valores ótimos de corrente elétrica que permitem o equilíbrio entre as velocidades de soldagem e de mergulho do eletrodo de modo a manter o comprimento do arco praticamente constante.

Para abertura do arco elétrico utilizando o mecanismo de soldagem por gravidade

em ambiente molhado, [Pessoa et al., 2003] utiliza um composto (Pat. Req. N° PJ 001331) posicionado entre a ponta do eletrodo e o metal de base. Esse composto impede um contato direto entre a ponta metálica do eletrodo e o metal de base impedindo assim o curto-circuito e permitindo apenas a passagem da corrente necessária para iniciar o processo de abertura de arco.

Em Kang (1996), é mostrado o desenvolvimento de uma ferramenta mecanizada para soldagem subaquática com SMAW (Figura 2.4). Como nesse tipo de soldagem é grande a dificuldade do operador para manter constante o comprimento do arco, os cordões geralmente apresentam aspectos irregulares. Baseando-se no controle de tensão do arco (*Arc Voltage Control*), o mecanismo regula a velocidade de alimentação do eletrodo de acordo com a tensão medida entre o porta-eletrodo e a peça, enquanto o soldador realiza o movimento da ferramenta ao longo da trajetória a ser soldada. Utilizando-se uma fonte do tipo corrente constante, observa-se que um aumento do comprimento do arco provoca um aumento da tensão, devido ao aumento da resistência elétrica. Nesse, caso o mecanismo aumenta a velocidade de alimentação do eletrodo. Quando há uma diminuição no comprimento do arco e a tensão diminui, o mecanismo diminui também a velocidade de alimentação, ou até mesmo provoca o recuo do eletrodo caso o soldador faça um movimento de mergulho excessivamente rápido.

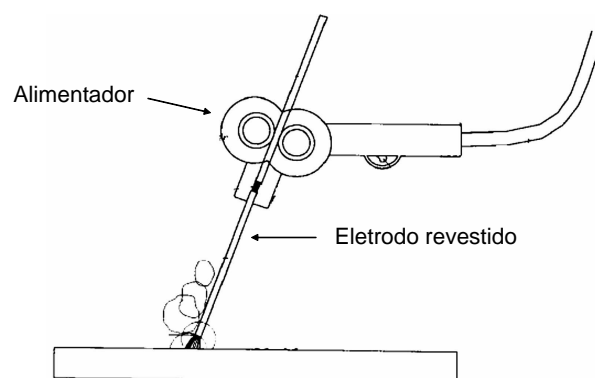


Figura 2.4: Ferramenta com alimentação mecanizada de eletrodo revestido utilizada para soldagem subaquática [Kang, 1996].

Essa abordagem não considera, contudo, a variação de resistência elétrica do eletrodo devido ao aumento de temperatura por efeito Joule . Isso causa uma medição incorreta da tensão do arco elétrico, já que há perda de tensão ao longo do eletrodo.

O presente trabalho propõe a utilização de um modelo da queda de tensão sobre o eletrodo revestido em função de seu comprimento e temperatura de modo a obter uma medição mais precisa do valor da tensão do arco elétrico.

2.1.4 Modelagem da variação da taxa de fusão

Uma limitação do SMAW em relação a outros processos de soldagem a arco, como os processos com proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW) e arame tubular (*Flux Cored Arc Welding* - FCAW), reside no fato da corrente elétrica de soldagem atravessar todo o comprimento do eletrodo não fundido. No GMAW e FCAW a corrente elétrica é transferida para o eletrodo pelo bico de contato, que é fixado à ponta da tocha, o que permite que a corrente atravesse o eletrodo apenas por alguns milímetros antes de passar para o arco elétrico.

No caso do SMAW, ao atravessar o eletrodo revestido, a corrente elétrica provoca aquecimento do mesmo, por efeito Joule. Esse aquecimento, somado ao provocado pelo calor gerado pelo arco elétrico, traz inconvenientes como a variação da taxa de fusão ao longo da soldagem e possível modificação das características do revestimento (perda de umidade e dissociação de ingredientes pelo calor), implicando em alterações nas características do arco e sua proteção [Stern, 1948, Quinn et al., 1997].

Em Felizardo (2003), é mostrado o desenvolvimento de um programa computacional utilizando o método dos volumes finitos em coordenadas generalizadas que simula a distribuição da temperatura ao longo do comprimento do eletrodo (Figura 2.5). O modelo possibilita verificar a influência dos diversos parâmetros e variáveis de soldagem (tensão do arco, corrente de soldagem, polaridade, espessura, tipo do revestimento etc.) na distribuição da temperatura.

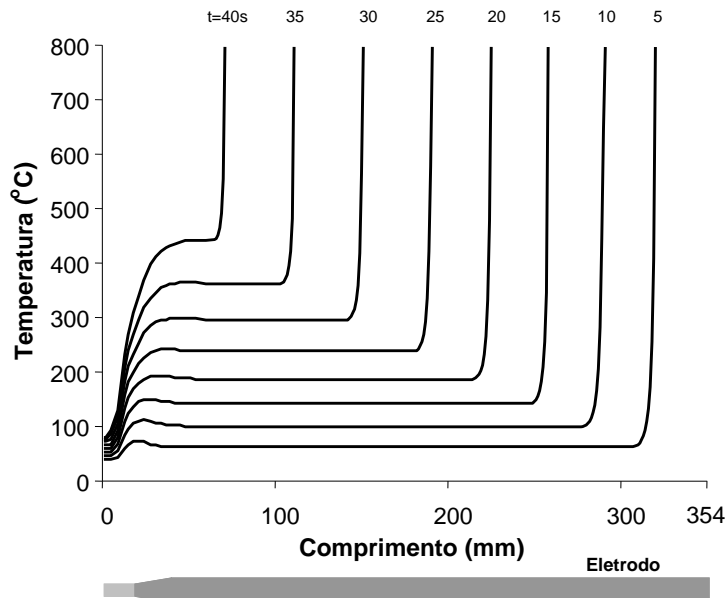


Figura 2.5: Distribuição da temperatura do eletrodo ao longo de seu comprimento [Felizardo, 2003].

O modelo permite, ainda, observar que o perfil longitudinal de temperatura é praticamente plano em quase todo o comprimento do eletrodo, devido ao aquecimento uniforme causado pelo efeito Joule, e que na região próxima à frente de fusão há um aumento abrupto de temperatura até a temperatura de fusão. Contudo, a temperatura da região não revestida é enormemente dependente do tipo de porta-eletrodo utilizado. Considerando-se a utilização do porta-eletrodo e que o mesmo retira calor da região não revestida, sua temperatura sobe a no máximo 100°C em 50 segundos de soldagem. A simulação do perfil de temperaturas sem a utilização do porta-eletrodo mostra que a temperatura do eletrodo chegaria a 1200°C.

A taxa de fusão do eletrodo [ter Berg and Larigaldie, 1952] é definida como a massa de metal consumida (M) pelo tempo de soldagem (t):

$$TF = \frac{dM}{dt}. \quad (2.1)$$

Outra definição para a taxa de fusão é também conhecida como taxa de consumo

[Wilson et al., 1956], que é a relação entre o comprimento consumido (L) e o tempo:

$$TF = \frac{dL}{dt}. \quad (2.2)$$

Segundo [ter Berg and Larigaldie, 1952], alguns fatores que alteram a taxa de fusão são:

- corrente e tensão de soldagem;
- ângulo de ataque;
- diâmetro da alma do eletrodo;
- temperatura de fusão da alma;
- temperatura do eletrodo durante a soldagem;
- espessura e concentricidade do revestimento e do eletrodo;
- composição química do revestimento;
- polaridade da corrente.

O comprimento e a tensão do arco elétrico possuem um efeito muito pequeno sobre a taxa de fusão. Resultados experimentais [ter Berg and Larigaldie, 1952] mostram que um aumento de tensão de 30% provoca uma variação de menos de 2% na taxa de fusão específica. Isso se justifica pelo fato de que o aumento no comprimento do arco elétrico apenas aumenta a queda de tensão através da coluna de plasma, onde a energia produzida não contribui para a fusão do eletrodo. De fato, em [Waszink and Piena, 1985] a energia útil produzida durante a soldagem é modelada como IV_0 , em que I é a corrente de soldagem e V_0 é uma constante dependente da polaridade, composição do metal do eletrodo e das propriedades do plasma. Porém, apesar de pouco influenciar a taxa de fusão, a alteração da tensão do arco elétrico provoca alterações na geometria do cordão, como largura, reforço e penetração [Kim et al., 1996, Lima II et al., 2005].

Wilson et al. (1956), mostra como o aumento da temperatura do eletrodo provoca o aumento da taxa de fusão, já que diminui a energia necessária para atingir a temperatura de fusão. Considerando a taxa de fusão como uma função da corrente de soldagem e

temperatura do eletrodo, Batana e Bracarense (1998) mostra o desenvolvimento de um modelo matemático empírico que relaciona a taxa de fusão instantânea com a corrente e a temperatura monitoradas durante a soldagem. Mediu-se a taxa de fusão para correntes de 78A, 100A e 120A abrindo o arco elétrico e extinguindo-o após diferentes tempos de soldagem. Na Figura 2.6 é mostrado o comprimento consumido utilizando cada corrente em função do tempo de soldagem.

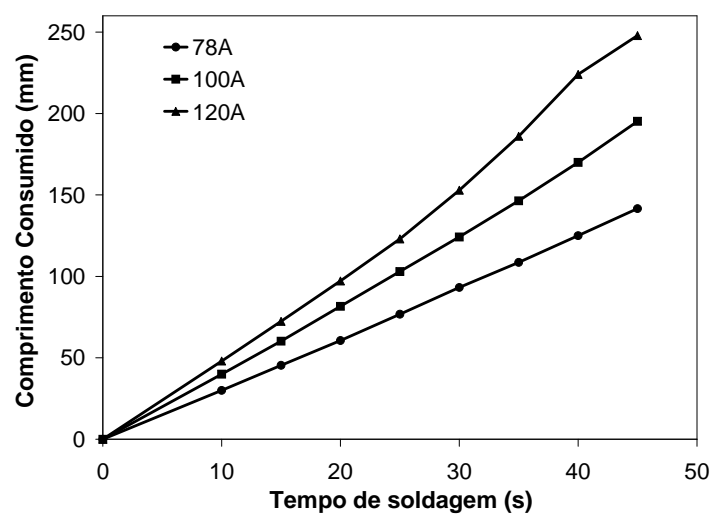


Figura 2.6: Comprimento consumido em função do tempo de soldagem [Batana and Bracarense, 1998].

A partir desses dados, obteve-se as seguintes relações entre a taxa de fusão e o tempo de soldagem:

$$\begin{aligned} 78A &\Rightarrow TF(t) = 0,0076t + 2,975 \\ 100A &\Rightarrow TF(t) = 0,0220t + 3,812 \\ 120A &\Rightarrow TF(t) = 0,0838t + 3,850 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Como o objetivo era determinar o mergulho do eletrodo em função da temperatura, desejava-se um modelo independente do tempo, mas que relacionasse a taxa de fusão com a temperatura medida e a corrente de soldagem. Utilizando mínimos quadrados obteve-se,

então, o seguinte modelo:

$$TF = 0,6674 + 0,00482T + 0,0298I - 0,0001TI - 1,06 \times 10^{-6}T^2 + 8,14 \times 10^{-6}TI^2 \quad (2.4)$$

em que TF é a taxa de fusão em mm/s, T é a temperatura medida, em °C e I é a corrente de soldagem, em A.

2.1.5 Soldagem com eletrodo revestido utilizando manipulador de 2 graus de liberdade

Para implementar a soldagem robotizada com eletrodo revestido, é mostrado em Oliveira (2000) o projeto de um manipulador com dois graus de liberdade (Figura 2.7), que realizam, respectivamente, os movimentos de translação e de mergulho do eletrodo. A utilização do manipulador permite a variação da velocidade de mergulho, de modo a compensar os efeitos do aumento de temperatura.

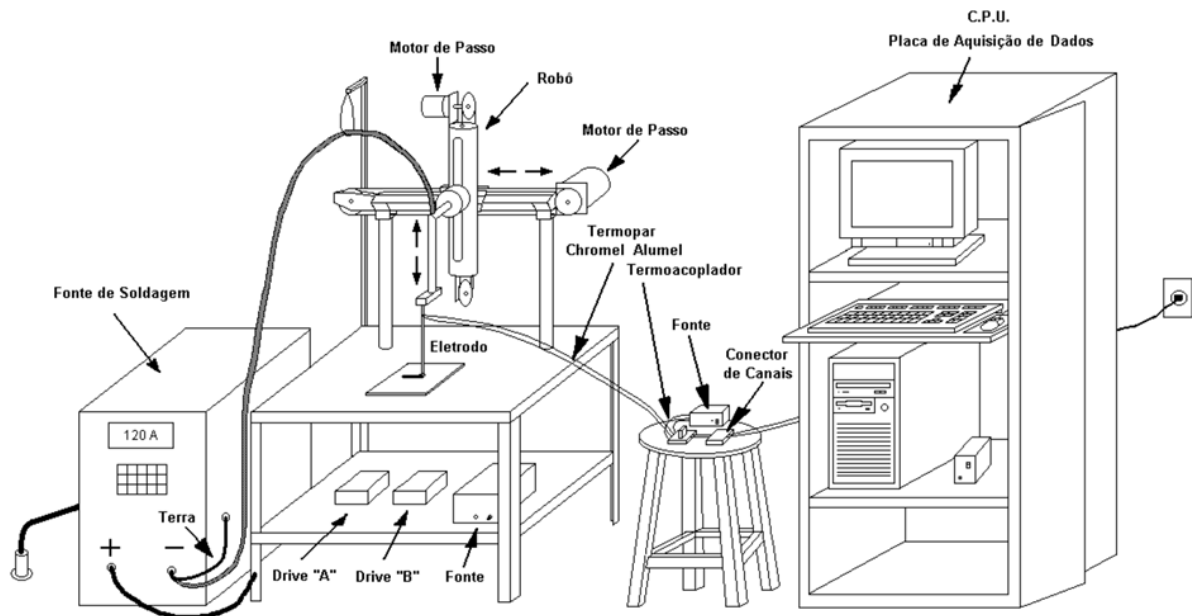


Figura 2.7: Sistema com manipulador de 2 GDL utilizado para soldagem com eletrodo revestido [Oliveira, 2000].

O sistema utiliza motores de passo para acionamento das duas juntas prismáticas do manipulador. Os motores são acionados por drivers e controlados por um microcomputador ao qual é acoplada uma placa de aquisição de dados. Essa placa é utilizada para monitorar a temperatura do eletrodo, ao qual é soldado um termopar a uma distância de 268 mm da ponta livre do mesmo, conforme mostrado na Figura 2.8. O revestimento do eletrodo é raspado, o termopar é soldado à alma por descarga capacitiva e coberto utilizando o mesmo material do revestimento.

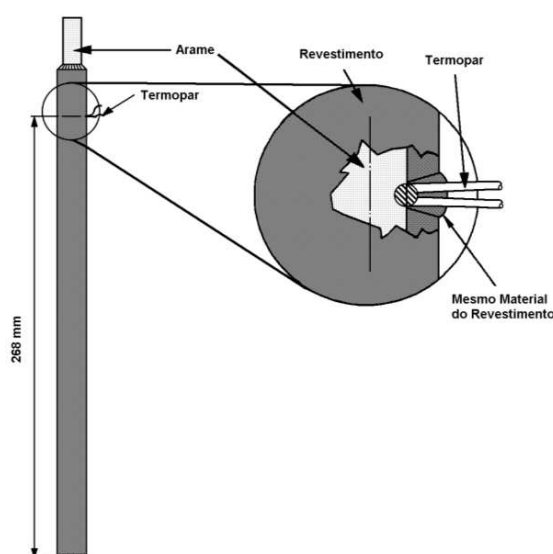


Figura 2.8: Fixação do termopar à alma do eletrodo [Oliveira, 2000].

Utilizando o manipulador de 2 graus de liberdade, Oliveira (2000) realizou testes preliminares de soldagem utilizando a relação de taxa de fusão do eletrodo revestido desenvolvida por Batana (1998) para determinar a taxa de mergulho (equação (2.4)). Nos testes, nenhum resultado satisfatório foi obtido, pois o eletrodo mergulhava cada vez mais na peça, reduzindo o comprimento do arco até o eletrodo grudar na peça e haver a extinção do arco, indicando que o valor da taxa de fusão estaria aumentando muito lentamente em relação ao esperado pela relação desenvolvida por Batana (1998).

Segundo Oliveira (2000), esse resultado pode ter sido causado por diferenças entre os lotes dos eletrodos utilizados no estudo de Batana (1998) e os eletrodos utilizados em

seu estudo. Assim sendo, seguindo os mesmos procedimentos realizados por Batana (1998), Oliveira (2000) obteve uma nova relação da taxa de fusão do eletrodo revestido em função da temperatura monitorada no mesmo e da corrente de soldagem. Na Figura 2.9 é mostrado o comprimento consumido em função do tempo de soldagem.

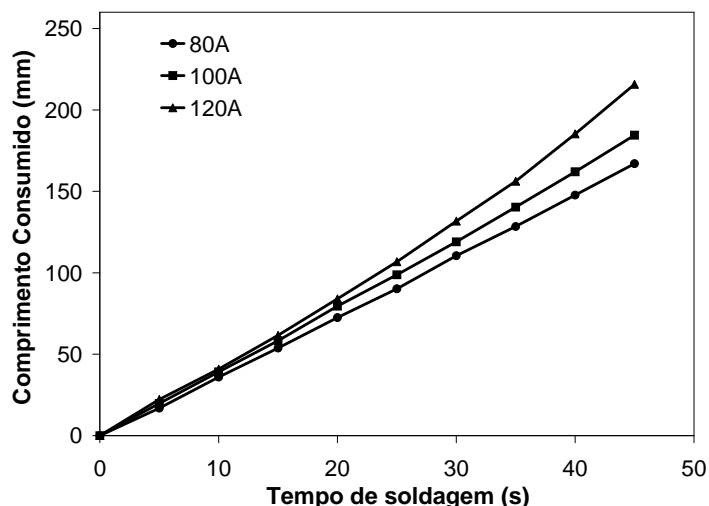


Figura 2.9: Comprimento consumido em função do tempo de soldagem [Oliveira, 2000].

A equação que relaciona a taxa de fusão com a temperatura medida e a corrente de soldagem obtida por Oliveira (2000) é:

$$TF = 2,2446 + 0,00813T + 0,0160I - 0,0001TI - 1,19 \times 10^{-7}T^2 + 6,48 \times 10^{-7}TI^2 \quad (2.5)$$

Foram feitos então vários testes de soldagem com as correntes de 80, 100 e 120A, utilizando essa relação. Em todos os testes de soldagem, a velocidade de translação horizontal do porta-eletrodo foi mantida constante em 2 mm/s, o comprimento do cordão de solda foi estabelecido no programa em 100 mm para as correntes de 80A e 100A e em 80 mm para a corrente de 120A. Os cordões de solda obtidos são mostrados na Figura 2.10.

O resultado esperado nos testes com a nova relação seria a obtenção de cordões de solda homogêneos, o que ocorreu apenas para a corrente de 80A (Figura 2.10(a)). Porém, para as correntes de 100 e 120A (Figuras 2.10(b) e 2.10(c)) não foram obtidos os resultados

esperados. Estes resultados foram justificados por Oliveira (2000) por problemas relacionados com a parte construtiva do sistema, que poderiam ser resolvidos em projetos futuros. Além disso, para as correntes de 100 e 120A não se obteve cordões retilíneos, devido à instabilidade do arco elétrico obtido.

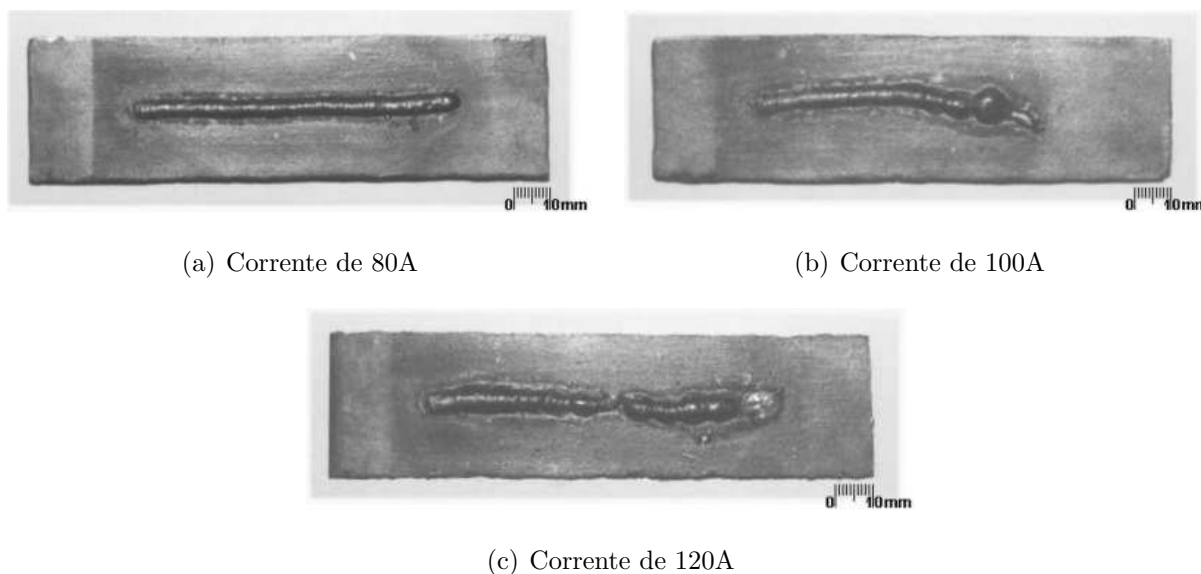


Figura 2.10: Cordões obtidos utilizando o manipulador de dois graus de liberdade [Oliveira, 2000].

Foi levantada ainda uma questão sobre a real necessidade de implementar a variação de velocidade de mergulho do eletrodo. Para responder essa questão foi feita uma solda com corrente de 80A, utilizando uma velocidade de mergulho constante de 3,7 mm/s. Essa velocidade corresponde à taxa de fusão inicial calculada para a corrente de 80A. Como velocidade de translação foi adotada a velocidade de 2 mm/s, também constante. O resultado obtido foi a extinção do arco em pouco tempo após o início da soldagem, resultando num cordão irregular e sem penetração. Na Figura 2.11 é mostrado o aspecto do cordão obtido.

A soldagem feita com corrente de 80A e com velocidade constante mostrou que não é possível obter um cordão de qualidade sem compensar o aumento da taxa de fusão do eletrodo durante o processo. Provou-se também que cada tipo de eletrodo necessita de uma relação específica para taxa de fusão, ou seja, uma mesma relação não permite descrever a



Figura 2.11: Cordão de solda depositado pelo sistema utilizando velocidade de mergulho constante [Oliveira, 2000].

taxa de fusão de eletrodos de diferentes diâmetros, composições e revestimentos.

2.2 Soldagem robotizada

Segundo a Robotic Industries Association (RIA), robô industrial é definido como um “manipulador multifuncional reprogramável projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, por meio de diversos movimentos programados, para o desempenho de uma variedade de tarefas” [Rivin, 1988]. Uma definição mais completa é apresentada pela norma ISO (International Organization for Standardization) 10218 [ISO 10218, 1992], como sendo “uma máquina manipuladora com vários graus de liberdade controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial”.

Soldagem robotizada [Bracarense et al., 2002] é uma forma específica de soldagem automática, que por sua vez é definida pela American Welding Society - AWS (Associação Americana de Soldagem) como: “soldagem com equipamento (robô, manipulador, etc.) que executa operações de soldagem, após programação, sem ajuste ou controle por parte do operador de solda”.

O primeiro processo de soldagem a ser robotizado foi o por resistência elétrica por pontos (*Resistance Spot Welding* - RSW), surgido na década de 70. A robotização deste processo, introduzido inicialmente na indústria automobilística, modificou completamente a concepção da linha de produção de automóveis, pois a precisão e a produtividade aumentaram

significativamente. Atualmente, o processo de soldagem com eletrodo sólido contínuo sob proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW) é, entre os vários processos de soldagem existentes, o mais utilizado na soldagem robotizada.

Os processos de soldagem e corte já robotizados atualmente são:

- *Gas Metal Arc Welding* - GMAW, ou processo de soldagem com eletrodo contínuo sob proteção gasosa, também conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*);
- *Flux Cored Arc Welding* - FCAW, ou soldagem com arame tubular;
- *Gas Tungsten Arc Welding* - GTAW, ou soldagem TIG;
- *Laser Beam Welding (and Cutting)* - LBW, ou soldagem e corte a laser;
- *Plasma Arc Welding (and Cutting)* - PAW, ou soldagem e corte a plasma;
- *Resistance Spot Welding* - RSW ou soldagem por resistência elétrica por pontos.

O SMAW é, atualmente, um processo predominantemente manual, como discutido anteriormente.

Quando se realiza uma solda, deseja-se sempre obter um cordão perfeito e homogêneo. Para isso, todas as variáveis do processo devem ser reguladas ou controladas de forma a manterem-se constantes ou dentro de faixas de tolerância. As variáveis mais importantes a serem controladas são a velocidade e trajetória de soldagem, o ângulo entre a ferramenta e a peça, o *stick-out* (distância entre o bico de contato da tocha e a peça), a tensão e corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame. Dessas, a velocidade, trajetória e ângulo de soldagem e o *stick-out* são controlados pelo robô, de acordo com a sua programação. A tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame são controladas pela máquina de solda, de acordo com valores pré programados na mesma ou recebidos do controlador do robô.

