

CAPÍTULO 8

SOLDAGEM ROBOTIZADA

Alexandre Queiroz Bracarense Teodiano Freire Bastos Filho,
Ivanilza Felizardo, Wagner Gomes Rogana

8.1 - DEFINIÇÃO

Soldagem automática é definida como sendo a aplicação de componentes mecanizados/eletrônicos para a execução de funções básicas de um procedimento de soldagem, exigindo-se não apenas componentes não-inteligentes para a movimentação do arco elétrico da solda sob a peça de trabalho (ou da peça sob o arco), mas também fixadores para prender os materiais, manipulando tanto o movimento da peça de trabalho, quanto o movimento do arco elétrico. Além disto, considera-se também sensores para monitorar parâmetros de soldagem e a partir deles, controlar o processo. De um modo geral, soldagem automática ainda não está disponível para utilização.

Soldagem robotizada é uma forma específica de soldagem automática a qual 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*”.

8.2 – PROCESSOS DE SOLDAGEM ROBOTIZADOS

O primeiro processo de soldagem a ser robotizado foi a soldagem por resistência elétrica por pontos (Resistance Spot Welding - RSW), surgida na década de 70. A robotização deste processo, introduzido inicialmente na indústria automobilística, mudou 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 em soldagem robotizada. Os processos de soldagem e corte que possuem interface com os robôs industriais 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*);
- 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 à plasma;
- Resistance Spot Welding – RSW ou soldagem por resistência elétrica por pontos.

8.3 – SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO ROBOTIZADA

8.3.1 - Soldagem com Eletrodo Sólido Contínuo sob Proteção Gasosa (GMAW)

Neste processo, o arco elétrico aquece a peça e o eletrodo (arame) cujo fornecimento é contínuo, fundindo-os e formando o metal de solda. Simultaneamente a tocha de soldagem é deslocada sobre a junta, conforme mostrado esquematicamente na figura 8.1. O equipamento requerido para o processo, mostrado na figura 8.2, inclui uma fonte de energia de soldagem de tensão constante, um alimentador de arame interconectado a uma fonte para controle de velocidade de arame, uma tocha de soldagem, um sistema de fornecimento de gás de proteção, que pode ser uma rede de gás ou um cilindro com reguladores de vazão deste gás.

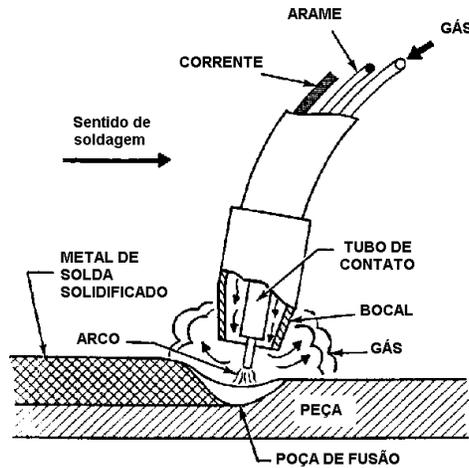


Figura 8.1 – Princípio de funcionamento do processo GMAW

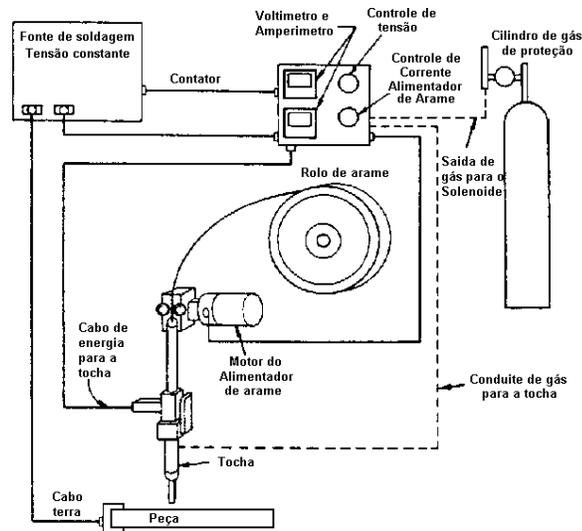


Figura 8.2 – Componentes do equipamento necessário para o processo de soldagem GMAW

Tanto o arco quanto o metal de solda fundido são protegidos por uma atmosfera de gases (gás ativo (CO₂) ou gás inerte (argônio ou hélio), ou misturas de gases ativo e inerte) através da tocha de soldagem. Misturas de gás argônio (inerte) e CO₂ (ativo) são freqüentemente utilizadas. As misturas podem variar desde 98% de argônio e 2% de CO₂, até 75% de argônio e 25% de CO₂. Em algumas aplicações, adiciona-se pequenas quantidades de oxigênio (O₂) ao argônio ou à mistura argônio/CO₂.

O processo foi inicialmente utilizado na soldagem de alumínio, mas é atualmente muito utilizado na soldagem dos metais comerciais, incluindo o aço carbono e suas ligas, aço inoxidável, e metais não ferrosos como o cobre. Aprimoramentos realizados nos últimos anos permitiram reduzir significativamente os respingos e melhorar a aparência do cordão de solda, tornando o processo um dos mais utilizados na indústria.