Um programa para a soldagem utilizando GMAW envolve, basicamente, 6 elementos:

1. Definição dos parâmetros para a realização do cordão de solda;
2. Posicionamento da ferramenta no início do cordão de solda;

3. Abertura do arco elétrico;
4. Movimentação da ferramenta ao longo do cordão de solda;
5. Interrupção do arco elétrico;
6. Afastamento da ferramenta.

Para cada linguagem de programação, cada um desses passos é programado de maneira diferente, e em alguns casos alguns passos podem ser realizados simultaneamente com a utilização de apenas um comando. Em programas que envolvem mais de um cordão, ou a integração do robô com outros dispositivos, como mesa posicionadora ou sensores de presença de peças, outros elementos de programação podem ser utilizados, como comandos de espera, de entrada e saída de sinais, de comunicação em rede etc.

Os benefícios obtidos com a robotização de processos de soldagem em relação à soldagem manual estão relacionados basicamente à sua repetibilidade e velocidades de deslocamento. A repetibilidade e precisão garante cordões de solda homogêneos e de qualidade, desde que corretamente programados. Já as altas velocidades de deslocamento permitem um aumento da produtividade pela redução do tempo de deslocamento entre juntas a serem soldadas.

No processo de soldagem GMAW robotizado, o robô é responsável por movimentar a ferramenta ao longo da junta a ser soldada com velocidade, *stick-out* e ângulo de soldagem programados. Todo o controle de alimentação de arame, tensão e fornecimento de corrente é realizado pela máquina de solda. O arame, bobinado, é alimentado por um dispositivo (o alimentador de arame) com velocidade controlada de acordo com os parâmetros de soldagem programados. Assim, não é necessário ao manipulador lidar com a alimentação do arame na poça de solda.

Capítulo 3. Metodologia

Neste capítulo é mostrada a metodologia utilizada para a soldagem robotizada com eletrodo revestido.

Na seção 3.1 é mostrada a metodologia proposta para geração de trajetória em tempo real durante a soldagem. Propõe-se a utilização de uma matriz de transformação variável para o TCP, considerando o eletrodo uma junta (prismática) adicional do manipulador. Dessa forma, o eletrodo passa a fazer parte do modelo cinemático do manipulador.

Na seção 3.2 discute-se a metodologia para o controle do comprimento do arco elétrico, considerando as possibilidades de controle em malha aberta por meio do cálculo da taxa de fusão em função da temperatura e corrente de soldagem e controle em malha fechada por meio da medição indireta do comprimento do arco elétrico.

Para dar suporte matemático ao trabalho, no Apêndice A são mostrados conceitos básicos sobre cinemática de robôs industriais e geração de trajetórias e no Apêndice B são mostrados conceitos sobre controle de processos.

3.1 Geração de trajetória para soldagem com eletrodo revestido

Para realizar a soldagem com eletrodo revestido, não é suficiente seguir uma trajetória linear ao longo do cordão de solda, como nos processos GMAW e FCAW, em que há uma alimentação contínua de arame. No SMAW, é necessário que o manipulador realize o movimento de mergulho do eletrodo, procurando manter constante o comprimento do arco elétrico. Como a taxa de fusão não é constante devido ao aquecimento do eletrodo por efeito Joule, a velocidade de mergulho deve ser regulada em tempo real.

A metodologia aqui proposta permite a programação do movimento do TCP de forma semelhante à utilizada no GMAW e FCAW, de forma transparente para o programador,

ou seja, é necessário programar apenas os pontos inicial e final do cordão, sem se preocupar com o consumo do eletrodo.

O eletrodo revestido é considerado como uma junta prismática da ferramenta. Assim, considerando como comprimento da junta o próprio comprimento do eletrodo, o TCP, localizado sempre na frente de fusão, realiza o movimento programado ao longo da peça a ser soldada e, a cada período de amostragem, o novo valor da junta é calculado e atualizado no modelo cinemático do manipulador. Dessa forma, o manipulador fará o movimento de mergulho do porta-eletrodo automaticamente, alimentando o eletrodo na poça de fusão.

Na Figura 3.1 é mostrado o fluxograma do controlador. Inicialmente é gerada a trajetória do TCP com base nos pontos programados pelo operador. A cada ponto da trajetória, o controlador estima a taxa de fusão do eletrodo. Caso o eletrodo não tenha sido ainda completamente consumido, é determinado um novo modelo do TCP da ferramenta. É calculada então a cinemática inversa do manipulador, bem como as das juntas, e os *set-points* são enviados para o controlador de cada junta. O ciclo se repete com a determinação do ponto seguinte da trajetória até que o ponto final seja atingido.

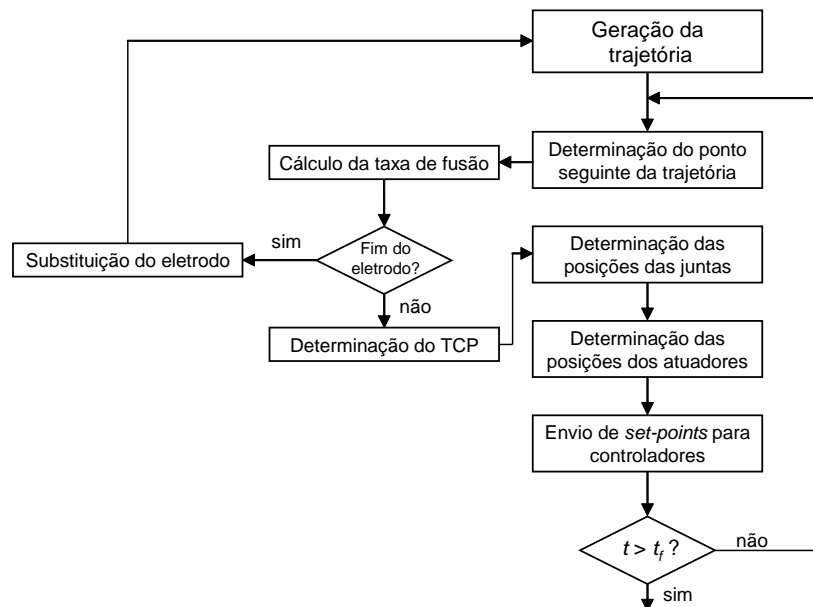


Figura 3.1: Fluxograma do controlador para a soldagem com eletrodo revestido.

Na Figura 3.2 é mostrado um modelo genérico de porta-eletrodo para a soldagem com eletrodo revestido com os sistemas de coordenadas anexados.

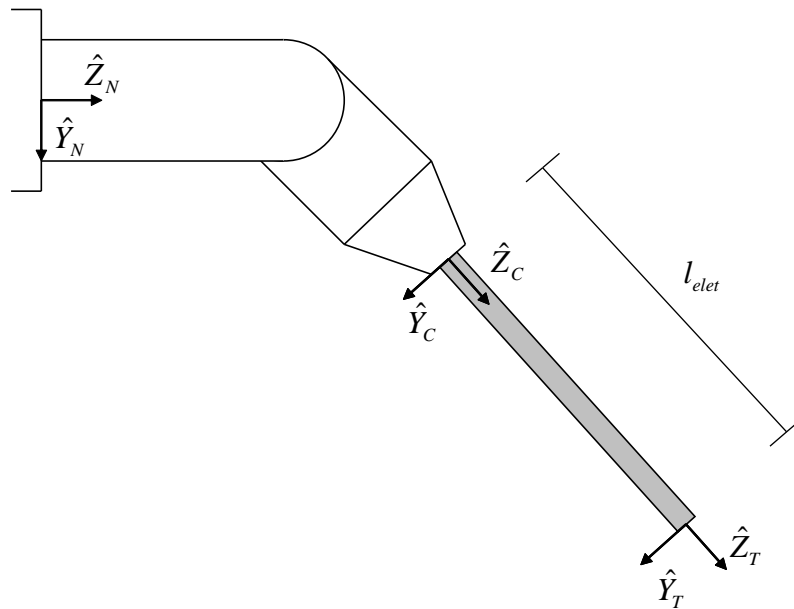


Figura 3.2: Porta-eletrodo genérico e sistemas de coordenadas anexos.

Considerando os sistemas de coordenadas $\{N\}$ como o sistema de coordenadas da última junta do manipulador, $\{C\}$ como um sistema de coordenadas posicionado na ponta do eletrodo consumido completamente e $\{T\}$ como o sistema de coordenadas do TCP, tem-se:

$$\begin{aligned}
{}^N_C T &= \begin{bmatrix} & & & \\ & {}^N_C R & & {}^N P_{CORG} \\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^C_T T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{elet} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1}
\end{aligned}$$

$${}^N_T T = {}^N_C T {}^C_T T,$$

em que ${}^N_C R$ e ${}^N P_{CORG}$ são constantes e dependem do porta-eletrodo específico e ${}^C_T T$ representa a junta prismática associada ao eletrodo.

Dessa forma, modelo cinemático para o cálculo da posição do TCP da ferramenta é dado por:

$${}^0_T T = {}^0_N T {}^N_T T, \tag{3.2}$$

em que ${}^0_N T$ é o modelo do manipulador de N juntas.

Para o cálculo da cinemática inversa é utilizada a relação:

$${}^0_N T = {}^0_T T {}^N_T T^{-1}, \tag{3.3}$$

e as posições das juntas do manipulador podem ser calculadas utilizando o modelo cinemático inverso do manipulador aplicado à matriz ${}^0_N T$.

Considere-se, por exemplo, o porta-eletrodo com as dimensões representadas na Figura 3.3, em que:

$${}^N_C T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 45^\circ & \sin 45^\circ & 50 \times \sin 45^\circ \\ 0 & -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 50 + 50 \times \cos 45^\circ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$${}^N_C T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7071 & 0,7071 & 35,3553 \\ 0 & -0,7071 & 0,7071 & 85,3553 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

e um eletrodo de comprimento inicial $l_{elet}(t_0) = 300\text{mm}$.

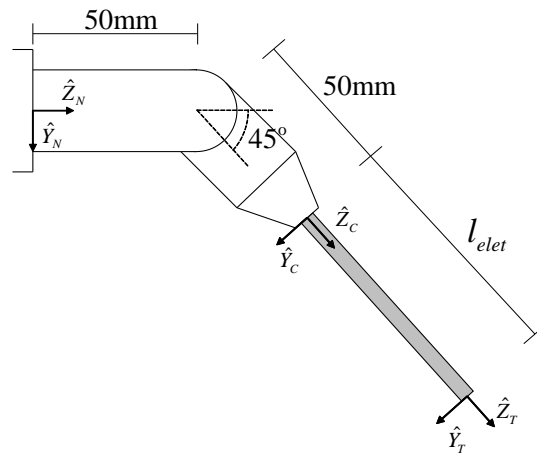


Figura 3.3: Exemplo de porta-eletrodo.

A matriz que define o TCP da ferramenta no instante inicial t_0 é então dada por:

$${}^N_T T(t_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7071 & 0,7071 & 247,4874 \\ 0 & -0,7071 & 0,7071 & 297,4874 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Se, por exemplo, durante a soldagem, forem consumidos 250mm do eletrodo, tem-

se, no tempo final t_f :

$${}^N_T T(t_f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7071 & 0,7071 & 70,7107 \\ 0 & -0,7071 & 0,7071 & 120,7107 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Na Figura 3.4 são mostradas as posições inicial e final do manipulador, simuladas utilizando o software Workspace, considerando como ponto inicial do cordão o ponto $P_0 = [500 \ 0 \ 700]^T$ e como ponto final $P_f = [750 \ 0 \ 700]^T$ (comprimento do cordão de 250mm) e um ângulo de soldagem de 90° .

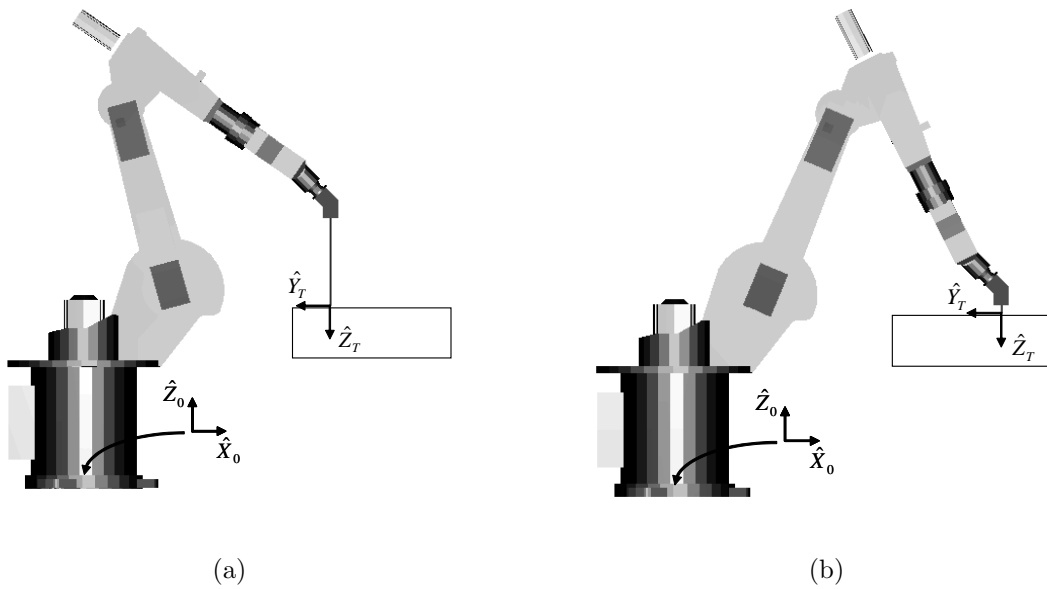


Figura 3.4: Posições inicial (a) e final (b) do manipulador durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 90° .

Considerando, ainda, a utilização de corrente de 120A e a taxa de fusão obtida experimentalmente por Batana (1998), dada pela equação (2.3), na Figura 3.5 é mostrada a posição do TCP da ferramenta e na Figura 3.6 é mostrada a posição da flange do manipulador (TCP0) em função do tempo, considerando uma velocidade de soldagem constante de 5mm/s. Observa-se que o TCP da ferramenta realiza o movimento de P_0 até P_f apenas na direção X

(direção de soldagem), da posição $X=500$ até a posição $X=750$, com velocidade constante de 5mm/s . Como o eletrodo está paralelo ao eixo Z , o mergulho do porta-eletrodo é realizado nessa direção, enquanto o mesmo avança na direção X .

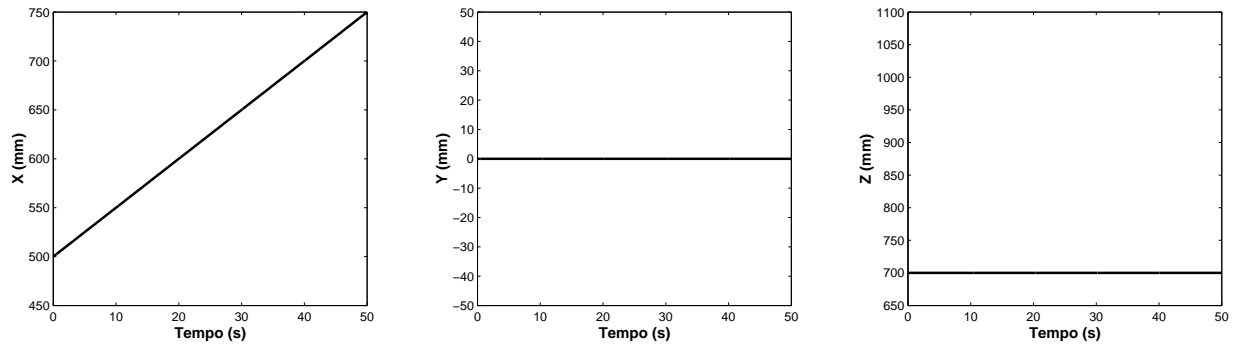


Figura 3.5: Posição do TCP da ferramenta durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 90° .

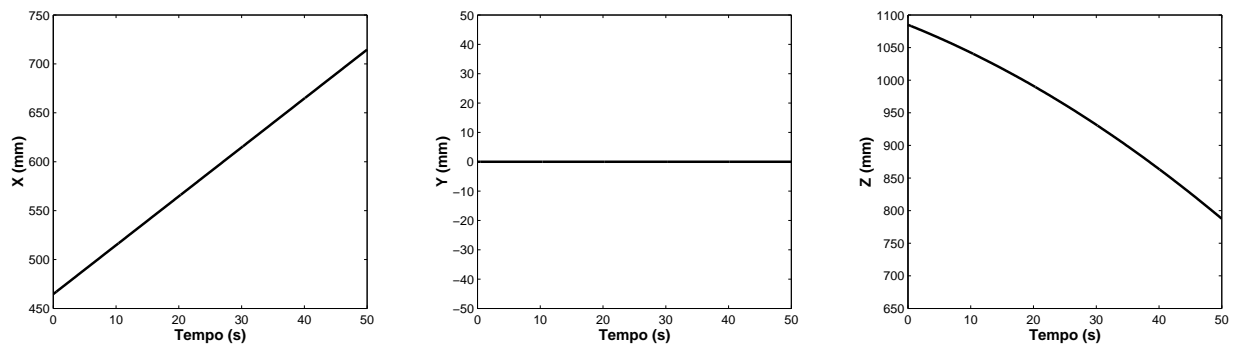


Figura 3.6: Posição da última junta do manipulador durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 90° .

Fazendo a composição dos movimentos em X e Z , obtém-se o gráfico mostrado na Figura 3.7, que representa a trajetória do TCP e do porta-eletrodo no plano XZ .

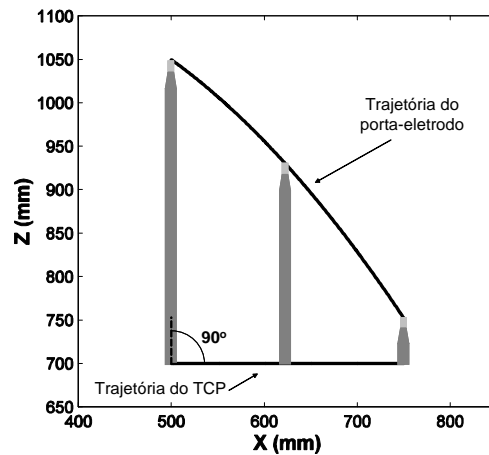


Figura 3.7: Trajetórias do TCP e do porta-eletrodo para soldagem com ângulo de 90° .

Como, nesse caso, o mergulho do eletrodo é realizado paralelamente ao eixo Z, a independência entre os movimentos de avanço do TCP (ao longo do eixo X) e de mergulho do eletrodo é facilmente observável na Figura 3.6. Considerando agora a soldagem com ângulo de 45° entre o eletrodo e a peça, é possível observar que esses movimentos não são independentes.

Na Figura 3.8 são mostradas as posições inicial e final do manipulador para um ângulo de soldagem de 45° , na Figura 3.9 é mostrada a posição da flange do manipulador (TCP0) em função do tempo e na Figura 3.10 são mostradas as trajetórias no plano XZ do TCP e do porta-eletrodo, para um ângulo de soldagem de 45° . Observa-se que, para as condições de soldagem simuladas, o manipulador avança na direção X no início do cordão. Após aproximadamente 40 segundos de soldagem, a componente do movimento de mergulho na direção -X passa a ser maior que a velocidade de soldagem, tornando necessário recuar o porta-eletrodo para compensar o aumento da taxa de fusão.

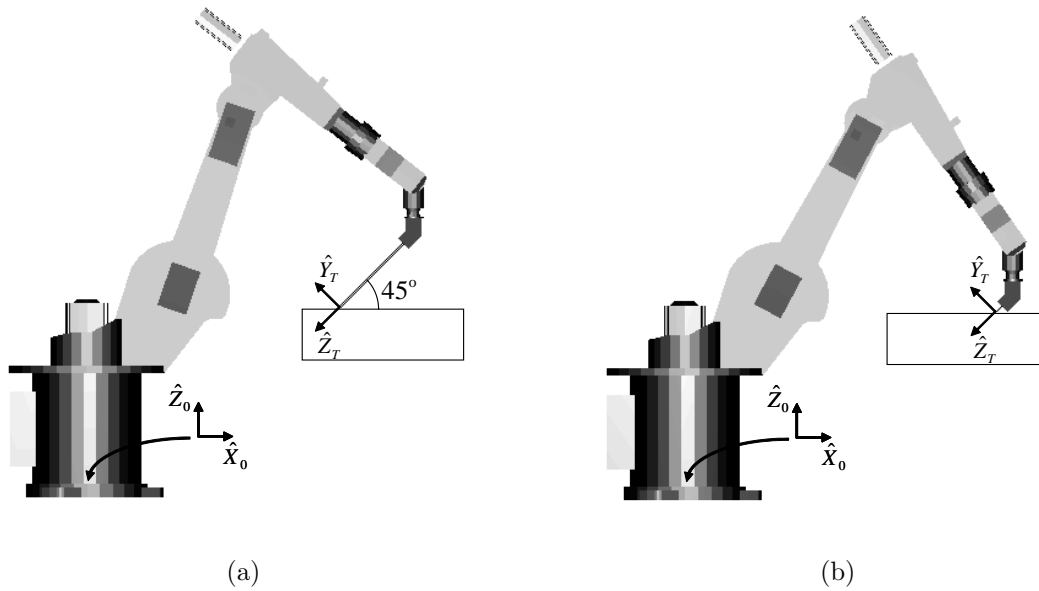


Figura 3.8: Posições inicial (a) e final (b) do manipulador durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 45° .

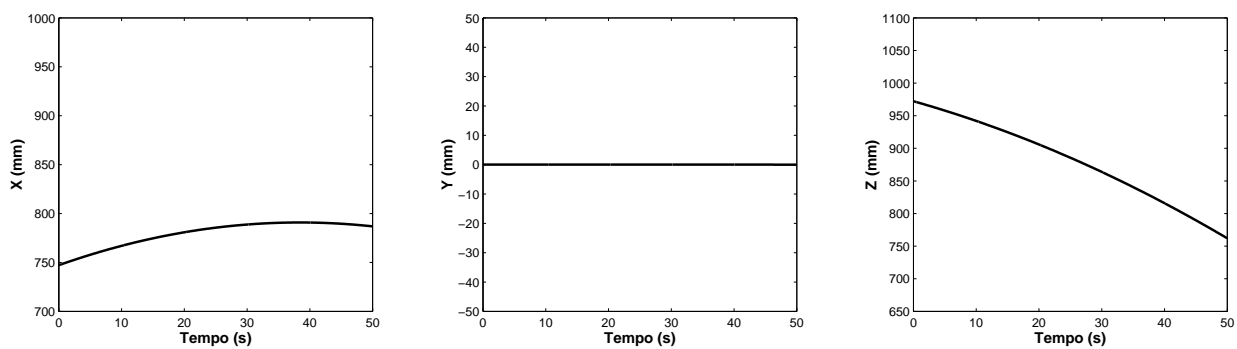


Figura 3.9: Posição da última junta do manipulador durante a soldagem com eletrodo revestido para soldagem com ângulo de 45° .

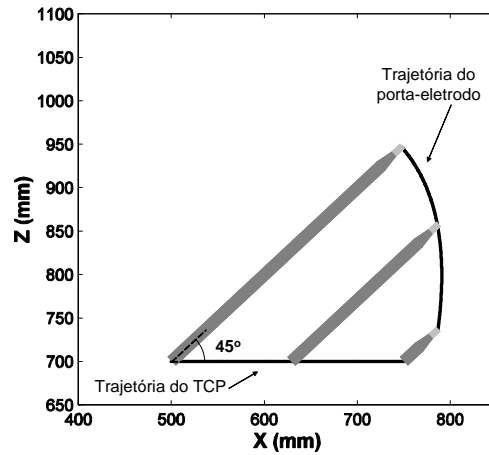


Figura 3.10: Trajetórias do TCP e do porta-eletrodo para soldagem com ângulo de 45° .

Assim, utilizando a metodologia proposta, é possível programar a velocidade de soldagem (avanço do TCP ao longo da junta) independentemente da velocidade de mergulho (taxa de variação de l_{elet}), como mostrado na Figura 3.11. Além disso, não é necessário que o operador conheça o comportamento da taxa de fusão, nem quanto do eletrodo será fundido ao longo da junta. Os pontos inicial e final podem ser marcados utilizando o eletrodo inteiro, já que o controlador estará gravando a posição da sua ponta (${}^0T(t_0)$). Ao ser aberto o arco elétrico, o eletrodo será consumido e o novo TCP estará localizado sempre na frente de fusão.

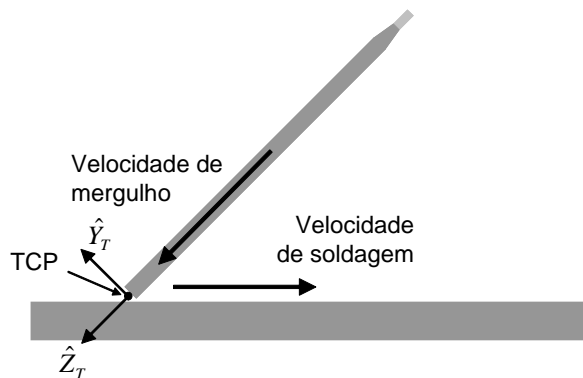


Figura 3.11: Velocidades de soldagem e de mergulho do eletrodo.

Essa metodologia pode ser estendida para trajetórias genéricas e não retilíneas, como por exemplo no caso da soldagem de tubos, bastando que a trajetória do TCP seja

programada pelo operador da mesma forma como em processos com alimentação contínua de arame. Na Figura 3.12(a) são mostradas a trajetória para o TCP programada pelo operador sobre o tubo e a trajetória do porta-eletrodo, para um ângulo de soldagem de 90° e na Figura 3.12(b) são mostradas as trajetórias para um ângulo de soldagem de 45° .

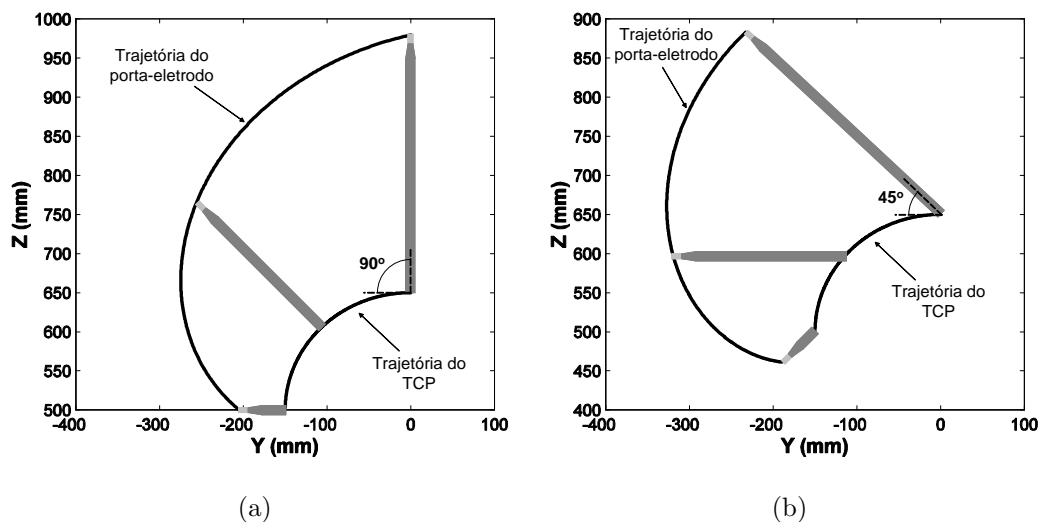


Figura 3.12: Trajetórias do TCP e do porta-eletrodo para soldagem de tubos com ângulo de soldagem de 90° (a) e de 45° (b).

Trajetórias de soldagem mais complexas podem ser programadas pela composição de movimentos lineares e circulares como em outros processos de soldagem.

3.2 Controle do comprimento do arco elétrico

Trabalhos anteriores buscando a robotização do processo de soldagem com eletrodo revestido [Batana, 1998, Oliveira, 2000] sugerem o levantamento de modelos da taxa de fusão do eletrodo em função da corrente e da temperatura para a determinação da velocidade de mergulho do porta-eletrodo. Dessa forma, fazendo o movimento de mergulho com velocidade igual à taxa de fusão, o comprimento do arco permaneceria constante durante toda a realização do cordão de solda. Na Figura 3.13 é mostrado um diagrama de blocos do sistema, em que I é a corrente de soldagem, T é a temperatura do eletrodo, TF_c é a taxa de fusão calculada

pelo modelo, v_{mr} é a velocidade de mergulho de referência, v_m é a velocidade de mergulho obtida e l_a é o comprimento do arco elétrico.



Figura 3.13: Controle do comprimento do arco elétrico em malha aberta.

O comprimento do arco é dado por

$$l_a(t) = l_{a0} + \int_0^t [TF(t) - v_m(t)] dt \quad (3.7)$$

em que l_{a0} é o comprimento inicial do arco, após sua abertura e TF é a taxa de fusão real do eletrodo.

Considerando um modelo perfeito da taxa de fusão ($TF_c(t) = TF(t)$) e uma velocidade de mergulho igual à taxa de fusão calculada pelo modelo ($v_m(t) = v_{mr}(t) = TF_c(t)$), tem-se um arco de comprimento constante durante toda a realização do cordão de solda.

Porém, as imperfeições do modelo, erros de medição da corrente e temperatura e outras perturbações causam pequenas diferenças entre o valor da taxa de fusão calculada ($TF_c(t)$) e a taxa de fusão real ($TF(t)$). Essas diferenças, mesmo que pequenas, podem causar uma grande variação do comprimento do arco, já que $l_a(t)$ varia com a integral dessa diferença:

$$l_a(t) = l_{a0} + \int_0^t [TF(t) - TF_c(t)] dt. \quad (3.8)$$

Isso mostra que o controle em malha aberta não é adequado para o sistema, já que a variável controlada apresenta uma parcela integral dos erros do modelo. A solução seria, portanto, utilizar uma medição do próprio comprimento do arco elétrico para determinar a velocidade de mergulho e utilizar um controlador em malha fechada (Figura 3.14). Nesse caso, é determinado um valor de referência para o comprimento do arco (l_{ref}) e o erro $e(t)$ é calculado como a diferença entre a referência e o comprimento medido do arco elétrico. Essa medição poderia ser feita, por exemplo, por meio de técnicas de visão computacional [Trucco and Verri, 1998], porém o equipamento envolvido (câmera de alta velocidade, lentes, computador para processamento etc.) seria dispendioso.

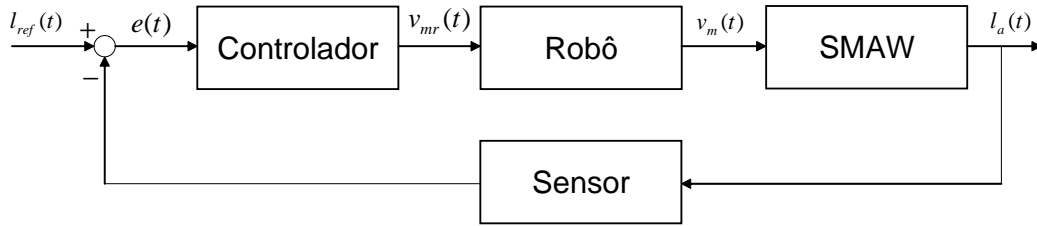


Figura 3.14: Controle do comprimento do arco elétrico em malha fechada.

Uma solução de mais baixo custo para o problema seria a medição da tensão no arco elétrico (V_{arco}) como forma de estimar o comprimento do mesmo, já que um aumento no arco causa um aumento na tensão. O problema é que não é possível medir diretamente a tensão sobre o arco elétrico, pois, durante a soldagem, a ponta do eletrodo próxima à frente de fusão não é acessível. Pode-se, por sua vez, medir a tensão fornecida pela fonte (V_{fonte}) a todo o circuito elétrico da soldagem, como mostrado na Figura 3.15, o que inclui a queda de tensão no cabeamento, no porta-eletrodo, na peça ($V_{c1} + V_{c2}$) e, principalmente, na extensão ainda não fundida do eletrodo (V_{eletr}).

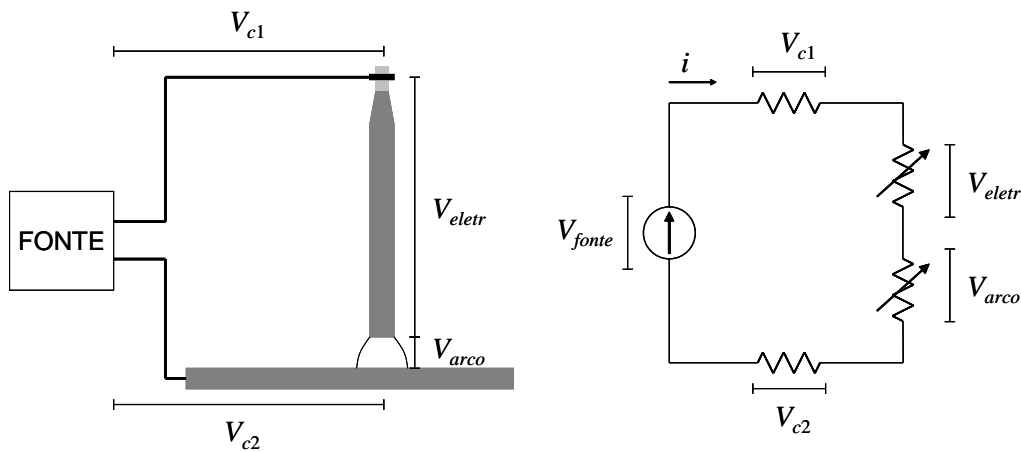


Figura 3.15: Circuito elétrico da soldagem com eletrodo revestido.

Pode-se considerar que a queda de tensão no cabeamento, no porta-eletrodo e na peça ($V_{c1} + V_{c2}$) é constante durante toda a realização do cordão, já que a corrente de soldagem é mantida praticamente constante pela máquina de solda. Porém, a queda de

tensão sobre a extensão do eletrodo ainda não fundido (V_{elctr}) não é constante, devido à diminuição de seu comprimento durante a fusão e ao aumento de sua resistividade elétrica com a temperatura. Assim, mesmo que o controlador mantenha V_{fonte} constante por meio do controle da velocidade de mergulho, como é feito em *Arc Voltage Controllers* [Kang, 1996], não se garante que V_{arco} será constante durante toda a realização do cordão, o que não garante, portanto, um comprimento de arco constante.

O presente trabalho propõe a utilização de um modelo da queda de tensão no eletrodo revestido em função da temperatura para compensar o efeito da sua variação.

Considerando:

$$V_{fonte} = V_{arco} + V_{elctr} + (V_{c1} + V_{c2}), \quad (3.9)$$

o movimento do robô durante a solda deverá ser de tal forma que se tenha

$$V_{arco} = cte = V_{fonte} - V_{elctr} - (V_{c1} + V_{c2}). \quad (3.10)$$

Os valores de V_{c1} e V_{c2} podem ser determinados experimentalmente para cada montagem do sistema, pois dependem da peça, cabos e contatos. A queda de tensão no eletrodo (V_{elctr}) pode ser modelada utilizando a seguinte equação:

$$V_{elctr} = RI = \rho \frac{l_{elet}}{A} I, \quad (3.11)$$

em que R é a resistência elétrica do eletrodo calculada em função de sua resistividade elétrica (ρ), seu comprimento (l_{elet}) e a área de sua seção transversal (A) e I é a corrente de soldagem. Como a condutividade elétrica da alma é duas ordens de grandeza maior que a do revestimento [Waszink and Piena, 1985], pode-se considerar apenas a resistividade e a área da seção transversal da alma do eletrodo.

Já que a área do eletrodo é constante e a corrente é mantida praticamente constante pela fonte, os parâmetros variáveis na equação (3.11) são o comprimento l_{elet} e a resistividade ρ . A resistividade deve ser considerada variável, já que durante a soldagem há um aumento

significativo da temperatura do eletrodo, o que provoca um aumento da resistividade elétrica do material.

Com base nos dados apresentados em [Metals Handbook, 1978], Felizardo (2003) mostra que a resistividade elétrica, em Ohms, do aço baixo carbono em função da temperatura em °C pode ser aproximada por:

$$\rho = \begin{cases} 1,22003 \times 10^{-7} + 4,54533 \times 10^{-10}T + 9,2253 \times 10^{-13}T^2, & \text{se } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \\ 6,63 \times 10^{-7} + 6,67143 \times 10^{-10}T - 1,71429 \times 10^{-13}T^2, & \text{se } T > 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.12)$$

Na Figura 3.16 é mostrada essa relação.

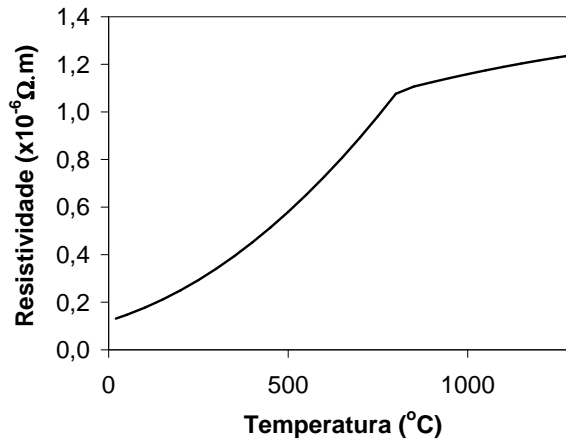


Figura 3.16: Resistividade elétrica do aço baixo carbono em função da temperatura.

Considerando a taxa de fusão e temperatura do eletrodo mostradas em Batana (1998) e a corrente de soldagem de 120A, obtém-se a curva de queda de tensão no eletrodo em função do tempo mostrada na Figura 3.17.

Pode-se observar que, caso seja mantida a tensão V_{fonte} constante durante toda a realização do cordão, haverá um período em que o arco terá um comprimento aproximadamente constante (período em que V_{elctr} sofre pouca variação) e em seguida o comprimento do arco aumentará, devido à diminuição de V_{elctr} .

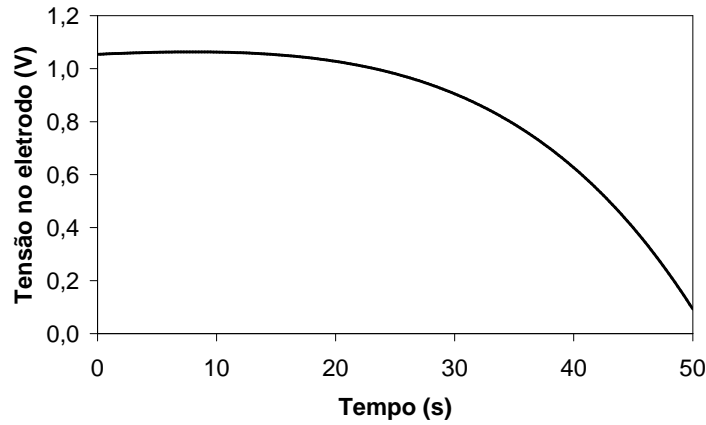


Figura 3.17: Queda de tensão no eletrodo em função do tempo de soldagem para corrente de 120A.

Dessa forma, o cálculo do erro $e(t)$ de tensão deve ser:

$$e(t) = V_{ref}(t) - \left(V_{fonte}(t) - (V_{c1} + V_{c2}) - \rho(t) \frac{l_{elet}(t)}{A} I \right), \quad (3.13)$$

em que V_{fonte} é o valor de tensão medido entre os terminais da fonte.

Os valores de V_{c1} e V_{c2} podem ser omitidos se o valor de referência incluir essas quedas de tensão, de modo que se tenha:

$$V_{ref} = V_{refarco} + V_{c1} + V_{c2}, \quad (3.14)$$

em que $V_{refarco}$ é o valor de tensão de referência para o arco elétrico. Essa forma de implementação permite ao programador regular os parâmetros do processo (tensão, corrente etc.) da mesma forma como é feito nos processos com alimentação contínua de arame, em que os valores ótimos, obtidos experimentalmente, incluem a tensão do arco elétrico e do cabeamento e peça.

Para efeitos de análise de desempenho do controlador, a compensação da queda de

tensão no eletrodo pode ser realizada diretamente no valor de referência V_{ref} , de modo que

$$V_{ref} = V_{refarco} + V_{c1} + V_{c2} + \rho(t) \frac{l_{elet}(t)}{A} I \quad (3.15)$$

$$e(t) = V_{ref} - V_{fonte}. \quad (3.16)$$

Em um instante de tempo t , o comprimento do eletrodo l_{elet} (Figura 3.2) pode ser calculado por

$$l_{elet}(t) = l_{elet}(0) - \int_0^t TF(t) dt. \quad (3.17)$$

Tem-se também:

$$l_{elet}(t) = l_{elet}(0) + \int_0^t \frac{dl_{elet}(t)}{dt} dt. \quad (3.18)$$

Como para se ter um comprimento de arco constante deve-se mergulhar o eletrodo a uma velocidade igual à taxa de fusão ($v_{mr}(t) = TF(t)$), tem-se que:

$$\frac{dl_{elet}(t)}{dt} = -v_{mr}(t). \quad (3.19)$$

Pela equação (3.13) e considerando que um aumento do arco elétrico provoca um aumento da tensão medida, observa-se que um erro negativo indica um arco maior que o desejado. Sendo assim, um erro negativo deve levar a um aumento da velocidade de mergulho. Utilizando um controlador PID, tem-se então:

$$v_{mr}(t) = - \left(K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (3.20)$$

ou seja:

$$\frac{dl_{elet}(t)}{dt} = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.21)$$

em que K_P , K_I e K_D são, respectivamente, as constantes proporcional, integral e derivativa do controlador.

A tensão do arco elétrico, porém, está sujeita a grandes flutuações causadas pelo movimento do gás e agitação da poça de fusão [ter Berg and Larigaldie, 1952]. O valor da

tensão pode variar desde 0V até o dobro do valor médio, durante a transferência metálica. Dessa forma, é apropriado se descartar a ação de controle derivativa, já que essa introduziria grandes ruídos na ação de controle, optando-se por um controlador PI.

Substituindo a equação (3.21) em (3.18) e desconsiderando a ação de controle derivativa, tem-se:

$$l_{elet}(t) = l_{elet}(0) + \int_0^t \left(K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \right) dt. \quad (3.22)$$

Esse valor deve ser utilizado na equação (3.1) para o cálculo do modelo do TCP da ferramenta a cada instante de amostragem. Ou seja, o comprimento consumido a ser considerado no modelo do TCP da ferramenta é dado por:

$$- \int_0^t \left(K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \right) dt. \quad (3.23)$$

O valor de referência para o robô é $l_{elet}(t)$, que realizará um movimento de mergulho do porta-eletrodo com velocidade $v_m(t)$. O diagrama de blocos do sistema em malha fechada é mostrado na Figura 3.18. A variável controlada é V_{fonte} , que deve seguir a referência V_{ref} determinada pela equação (3.15).

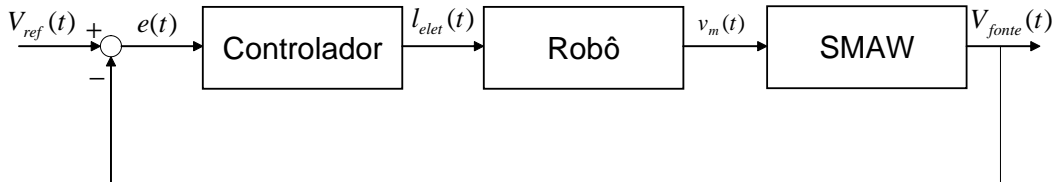


Figura 3.18: Controle da tensão do arco elétrico em malha fechada.

Com o objetivo de acelerar a resposta inicial do sistema, pode-se calcular um valor inicial $INTEG_0$ para a ação de controle integral do PI considerando uma velocidade de mergulho inicial $v_{mr}(0)$ previamente obtida com base em modelos empíricos da taxa de fusão e condições iniciais nulas:

$$v_{mr}(0) = - \left(K_P e(t) + K_I \left(\int_0^t e(t) dt + INTEG_0 \right) \right)_{t=0} = -K_I INTEG_0, \quad (3.24)$$

Assim:

$$INTEG_0 = -\frac{v_{mr}(0)}{K_I} \quad (3.25)$$

Dessa forma, ao ser aberto o arco elétrico, o sistema terá uma velocidade inicial de mergulho diferente de zero.

Capítulo 4. Implementação da Metodologia Proposta

Neste capítulo é mostrada a implementação em um robô industrial da metodologia proposta para a soldagem robotizada com eletrodo revestido. Na seção 4.1 são descritos os equipamentos e materiais utilizados nos experimentos e na seção 4.2 é mostrada a implementação da metodologia na linguagem KRL (*KUKA Robot Language*). No Apêndice C é mostrada a listagem completa do programa.

4.1 Equipamentos e materiais

4.1.1 Robô industrial

Para validar a metodologia apresentada, foi utilizado um robô industrial antropomórfico, modelo KR-16 (Figura 4.1), do fabricante KUKA Roboter, de 6 graus de liberdade rotativos, capacidade de carga de 16Kg e um alcance máximo de 1610mm.



Figura 4.1: Robô industrial antropomórfico KUKA KR16 utilizado para validação da metodologia proposta.

Esse manipulador utiliza um controlador KR C2, cuja linguagem de programação KRL [KUKA Roboter GmbH, 2003] 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 nas seções anteriores para geração de trajetória durante a soldagem e controle do comprimento do arco elétrico.

4.1.2 Sistema de aquisição de dados

Por padrão, o controlador KR C2 é fornecido sem entradas e saídas de dados. Para realizar a aquisição de dados, foi utilizado um sistema modular de E/S, “I/O-SYSTEM 750”, do fabricante WAGO. Esse sistema se comunica com o controlador do robô por uma interface DeviceNet, realizada por um módulo de comunicação 750-306 (Figura 4.2). A esse módulo podem ser acoplados cartões de entradas e saídas digitais e analógicas, permitindo uma grande flexibilidade de aplicações.



Figura 4.2: Módulo de comunicação DeviceNet 750-306 para sistema de E/S.

A aquisição de dados analógicos é feita por um cartão modelo 750-456 (Figura 4.3), acoplado ao módulo 750-306. Esse cartão possui duas entradas analógicas diferenciais de $\pm 10V$ com uma resolução de 12 bits, que são convertidos para um valor real de -1,0 a 1,0 pelo controlador do robô. Apesar da baixa taxa de amostragem obtida com esse cartão (no máximo 500Hz), o mesmo se adequa bem à aplicação proposta, já que o sinal de tensão medido será filtrado antes de ser adquirido (não é necessário adquirir as flutuações de tensão, e sim seu valor médio) e os períodos de amostragem do controlador serão superiores a 10ms.



Figura 4.3: Cartão de entradas analógicas modelo 750-456.

A conexão entre o cartão de entradas analógicas e os terminais da máquina de solda para a medição da tensão fornecida ao circuito de soldagem é feita por um condicionador de sinais que divide o valor de tensão por 10, além de possibilitar a filtragem de ruídos e flutuações de tensão, como mostrado na Figura 4.4. Dessa forma, o sistema é capaz de ler valores de tensão de -100V a 100V, que são convertidos para uma escala de -1,0 a 1,0 quando lidos pelo controlador do robô.

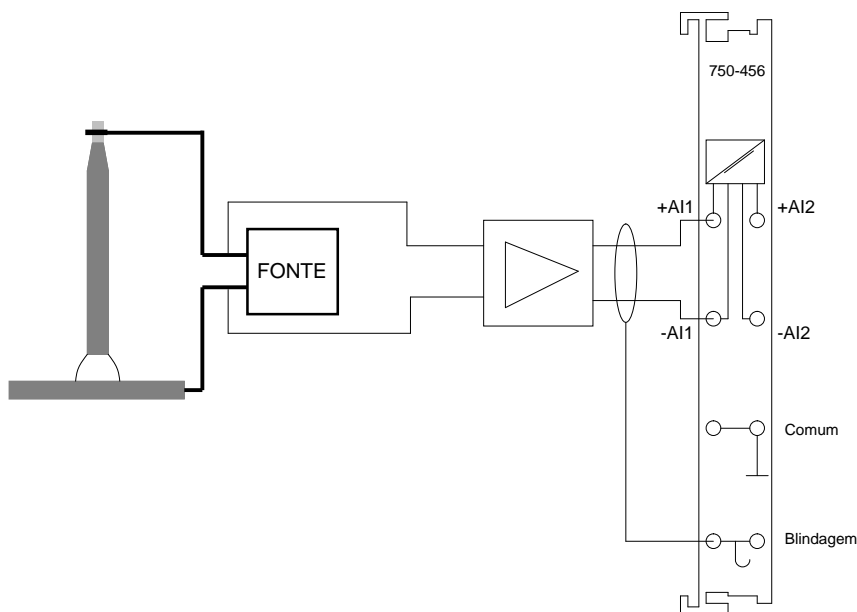


Figura 4.4: Esquema de ligação para medição da tensão fornecida pela máquina de solda.

Como terminador do módulo DeviceNet, é utilizado ainda um cartão 750-600.

4.1.3 Máquina de solda

Para os testes de soldagem foi utilizada uma máquina MasterTig AC/DC 2500W [KEMPPI, 2002] (Figura 4.5), capaz de fornecer correntes de até 250A, e uma tensão em circuito aberto de 70V, não necessitando de gatilho para o início da soldagem.



Figura 4.5: Fonte de soldagem MasterTig 2500W.

4.1.4 Porta-eletrodo

Como porta-eletrodo foi utilizado um mandril adaptado em um porta-ferramenta [Dantas et al., 2005]. O fornecimento de corrente é feito através das castanhas do mandril, que é, por sua vez, isolado eletricamente do porta-ferramenta por uma bucha de nylon. Na Figura 4.6 é mostrado o porta-eletrodo segurando um eletrodo completo e outro já fundido.