Algumas vantagens do processo são:

- Solda uma grande variedade de metais comerciais e ligas metálicas;
- Solda em todas as posições, com uma apropriada escolha do modo de transferência metálica;
- Trabalha com altas taxas de deposição (kg de metal depositado por hora) e não requer interrupções durante a soldagem (alto ciclo de trabalho - tempo de soldagem dividido pelo tempo total de fabricação), devido à continuidade do eletrodo;
- Praticamente não há escória no cordão, minimizando ou mesmo dispensando a limpeza pós-soldagem;
- Pode-se trabalhar dentro de uma grande faixa de corrente, o que torna o processo flexível e versátil também para soldagem de chapas finas, chapas chanfradas e soldagem em juntas com abertura de raiz;
- Os índices de fumo devido à soldagem são relativamente baixos.

Algumas limitações do processo são:

- equipamento é mais complexo e de custo mais elevado, se comparado com outros processos de soldagem a arco. O cilindro de gás torna o equipamento menos portátil e de difícil locomoção;
- Há a necessidade de proteção contra vento (grande sensibilidade a correntes de ar);
- A realização de soldas em juntas estreitas normalmente é comprometida devido ao tamanho da tocha.

8.3.2. Componentes de um Sistema para Soldagem a Arco Robotizada

Um robô industrial consiste de um conjunto de elos conectados e articulados, sendo o primeiro elo vinculado geralmente a uma base fixa, e o último elo, denominado extremidade terminal, é aquele onde a *ferramenta tocha de soldagem* é fixada. Deste modo, o deslocamento da tocha passa a ser controlado segundo a movimentação especificada pela programação do robô.

Existem quatro principais tipos de configurações básicas de robôs industriais que são mais utilizados em operações de soldagem, conforme mostrado na figura 8.3. Os robôs na configuração do tipo retangular ou cartesiana movem a tocha dentro de um volume na forma

retangular, nas direções "x", "y" e "z", sendo os mais empregados em processos de soldagem para a produção de cordões de solda lineares.

O tipo cilíndrico é similar ao retangular, pois utiliza movimentos de deslizamento em duas direções (vertical (z) e extensão (x)), porém tem uma junta de rotação, a qual estabelece o espaço de trabalho como um cilindro (círculo no plano da base e um retângulo na elevação). O tipo esférico ou polar possui um eixo deslizante e dois eixos rotativos. O espaço de trabalho é uma esfera.

Finalmente, o robô do tipo articulado, cujos movimentos são todos de rotação, apresenta um espaço de trabalho mais complexo e irregular, tornando-o adequado para qualquer tipo de soldagem (lineares ou fora de posição). Devido a esta grande mobilidade, este é o mais utilizado atualmente.

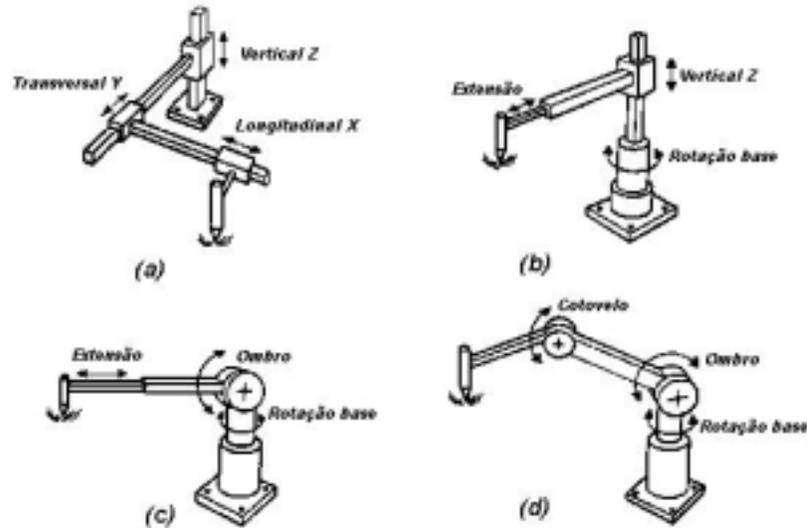


Figura 8.3 - Configurações básicas de robôs industriais mais empregadas em soldagem. (a) retangular ou cartesiano; (b) cilíndrico; (c) esférico ou polar e (d) articulado.

Um fator que pode ser determinante na escolha de um robô, é o seu sistema de integração "robô/fonte de energia" (interface com diferentes sistemas). Muitas empresas preferem adquirir soluções de baixo custo através de soluções dedicadas (sistemas específicos). Entretanto, elas esquecem que a robotização de processos industriais envolve diferentes soluções integradas entre si, necessitando de flexibilidade. Exemplificando, a aquisição de um robô integrado por uma fonte de energia de soldagem de apenas um fabricante, pode significar no futuro, uma limitação, pois impossibilita a utilização de uma fonte de energia de outro fabricante, de características diferentes. Ou seja, a soldagem robotizada fica atrelada a uma aplicação específica cuja modificação, implica na aquisição de uma nova fonte de energia e de um novo robô.

As empresas fabricantes de robôs industriais têm estudado formas cada vez mais baratas de fazer esta flexibilização e têm atendido satisfatoriamente o mercado sem onerar demasiadamente os custos do sistema. A expectativa é que em breve exista uma interface "universal" que flexibilizará mudanças nos processos de soldagem, como a troca de uma fonte de energia padrão de tensão constante para uma fonte de energia pulsada. A tabela 8.1 apresenta os componentes básicos de um sistema de soldagem robotizada ou célula robótica para soldagem. A figura 8.4 apresenta uma célula robótica com configuração básica para soldagem.