Utilizando a rotina para definição de ferramentas do KR C2, foram obtidos os seguintes modelos para os sistemas de coordenadas do TCP com o eletrodo completo e com

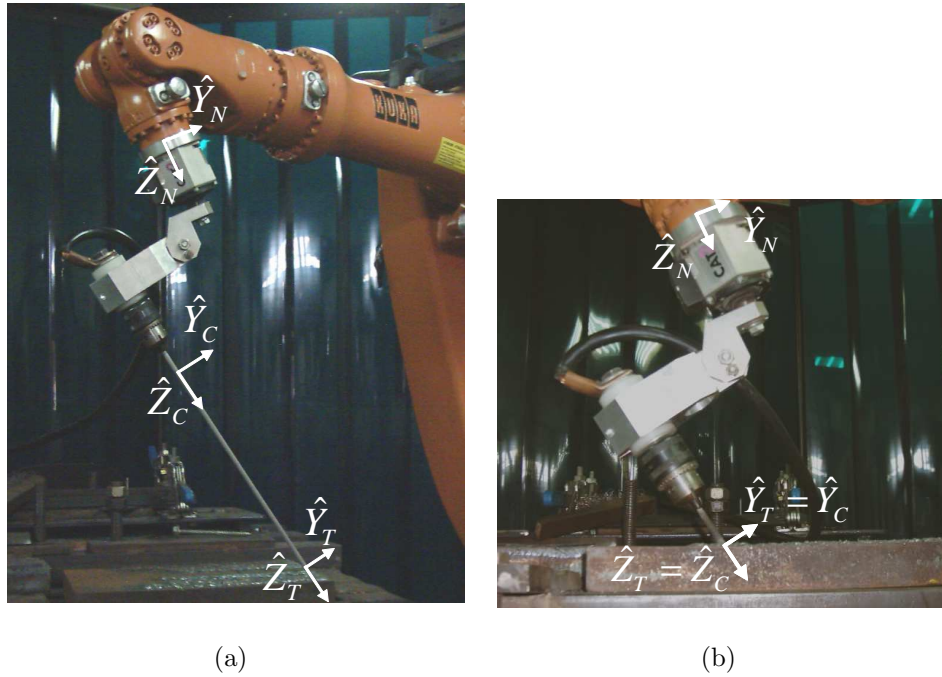


Figura 4.6: Robô industrial com porta-ferramentas segurando um eletrodo completo (a) e já fundido (b).

o eletrodo fundido:

$${}^N T(t_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0,9886 & 0,1509 & -66 \\ 0 & -0,1509 & 0,9886 & 549 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

$${}^N T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0,9886 & 0,1509 & -109 \\ 0 & -0,1509 & 0,9886 & 264 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

4.1.5 Consumíveis

A metodologia proposta permite a soldagem com eletrodo revestido de qualquer comprimento, diâmetro e tipo de revestimento, já que realiza o controle em malha fechada do processo. Dessa

forma, a metodologia proposta foi validada com a utilização de eletrodos revestidos dos tipos rutílico (E6013), de 4mm de diâmetro, e básico (E7018), de 3,25mm de diâmetro, utilizando correntes de soldagem na faixa de 150A a 180A, indicadas pelo fabricante.

Como metais de base foram utilizadas chapas de aço carbono para a realização de cordões lineares e tubos para a realização de cordões em trajetórias não lineares.

4.2 Implementação da metodologia

Tipicamente, um programa em KRL [KUKA Roboter GmbH, 2003] é composto de dois arquivos. O arquivo “SRC” contém o código do programa em si, enquanto o arquivo “DAT” contém dados específicos do programa. Variáveis e estruturas definidas e inicializadas no arquivo de dados, caso alteradas durante a execução do programa, são novamente armazenadas no arquivo, permitindo a memorização de seus valores mesmo após finalizado o programa.

Para a implementação da metodologia proposta para a soldagem com eletrodo revestido foi utilizado, ainda, um terceiro tipo de arquivo, “SUB” (*submit*), que pode ser executado em paralelo com o programa principal, permitindo ao controlador do robô monitorar processos durante a execução de movimentos do manipulador. Esse recurso foi utilizado para monitorar a tensão medida na fonte de soldagem e implementar o controlador PI para o controle da velocidade de mergulho do eletrodo.

Na Figura 4.7 é mostrada a implementação do programa *submit*. Inicialmente são definidas as variáveis locais `erro` e `deltaT`. Em seguida, as variáveis globais `PIDKP`, `PIDKI`, `integ`, `mergulho` e `SPtensao` são inicializadas como 0, já que o programa *submit* deve ser executado antes do programa principal, onde serão definidos respectivamente os ganhos do controlador PI, o valor inicial para o integrador e gasto inicial do eletrodo e o *set-point* de tensão.

O temporizador `$TIMER[5]`, utilizado para a monitoração do período de amostragem do controlador, é então iniciado e zerado. Como período de amostragem, foi escolhido o próprio período de interpolação do controlador KR C2, de 12ms, utilizado em

todas as tarefas realizadas pelo sistema, como a atualização de leituras de entradas, escritas em saídas e comunicação com os controladores de juntas. O programa entra então em um laço infinito em que, após aguardado o intervalo de amostragem, o tempo decorrido é armazenado na variável `deltaT` e o temporizador é novamente zerado. O erro entre o *set-point* de tensão e o valor medido no canal 1 (`$ANIN[1]`) é calculado e integrado na variável `integ`. Como mencionado na seção 4.1.2, o valor de tensão é lido pelo controlador em uma escala de 1/100, devendo ser multiplicado por 100 para que se obtenha o valor em volts. A variável `mergulho` então calculada de acordo com a equação (3.23).

```
real erro
int deltaT
PIDKP=0
PIDKI=0
Integ=0
mergulho=0
SPtensao=0

$TIMER.STOP[5]=FALSE
$TIMER[5]=0

LOOP
  WAIT FOR ($TIMER[5]>=12)
  deltaT=$TIMER[5]
  $TIMER[5]=0
  erro=(SPtensao-$ANIN[1]*100.0)
  Integ=Integ+erro*deltaT/1000.0
  mergulho=mergulho-((PIDKP*erro)+(PIDKI*Integ))*deltaT/1000.0
ENDLOOP
```

Figura 4.7: Implementação do controlador PI.

Para permitir o armazenamento dos dados durante a execução do programa, como histórico do comprimento do eletrodo, valor instantâneo de tensão e o tempo, utilizou-se uma estrutura de dados definida e inicializada no arquivo “DAT”, como mostrado na Figura 4.8. Durante a execução do programa, a cada intervalo de amostragem, esses valores são armazenados e, após finalizada a execução, o controlador atualiza o arquivo de dados, podendo ser utilizados para a geração de gráficos de análise de desempenho do controlador. As

variáveis C (comprimento consumido), AI1 e AI2 (valores lidos nas entradas analógicas do cartão 750-456) são definidas como reais e a variável T (tempo em milissegundos) é definida como inteira, e fazem parte da estrutura HISTORICO. O vetor HIST é definido como um vetor do tipo HISTORICO, e em seguida cada elemento desse vetor é inicializado com o valor 0. Por se tratar de um arquivo de dados que não é executado, não é possível se utilizar uma estrutura FOR, e cada valor do vetor deve ser inicializado independentemente. Nesse arquivo são ainda declaradas e inicializadas as variáveis GastoEletrodoInicial (comprimento do eletrodo consumido durante a execução anterior do programa), Corrente, Tensao, DiaElet e CompTotalElet, para que seus valores sejam também armazenados no arquivo de dados.

```
STRUC HISTORICO REAL C,AI1,AI2,INT T
DECL HISTORICO HIST[1000]
HIST[1]=C 0.0,AI1 0.0,AI2 0.0,T 0
HIST[2]=C 0.0,AI1 0.0,AI2 0.0,T 0
...
HIST[1000]=C 0.0,AI1 0.0,AI2 0.0,T 0

DECL REAL GastoEletrodoInicial=0.0
DECL REAL Corrente=175.0
DECL REAL Tensao=21.0
DECL REAL DiaElet=4.0
DECL REAL CompTotalElet=300.0
```

Figura 4.8: Declaração e inicialização dos dados no arquivo “DAT”.

Outras variáveis, que não necessitam ser armazenadas no arquivo de dados, são definidas no programa principal (arquivo “SRC”). No Apêndice C é mostrada a listagem completa do programa.

Após inicializadas todas as variáveis, o manipulador é movimentado para o ponto HOME (posição inicial de segurança do programa). São então definidos valores para algumas variáveis de sistema. A variável de sistema \$advance define o número de linhas de movimento para as quais o controlador deve calcular a trajetória durante o movimento em curso. Isso evita paradas no ponto final de cada movimento, já que é possível iniciar a trajetória seguinte

sem necessariamente alcançar exatamente o ponto final de cada trajetória. Nesse programa em particular, garante que o novo ponto da trajetória seja calculado durante o movimento em curso. `$VEL.CP` define a velocidade de movimentos lineares dos comandos seguintes. `$BASE` define o sistema de coordenadas a ser utilizado para a geração de trajetórias, e é definido como o sistema padrão `$WORLD`. O sistema de coordenadas da ferramenta é definido como o eletrodo completo (sistema de coordenadas 11).

O TCP é então movimentado para o ponto P3. Esse ponto é marcado pelo usuário aproximadamente 50mm afastado do ponto de início da soldagem. Caso a variável `TestarCaminho` tenha sido definida com o valor `TRUE`, o manipulador realiza o movimento completo do cordão (ponto P1 ao ponto P2), considerando o modelo do TCP constante, a título de teste da trajetória. Os pontos P1 e P2 são também marcados pelo usuário utilizando a interface padrão do KR C2, em que o TCP é movimentado até o ponto desejado utilizando o *teach pendant* e armazenado na linha desejada.

Em seguida os pontos de início e final do cordão (identificados internamente pelo controlador como `XP1` e `XP2`) são armazenados nas variáveis `Ponto1` e `Ponto2`. São definidas também a velocidade de soldagem (`vlin`), em m/s e o tempo de passo (`tpasso`), em segundos. O tempo de passo deve ser um múltiplo do intervalo de interpolação do controlador, que é de 12ms. Com base nas coordenadas dos pontos `Ponto1` e `Ponto2`, o comprimento do cordão em mm (`compcordao`) é calculado utilizando a função `calcdist` (Figura 4.9). Considerando que as acelerações proporcionadas pelo KR 16 são substancialmente maiores que as velocidades de soldagem, o tempo de aceleração pode ser desprezado e o número de pontos da trajetória é calculado como $\text{numpts}=(\text{compcordao}/(\text{vlin}*1000))/\text{tpasso}$.

O vetor `Passo` é o deslocamento do TCP a cada período de tempo `tpasso` e é calculado por $(\text{Ponto2}-\text{Ponto1})/\text{numpts}$. Porém, como em KRL os pontos são definidos como estruturas de dados, cada uma das propriedades de `Passo` (X, Y, Z, A, B e C) deve ser calculada independentemente (Figura 4.10). A instrução `;FOLD` é utilizada para ocultar trechos do programa que não precisam necessariamente ser apresentados ao usuário na tela de edição. Nesse exemplo, apenas


```

DEFFCT REAL calcdist(PT1:IN,PT2:IN)
  DECL FRAME PT1, PT2, DIF
  DIF.X=PT2.X-PT1.X
  DIF.Y=PT2.Y-PT1.Y
  DIF.Z=PT2.Z-PT1.Z
  return(sqrt(DIF.X*DIF.X + DIF.Y*DIF.Y + DIF.Z*DIF.Z))
ENDFCT

```

Figura 4.9: Função para o cálculo da distância entre pontos.

a linha Definição do vetor passo ($\text{Passo}=(\text{Ponto2}-\text{Ponto1})/\text{numpts}$) é mostrada na tela, representando todo o trecho entre ;FOLD e ;ENDFOLD.

```

;FOLD Definição do vetor passo (Passo=(Ponto2-Ponto1)/numpts)
Passo.X=(Ponto2.X-Ponto1.X)/numpts
Passo.Y=(Ponto2.Y-Ponto1.Y)/numpts
Passo.Z=(Ponto2.Z-Ponto1.Z)/numpts
Passo.A=(Ponto2.A-Ponto1.A)/numpts
Passo.B=(Ponto2.B-Ponto1.B)/numpts
Passo.C=(Ponto2.C-Ponto1.C)/numpts
;ENDFOLD

```

Figura 4.10: Definição do vetor passo.

Como nem sempre se conhece o modelo matemático da ferramenta para se definir o sistema de coordenadas do TCP, foi utilizado o próprio sistema do KR C2 para a definição de ferramentas. O procedimento deve ser realizado duas vezes, uma com o eletrodo completo (sistema de coordenadas 11) e outra com o restante de um eletrodo já utilizado (sistema 12), representando, respectivamente, as matrizes de transformação homogênea ${}^N T(t_0)$ e ${}^N T_C$ mostradas na Figura 4.6.

A partir das transformações `TOOL_DATA[11]` e `TOOL_DATA[12]`, o programa calcula então o vetor unitário de variação da ferramenta (Figura 4.11). Esse vetor é utilizado durante a soldagem para o cálculo do TCP a partir da taxa de mergulho determinada pelo controlador PI.

```
;FOLD Calculo do comprimento do eletrodo
CompFerr=calcdist(TOOL_DATA[12],TOOL_DATA[11])
;ENDFOLD

;FOLD Calculo do vetor unitario variacao da ferramenta
(VarFerr=(TOOL_DATA[12]-TOOL_DATA[11])/CompFerr)
VarFerr.X=(TOOL_DATA[12].X-TOOL_DATA[11].X)/CompFerr
VarFerr.Y=(TOOL_DATA[12].Y-TOOL_DATA[11].Y)/CompFerr
VarFerr.Z=(TOOL_DATA[12].Z-TOOL_DATA[11].Z)/CompFerr
VarFerr.A=(TOOL_DATA[12].A-TOOL_DATA[11].A)/CompFerr
VarFerr.B=(TOOL_DATA[12].B-TOOL_DATA[11].B)/CompFerr
VarFerr.C=(TOOL_DATA[12].C-TOOL_DATA[11].C)/CompFerr
;ENDFOLD
```

Figura 4.11: Cálculo do vetor unitário variação da ferramenta.

A variável `Ferr` é então definida como o TCP inicial `TOOL_DATA[11]` e o manipulador é movimentado para o ponto `Ponto1`. A variável `PontoAnt`, que define o último ponto comandado é definida como `Ponto1`.

O controlador deve aguardar então até que o arco elétrico seja aberto. Isso pode ser verificado pela medição do valor da tensão fornecida pela máquina. Quando em circuito aberto, a máquina fornece uma tensão de 70V (leitura de 0,7). Ao contrário, quando em curto-circuito (por exemplo, se o eletrodo grudar na peça), o valor de tensão fornecido é baixo (igual ao produto da corrente elétrica pelas resistências do cabeamento e eletrodo). Dessa forma, pode-se considerar que um valor de tensão entre 10V e 60V indica que o arco elétrico foi estabelecido.

Após verificada a abertura do arco, o temporizador `$TIMER[6]` é inicializado, assim como a ação de controle do controlador PI (`mergulho`) e o valor do integrador, calculado como na equação (3.25).

Um laço `FOR` é iniciado com a variável inteira `pt`, que vai de 2 até o número de pontos da trajetória (`numpts`). Inicialmente, o valor da variável global `mergulho` é copiado na variável local `GastoEletrodo`, para evitar que alterações na primeira, realizadas pelo programa `submit`, executado simultaneamente com o programa principal, causem problemas

durante a realização dos cálculos seguintes.

Acessos a variáveis globais, variáveis de sistema e entradas e saídas fazem com que o controlador KR C2 interrompa o fluxo do programa até que o movimento em curso seja finalizado. Isso não é desejável nesse caso, já que o ponto seguinte da trajetória deve ser calculado antes que o manipulador alcance o último ponto comandado, para evitar que o eletrodo pare em cada ponto da trajetória. Para isso a instrução `continue` é utilizada antes do acesso à variável `mergulho`, o que evita a interrupção na execução do programa.

É verificado então se o eletrodo já foi completamente consumido ($(\text{GastoEletrodo} + \text{GastoEletrodoInicial}) > \text{CompFerr}$). Caso afirmativo, o laço FOR é interrompido.

O programa continua com a gravação do histórico no vetor HIST e o novo ponto da trajetória (`PontoProx`) é calculado como `PontoAnt+Passo`, como mostrado na Figura 4.12.

```
;FOLD Calculo do novo ponto (PontoProx=PontoAnt+Passo)
PontoProx.X=PontoAnt.X+Passo.X
PontoProx.Y=PontoAnt.Y+Passo.Y
PontoProx.Z=PontoAnt.Z+Passo.Z
PontoProx.A=PontoAnt.A+Passo.A
PontoProx.B=PontoAnt.B+Passo.B
PontoProx.C=PontoAnt.C+Passo.C
;ENDFOLD
```

Figura 4.12: Cálculo do ponto seguinte da trajetória.

O novo modelo da ferramenta é calculado como a ferramenta 11 (eletrodo completo) somado ao vetor unitário variação da ferramenta (`VarFerr`) multiplicado pelo consumo do eletrodo (Figura 4.13). Na Figura 4.14 é mostrado o código para o cálculo de `Ferr`.

O último passo de cada iteração do programa é comandar o movimento para o ponto calculado com o modelo da nova ferramenta calculada. O controlador do robô é o responsável por calcular a posição da última junta do controlador (equação (3.3))

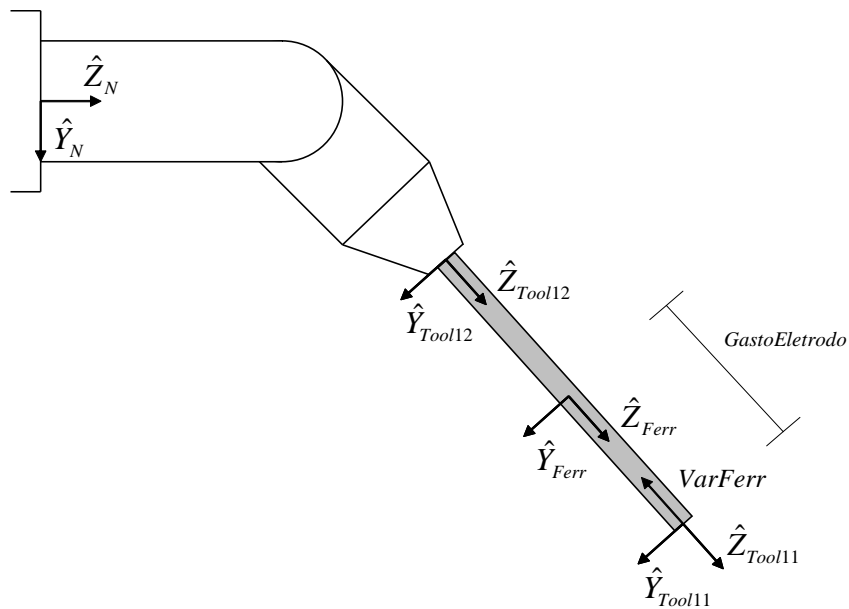


Figura 4.13: Cálculo do modelo da ferramenta durante a soldagem.

```

;FOLD Calculo da nova ferramenta (Ferr=TOOL.DATA[11]+VarFerr*GastoEletrodo)
Ferr.X=TOOL.DATA[11].X+VarFerr.X * GastoEletrodo
Ferr.Y=TOOL.DATA[11].Y+VarFerr.Y * GastoEletrodo
Ferr.Z=TOOL.DATA[11].Z+VarFerr.Z * GastoEletrodo
Ferr.A=TOOL.DATA[11].A+VarFerr.A * GastoEletrodo
Ferr.B=TOOL.DATA[11].B+VarFerr.B * GastoEletrodo
Ferr.C=TOOL.DATA[11].C+VarFerr.C * GastoEletrodo
;ENDFOLD

```

Figura 4.14: Código para o cálculo do modelo da ferramenta.

e realizar o cálculo da cinemática inversa com base nessas duas informações. Porém, a velocidade comandada deve levar em consideração a distância percorrida desde o último ponto comandado até o novo ponto utilizando a nova ferramenta em ambos, já que se tem como restrição o tempo de passo t_{passo} . É necessário, então, calcular qual seria a posição do TCP utilizando a nova ferramenta considerando a posição anterior do manipulador (Figura 4.15).

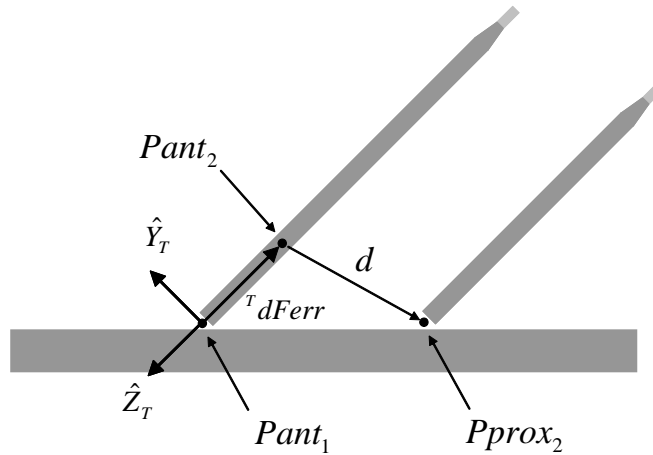


Figura 4.15: Distância percorrida pelo TCP.

Seja o vetor ${}^T dFerr$ a variação da ferramenta entre as duas iterações do programa, definido no sistema de coordenadas do TCP comandado ($\{T\}$). Pode-se, então, calcular a posição do ponto ${}^0 Pant_2$ (ponto anterior com a nova ferramenta, em relação ao sistema de coordenadas da base, $\{0\}$) como:

$${}^0 Pant_2 = {}^0 T_{Pant_1} {}^T dFerr, \quad (4.3)$$

em que ${}^0 T_{Pant_1}$ é a matriz transformação homogênea que define a posição e orientação do ponto anterior da trajetória em relação ao sistema de coordenadas da base (no programa representado por `PontoAnt`). Na linguagem KRL, a transformação entre sistemas de coordenadas pode ser realizada por meio do operador “:”. Assim, ${}^0 Pant_2$ pode ser calculado por `PontoAnt:dFerr`.

A distância percorrida é calculada como:

$$d = |{}^0 Pant_2 - {}^0 Pprox_2| \quad (4.4)$$

em que ${}^0P_{prox_2}$ é o novo ponto da trajetória (PontoProx).

Na Figura 4.16 são mostrados o cálculo da distância a ser percorrida pelo TCP (`disttcp`) e da velocidade (`vtcp`). Em seguida o valor da velocidade é copiado para a variável de sistema `$VEL.CP` e o movimento é comandado.

```
;FOLD Calculo da variacao da ferramenta
  (dFerr=VarFerr*(GastoEletrodo-HIST[pt-1].C))
dFerr.X=VarFerr.X*(GastoEletrodo-HIST[pt-1].C)
dFerr.Y=VarFerr.Y*(GastoEletrodo-HIST[pt-1].C)
dFerr.Z=VarFerr.Z*(GastoEletrodo-HIST[pt-1].C)
;ENDFOLD

disttcp=calcdist(PontoAnt:dFerr, PontoProx)
$TOOL=Ferr
vtcp=disttcp/1000/tpasso
$VEL.CP=vtcp
LIN PontoProx C_VEL
```

Figura 4.16: Cálculo da velocidade comandada e comando para execução do movimento.

O programa repete as iterações (laço `FOR`) até que o ponto final do cordão tenha sido atingido (`pt=numpts`) ou o eletrodo tenha sido completamente consumido (`((GastoEletrodo+GastoEletrodoInicial)>CompFerr)`).

Finalizado o laço `FOR`, o manipulador afasta o eletrodo 30mm da peça na direção Z, causando a extinção do arco elétrico. A variável `GastoEletrodoInicial` é incrementada de `GastoEletrodo` de modo que, na execução seguinte do programa, o manipulador reconheça que o eletrodo já foi parcialmente consumido.

Finalmente, o manipulador se movimenta para o ponto P4 marcado pelo usuário, se afastando da estação de trabalho e retornando ao ponto `HOME`.

A utilização de um robô industrial para a implementação da metodologia traz vantagens como:

- possibilidade de utilização das rotinas já implementadas pelo fabricante para o cálculo das cinemáticas direta e inversa e da dinâmica;

- robustez do controlador;
- repetibilidade e acurácia;
- interface de programação facilitada.

Como mencionado anteriormente, o programa implementado para a soldagem com eletrodo revestido utiliza as facilidades de programação da interface KCP (*KUKA Control Panel*), tanto para a definição da ferramenta como para a programação da trajetória do cordão de solda.

Para definir a ferramenta, o usuário deve levar a ponta do eletrodo (TCP da ferramenta) a um ponto de referência fixo no espaço quatro vezes com orientações diferentes. Em seguida, deve fornecer dois pontos de referência que definam as direções \hat{X} e \hat{Z} . O controlador calcula então a transformação de coordenadas entre o sistema da última junta e o TCP, representadas por X, Y, Z (deslocamento), A, B e C (ângulos de rotação). Para a aplicação em questão, esse procedimento deve ser realizado duas vezes, uma com o eletrodo completo (sistema de coordenadas 11) e outra com o restante de um eletrodo já utilizado (sistema 12).

A trajetória é programada pela marcação dos pontos do cordão. No caso de um cordão linear, devem ser definidos os pontos de suas extremidades (Figura 4.17). É importante observar que os pontos são marcados com o eletrodo completo, não sendo necessário que o usuário conheça quanto do eletrodo será consumido durante a soldagem.

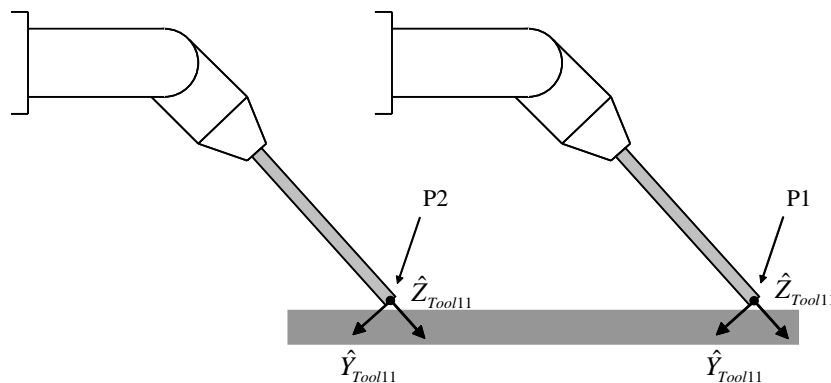


Figura 4.17: Marcação de pontos para programação do cordão de solda.

Capítulo 5. Resultados e Discussões

Este capítulo mostra os resultados experimentais obtidos com a utilização da metodologia proposta para a soldagem robotizada com eletrodo revestido, validando a robotização do processo.

5.1 Regulagem manual do mergulho do eletrodo

Inicialmente, para verificar a viabilidade da metodologia proposta para o controle da taxa de mergulho pelo robô, foram realizados experimentos em que a velocidade de mergulho do eletrodo era regulada manualmente por um potenciômetro que fornecia um valor de tensão de 0 a 3V para o controlador do robô, simulando o valor de tensão medido durante o processo ($V_{fonte} = 0V$ a 30V). A velocidade de mergulho era, então, regulada para um valor proporcional a esse valor de tensão. Assim, após a abertura do arco, um soldador, visualizando o comprimento do mesmo, era capaz de realizar o mergulho.

Para isso, utilizou-se um valor de referência $V_{ref} = 15V$ e as constantes do controlador PI: $K_P = 80 \text{ mm}/(\text{s.V})$ e $K_I = 0$. Foram utilizados eletrodos E6013 de 4mm de diâmetro, por serem considerados os mais fáceis de se soldar manualmente, velocidade de soldagem de 6mm/s, corrente de 180A e ângulo de soldagem de 45°.

O composto utilizado para abertura do arco elétrico na soldagem subaquática com o mecanismo para soldagem por gravidade [Pessoa et al., 2003] apenas funciona adequadamente na soldagem molhada. Nos experimentos aqui apresentados, utilizou-se um pedaço de palha de aço, como em Oliveira (2000), para a abertura do arco. A palha de aço impede um contato direto entre o eletrodo e a peça a ser soldada. Após a passagem inicial da corrente, a palha se desfaz, dando lugar ao arco elétrico.

Na Figura 5.1(a) são mostrados os valores de tensão medidos durante a soldagem para dois experimentos e na Figura 5.1(b) é mostrado o mergulho do porta-eletrodo em função

do tempo. Na Figura 5.1(c) é mostrado o valor da tensão fornecida pelo potenciômetro.

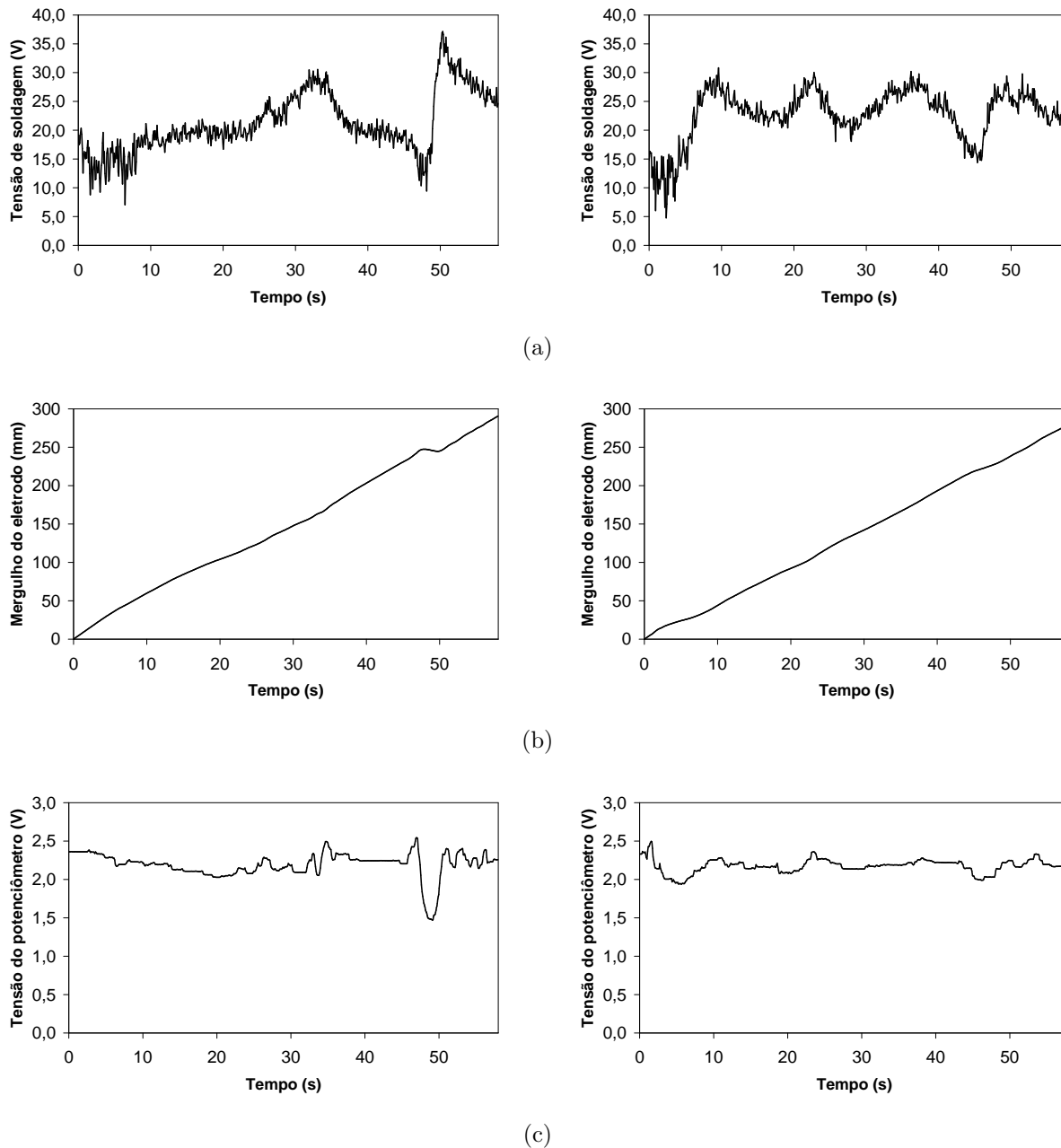


Figura 5.1: Valores de tensão de soldagem (a), mergulho do eletrodo (b) e tensão do potenciômetro (c) para soldagem com regulagem manual de velocidade de mergulho.

Observa-se que, utilizando o mergulho manual, os valores de tensão variaram substancialmente, o que resultou em cordões irregulares (Figura 5.2). Porém, foi possível

verificar que o sistema robótico é capaz de realizar o mergulho do eletrodo na poça de solda mantendo a velocidade de soldagem constante.



Figura 5.2: Cordões de solda obtidos com a regulagem manual do mergulho do eletrodo.

5.2 Ajuste do controlador PI

O passo seguinte foi utilizar o controlador PI para controlar a velocidade de mergulho, procurando manter a tensão V_{fonte} constante. Para ajustar os ganhos do controlador foram feitos vários cordões utilizando valores diferentes para K_P e K_I .

Como valores iniciais foram escolhidos $K_P = 20 \text{ mm}/(\text{s}\cdot\text{V})$ e $K_I = 7 \text{ mm}/(\text{s}^2\cdot\text{V})$. Esses valores foram escolhidos empiricamente a partir de dados como tempo de resposta e oscilação observados nas respostas obtidas anteriormente. Utilizou-se um valor de referência para a tensão de $V_{ref} = 25\text{V}$. Na Figura 5.3 são mostrados o valor de tensão e o mergulho do porta-eletrodo.

Observa-se a grande oscilação inicial do valor de tensão, assim como no mergulho do porta-eletrodo, até que se atinja um valor aproximadamente constante para a tensão, com uma pequena oscilação.

Repetiu-se o experimento, dessa vez com $K_P = 30 \text{ mm}/(\text{s}\cdot\text{V})$ e $K_I = 4 \text{ mm}/(\text{s}^2\cdot\text{V})$ buscando a diminuição da oscilação do valor de tensão e do tempo de estabilização. Na Figura

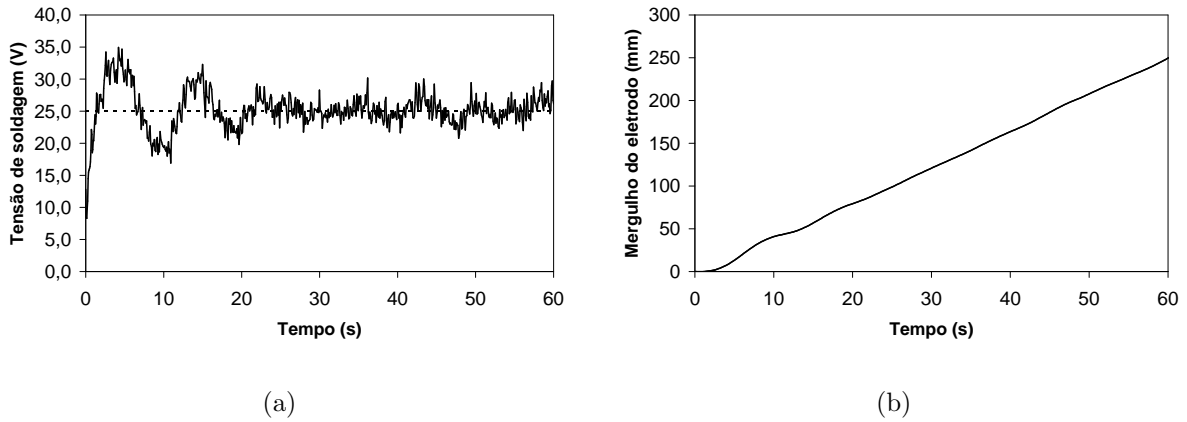


Figura 5.3: Valores de tensão de soldagem (a) e mergulho do eletrodo (b) para soldagem com regulagem automática de velocidade de mergulho ($K_P = 20 \text{ mm}/(\text{s.V})$, $K_I = 7 \text{ mm}/(\text{s}^2.\text{V})$ e $V_{ref} = 25\text{V}$).

5.4 é mostrado o resultado obtido.

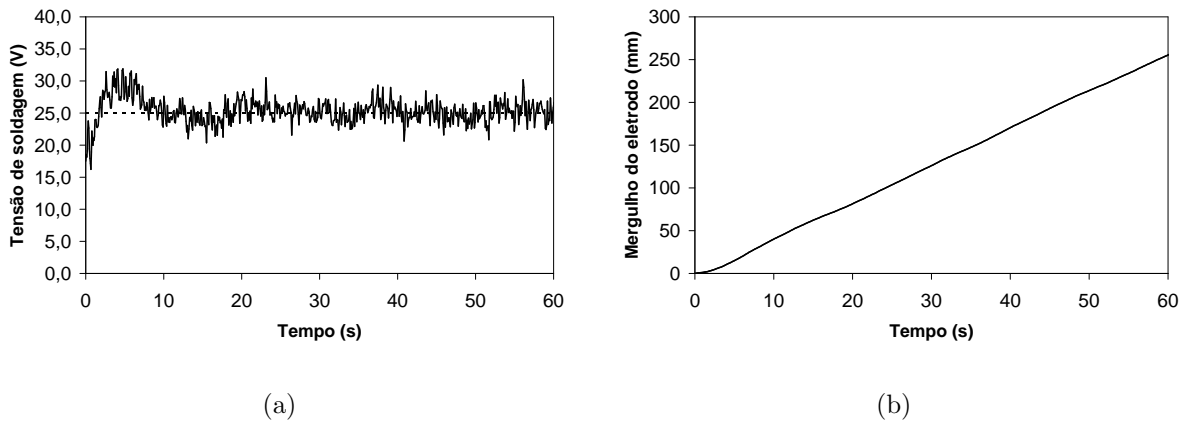


Figura 5.4: Valores de tensão de soldagem (a) e mergulho do eletrodo (b) para soldagem com regulagem automática de velocidade de mergulho ($K_P = 30 \text{ mm}/(\text{s.V})$, $K_I = 4 \text{ mm}/(\text{s}^2.\text{V})$ e $V_{ref} = 25\text{V}$).

Observa-se uma redução significativa da oscilação do valor de tensão. Porém, entre 0 e 10 segundos tem-se ainda uma grande variação nesse valor.

Após vários experimentos, o ajuste do controlador que proporcionou um menor

tempo de resposta foi $K_P = 40 \text{ mm}/(\text{s}\cdot\text{V})$ e $K_I = 5,5 \text{ mm}/(\text{s}^2\cdot\text{V})$, cujo resultado é mostrado na Figura 5.5. Na Figura 5.6 são mostrados alguns cordões de solda obtidos durante os experimentos para regulagem do controlador.

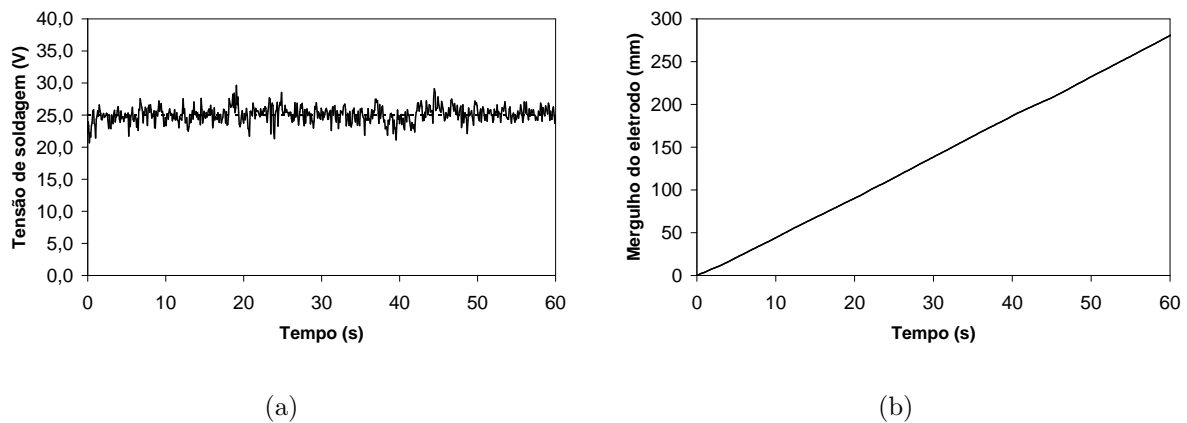


Figura 5.5: Valores de tensão de soldagem (a) e mergulho do eletrodo (b) para soldagem com regulagem automática de velocidade de mergulho ($K_P = 40 \text{ mm}/(\text{s}\cdot\text{V})$, $K_I = 5,5 \text{ mm}/(\text{s}^2\cdot\text{V})$ e $V_{ref} = 25\text{V}$).



Figura 5.6: Cordões de solda obtidos durante os experimentos para regulagem do controlador.

Com o objetivo de se obter melhores parâmetros de soldagem, foram feitos vários cordões de solda (Figura 5.7), variando a corrente de soldagem, tensão de referência e velocidade de soldagem.

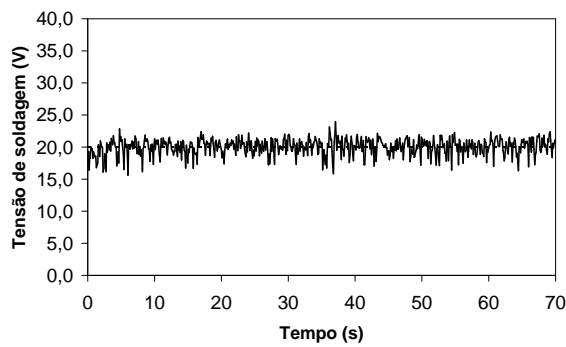


Figura 5.7: Cordões de solda obtidos durante a regulagem dos parâmetros de soldagem (corrente, tensão de referência e velocidade).

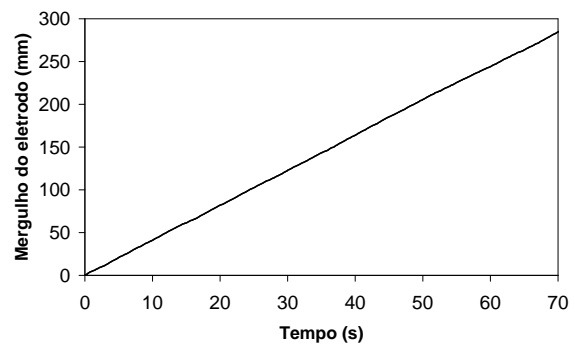
Na Figura 5.8 é mostrado o aspecto do cordão e na Figura 5.9 são mostrados os valores de tensão de soldagem e comprimento consumido para uma velocidade de soldagem de 2,5mm/s, corrente de 150A e tensão de referência de 20V. Nas Figuras 5.10 e 5.11 são mostrados os resultados utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 180A e tensão de referência de 21V. Como esperado, o cordão obtido utilizando uma corrente maior possui uma largura maior (maiores taxas de fusão e de deposição) e um comprimento menor, já que foram utilizados eletrodos de mesmo comprimento e diâmetro.



Figura 5.8: Aspecto do cordão de solda utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 150A e tensão de referência de 20V.



(a)



(b)

Figura 5.9: Valores de tensão de soldagem (a) e mergulho do eletrodo (b) utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 150A e tensão de referência de 20V.



Figura 5.10: Aspecto do cordão de solda utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 180A e tensão de referência de 21V.

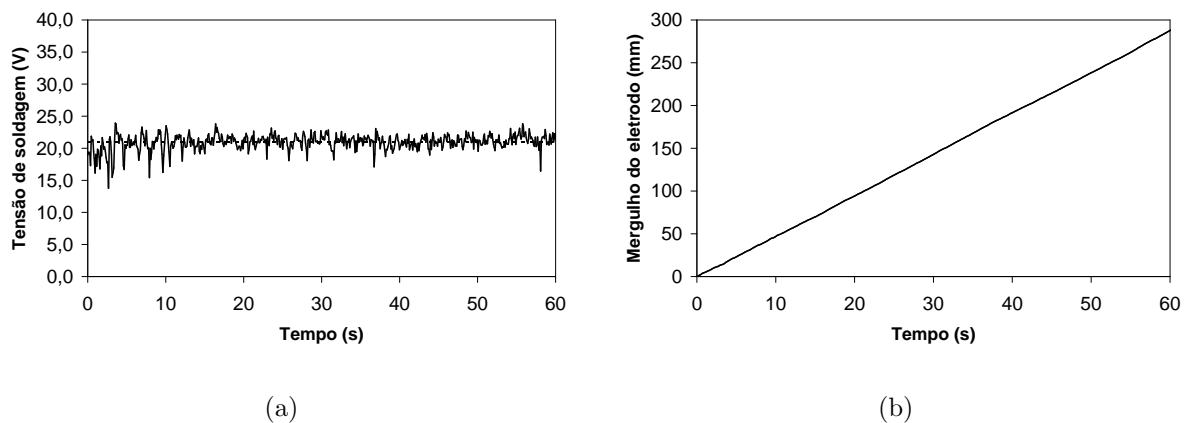


Figura 5.11: Valores de tensão de soldagem (a) e mergulho do eletrodo (b) utilizando velocidade de 2,5mm/s, corrente de 180A e tensão de referência de 21V.

Durante os testes para ajuste de parâmetros do controlador, foi possível observar que, quando são utilizadas tensões de referência abaixo de um valor mínimo (menor que a soma das quedas anódica e catódica de potencial), o controlador tende a mergulhar o eletrodo cada vez mais na poça de fusão, devido à ação integral do controlador, o que provoca a flexão do eletrodo e a extinção do arco, quando o mesmo gruda na peça. Para evitar esse efeito é necessário que o valor de referência de tensão regulado seja sempre maior que a soma das quedas anódica e catódica e as quedas de tensão no cabeamento.

5.3 Implementação da compensação da queda de tensão no eletrodo revestido

Nos testes realizados, foi possível observar, confirmando a literatura [Bracarense, 1994], que apesar de o robô ser capaz de manter a tensão constante, o comprimento do arco aumenta significativamente no final do cordão, como discutido anteriormente na seção 3.2.

Para compensar esse efeito, foi utilizada a solução proposta anteriormente, em que

V_{elctr} é modelada como

$$V_{elctr}(T, l_{elet}) = R(T, l_{elet})I = \rho(T) \frac{l_{elet}}{A} I, \quad (5.1)$$

em que a resistividade elétrica ρ é uma função da temperatura do eletrodo (T), l_{elet} é o comprimento do eletrodo ainda não fundido, A é a área da seção transversal da alma do eletrodo e I é a corrente de soldagem.

Para isso, foram feitos testes para obtenção da curva de temperatura na região revestida do eletrodo em função do tempo. Termopares do tipo K foram utilizados para a monitoração durante as soldagens. Para que a junta de medição de cada termopar realizasse a leitura da região plana da curva de temperatura do eletrodo (região revestida), os fios que os compõe (nesse caso um fio de cromel e outro de alumel) foram previamente soldados utilizando-se o processo a chama oxiacetilênica. Para que o termopar fosse posicionado na região revestida do eletrodo, inicialmente uma pequena quantidade de revestimento foi retirada, até que a alma do eletrodo fosse descoberta. O termopar foi então soldado por descarga capacitiva e posteriormente a região foi recoberta com uma massa feita com o próprio revestimento do eletrodo e uma pequena quantidade de adesivo.

Na Figura 5.12 é mostrada a temperatura média em função do tempo, medida com a utilização dos termopares durante a realização de 5 cordões, utilizando eletrodos E6013 de 4mm de diâmetro e corrente de 175A. Essa curva pode ser aproximada pela seguinte equação:

$$T(t) = 27,36 + 3,8655t + 0,0384t^2, \quad (5.2)$$

com a temperatura T em °C e o tempo t em segundos.

Utilizando essa equação de temperatura e as equações (3.12) e (5.1), foi implementada no programa do controlador a variação do valor de referência de tensão, conforme mostrado na Figura 5.13.

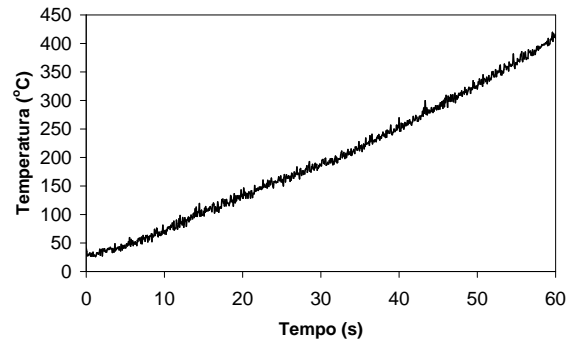


Figura 5.12: Temperatura média dos eletrodos em função do tempo durante a soldagem para uma corrente de 175A.

Inicialização de variáveis:

```
Corrente=175
Tensao=23
DiaElet=0.004
AreaElet=3.1415*DiaElet*DiaElet/4
```

Laço FOR no programa principal:

```
Tempo=$TIMER[6]/1000.0
Temperatura=27.36+3.8655*Tempo+0.0384*Tempo*Tempo
resistividade=1.22003E-7+4.45433E-10*Temperatura+9.2253E-13*Temperatura*Temperatura
resistencia=resistividade*(CompTotalElet-GastoEletrodo)/AreaElet
SPTensao=Tensao+resistencia*corrente
```

Figura 5.13: Implementação da compensação da queda de tensão em KRL.

Foram então feitos testes de soldagem utilizando o programa alterado. Como valor de referência foi utilizado $V_{ref} = 21V$. Na Figura 5.14(a) são mostrados, em uma escala de 15V a 25V, a tensão medida e o valor de referência para a tensão, e na Figura 5.14(b) é mostrada a tensão sobre o eletrodo (V_{elctr}) em função do tempo.

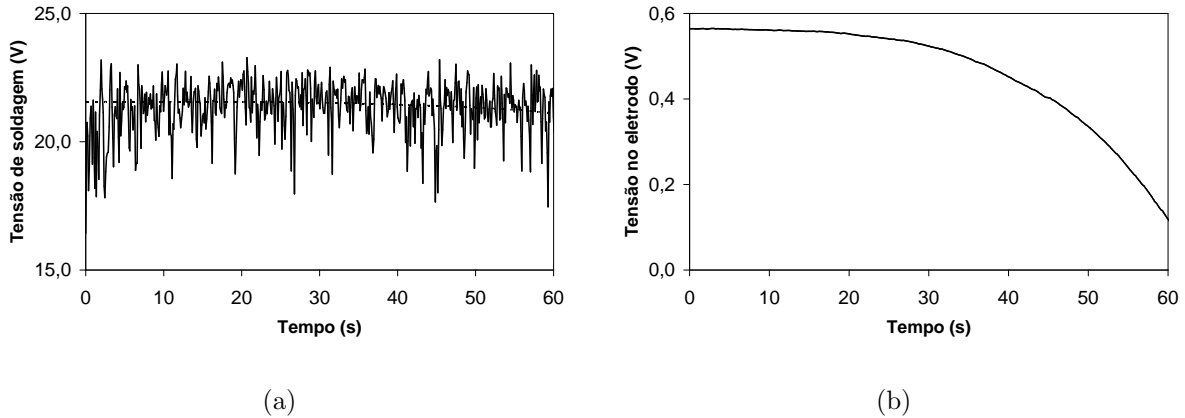


Figura 5.14: Valores de tensão total no circuito e de referência (a) e tensão sobre o eletrodo (b).