Tabela 8.1 - Componentes básicos de um sistema para soldagem robotizada

COMPONENTES BÁSICOS	CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES
Robô	Graus de liberdade, envelope de trabalho (faixa), destreza (precisão), fonte de energia, repetibilidade, velocidade, capacidade de carga, tipo de acionadores.
Controle computacional do robô	Técnica de programação, sistema “feedback” de controle, tamanho da memória e do arquivo de backup, armazenamento do programa, interfaces, softwares especiais de soldagem.
Fonte de energia para soldagem	Ciclo de trabalho (usualmente 100% é desejável), interface com o controle do robô, precisão (corrige pequenas flutuações da tensão do arco) e habilidade de constantemente iniciar o arco elétrico.
Equipamentos e acessórios para soldagem a arco	Tipo de alimentador do arame (2 ou 4 roletes, por exemplo), tipo de controle, interface com o controle do robô, tocha de soldagem (capacidade, precisão, dimensões), cabos (comprimento e montagem), ferramentas para alinhamento, estação de limpeza do bocal da tocha, estação do operador e equipamento de segurança.

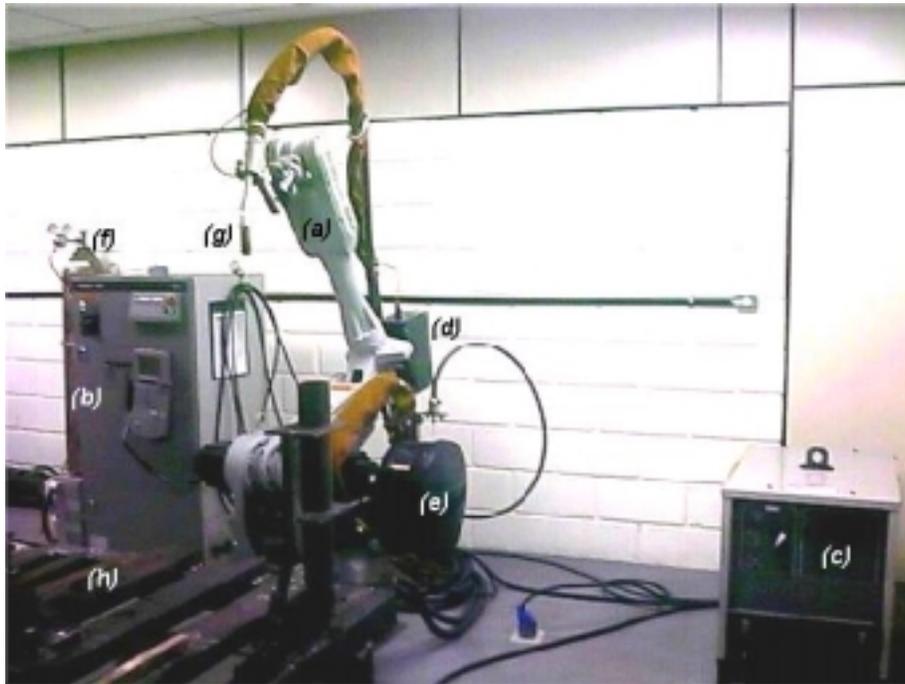


Figura 8.4 – Célula robótica para soldagem – configuração básica. (a) robô; (b) controle; (c) fonte de soldagem; (d) alimentador de arame; (e) rolo de arame; (f) cilindro de gás; (g) tocha de soldagem e (h) mesa de soldagem

8.4 – CONSIDERAÇÕES QUANTO À PROGRAMAÇÃO DO ROBÔ PARA SOLDAGEM

Quando se faz uma solda, deseja-se sempre fazer uma solda perfeita. Em qualquer método de aplicação, exceto na soldagem manual, algum tipo de controle ou mecanismo normalmente é requerido. Este controle é necessário para rodar o programa que controla os parâmetros de soldagem para depositar a solda. Em soldagem manual o controle é realizado pelo soldador. Em processos semi-mecanizados um controle no sistema de alimentação de arame inicia a alimentação, permite a passagem de corrente e libera o gás de proteção, quando o soldador aciona o gatilho da tocha. Em soldagem robotizada entretanto, este procedimento requer um sistema mais complexo e funções adicionais de controle, incluindo movimento da tocha e até movimento do sistema de fixação das partes a serem soldadas.

Quanto maior a complexidade necessária, tal como oscilação da tocha, controle de corrente (monitoração de parâmetros), etc. mais complexo é o sistema de controle. Atualmente, a maioria dos robôs industriais vêm com modernos sistemas de controle que lhes confere uma grande capacidade de produção de soldas com qualidade.