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

Na Figura 5.15(a) é mostrado o comprimento consumido do eletrodo em função do tempo, obtido com base nos dados armazenados no arquivo de dados do controlador do robô. Uma regressão quadrática dessa curva leva à função

$$l_c(t) = 0,0021t^2 + 4,5740t - 0,6437. \quad (5.3)$$

Derivando-se essa equação pelo tempo tem-se a taxa de fusão:

$$T_f(t) = 0,0042t + 4,5740, \quad (5.4)$$

mostrada na Figura 5.15(b).

Observa-se que a taxa de fusão possui valor inicial de aproximadamente 4,57mm/s,

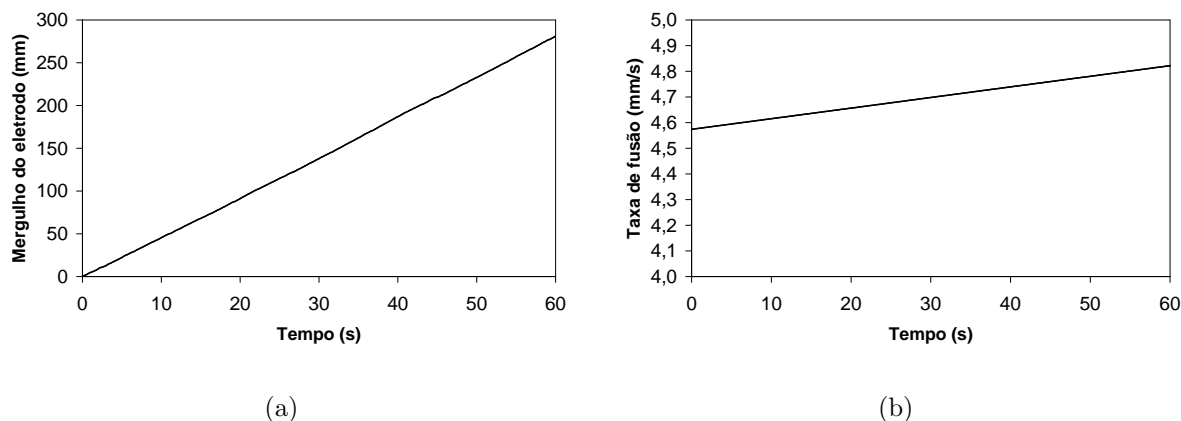


Figura 5.15: Comprimento consumido (a) e taxa de fusão do eletrodo (b).

e, no final do eletrodo, chega a 4,8mm/s, o que comprova a necessidade da variação da taxa de mergulho do eletrodo ao longo da soldagem.

5.4 Testes de repetibilidade e flexibilidade

Para comprovar a repetibilidade alcançada com a robotização do processo, foram realizados vários cordões sobre chapa utilizando eletrodos E6013 de 4mm de diâmetro, corrente de soldagem de 175A, tensão de referência de 21V e velocidade de soldagem de 2,5mm/s. Na Figura 5.16 são mostrados vários cordões realizados sobre chapa. Observa-se que todos os cordões possuem aparência similar, verificando-se a repetibilidade obtida com a robotização do processo.

Com o objetivo de comprovar a flexibilidade da metodologia utilizada no que diz respeito à variedade de eletrodos, foram feitos testes utilizando eletrodos E7018 de 3,25mm de diâmetro. Os melhores cordões foram obtidos utilizando corrente de 150A, velocidade de 2,5mm/s e tensão de referência $V_{ref} = 26,5V$. Na Figura 5.17 é mostrado o aspecto desses cordões.

Obteve-se cordões uniformes e com menos respingos que os cordões obtidos com eletrodos E6013. É importante observar que os eletrodos E7018, apesar de produzirem cordões de melhor qualidade, apresentam uma maior dificuldade na soldagem manual. Nos

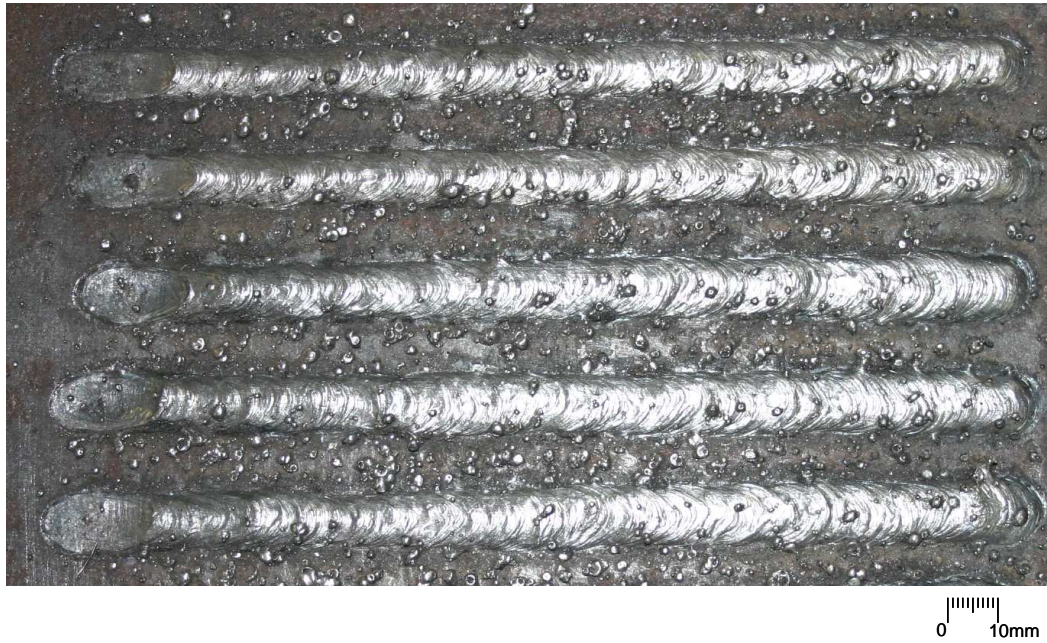


Figura 5.16: Cordões de solda sobre chapa utilizando eletrodos E6013 comprovando a repetibilidade do processo.



Figura 5.17: Cordões de solda sobre chapa utilizando eletrodos E7018 comprovando a flexibilidade e repetibilidade do processo.

experimentos realizados, esses eletrodos não apresentaram dificuldade operacional alguma em relação aos eletrodos E6013, porém foi necessário realizar alguns experimentos para regular a tensão de referência, já que a tensão do arco elétrico varia consideravelmente com a alteração do revestimento do eletrodo. Contudo, essa regulagem inicial de parâmetros deve ser feita em qualquer processo de soldagem a arco.

5.5 Soldagem de cordões em trajetórias não lineares

Para demonstrar a generalidade da metodologia desenvolvida para a geração de trajetórias, foi realizada uma soldagem orbital em tubo. A solda foi realizada nas posições plana e vertical descendente (Figura 5.18), em um tubo de 14 polegadas de diâmetro, utilizando um ângulo de 45°, puxando a poça de solda. Utilizou-se uma corrente de 130A, a velocidade de soldagem foi programada para 5,5mm/s e a tensão de referência para 18V. Na Figura 5.19 é mostrado o posicionamento do manipulador com o eletrodo no momento de abertura do arco elétrico e após sua extinção.

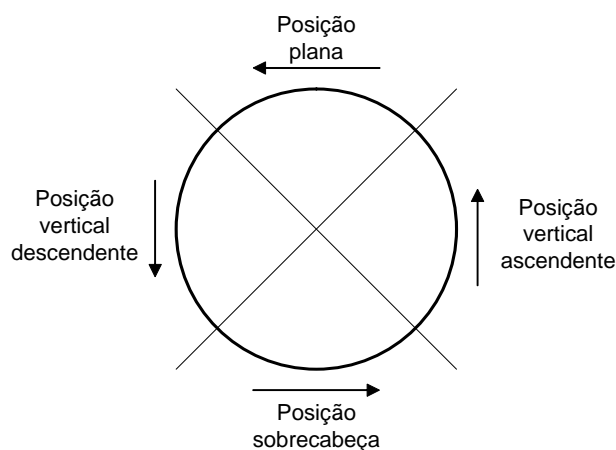


Figura 5.18: Posições de soldagem no tubo durante a soldagem orbital.

Na Figura 5.20 é mostrado o aspecto de dois cordões de solda realizados com os mesmos parâmetros de soldagem, demonstrando a repetibilidade do processo.

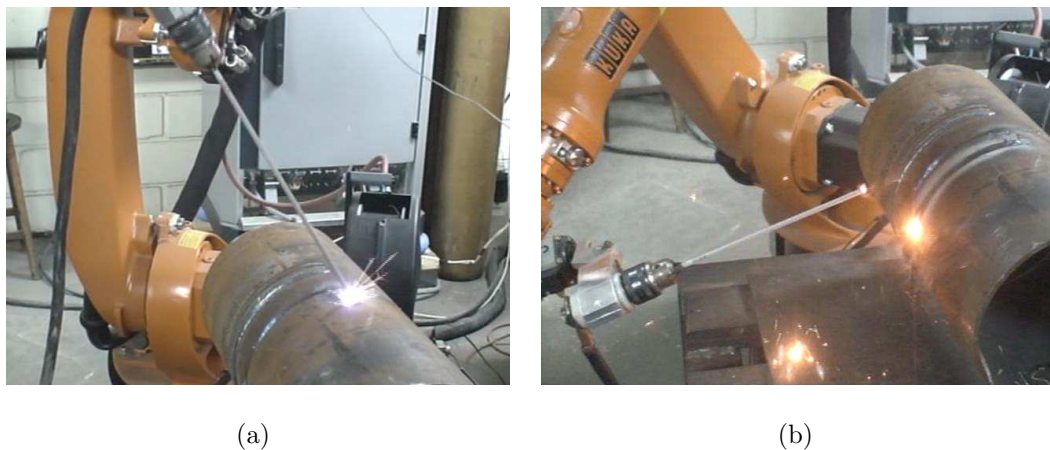


Figura 5.19: Posicionamento do manipulador com o eletrodo no momento de abertura do arco elétrico (a) e após o afastamento do eletrodo para a extinção do arco (b).

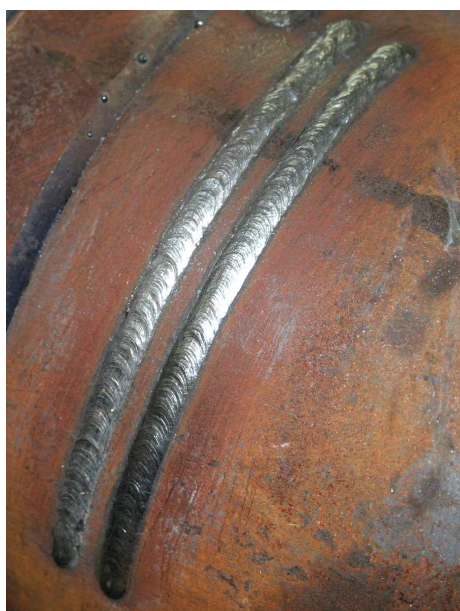


Figura 5.20: Cordões de solda depositados sobre tubo.

5.6 Soldagem multipasses

Um dos problemas relacionados à soldagem GMAW robotizada surge quando é necessária a utilização de multipasses. Multipasses são utilizados nos casos em que é necessário realizar vários cordões de solda, um sobre o outro, de forma a depositar material suficiente para preencher uma junta. Nesses casos é necessário que o robô, a cada passe, afaste a ferramenta do chanfro para manter uniforme em todos os cordões a distância entre o bico de contato e o cordão anterior. Esse afastamento pode ser realizado na própria programação dos movimentos ou com a utilização de sensores. No primeiro caso, é necessário o conhecimento da geometria dos cordões para que seja feita a programação de cada passe. Já no segundo caso, o afastamento da ferramenta é realizado automaticamente com base nas informações obtidas pelos sensores. Sistemas de sensoreamento utilizam comparação com padrões ou técnicas baseadas em regras [Wu et al., 1996, Haug and Pritschow, 1998]. Porém a utilização de sensores torna o sistema significativamente mais oneroso.

A metodologia aqui apresentada para a soldagem com eletrodo revestido permite que passes múltiplos sejam realizados sem grandes problemas, já que o controlador regula automaticamente o mergulho do eletrodo no momento em que o comprimento do arco diminui. Na Figura 5.21 é mostrada uma vista lateral da deposição de cordões múltiplos.

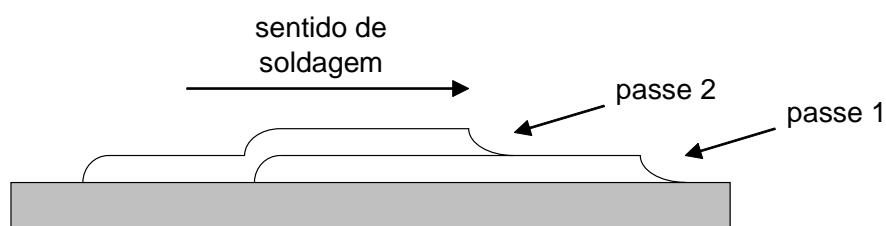
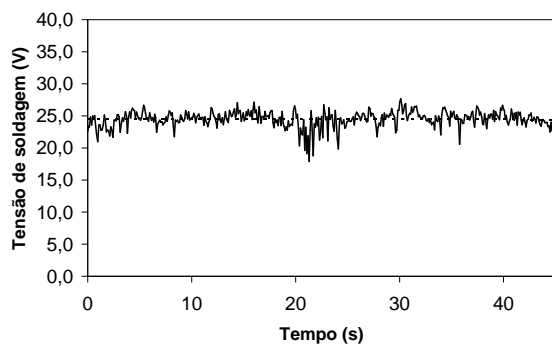


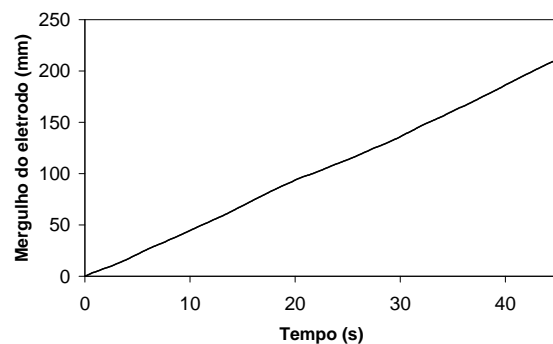
Figura 5.21: Vista lateral da deposição de cordões múltiplos.

Durante a deposição do segundo cordão, no momento em que o eletrodo atinge o cordão anterior, o comprimento do arco diminui, o que causa uma diminuição na velocidade de mergulho do eletrodo, ou até mesmo seu recuo, de forma a manter o comprimento do arco constante.

Foram realizados testes de soldagem multipasses utilizando eletrodos E6013. Na Figura 5.22(a) são mostrados os valores de tensão medidos durante a realização do segundo passe e na Figura 5.22(b) é mostrado o mergulho do eletrodo. Pode-se observar que, no momento em que a soldagem do segundo cordão atinge o início do primeiro (aproximadamente no tempo de 20 segundos), há uma diminuição do valor de tensão no arco, o que é compensado pelo controlador com uma diminuição no mergulho do eletrodo. Em um momento seguinte a tensão novamente se estabiliza no valor desejado. Esse experimento mostra também a robustez do sistema a perturbações, já que o primeiro cordão pode ser considerado como uma perturbação no processo durante a soldagem do segundo.



(a)



(b)

Figura 5.22: Valores de tensão de soldagem (a) e mergulho do eletrodo (b) para soldagem de cordões múltiplos.

Capítulo 6. Conclusões

O presente trabalho apresentou a robotização do processo de soldagem com eletrodo revestido, aliando a flexibilidade do processo à repetibilidade obtida com a robotização. Foi desenvolvida uma metodologia para a geração da trajetória do porta-eletrodo durante a soldagem de forma a movimentar a frente de fusão ao longo da peça com a velocidade e ângulo de soldagem programados pelo operador, mantendo o comprimento do arco elétrico constante. O comprimento do arco é controlado em malha fechada utilizando como realimentação do controlador a tensão fornecida pela máquina de solda com compensação da queda de tensão sobre o eletrodo em função de seu comprimento e temperatura.

Com a realização desse trabalho foi possível concluir que:

1. É viável a robotização do processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW), aliando a flexibilidade e repetibilidade da robotização às vantagens do processo, trazendo a possibilidade de robotização de tarefas perigosas e insalubres para o ser humano, como trepanação de dutos e soldagem subaquática;
2. O mergulho do eletrodo pode ser realizado pelo próprio manipulador, sem a necessidade da construção de mecanismos adicionais para realizar a sua alimentação. Para realizar a geração da trajetória da ferramenta durante a soldagem, o modelo cinemático do eletrodo foi incluído na própria cinemática do manipulador, e considerado como uma junta prismática cujo deslocamento é relacionado à taxa de fusão. O TCP se movimenta ao longo da junta a ser soldada, depositando o cordão de solda ao longo da trajetória programada enquanto a ferramenta realiza o mergulho do eletrodo de forma independente;
3. A metodologia desenvolvida permite a realização de cordões de geometria genérica, como a trepanação de dutos;

4. A metodologia possibilita, ainda, a programação da solda pelo operador de modo semelhante ao de processos com alimentação contínua de arame, já que o mergulho do eletrodo é realizado automaticamente pelo robô;
5. Um controlador PI é adequado para controlar o comprimento do arco elétrico, tendo como ação de controle o deslocamento da junta prismática relacionada ao consumo do eletrodo. Para evitar o aumento do arco elétrico ao longo da realização do cordão, efeito que ocorre quando se considera como tensão do arco a própria tensão da fonte, utilizou-se um modelo da queda de tensão sobre o eletrodo permitindo uma determinação mais precisa do valor de tensão do arco elétrico;
6. O modelo da queda de tensão sobre o eletrodo deve levar em conta sua temperatura, já que sua resistividade varia significativamente com o aquecimento do mesmo;
7. A utilização de um robô industrial com uma interface de programação flexível permitiu a programação da geração em tempo de execução da trajetória do porta-eletrodo e cálculo do consumo do eletrodo;
8. A repetibilidade obtida com a robotização foi comprovada pela obtenção de cordões semelhantes;
9. A flexibilidade da metodologia no que diz respeito à alteração de eletrodos foi comprovada pela soldagem de cordões com eletrodos rúflicos e básicos;
10. A flexibilidade da metodologia para a soldagem de cordões sobre juntas de geometrias genéricas foi comprovada pela realização de cordões lineares e sobre tubo.

Capítulo 7. Sugestões para Trabalhos Futuros

1. **Cálculo da temperatura média do eletrodo utilizando a medição da temperatura na região não revestida:** Em Felizardo (2003) é mostrado o desenvolvimento de um modelo utilizando volumes finitos para o levantamento da curva de temperatura do eletrodo. A utilização desse modelo para o cálculo em tempo real da temperatura é inviável devido ao seu custo computacional elevado e à necessidade de se conhecer todas as propriedades físicas do eletrodo e da garra utilizados, assim como as condições do ambiente. Sugere-se, com base nesses estudos, o desenvolvimento de um modelo físico que relacione a temperatura média do eletrodo com a temperatura medida na região não revestida obtida com a utilização de um termopar inserido na garra [Dantas et al., 2005].
2. **Soldagem GMAW multipasses:** Aplicar a metodologia aqui desenvolvida utilizando a variação do TCP para realizar o afastamento da ferramenta a cada passe da soldagem.
3. **Aplicação em soldagem subaquática:** Aplicação da metodologia desenvolvida para soldagem robotizada com eletrodo revestido em um sistema robótico capaz de operar em ambiente subaquático.
4. **Aplicação em trepanação de dutos:** Desenvolvimento de um sistema capaz de inferir, por meio de medições externas, a temperatura interior no tubo condutor de fluido e implementar no sistema a alteração dos parâmetros e/ou interrupção da soldagem caso essa temperatura atinja patamares críticos.
5. **Otimização dos parâmetros de soldagem:** Estudar os melhores parâmetros de soldagem (corrente, comprimento do arco elétrico e velocidade de soldagem) para os diferentes tipos de eletrodos e posições de soldagem.
6. **Estudo sobre a variação da velocidade de soldagem:** Com o aumento da taxa

de fusão, e mantendo-se a velocidade de soldagem constante, há um aumento da taxa de deposição de material. O aumento da velocidade de soldagem pode ser facilmente implementado utilizando a metodologia proposta e compensaria esse efeito, porém seria necessário estudar os efeitos desse aumento da velocidade sobre a geometria do cordão e sua microestrutura.

7. **Implementação da reabertura do arco elétrico:** Para trajetórias de grande extensão, um único eletrodo pode não ser suficiente para completar a deposição do cordão. Nesses casos seria necessário que o manipulador fizesse a troca automática do eletrodo e a reabertura do arco elétrico no ponto de interrupção da solda.
8. **Estimação da queda de tensão sobre o eletrodo revestido:** Utilizando informações obtidas do controlador de corrente da máquina de solda, realizar a estimação da resistência e, conseqüentemente, da queda de tensão sobre o eletrodo revestido.

Apêndice A. Modelagem Cinemática e Geração de Trajetórias

A.1 Cinemática direta e inversa de robôs industriais

Um robô industrial é composto basicamente por um manipulador e um controlador. O manipulador é a parte mecânica que realiza o posicionamento da ferramenta por meio da movimentação de seus elos, que são conectados entre si por juntas (que podem ser rotativas ou prismáticas). As juntas são acionadas por atuadores, que convertem a energia elétrica em movimento e possuem sensores que fornecem ao controlador informações sobre posição e velocidade. O controlador do robô é responsável pelo comando dos atuadores e leitura dos sensores de forma a fazer o manipulador realizar os movimentos pré-programados. A ferramenta é chamada de elemento terminal, ou *end-effector* e é responsável pela realização da tarefa propriamente dita.

O modelo do robô é obtido a partir do estudo da sua cinemática. A cinemática trata do estudo dos movimentos sem considerar as causas que lhes dão origem [Craig, 1989]. O problema da cinemática direta consiste em determinar a posição e a orientação da ferramenta em relação ao sistema de coordenadas da base, dados os ângulos de cada uma das juntas do manipulador. A metodologia consiste em definir para cada elo um sistema de coordenadas e descrever as relações entre esses sistemas de coordenadas.

Além de conhecer o modelo do manipulador, é necessário ao controlador o conhecimento da ferramenta, para que seja possível realizar a tarefa com máxima precisão e repetibilidade. No caso da soldagem com eletrodo revestido, a ferramenta utilizada é o porta-eletrodo. No modelo da ferramenta deve ser levado em consideração o eletrodo em si: seu comprimento e orientação.

O posicionamento de um robô (ou de sua ferramenta) pode ser definido de três modos distintos:

- Espaço Cartesiano
- Espaço de Juntas
- Espaço de Atuadores

O primeiro modo utiliza o sistema de coordenadas cartesianas para determinar, no espaço, a posição (x, y, z) e orientação $(roll, pitch, yaw)$ do TCP (*tool center point*) da ferramenta acoplada ao robô ($P(t) = \{x, y, z, r, p, w\}$).

O segundo modo (espaço de juntas) utiliza o conjunto de variáveis de deslocamento das articulações, ou ângulos das juntas para robôs de juntas rotativas ($\theta(t) = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6\}$).

O terceiro e último modo de se definir o posicionamento do robô é o espaço dos atuadores, em que se consideram os movimentos dos atuadores ($A(t) = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6\}$). Por exemplo, no caso de juntas acionadas por motores rotativos, o espaço dos atuadores define a posição angular de cada motor.

Define-se, então, como cinemática direta, a relação entre o espaço das juntas e o espaço cartesiano: $\theta(t) \rightarrow P(t)$. Já a cinemática inversa determina a relação entre o espaço cartesiano e o espaço das juntas: $P(t) \rightarrow \theta(t)$. A cinemática dos atuadores, por sua vez, determina a relação entre o espaço das juntas e dos atuadores, e vice-versa. Na Figura A.1 são mostradas essas relações.

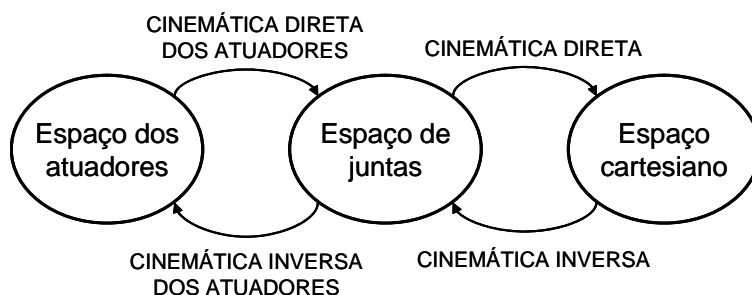


Figura A.1: Espaços utilizados para definir o posicionamento de um robô.