8.4.1 - Definições Básicas

Alguns termos e controles básicos utilizados atualmente em soldagem robotizada são:

- Tempo de pré-fluxo: Tempo entre liberar o gás e abrir o arco elétrico – *Preflow time (prepurge)* – Durante este intervalo de tempo, o gás de proteção flui da tocha e gera uma nuvem que afasta o ar da região de abertura do arco. A utilização deste pré-fluxo, ajuda a prevenir problemas no início do cordão de solda. Em alguns sistemas, durante este intervalo de tempo, a circulação de água para refrigeração da tocha é aberta;
- Tempo, corrente e tensão de abertura: Intervalo de tempo – *start time* - antes da soldagem onde a corrente - *start current* - e a tensão - *start voltage* - são ajustadas acima ou abaixo da corrente e da tensão de soldagem para abertura do arco – Esta regulagem ajuda a abrir o arco no início do cordão, onde as peças estão frias. Este procedimento também ajuda a prevenir problemas no cordão e promove uma deposição homogênea em toda a extensão da junta. Neste intervalo inicia-se a alimentação de arame;
- Tempo de subida de corrente: Tempo entre a aplicação da corrente de abertura do arco e a corrente de soldagem – *upslope time* – Durante este tempo a corrente aumenta ou diminui para a corrente de soldagem. Em alguns casos (chapas finas) aplicam-se pulsos de corrente – *hot start current* – para garantir que o arco não seja extinto e que a corrente de soldagem seja alcançada satisfatoriamente;
- Tempo de retardo para início do movimento da tocha: Tempo para iniciar o movimento da tocha após a abertura do arco – *Travel start delay time* – Durante este intervalo de tempo, que pode coincidir com o tempo de abertura e o tempo de subida da corrente, o arame inicia a fusão, depositando-se na junta, porém sem movimento da tocha. Esta fusão enche o início do cordão garantindo uma deposição homogênea em toda a extensão da junta;
- Tempo de soldagem: Tempo entre o início e o término da soldagem onde a corrente de soldagem – *welding current* – e a tensão de soldagem – *welding voltage* são aplicadas dependendo do que esta sendo soldado;
- Tempo de descida da corrente: Tempo entre a corrente de soldagem e a extinção do arco e solidificação da cratera no final do cordão – *downslope time* - Durante este tempo controles de enchimento (tempo e corrente) da cratera (*crater fill time and current*) podem ser utilizados. Na maioria das vezes a tocha pára no início deste intervalo e o metal fundido do

arame se deposita na cratera, evitando uma cratera com depressão, garantindo assim uma deposição homogênea em toda a extensão da junta;

- **Tempo de parada de alimentação de arame:** Intervalo de tempo no final do enchimento da cratera e a extinção completa do arco, onde a corrente e a tensão são reduzidas gradativamente permitindo um aumento do comprimento do arco – *burnback time* – A utilização deste tempo na programação da soldagem, facilita a reabertura do arco pois evita que o arame fique “colado” na cratera.
- **Tempo de pós-fluxo:** Tempo entre a extinção do arco e o fechamento do gás – *Postflow time (postpurge)* – Durante este intervalo de tempo, o gás flui da tocha após a extinção do arco. A utilização deste pós-fluxo, ajuda a prevenir problemas (contaminação) no fim do cordão de solda afastando o ar da região onde a cratera está solidificando. Em alguns sistemas, a água que circula pela tocha ainda fica aberta durante este intervalo de tempo preservando a mesma;
- **Ciclo de soldagem:** O ciclo de soldagem - *weld cycle time* – é o tempo total requerido para executar todos os eventos envolvidos para realizar a solda. Ele é considerado desde o primeiro instante de pré-fluxo até o último instante de pós-fluxo. O ciclo de soldagem está relacionado com a produção durante a soldagem robotizada.

8.4.2 - Seqüência para a Programação

A programação do robô para a realização de soldas, segue a seqüência abaixo:

a) *Calibração da posição* da tocha de soldagem para assegurar que o robô operará dentro da sua faixa de tolerância;

b) *Localização dos componentes* de trabalho (mesa, gabaritos, fixadores, etc.) e definição do tipo de fonte de energia;

c) *Definição do caminho* que será seguido pela tocha de soldagem do robô, assim como a localização dos cordões de solda. Alguns robôs são do tipo "ensino e repetição (playback)" (armazenamento na memória do controlador, dos pontos a serem percorridos) e outros devem ser programados "off-line". O controle computacional de um robô (movimentação) pode ser realizado de três formas diferentes:

- *Ponto-a-ponto:* quando o robô tem a habilidade de se mover de um ponto específico para outro, mas sem poder parar em um ponto arbitrário não definido anteriormente (entre os pontos);
- *Caminho contínuo:* habilidade de mover tomando como referência pontos específicos que definem um caminho, mas a trajetória seguida pode não corresponder aos pontos de programação;
- *Caminho controlado (trajetória computada):* o caminho entre os pontos programados é controlado, podendo ser definido através de uma interpolação linear (linha reta) ou por uma interpolação parabólica, bastando para isso que as coordenadas inicial e final, e o tipo de interpolação sejam informadas ao controle.

O controle computacional dependerá do tipo de robô e do programa implementado, entretanto a maioria dos robôs para soldagem utilizam trajetória computada.

d) *Definição das condições de soldagem* a serem utilizadas e que devem estar atreladas às coordenadas de movimentação do robô. Nesta etapa da programação são inseridos na programação, dois arquivos, o primeiro, no início da trajetória onde será depositado o cordão,

contém informações para abertura do arco. O segundo, no final da trajetória, contém informações para extinção do arco.

e) *Refinamento do programa* através da verificação do desempenho e introdução de alguns controles básicos para soldagem. Algumas vezes necessita-se editar o programa novamente para se obter a correta soldagem da peça.