A.1.1 Descrições e transformações espaciais

Um ponto pode ser localizado no espaço em relação a um sistema de coordenadas $\{A\}$ por meio de um vetor posição tridimensional [Craig, 1989]:

$${}^A P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}. \quad (\text{A.1})$$

Para descrever completamente um objeto no espaço torna-se necessário também definir sua orientação. Para isso, define-se um sistema de coordenadas $\{B\}$ preso ao objeto. Uma descrição da orientação do sistema de coordenadas $\{B\}$ em relação ao $\{A\}$ define também a orientação do objeto em relação a $\{A\}$. Uma maneira de se definir essa orientação é definir os vetores unitários dos três eixos principais de $\{B\}$ (\hat{X}_B , \hat{Y}_B e \hat{Z}_B) em relação a $\{A\}$, obtendo-se ${}^A \hat{X}_B$, ${}^A \hat{Y}_B$ e ${}^A \hat{Z}_B$.

Esses três vetores definem a matriz rotação 3×3

$${}^A R = \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B & {}^A \hat{Y}_B & {}^A \hat{Z}_B \end{bmatrix}. \quad (\text{A.2})$$

Já a matriz rotação que define o sistema de coordenadas A em relação ao B (${}^B R$) é dada pela inversão da matriz ${}^A R$:

$${}^B R = {}^A R^{-1}. \quad (\text{A.3})$$

Observa-se que as linhas da matriz ${}^A R$ definem os vetores unitários do sistema de coordenadas $\{A\}$ em relação ao sistema $\{B\}$:

$${}^A R = \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B & {}^A \hat{Y}_B & {}^A \hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B \hat{X}_A^T \\ {}^B \hat{Y}_A^T \\ {}^B \hat{Z}_A^T \end{bmatrix}, \quad (\text{A.4})$$

ou seja, a matriz rotação que descreve o sistema $\{A\}$ em relação ao $\{B\}$ é dada pela transposição da matriz rotação que descreve o sistema $\{B\}$ em relação ao $\{A\}$:

$${}^B R = {}^A R^T. \quad (\text{A.5})$$

Sabe-se ainda que o inverso de uma matriz com colunas ortonormais (ortogonais entre si e de módulo igual à unidade) é igual à sua transposta [Goldman, 1985]:

$${}^A_B R^{-1} = {}^A_B R^T = {}^B_A R, \quad (\text{A.6})$$

o que confirma a equação (A.3).

Para descrever completamente um sistema de coordenadas $\{B\}$ é necessário não só definir sua orientação relativa a um referencial $\{A\}$, como também a posição de sua origem (P_{BORG}) em relação a $\{A\}$:

$$\{B\} = \{{}^A_B R, {}^A P_{BORG}\}. \quad (\text{A.7})$$

De posse de ${}^A_B R$ e ${}^A P_{BORG}$, é possível transformar a descrição de um ponto em $\{B\}$ para $\{A\}$:

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{BORG}. \quad (\text{A.8})$$

Essa equação de transformação pode ser substituída por uma simples multiplicação matricial (${}^A P = {}^A_B T {}^B P$) pela matriz transformação homogênea:

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} & & & \\ & {}^A_B R & & {}^A P_{BORG} \\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.9})$$

Supondo que seja conhecida a matriz transformação homogênea ${}^A_B T$ que descreve o sistema de coordenadas $\{B\}$ em relação ao sistema $\{A\}$, a matriz que descreve o sistema $\{A\}$ em relação ao $\{B\}$ é sua inversa, ou seja:

$${}^B_A T = {}^A_B T^{-1}. \quad (\text{A.10})$$

Porém, ao contrário das matrizes de rotação, as matrizes de transformação homogênea não são necessariamente ortonormais, portanto: ${}^A_B T^{-1} \neq {}^A_B T^T$.

Uma alternativa para calcular a inversa de uma matriz transformação homogênea sem a necessidade de sua inversão numérica [Craig, 1989], é encontrar

${}^B P_{AORG} = -{}^A R^T {}^A P_{BORG}$ utilizando a equação (A.8) e considerar que a inversa da matriz rotação é igual à sua transposta, o que leva a:

$${}^B_A T = {}^A_B T^{-1} = \begin{bmatrix} & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.11})$$

A.1.2 Ângulos de rotação

Apesar de serem definidas por matrizes 3×3 , sabe-se que as matrizes rotação, por serem ortonormais, possuem apenas três graus de liberdade, pois:

$$\begin{aligned} |\hat{X}| &= 1, \\ |\hat{Y}| &= 1, \\ |\hat{Z}| &= 1, \\ \hat{X} \cdot \hat{Y} &= 0, \\ \hat{X} \cdot \hat{Z} &= 0, \\ \hat{Y} \cdot \hat{Z} &= 0. \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Isso mostra ser possível definir uma matriz rotação por apenas três parâmetros. Esses três parâmetros podem ser as rotações de um sistema de coordenadas em torno de três eixos distintos. Aqui serão mostradas as rotações sobre os eixos $X - Y - Z$ fixos [Craig, 1989], que são comumente chamados de *roll*, *pitch* e *yaw*. Essas rotações podem ser descritas como: “Comece com o sistema de coordenadas $\{B\}$ coincidente com o sistema de referência $\{A\}$. Primeiro rotacione $\{B\}$ sobre o eixo \hat{X}_A de um ângulo γ , em seguida sobre \hat{Y}_A de um ângulo β e finalmente sobre o eixo \hat{Z}_A de um ângulo α ”. Observa-se que pela definição todas as rotações são efetuadas em relação aos eixos do sistema de coordenadas de referência (fixo), em oposição aos ângulos de Euler, em que as rotações são efetuadas em relação ao sistema móvel.

A matriz de rotação ${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha)$ é obtida pelo produto das matrizes de rotação em torno de cada eixo independentemente:

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) =$$

$$\begin{bmatrix} C_\alpha & -S_\alpha & 0 \\ S_\alpha & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\beta & 0 & S_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\beta & 0 & C_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\gamma & -S_\gamma \\ 0 & S_\gamma & C_\gamma \end{bmatrix} = \quad (\text{A.13})$$

$$\begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta & C_\alpha S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma & C_\alpha S_\beta C_\gamma + S_\alpha S_\gamma \\ S_\alpha C_\beta & S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma & S_\alpha S_\beta C_\gamma - C_\alpha S_\gamma \\ -S_\beta & C_\alpha S_\gamma & C_\beta C_\gamma \end{bmatrix},$$

onde C_α é $\cos(\alpha)$, S_α é $\sin(\alpha)$ e assim por diante.

É também importante resolver o problema inverso, ou seja, dada a matriz rotação ${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha)$, obter os ângulos de rotação α , β e γ . Fazendo:

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (\text{A.14})$$

a solução é dada por:

$$\beta = \text{atan2}\left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}\right),$$

$$\alpha = \text{atan2}\left(\frac{r_{21}}{C_\beta}, \frac{r_{11}}{C_\beta}\right), \quad (\text{A.15})$$

$$\gamma = \text{atan2}\left(\frac{r_{32}}{C_\beta}, \frac{r_{33}}{C_\beta}\right),$$

em que $\text{atan2}(x, y)$ é a função arco tangente de dois argumentos, capaz de definir em qual dos quatro quadrantes se encontra o ângulo calculado. Se $\beta = \pm 90^\circ$ ($C_\beta = 0$), apenas a soma de

α e γ pode ser calculada. Nesse caso, pode-se utilizar a solução:

$$\begin{aligned}\beta &= 90^\circ, \\ \alpha &= 0^\circ, \\ \gamma &= \text{atan2}(r_{12}, r_{22}).\end{aligned}\tag{A.16}$$

A.1.3 Modelagem cinemática

Para lidar com a complexa geometria dos manipuladores, a modelagem cinemática é feita anexando um sistema de coordenadas a cada um dos elos do manipulador. A modelagem é feita, então, definindo as descrições do sistema de coordenadas de cada elo em relação ao do elo anterior em função do deslocamento da junta que os conecta.

Define-se o sistema de coordenadas $\{0\}$ como o sistema de coordenadas da base (fixo), os sistemas $\{i\}$ como os sistemas de cada elo, em que i é o número do elo e, finalmente, o sistema $\{T\}$ como o sistema anexado à ponta da ferramenta (TCP - *Tool Center Point*).

A princípio, cada matriz transformação entre os sistemas de coordenadas do manipulador teria 6 parâmetros independentes: 3 de deslocamento do sistema de coordenadas e outros 3 de rotação. Porém, para simplificar os cálculos utiliza-se a convenção chamada de notação de Denavit-Hartenberg (D-H). Nessa convenção, a transformação entre os sistemas de coordenadas de dois elos adjacentes (sistemas i e $i-1$) é definida por apenas 4 parâmetros, a saber:

a_{i-1} = distância de \hat{Z}_{i-1} a \hat{Z}_i medida ao longo de \hat{X}_{i-1} ;

α_{i-1} = ângulo entre \hat{Z}_{i-1} e \hat{Z}_i rotacionado em torno de \hat{X}_{i-1} ;

d_i = distância entre \hat{X}_{i-1} e \hat{X}_i medida ao longo de \hat{Z}_i ;

θ_i = ângulo entre \hat{X}_{i-1} e \hat{X}_i rotacionado em torno de \hat{Z}_i .

A Figura A.2 exemplifica os 4 parâmetros de Denavit-Hartenberg.

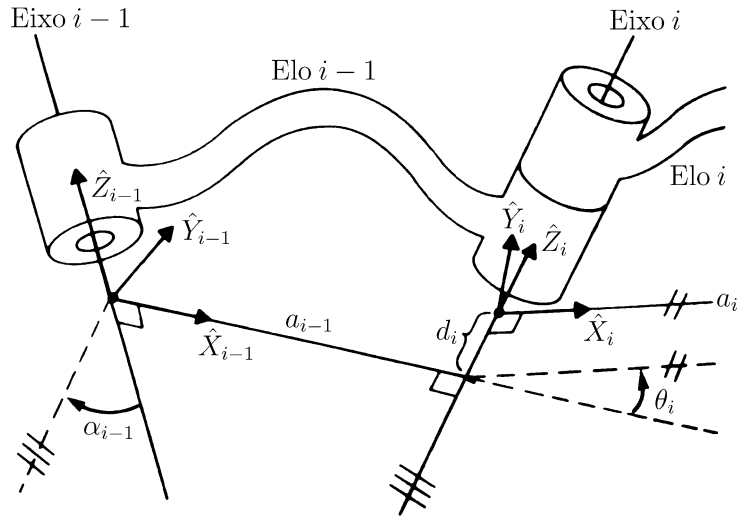


Figura A.2: Exemplo de uma junta rotativa e os sistemas de coordenadas anexados aos elos [Craig, 1989].

Definindo-se cada eixo \hat{Z}_i coincidente com o eixo de revolução de cada junta (no caso de robôs que possuam apenas juntas de revolução), tem-se θ_i como variável e os outros parâmetros constantes.

A matriz transformação homogênea que descreve um sistema de coordenadas i em relação ao sistema anterior $i - 1$ é dada por:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} & 0 & a_{i-1} \\ S_{\theta_i} C_{\alpha_{i-1}} & C_{\theta_i} C_{\alpha_{i-1}} & -S_{\alpha_{i-1}} & -S_{\alpha_{i-1}} d_i \\ S_{\theta_i} S_{\alpha_{i-1}} & C_{\theta_i} S_{\alpha_{i-1}} & C_{\alpha_{i-1}} & C_{\alpha_{i-1}} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.17})$$

Para um robô de N juntas, a transformação entre o sistema de coordenadas da base e o sistema de coordenadas da junta N é dada por:

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{N-1}T_N \quad (\text{A.18})$$

e a transformação entre o sistema de coordenadas da base e o sistema da ferramenta $\{T\}$ por:

$${}^0T_T = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{N-1}T_N {}^N T_T, \quad (\text{A.19})$$

em que N_T descreve o sistema de coordenadas do TCP em relação à última junta do manipulador. Usualmente, essa descrição é uma matriz constante, se as características da ferramenta permanecerem constantes durante a realização da tarefa.

A.2 Geração de trajetórias

Basicamente, a programação do movimento de um robô consiste na definição de pontos a serem atingidos pela ferramenta (TCP). Entre os pontos inicial e final de determinada trajetória é necessário se definir as posições de cada junta do manipulador a intervalos de tempo regulares e fornecer essas posições ao controlador como valores de referência. Esse procedimento é conhecido como geração de trajetórias.

A geração de trajetória é baseada no movimento desejado para a ferramenta (sistema de coordenadas $\{T\}$) em relação a um sistema de coordenadas fixo (sistema de coordenadas $\{S\}$), como mostrado na Figura A.3. Definem-se também duas posições básicas da ferramenta: a inicial ($\{T_{inicial}\}$) e a final ($\{T_{final}\}$). Além dos pontos inicial e final, a trajetória gerada deve obedecer a certas restrições. Normalmente utiliza-se a restrição de suavidade da trajetória. Uma função suave é definida como uma função contínua e que possua primeira derivada também contínua. A primeira derivada contínua significa uma função velocidade contínua, ou seja, com acelerações finitas.

A trajetória pode ser gerada no espaço de juntas ou no espaço cartesiano. A geração no espaço de juntas tende a ser de computação mais leve, já que nesse caso só é necessário se aplicar o modelo cinemático inverso aos pontos inicial e final da trajetória. No caso da utilização do espaço cartesiano, é necessário se calcular a posição do manipulador no espaço de juntas para cada ponto intermediário da trajetória.

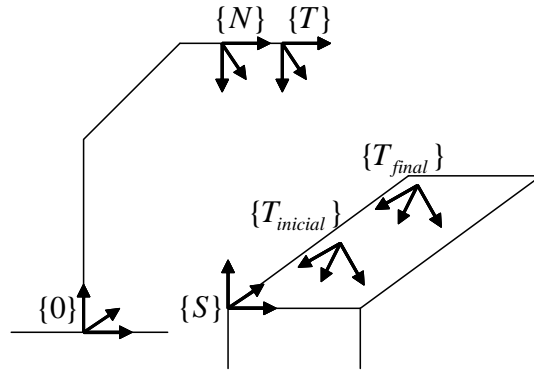


Figura A.3: Sistemas de coordenadas do manipulador ($\{0\}$ e $\{N\}$), da ferramenta ($\{T\}$), fixo ($\{S\}$) e posições inicial e final da ferramenta ($\{T_{inicial}\}$ e $\{T_{final}\}$).

A.2.1 Geração de trajetórias no espaço de juntas

A restrição de movimento suave leva a quatro restrições básicas para cada junta do manipulador:

$$\begin{aligned}
 \theta(0) &= \theta_0, \\
 \theta(t_f) &= \theta_f, \\
 \dot{\theta}(0) &= 0, \\
 \dot{\theta}(t_f) &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{A.20}$$

em que t_f é o tempo de duração do movimento, θ_0 é a posição inicial da junta e θ_f é a posição final.

Essas quatro restrições podem ser satisfeitas por um polinômio de no mínimo terceiro grau:

$$\begin{aligned}
 \theta(t) &= a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3, \\
 \dot{\theta}(t) &= a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2, \\
 \ddot{\theta}(t) &= 2a_2 + 6a_3.
 \end{aligned}
 \tag{A.21}$$

Esse tipo de interpolação é chamada de polinômios cúbicos [Craig, 1989].

Aplicando as restrições (A.20) a (A.21) tem-se:

$$\begin{aligned}
 \theta_0 &= a_0, \\
 \theta_f &= a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3, \\
 0 &= a_1, \\
 0 &= a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2.
 \end{aligned} \tag{A.22}$$

Resolvendo para a_i tem-se os coeficientes dos polinômios:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \theta_0, \\
 a_1 &= 0, \\
 a_2 &= \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0), \\
 a_3 &= -\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0),
 \end{aligned} \tag{A.23}$$

o que permite calcular a trajetória para uma junta dadas suas posições inicial e final.

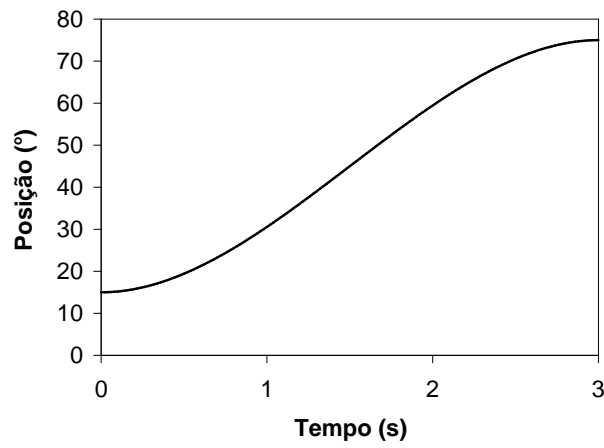
Para um robô de N juntas, é necessário calcular os coeficientes a_{in} para cada junta n . Para que os movimentos de todas as juntas terminem simultaneamente, basta considerar os tempos t_f iguais para cada uma.

Na Figura A.4 são mostradas, para um movimento com duração de 3 segundos, a posição, velocidade e aceleração de uma junta considerando $\theta_0 = 15^\circ$ e $\theta_f = 75^\circ$.

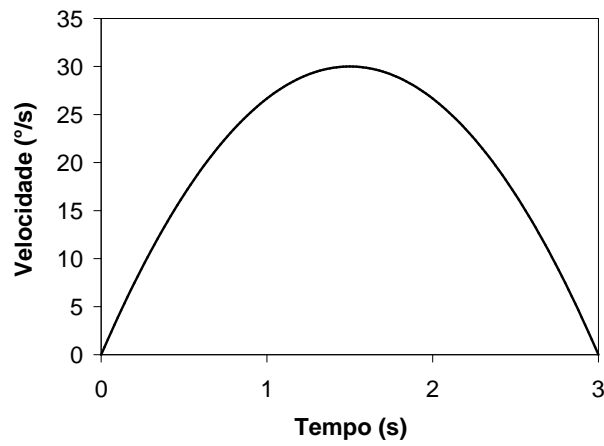
Outro modo comum de se gerar uma trajetória suave é considerar uma função linear com extremidades suaves (*parabolic blends*). Isso pode ser obtido por uma aceleração finita $\ddot{\theta}$ e constante durante um tempo t_b até que seja atingida uma velocidade máxima $\dot{\theta}_h$, que é mantida constante até a proximidade do ponto final ($t = t_f - t_b$). É então aplicada uma aceleração de mesmo módulo e sinal inverso da inicial até que seja atingido o ponto destino no tempo $t = t_f$ com velocidade $\dot{\theta}(t_f) = 0$.

A velocidade ao final do tempo de aceleração deve ser igual à velocidade na região suave. Assim:

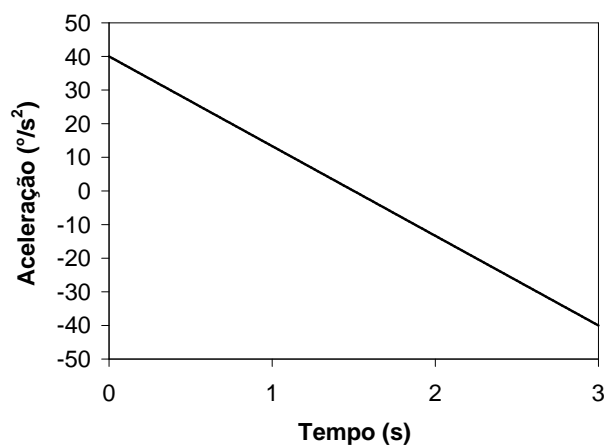
$$\ddot{\theta} t_b = \frac{\theta_h - \theta_b}{t_h - t_b}, \tag{A.24}$$



(a) Posição



(b) Velocidade



(c) Aceleração

Figura A.4: Geração de trajetória utilizando polinômio cúbico.

em que $t_h = t_f/2$ é o tempo na metade do movimento, $\theta_h = (\theta_f - \theta_0)/2$ é a posição na metade do movimento e θ_b é a posição ao final da região de aceleração, dada por

$$\theta_b = \theta_0 + \frac{1}{2}\ddot{\theta}t_b^2. \quad (\text{A.25})$$

Combinando (A.24) com (A.25) tem-se

$$\ddot{\theta}t_b^2 - \ddot{\theta}t_f t_b + (\theta_f - \theta_0) = 0. \quad (\text{A.26})$$

Assim, dados θ_0 , θ_f e t_f , podem ser escolhidos quaisquer $\ddot{\theta}$ e t_b que satisfaçam (A.26). Por exemplo, escolhendo uma aceleração $\ddot{\theta}$, t_b é dado por:

$$t_b = \frac{t_f}{2} - \frac{\sqrt{\ddot{\theta}^2 t_f^2 - 4\ddot{\theta}(\theta_f - \theta_0)}}{2\ddot{\theta}}. \quad (\text{A.27})$$

Para que a trajetória seja factível, é necessário que o sistema de acionamento de cada junta seja capaz de produzir uma aceleração tal que

$$\ddot{\theta} \geq \frac{4(\theta_f - \theta_0)}{t_f^2}. \quad (\text{A.28})$$

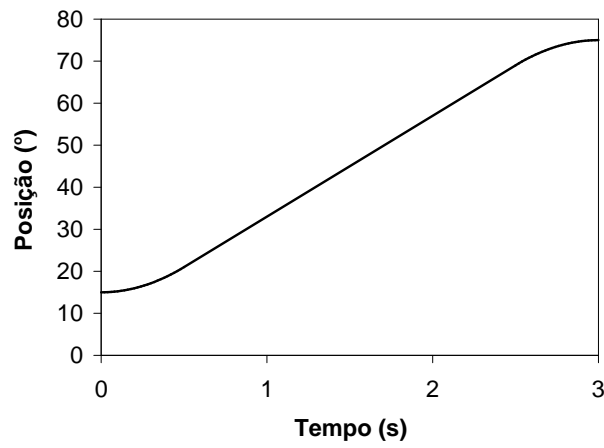
Caso contrário, não é possível percorrer a distância $\theta_f - \theta_0$ no tempo t_f .

Na Figura A.5 são mostradas, para um movimento de 3 segundos, a posição, velocidade e aceleração de uma junta considerando $\theta_0 = 15^\circ$, $\theta_f = 75^\circ$ e $\ddot{\theta} = 40^\circ/s^2$.

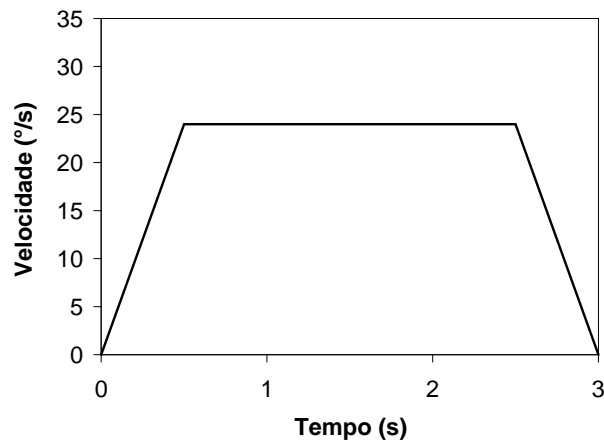
Outra situação comum é, ao invés de se especificar o tempo de movimento, especificar a velocidade máxima do mesmo. Assim, dadas a aceleração e velocidade máxima, tem-se:

$$t_b = \frac{\dot{\theta}_h}{\ddot{\theta}}, \quad (\text{A.29})$$

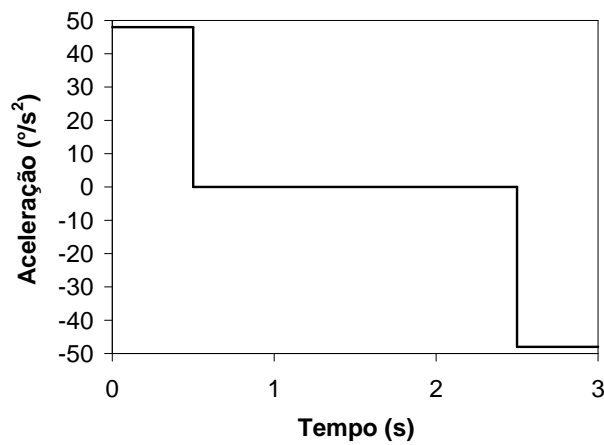
$$t_f = \frac{\ddot{\theta}t_b^2 + (\theta_f - \theta_0)}{\ddot{\theta}t_b}.$$



(a) Posição



(b) Velocidade



(c) Aceleração

Figura A.5: Geração de trajetória utilizando função linear com extremidades suaves.

A restrição para o valor mínimo da aceleração em função da velocidade máxima do movimento é

$$\ddot{\theta} \geq \frac{\dot{\theta}_h^2}{\theta_f - \theta_0}. \quad (\text{A.30})$$

Caso essa restrição não seja satisfeita, o tempo total do movimento é dado por:

$$t_f = 2 \sqrt{\frac{\theta_f - \theta_0}{\ddot{\theta}}}. \quad (\text{A.31})$$

A.2.2 Geração de trajetórias no espaço cartesiano

A geração de trajetória no espaço cartesiano é baseada no fato de que se o TCP da ferramenta percorrer vários pontos suficientemente próximos entre si e que estejam em uma mesma reta no espaço, a trajetória final se aproximará de uma reta.