Por exemplo, ensina-se um robô de soldagem a soldar uma parte específica de um componente direcionando ou orientando a tocha de soldagem, posicionada no final do braço do robô. A movimentação ou manipulação das juntas do robô, assim como a caminho a seguir, é realizado por uma interface homem-máquina (IHM), ou seja, “*teach pendant*”, através de botões de controle ou “*joystick*”. Pontos ao longo da trajetória são inseridos e armazenados na memória do controle computacional do robô (a programação ensino-repetição é realizada pelo programador do robô que fisicamente guia a tocha de soldagem ao longo da trajetória a ser seguida, armazenando alguns pontos). O robô irá repetir este programa tendo como referência os pontos da posição de calibração do robô.

Caso a espessura ou dimensões da peça seja diferente da utilizada para a programação da trajetória e das condições de soldagem do robô, o cordão de solda será posicionado em uma posição diferente da desejada, ou seja, não cobrirá completamente o chanfro ou a junta, ou o fará de forma incompleta. Consequentemente, a precisão e os dispositivos de fixação necessitam ser modificados para o sucesso da operação. Esta variação das dimensões da peça, entretanto, podem ser superadas através do uso de sensores especiais e sistemas de controle adaptativos desenvolvidos especialmente para operações de soldagem robotizada a arco.

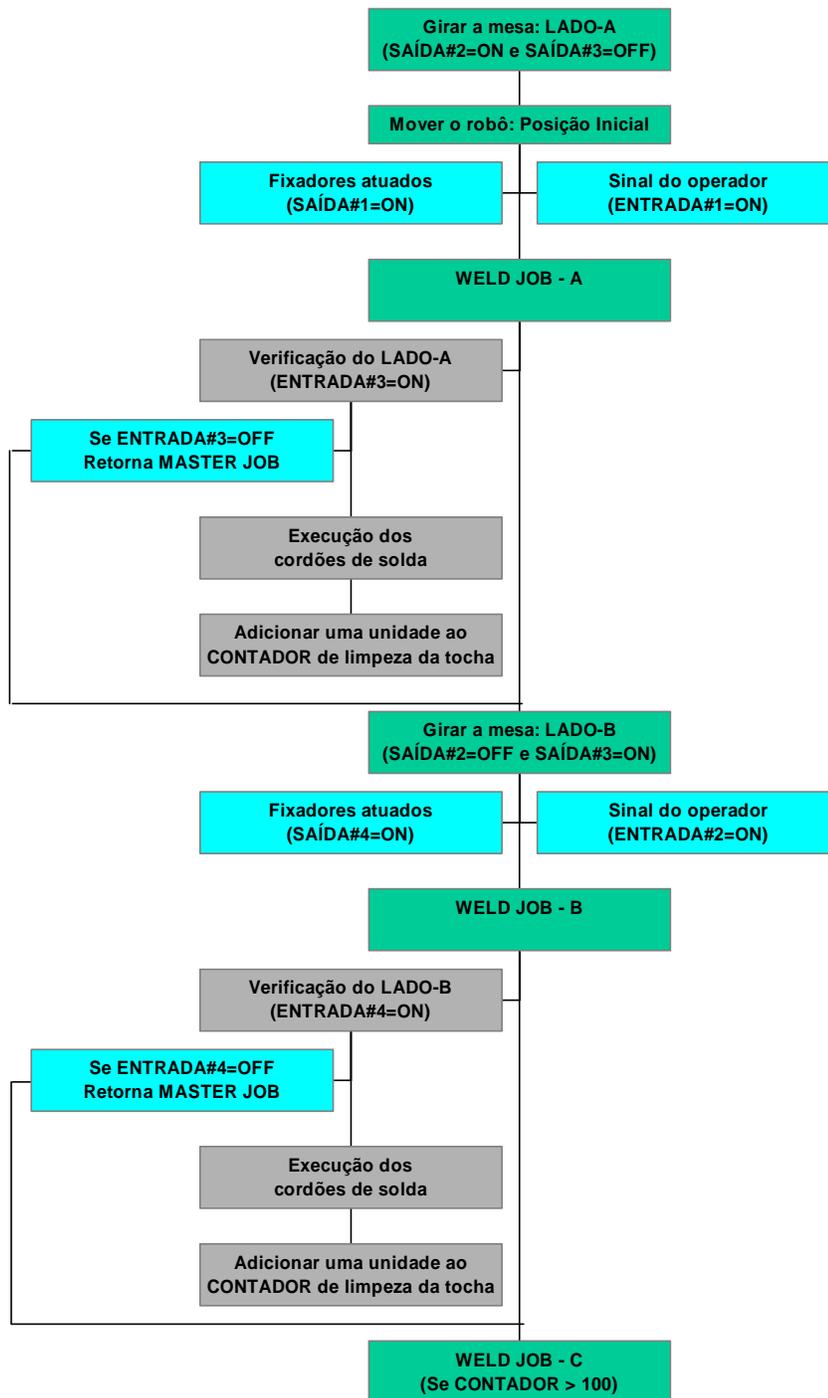
8.4.3 - Exemplo de Seqüência de Programação em Soldagem GMAW

A figura 8.5 apresenta um fluxograma de programação de uma soldagem robotizada GMAW. Neste procedimento, definiu-se que a mesa giratória tem duas posições (LADO-A e LADO-B) com ângulo de 180° de defasagem. Os sensores para informar a posição da mesa giratória podem ser óticos, magnéticos, capacitivos, indutivos ou mecânicos, podendo estar localizado na mesa ou no atuador (verificar esta possibilidade junto do fabricante).