Na soldagem, geralmente deseja-se que a velocidade de deslocamento da ferramenta permaneça constante durante a realização do cordão. Dessa forma, é conveniente considerar uma função linear com extremidades suaves. Considerando-se que as velocidades de soldagem são baixas em relação à aceleração obtida em robôs industriais, pode-se considerar que a velocidade permanece constante durante toda a trajetória, já que os tempos de aceleração e desaceleração (t_b) são mínimos.

Durante um movimento linear da ferramenta entre dois pontos, as coordenadas x , y e z são interpoladas entre os respectivos valores inicial e final, obedecendo as restrições de velocidade e aceleração. Porém, se a orientação da ferramenta for especificada por uma matriz rotação, não é possível interpolar os elementos da matriz ao longo do movimento, pois as matrizes resultantes não seriam ortonormais. A solução é, então, utilizar a representação da orientação como a rotação sobre três ângulos, como mostrado na seção A.1.2. Dessa forma, é possível se interpolar a rotação do TCP pela variação desses três ângulos e calcular a matriz rotação correspondente para cada conjunto de ângulos. O resultado é, então, um movimento linear do TCP com a reorientação suave da ferramenta durante o movimento. O símbolo χ será utilizado para representar o vetor de 6 variáveis a ser interpolado ao longo do movimento.

Considerando $\{A\}$ o sistema de coordenadas do TCP em algum ponto do movimento e $\{S\}$ o sistema de coordenadas fixo, o vetor χ é dado por:

$${}^S\chi_A = \begin{bmatrix} {}^SP_{AORG} \\ {}^SK_A \end{bmatrix}, \quad (\text{A.32})$$

em que SK_A é o vetor composto pelos valores dos ângulos de rotação equivalentes à matriz ${}^S_A R$.

Para que o movimento do TCP se aproxime o máximo possível de um movimento linear, outra restrição deve ser considerada: além de o tempo total de interpolação t_f de todas as variáveis de ${}^S\chi_A$ ser o mesmo, é necessário também que os tempos de aceleração t_b sejam iguais. Assim, é possível que os valores das acelerações sejam diferentes. Dessa forma, t_b deve ser calculado de forma a não exceder aceleração e velocidades máximas de cada grau de liberdade do manipulador.

A.2.3 Realização da trajetória

Em tempo de execução, o gerador de trajetórias deve calcular os valores de θ , $\dot{\theta}$ e $\ddot{\theta}$ e alimentar o sistema de controle do manipulador (Figura A.6).

Para o espaço de juntas, caso seja considerada a interpolação por polinômios cúbicos, o gerador de trajetórias deve apenas calcular as equações (A.21) para cada tempo t . No caso da interpolação linear, os valores devem ser calculados com base na região do movimento correspondente ao tempo t :

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_0 + \frac{1}{2}\ddot{\theta}t^2, & \text{se } t \leq t_b; \\ \theta_b + \dot{\theta}_h(t - t_b), & \text{se } t_b < t < (t_f - t_b); \\ \theta_f - \frac{1}{2}\ddot{\theta}(t_f - t)^2, & \text{se } (t_f - t_b) \leq t. \end{cases} \quad (\text{A.33})$$

Quando considerada a interpolação linear no espaço cartesiano, as equações (A.33)

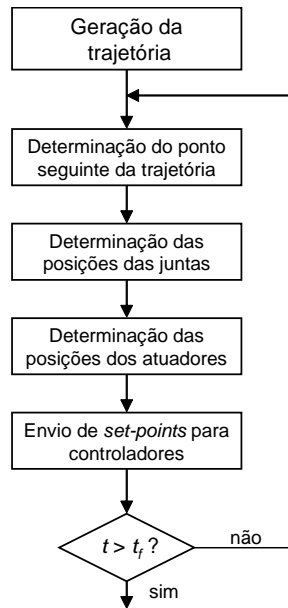


Figura A.6: Fluxograma do controlador para realização de trajetórias.

são aplicadas a cada uma das coordenadas do vetor ${}^S\chi_A$ e o modelo cinemático inverso é aplicado de forma a se obter o valor de cada junta no instante de tempo t .

Apêndice B. Controle de Processos

O objetivo de um sistema de controle é fazer com que a variável controlada atinja o valor ou o estado determinado pelo usuário por intermédio de uma referência [Rosário, 2005]. Para tanto, é necessário que o controlador atue no sistema de modo a modificar essa variável. Os dispositivos que atuam sobre o sistema são chamados de atuadores. As medições da variável controlada e de outros estados do sistema são realizadas por meio de sensores.

B.1 Sistemas de controle em malha aberta

Nos sistemas de controle em malha aberta (Figura B.1), o controlador atua sobre o sistema sem que haja uma medição de seus estados, ou seja, a ação de controle é independente da saída. Nesses casos, é necessária a existência de um modelo do sistema de modo a permitir ao controlador calcular a ação de controle para que a saída acompanhe o valor da referência. O controlador implementa, portanto, a função inversa do modelo do sistema. Quanto mais fiel o modelo, mais eficiente será o controlador.

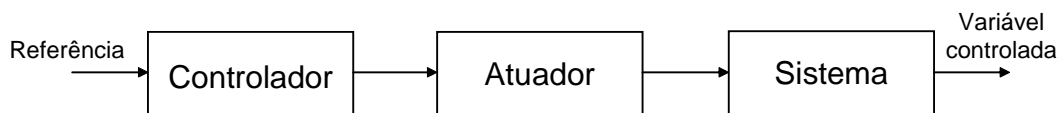


Figura B.1: Controle em malha aberta.

Caso o sistema controlado esteja sujeito a perturbações, o modelo deve também prever sua resposta a essas perturbações, e o controlador deve ser capaz de medi-las, de modo a atuar no sistema para compensar seus efeitos.

A metodologia utilizada por [Oliveira, 2000] para controle do comprimento do arco elétrico na soldagem com eletrodo revestido implementa um controle em malha aberta. Isso a torna muito sensível à fidelidade do modelo, pois qualquer erro do modelo ou variação na composição do eletrodo e revestimento causa uma diferença entre a velocidade de mergulho

e a taxa de fusão, causando um aumento ou diminuição do arco, já que não há uma medição do seu comprimento durante a solda.

B.2 Sistemas de controle em malha fechada

Um sistema de controle em malha fechada é aquele no qual existe uma realimentação da saída proveniente de um sensor que mede a variável controlada [Rosário, 2005]. O controlador compara valor medido com a referência, obtendo um sinal de erro, e, por meio do atuador, atua no sistema de modo a minimizar esse erro (Figura B.2).

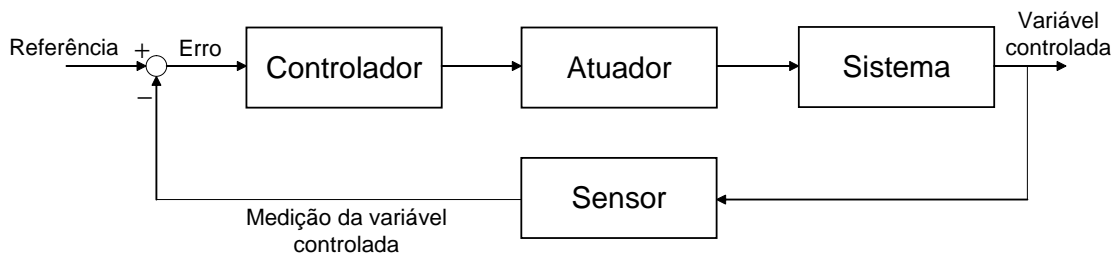


Figura B.2: Controle em malha fechada.

Esse tipo de sistema de controle apresenta respostas mais precisas, já que é capaz de atuar no sistema sempre que sua resposta diferir do valor de referência, sendo mais robusto a perturbações. Além disso, não existe a necessidade de se conhecer o modelo preciso do sistema.

O projeto de um controlador envolve critérios como: rejeição a perturbações, minimização de erros de regime permanente, resposta transiente, diminuição da sensibilidade do sistema a mudanças de parâmetros e, principalmente, a estabilidade do sistema [Phillips and Nagle, 1995].

Um controlador largamente utilizado é o controlador PID [Homkes, 2002]. Esse tipo de controlador possui três ações de controle com o objetivo de diminuir o erro. A primeira é a ação de controle proporcional (P). Quanto maior o erro, maior a ação de controle. A ação integral (I) produz uma ação de controle proporcional à integral do erro ao longo do

tempo. Dessa forma, mesmo se o sistema atingir erro zero, o controlador é capaz de continuar atuando sobre o mesmo de forma a mantê-lo no estado desejado. Finalmente, a ação de controle derivativa (D) é proporcional à variação do erro, ou seja, quanto mais rapidamente o erro aumentar, maior a ação de controle. A ação de controle do controlador PID é a soma das ações P, I e D:

$$C(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (\text{B.1})$$

em que K_P , K_I e K_D são, respectivamente, as constantes proporcional, integral e derivativa. O projeto do controlador envolve, portanto, a sintonia dessas constantes de forma a obter a melhor resposta para o sistema, atendendo aos critérios estabelecidos.

Apêndice C. Listagem do Programa

A seguir é apresentada a listagem completa do programa implementado em KRL para a soldagem robotizada com eletrodo revestido.

```
DEF SMAW( )
;Autor: Eduardo Jose Lima II

EXTFCT REAL calcdist(FRAME:IN,FRAME:IN)
DECL FRAME Ponto1
DECL FRAME Ponto2
DECL FRAME PontoAnt
DECL FRAME PontoProx
DECL FRAME Passo
DECL FRAME Ferr
DECL FRAME VarFerr
DECL FRAME dFerr
real CompFerr
real vlin
real vtcp
real GastoEletrodo
real disttcp
int pt
real tpasso
real compcordao
int numpts
real resistividade
real resistencia
real AreaElet
real Temperatura
bool TestarCaminho
bool ArcoAberto
real Tempo

;INICIALIZACOES DE VARIAVEIS
GastoEletrodoInicial=0
PIDKP=40
PIDKI=0.20
Corrente=175
Tensao=21
DiaElet=4
AreaElet=3.1415*DiaElet*DiaElet/4
TestarCaminho=FALSE
```

```
;FOLD Apagar os dados anteriores
for pt=1 to 1000
  HIST[pt]=C 0.0,AI1 0.0,AI2 0.0,AI3 0.0,AI4 0.0,T 0
endfor
;ENDFOLD

PTP HOME Vel= 100 %

$advance=1
$VEL.CP=0.1
$BASE = $WORLD

$TOOL=TOOL_DATA[11]
$ACT.TOOL=11

PTP P3 Vel= 15 % PDAT2 Tool[11] Base[0]

if TestarCaminho then
  LIN P1 Vel= 0.2 m/s CPDAT1 Tool[11] Base[0]
  LIN P2 Vel= 0.2 m/s CPDAT2 Tool[11] Base[0]
  LIN P3 Vel= 0.5 m/s CPDAT2 Tool[11] Base[0]
endif

Ponto1=XP1
Ponto2=XP2

;Velocidade de soldagem em m/s
vlin=0.0025
;Tempo de passo, em segundos
tpasso=0.072

compcordao=calcdist(Ponto2,Ponto1)
numpts=(compcordao/(vlin*1000))/tpasso
if numpts>1000 then
  halt
endif

;FOLD Definicao do vetor passo (Passo=(Ponto2-Ponto1)/numpts)
Passo.X=(Ponto2.X-Ponto1.X)/numpts
Passo.Y=(Ponto2.Y-Ponto1.Y)/numpts
Passo.Z=(Ponto2.Z-Ponto1.Z)/numpts
Passo.A=(Ponto2.A-Ponto1.A)/numpts
Passo.B=(Ponto2.B-Ponto1.B)/numpts
Passo.C=(Ponto2.C-Ponto1.C)/numpts
;ENDFOLD
```

```
;FOLD Calculo do comprimento do eletrodo
CompFerr=calcdist(TOOL_DATA[12],TOOL_DATA[11])
;ENDFOLD

;FOLD Calculo do vetor unitario variacao da ferramenta
(VarFerr=(TOOL_DATA[12]-TOOL_DATA[11])/CompFerr)
VarFerr.X=(TOOL_DATA[12].X-TOOL_DATA[11].X)/CompFerr
VarFerr.Y=(TOOL_DATA[12].Y-TOOL_DATA[11].Y)/CompFerr
VarFerr.Z=(TOOL_DATA[12].Z-TOOL_DATA[11].Z)/CompFerr
VarFerr.A=(TOOL_DATA[12].A-TOOL_DATA[11].A)/CompFerr
VarFerr.B=(TOOL_DATA[12].B-TOOL_DATA[11].B)/CompFerr
VarFerr.C=(TOOL_DATA[12].C-TOOL_DATA[11].C)/CompFerr
;ENDFOLD

Ferr=TOOL_DATA[11]
$TOOL=Ferr

LIN Ponto1
PontoAnt=Ponto1

REPEAT
  arcoaberto = ($ANIN[1]>0.1) and ($ANIN[1]<0.6)
UNTIL arcoaberto == TRUE

$TIMER_STOP[6]=FALSE
$TIMER[6]=0
mergulho=0
Integ=-4/PIDKI

for pt=2 to numpts
  continue
  GastoEletrodo=mergulho
  if ((GastoEletrodo+GastoEletrodoInicial)>CompFerr) then
    EXIT
  endif

  ;Gravacao de dados no arquivo de dados
  HIST[pt].C=GastoEletrodo
  continue
  HIST[pt].AI1=$ANIN[1]
  continue
  HIST[pt].AI2=$ANIN[2]
  continue
  HIST[pt].T=$TIMER[6]
```

```
;Modelo da temperatura
continue
Tempo=$TIMER[6]/1000.0
Temperatura=27.36+3.8655*Tempo+0.0384*Tempo*Tempo

;Resistividade em funcao da temperatura
resistividade=1.22003E-7+4.45433E-10*Temperatura
+9.2253E-13*Temperatura*Temperatura
resistencia=resistividade*(CompTotalElet-GastoEletrodo)/AreaElet

;Definição do set-point de tensao
SPTensao=Tensao+resistencia*corrente
if SPTensao<=12 then
    SPTensao=12
endif

;FOLD Calculo do novo ponto (PontoProx=PontoAnt+Passo)
PontoProx.X=PontoAnt.X+Passo.X
PontoProx.Y=PontoAnt.Y+Passo.Y
PontoProx.Z=PontoAnt.Z+Passo.Z
PontoProx.A=PontoAnt.A+Passo.A
PontoProx.B=PontoAnt.B+Passo.B
PontoProx.C=PontoAnt.C+Passo.C
;ENDFOLD

;FOLD Calculo da nova ferramenta (Ferr=TOOL_DATA[11]+VarFerr*GastoEletrodo)
Ferr.X=TOOL_DATA[11].X+VarFerr.X * GastoEletrodo
Ferr.Y=TOOL_DATA[11].Y+VarFerr.Y * GastoEletrodo
Ferr.Z=TOOL_DATA[11].Z+VarFerr.Z * GastoEletrodo
Ferr.A=TOOL_DATA[11].A+VarFerr.A * GastoEletrodo
Ferr.B=TOOL_DATA[11].B+VarFerr.B * GastoEletrodo
Ferr.C=TOOL_DATA[11].C+VarFerr.C * GastoEletrodo
;ENDFOLD

;FOLD Calculo da variacao da ferramenta
(dFerr=VarFerr*(GastoEletrodo-HIST[pt-1].C))
dFerr.X=VarFerr.X*(GastoEletrodo-HIST[pt-1].C)
dFerr.Y=VarFerr.Y*(GastoEletrodo-HIST[pt-1].C)
dFerr.Z=VarFerr.Z*(GastoEletrodo-HIST[pt-1].C)
;ENDFOLD

disttcp=calcdist(PontoAnt:dFerr, PontoProx)
$TOOL=Ferr
vtcp=disttcp/1000/tpasso
$VEL.CP=vtcp
LIN PontoProx C_VEL
PontoAnt=PontoProx
endfor
```

```
$VEL.CP=0.2
LIN_REL FRAME: Z 30
GastoEletrodoInicial=GastoEletrodoInicial+GastoEletrodo

PTP P4 Vel= 15 % PDAT1 Tool[11] Base[0]

PTP HOME Vel= 15 % DEFAULT

END
```

O arquivo de dados é associado ao programa principal e armazena os dados após a execução do programa:

```
DEFDAT SMAW( )

STRUC HISTORICO REAL C,AI1,AI2,INT T
DECL HISTORICO HIST[1000]
HIST[1]=C 0.0,AI1 0.0,AI2 0.0,T 0
HIST[2]=C 0.0,AI1 0.0,AI2 0.0,T 0
...
HIST[1000]=C 0.0,AI1 0.0,AI2 0.0,T 0

DECL REAL GastoEletrodoInicial=0.0
DECL REAL Corrente=175.0
DECL REAL Tensao=21.0
DECL REAL DiaElet=4.0
DECL REAL CompTotalElet=300.0

ENDDAT
```

O programa *submit* implementa o controlador PI e é executado paralelamente ao programa principal:

```
DEF SUBMIT_SMAW( )
;Autor: Eduardo Jose Lima II

real erro
int deltaT
PIDKP=0
PIDKI=0
Integ=0
mergulho=0
SPtensao=0

$TIMER.STOP[5]=FALSE
$TIMER[5]=0

LOOP
  WAIT FOR ($TIMER[5]>=12)
  deltaT=$TIMER[5]
  $TIMER[5]=0
  erro=(SPtensao-$ANIN[1]*100.0)
  Integ=Integ+erro*deltaT/1000.0
  mergulho=mergulho-((PIDKP*erro)+(PIDKI*Integ))*deltaT/1000.0
ENDLOOP

END
```

Índice Remissivo

- Arc Voltage Control, 9
- Atuadores, 77, 94
- Cinemática, 77
- Cinemática direta, 77
- Cinemática inversa, 78
- Comprimento do arco elétrico, 5
- Controlador PID, 37, 95
- Controlador Robótico, 77
- Controle de processos, 94
- Controle em malha aberta, 94
- Controle em malha fechada, 95
- Denavit-Hartenberg, 83
- Descrições, 79
- Efeito Joule, 10
- End-effector, 77
- Frente de fusão, 11
- Geração de trajetórias, 85
- KRL, 40
- Manipulador, 77
- Matriz rotação, 79
- Matriz transformação homogênea, 80
- Porta-eletrodo, 23
- Repetibilidade, 8, 20
- Revestimento, 4
- Robô industrial, 18, 77
- Sensores, 94
- Sistemas de coordenadas, 79
- SMAW, 4
- Soldagem por gravidade, 8
- Soldagem robotizada, 18
- Soldagem subaquática, 6
- Stick-out, 19
- Taxa de fusão, 11
- TCP, 78
- Teach pendant, 48
- Termopares, 64
- Trepanação de dutos, 7

Referências Bibliográficas

- [Batana, 1998] Batana, J. R. (1998). *Modelamento da Taxa de Fusão Através da Monitoração da Temperatura do Eletrodo Revestido para Soldagem Robotizada*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.
- [Batana and Bracarense, 1998] Batana, J. R. and Bracarense, A. Q. (1998). Monitoração e controle do processo de soldagem com eletrodo revestido visando a robotização. In *XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*. ABS.
- [Bracarense, 1994] Bracarense, A. Q. (1994). *Shielded Metal Arc Welding Electrode Heating Control By Flux Ingredients Substitution*. PhD Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- [Bracarense et al., 2002] Bracarense, A. Q., Bastos Filho, T. F., Felizardo, I., and Rogana, W. G. (2002). *Robótica Industrial - Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos*, chapter 8 - Soldagem Robotizada, p.139-155. Ed. Edgard Blücher.
- [Cotton, 1977] Cotton, H. C. (1977). *Why underwater welding? In Underwater Welding for Offshore Installations*, pages p.3–7. The Welding Institute.
- [Craig, 1989] Craig, J. J. (1989). *Introduction to Robotics Mechanics and Control*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 2nd edition.
- [Dantas et al., 2005] Dantas, C. M., Lima II, E. J., and Bracarense, A. Q. (2005). Development of an instrumented gripper for robotic shielded metal arc welding. In *Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering*.
- [Felizardo, 2003] Felizardo, I. (2003). *Estudo Experimental e Numérico do Aquecimento de Eletrodos Revestidos Durante a Soldagem*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

- [Goldman, 1985] Goldman, R. (1985). *Design of an Interactive Manipulator Programming Environment*. UMI Research Press, Ann Arbor, Mich.
- [Haug and Pritschow, 1998] Haug, K. and Pritschow, G. (1998). Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam-tracking in the shipbuilding industry. In *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 98)*.
- [Homkes, 2002] Homkes, R. (2002). *The Mechatronics Handbook*, chapter 3 - System Interfacing, Instrumentation, and Control Systems. CRC Press.
- [ISO 10218, 1992] ISO 10218 (1992). *Manipulating industrial robots - Safety*.
- [Juers, 1993] Juers, R. H. (1993). *Naval Surface Warfare Center. Welding Brazing and Soldering*, ASM Handbook.
- [Kang, 1996] Kang, D. (1996). *Development of an arc voltage control mechanism for underwater wet SMAW process*. Msc. thesis, Ohio State University.
- [KEMPPI, 2002] KEMPPI (2002). *Manual de Instruções MasterTig*.
- [Kim et al., 1996] Kim, I. S., Kwon, W. H., and Siores, E. (1996). An investigation of a mathematical model for predicting weld bead geometry. *Canadian Metallurgical Quarterly*.
- [KUKA Roboter GmbH, 2003] KUKA Roboter GmbH (2003). *KUKA System Software (KSS) Expert Programming*.
- [Lima II et al., 2005] Lima II, E. J., Castro, C. A. C., Bracarense, A. Q., and Campos, M. F. M. (2005). Determinação da relação entre parâmetros de soldagem, largura da poça e aspectos do cordão de solda utilizando câmera de alta velocidade. *Revista Soldagem e Inspeção*, 10(4).
- [Marques, 1991] Marques, P. V. (1991). *Tecnologia da Soldagem*. Fundação Christiano Ottoni - FCO, Belo Horizonte - MG.

- [Marques et al., 2005] Marques, P. V., Modenesi, P. J., and Bracarense, A. Q. (2005). *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia*. UFMG, Belo Horizonte - MG.
- [Mazzaferro, 1998] Mazzaferro, J. A. E. (1998). *Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem Subaquática com Eletrodos Revestidos*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [Metals Handbook, 1978] Metals Handbook (1978). *Properties and Selection: Irons and Steels*, volume 1. ASM International, Materials Park, Ohio.
- [Oliveira, 2000] Oliveira, H. B. (2000). *Estudo e Implementação de um Sistema para Monitoração e Controle na Soldagem Robotizada com Eletrodo Revestido*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.
- [Pessoa, 2003] Pessoa, E. C. P. (2003). *Estudo Comparativo do Desempenho de Eletrodos Comerciais E6013, E7018 e E7024 em Ambiente Molhado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.
- [Pessoa et al., 2003] Pessoa, E. C. P., Bracarense, A. Q., Liu, S., and Guerrero, F. P. (2003). Estudo comparativo do desempenho de eletrodos revestidos E6013, E7024 e E7018 em soldagem subaquática em água doce do aço A36 à profundidades de 50 e 100 metros. In *Anais do 2º COBEF*, Uberlândia - MG. ABCM.
- [Phillips and Nagle, 1995] Phillips, C. L. and Nagle, H. T. (1995). *Digital Control Systems Analysis and Design*. Prentice-Hall.
- [Quinn et al., 1997] Quinn, T. P., Bracarense, A. Q., and Liu, S. (1997). A melting rate temperature distribution model for shielded metal arc welding electrodes. *Welding Journal*, 76(12):p.532s-538s.
- [Rivin, 1988] Rivin, E. (1988). *Mechanical Design of Robots*. McGraw-Hill Inc., New York, 1st edition.

- [Rosário, 2005] Rosário, J. M. (2005). *Princípios de Mecatrônica*. Pearson Prentice Hall, São Paulo.
- [Rowe and Liu, 2001] Rowe, M. D. and Liu, S. (2001). Recent development in underwater wet welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 6(6):p.387–396.
- [Stern, 1948] Stern, I. L. (1948). Overheating of electrodes. *The Welding Journal*, 27(7):p.522–526.
- [ter Berg and Larigaldie, 1952] ter Berg, J. and Larigaldie, A. (1952). Melting rate of coated electrodes. *Welding Journal*, 32(5):p.268–271.
- [Trucco and Verri, 1998] Trucco, E. and Verri, A. (1998). *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [Waszink and Piena, 1985] Waszink, J. H. and Piena, M. J. (1985). Thermal process in covered electrode. *Welding Journal*, 64(2):p.37s–48s.
- [Welding Handbook, 1991] Welding Handbook (1991). *Welding Processes*, volume 2. AWS: American Welding Society, eighth edition.
- [Welding Handbook, 1996] Welding Handbook (1996). *Material and Applications*, volume 3. AWS: American Welding Society, eighth edition.
- [Wernicke and Pohl, 1998] Wernicke, R. and Pohl, R. (1998). Underwater wet repair-welding and strength testing on pipe-patch joints. In *Proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*.
- [Wilson et al., 1956] Wilson, J. L., Claussen, G. E., and Jackson, C. E. (1956). Effect of I^2R heating on electrode melt rate. *Welding Journal*, 35(1):p.1–8.
- [Wu et al., 1996] Wu, J., Smith, J. S., and Lucas, J. (1996). Weld bead placement system for multipass welding. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 143(2):85–90.