WELD JOB – A: Inicialmente, verifica se a mesa giratória encontra-se no LADO-A e se os fixadores estão atuados. A seguir, desloca-se para o início da junta, executando o programa de soldagem. Adiciona uma unidade ao contador de limpeza da tocha.

WELD JOB – B: Inicialmente, verifica se a mesa giratória encontra-se no LADO-B e se os fixadores estão atuados. A seguir, desloca-se para o início da junta, executando o programa de soldagem. Adiciona uma unidade ao contador de limpeza da tocha.

WELD JOB – C: Inicialmente, desloca a tocha de soldagem até a estação de limpeza da tocha (acessório do robô para retirar os respingos e a seguir, pulverizar anti-respingo no bocal da tocha, automaticamente). Acionar o dispositivo automático de limpeza da tocha, quando o TCP estiver na posição de inicialização. “Zerar” o contador de limpeza da tocha.



LEGENDA

ENTRADA#1: LADO-A liberado pelo operador

ENTRADA#2: LADO-B liberado pelo operador

ENTRADA#3: Mesa posicionada no LADO-A

ENTRADA#4: Mesa posicionada no LADO-B

COR VERDE: Seqüência do MASTER JOB

COR CINZA: Seqüência do WELD JOB

SAÍDA#1: Fixador atuando no LADO-A

SAÍDA#2: Girar a mesa para o LADO-A

SAÍDA#3: Girar a mesa para o LADO-B

SAÍDA#4: Fixador atuando no LADO-B

COR AZUL: Verificação condicional de prosseguimento

Figura 8.5 - Fluxograma da programação de uma célula robotizada GMAW

MASTER JOB: Girar a mesa para o LADO-A. Mover o robô para a posição inicial, informando quando a estação de trabalho está pronta. Aguardar o sinal do operador do robô informando que as peças encontram-se em posição de soldagem (através de uma botoeira). Executar o programa WELD JOB-A (nesse momento, o operador está posicionando as partes a serem soldadas no LADO-B). Girar a mesa para o LADO-B e executar o programa WELD JOB-B, somente após a verificação do posicionamento das peças a serem soldadas (nesse momento, o operador retira o conjunto soldado e posiciona novas partes a serem soldadas no LADO-A). Verifica se há necessidade de limpeza da tocha (execução do WELD JOB-C). Esse programa é executado até que o operador decida pela interrupção do mesmo, ou que seja fabricado um número predeterminado pela produção, ou ocorra algum problema (colisão por exemplo).

8.5 – PROJETO DE JUNTA E TOLERÂNCIAS PARA A SOLDAGEM ROBOTIZADA

Um robô, como um soldador humano, solda qualquer junta. Entretanto, quando se considera a possibilidade de robotização da soldagem de uma determinada peça ou dispositivo, deve-se considerar também a repetibilidade. Em outras palavras, apesar de ser possível utilizá-lo para soldagens de recuperação e manutenção, deve-se considerar sempre a utilização de um robô para soldagens seriadas e neste caso, para obter cordões de solda iguais. Para isto, deve-se garantir que as peças a serem soldadas estejam dentro de tolerâncias adequadas. Neste caso, o projeto das juntas deve considerar o acesso e a abertura da junta tal que permita a deposição homogênea do metal de solda.

Quanto à junta, normalmente tem-se considerado apenas soldagens em passes únicos. Assim, juntas sobrepostas, de topo, em “T” ou “L” têm sido utilizadas com sucesso. A deposição em chanfros também é possível, entretanto, em alguns casos, devido à diluição do material depositado, o controle do comprimento do arco fica comprometido e torna-se difícil garantir uma qualidade adequada para o que se deseja. Em casos específicos, onde sistemas de monitoração são utilizados, o controle do robô ajusta a distância entre a tocha e a superfície dos cordões garantido assim que o comprimento do arco fique constante durante a deposição dos cordões.

Quanto à tolerância, algumas regras práticas têm sido utilizadas com sucesso. Uma delas diz que a abertura entre partes a serem soldadas não pode ser superior à metade do diâmetro do eletrodo. Neste caso, se o diâmetro do eletrodo for de 1,2 mm, a repetição do processo só ocorrerá se as aberturas entre as juntas não forem superiores a 0,6 mm. De um modo geral, principalmente em soldagem robotizada de peças estampadas, por exemplo, é muito difícil garantir uma constância nas tolerâncias entre as peças. Neste caso, outros fatores devem ser considerados para conseguir uma adequada deposição, mesmo que os cordões não fiquem exatamente iguais, porém que fiquem dentro de uma faixa de aceitação. Dentre os vários fatores

a serem considerados, citam-se o processo de soldagem, a posição de soldagem e os parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem, tipo de gás, etc.).

8.6 – APLICAÇÃO, ESCOLHA E AQUISIÇÃO DE ROBÔS PARA SOLDAGEM

A escolha de um robô está relacionada com a tecnologia a ele agregada. Deve-se adquirir um robô com a maior qualidade possível e de melhor repetibilidade. Atualmente, um robô de seis graus de liberdade é o mais indicado para as operações em soldagem, por ser mais flexível (consegue alcançar todos os pontos de seu espaço de trabalho) que aqueles de menores graus de liberdade. Além disso, deve-se optar por robôs que possuam servo motores alimentados por corrente alternada (CA). Essa é uma tecnologia recente na área de robótica que elimina a necessidade do robô ir à posição inicial, sempre que for ligado.

Outro fator importante a ser observado é a segurança. Embora a responsabilidade da segurança na célula robótica é da empresa e do operador, o robô deve fornecer vários níveis de segurança. A segurança deve ser desde o total travamento dos servos motores, até a implantação de barreiras físicas entre o robô e o operador, não se esquecendo da verificação do programa sem que ocorra a abertura do arco elétrico.

As juntas dos braços do robô movem-se rapidamente se for utilizado motores elétricos. As máximas velocidades encontram-se entre 6.000 e 9.000 cm/min, velocidade essa muito superior à velocidade de soldagem dos processos a arco elétrico. Usualmente, o robô soldará com a mesma velocidade ou ligeiramente mais rápido que um soldador. Mas a elevada velocidade de manipulação reduz o tempo de movimentação entre os cordões de solda e entre a troca de peças, portanto, reduzindo o tempo total de fabricação por soldagem.

Como um exemplo, robôs utilizados para soldagem de chapas de aço que compõem cascos de navios utilizam velocidades de soldagem entre 30 a 90 cm/min, com uma velocidade de alimentação de arame entre 9 a 15 m/min, utilizando um eletrodo de 1,2 mm de diâmetro. Expressões empíricas utilizadas neste tipo de aplicação permitem obter a velocidade de soldagem (v_{sol}) e a velocidade de alimentação de arame (w_{sol}):

$$v_{sol} = \frac{w_{sol} \pi \phi^2}{4S}$$

e

$$w_{sol} = AI + BhI^2,$$

onde:

ϕ é o diâmetro do eletrodo,

S é a área de deposição,

h é a extensão do eletrodo,

I é a corrente de soldagem, e

A e B são constantes empíricas.

Para determinar qual robô de soldagem é mais indicado para uma planta industrial, deve-se considerar alguns pontos muito importantes e que podem alterar significativamente o projeto original da peça a ser soldada.

A primeira consideração está relacionada com a peça a ser soldada. No caso de ser um projeto novo, deve-se levar em conta a possibilidade da soldagem ser realizada em pontos que dêem a ela resistência suficiente para utilização, porém que minimizem tensões residuais, distorções, elevados campos de temperatura, etc. Os gabaritos devem ser simples, porém eficientes e de preferência, deve-se optar para soldagem na posição plana ou horizontal. A tolerância entre as peças deve ser a mínima possível, de modo a permitir o encaixe entre as mesmas ou no conjunto. Deve-se sempre pensar em melhoria de tolerância da peça. Ainda sobre o gabarito, deve-se considerar o tamanho e o peso do conjunto. Gabaritos em mesas giratórias, onde enquanto um conjunto está sendo soldado, o outro está sendo montado para soldagem, têm sido muito utilizadas. A integração entre estas mesas e o robô são relativamente fáceis de serem realizadas. Em alguns casos, pode-se optar por sistemas com alguns graus de liberdade que podem ser integrados com o robô. Neste caso, aumenta-se o número de graus de liberdade, porém, aumenta-se também a complexidade de programação.

Finalmente, as considerações quanto à produção. O número total de soldas e o comprimento de cada solda estão relacionados com o tempo de soldagem e com o gasto com o material de consumo. Em alguns casos, não é possível reduzir o comprimento das soldas para compensar estes dois fatores. Na maioria dos casos entretanto, levando em consideração a estabilidade do robô, pode-se aumentar as velocidades de intervalo entre cordões compensando o tempo de soldagem. Deve-se sempre ter em mente a meta a ser atingida no projeto de automação, ou seja, se deseja-se aumentar o volume da produção com a robotização do processo de soldagem, melhorar a qualidade das peças ou realizar procedimentos de soldagem com segurança. Neste caso, restrições orçamentárias também devem ser consideradas para que não haja decepção após a implementação do processo, o que se for feito obedecendo o bom senso, dificilmente acontece.

8.7 – MONITORAÇÃO EM PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO ROBOTIZADA

Uma forma de aumentar a confiabilidade na soldagem robotizada é considerando a utilização de sistemas de monitoração com sensores. Os sensores têm como função a obtenção de informações sobre o ambiente onde encontra-se o robô, além de informações sobre o processo (parâmetros) de soldagem. As informações obtidas podem ser utilizadas para adaptar o robô ao ambiente ou ajustar os parâmetros de soldagem. Nestes casos, os ajustes podem ser automáticos, dependendo de um sistema de controle acoplado ao sistema de monitoração ou realizando ajustes após repetidas operações e testes.

Quando sensores são utilizados na soldagem a arco, seja robotizada ou não, eles operam em um meio adverso e agressivo à sua integridade. A presença do arco elétrico implica em vários problemas para a operação dos sensores, sendo o calor produzido pelo arco, o fator que provoca as principais limitações para uma operação correta. Além do calor, outros fatores também afetam os sensores: a luz intensa provocada pelo arco afeta os sistemas que empregam visão artificial; os intensos campos eletromagnéticos provocados têm influência sobretudo nos sensores indutivos; a deformação ou desvio do eletrodo tem influência sobre os sensores de contato elétrico; a flutuação da tensão de alimentação, o desgaste do eletrodo, salpicos e as mudanças na forma do arco, provocam erros nos diversos sensores de arco.

A escolha de um sistema de monitoração ou do sensor mais indicado para uma determinada aplicação não é uma tarefa fácil e, da mesma forma que a própria escolha do robô, a escolha do sistema deve ser realizada com bom senso. Os fatores considerados anteriormente levaram ao desenvolvimento de diversos sistemas de refrigeração e proteção dos sensores para que pudessem operar no ambiente de soldagem a arco. Uma vez protegidos, os sensores podem ser utilizados para localizar a estrutura a ser soldada, buscar o cordão de soldagem e seu início, extrair as características

geométricas da junta, e guiar a tocha de soldagem ao longo do cordão de solda até o ponto final. Paralelamente estarão operando sensores para detectar possíveis obstáculos na trajetória do robô e para a monitorização do processo de soldagem, e finalmente, outros sensores realizarão o controle de qualidade da soldagem.

Assim, as possíveis tarefas a serem realizadas pelos sensores em um processo de soldagem devem ser:

a) *Informação geral sobre a área de trabalho:*

Para realizar esta tarefa, é necessário um sensor que possa proporcionar informações globais da estrutura a ser soldada. O sensor deve identificar todas as partes da estrutura, formas, tipos e dimensões aproximadas, devendo proporcionar informação tridimensional da mesma. Um sensor de visão artificial, utilizando câmaras de vídeo CCD, pode cumprir este objetivo. Para a obtenção de informação 3D (tridimensional) é basicamente utilizada a técnica de triangulação, apesar de que também se possa utilizar uma câmara fixa e um sensor de distância (ultra-som ou laser).

b) *Detecção da junta, extração das características geométricas e acompanhamento da deposição do cordão de solda:*

Com a informação proporcionada pelo sensor de informação geral, pode-se posicionar o robô na estrutura a soldar. A partir daí começa a operação dos outros tipos de sensores cuja tarefa será encontrar o cordão de solda, extrair as características geométricas da junta e posteriormente realizar o acompanhamento da deposição do cordão de solda.

A operação de encontrar a junta significa encontrar sua posição geométrica antes que comece o procedimento de soldagem. A operação para extrair as características geométricas da junta consiste em obter a largura, profundidade e área de deposição a ser preenchida pelo cordão de solda. Isto permite que o sistema robotizado realize o controle dos parâmetros de soldagem com a finalidade de proporcionar a quantidade de material necessário para cada tipo de junta, a velocidade de soldagem (equação 1) e até determinar a amplitude do movimento de tecimento a ser realizado pela tocha, quando for o caso. Já para realizar o acompanhamento da deposição, deve-se ter em mente que durante o processo de soldagem por arco ocorrem deformações no cordão de solda devido às altas temperaturas presentes. Assim, é necessário um sensor que possa seguir o cordão de solda, mesmo na presença destas deformações.

A detecção do cordão de solda pode ser feita mediante uma série de passos ou em uma única operação. Podem ser empregados sensores de contato ou de não-contato. Os sensores de contato podem ser puramente mecânicos, elétricos ou uma mescla dos dois (eletro-mecânico). Também podem ser utilizados transdutores de ultra-som, dos tipos utilizados em ensaios não-destrutivos, em contato com a peça a soldar. Além de detectar a junta, este sensor pode ser utilizado também para acompanhamento da deposição do cordão de solda.

Os sensores que proporcionam medidas do cordão de solda, sem contato com o mesmo, podem ser de diversos tipos: óticos, ultra-sônicos, indutivos, de arco, etc. Estes tipos de sensores possuem a vantagem de, ao não operar em contato com as peças a soldar, não se danificam facilmente.

- *Sensores óticos:* Os sensores óticos (luz visível ou laser) podem ser utilizados tanto para encontrar e seguir o cordão de solda, quanto para extrair as características geométricas das juntas. Estes sensores são classificados em sensor pontual (fotodiodo ou fototransistor), sensor linear (CCD, MOS e PDS) e sensor de área (imagem por CCD ou MOS), de acordo com a forma com que recebem a luz internamente.

- *Sensores ultra-sônicos:* Os sensores ultra-sônicos operando no ar também podem ser utilizados para avaliar a dimensão de uma junta. Outro tipo de sensor de não-contato utilizado para este propósito é o indutivo. Um sensor de arco, que utiliza o próprio arco elétrico do processo de soldagem, também pode ser utilizado como sensor para acompanhamento da deposição do cordão de solda, e até a radiação térmica (captada por câmaras infravermelhas) emitida pela peça que está sendo soldada pode ser utilizada para este fim.

c) *Detecção de obstáculos:*

O robô deve ser capaz de operar no ambiente de soldagem, detectando possíveis obstáculos que impeçam seus movimentos e que ocasionaria uma colisão, se a ação de evitá-los não seja executada. A detecção de obstáculos pode realizar-se por um sensor de informação geral (visão artificial), capaz de identificar todos os obstáculos existentes no trajeto do robô, ou por sensores locais colocados no próprio robô (ultra-som).

d) *Monitorização:*

A monitorização de um processo de soldagem consiste em detectar variações no processo, verificando, por exemplo, a posição relativa da estrutura a soldar, e a presença do arco elétrico. Os sensores que podem ser utilizados para a monitorização são os sistemas de visão artificial, captando imagens da peça que se solda e os sensores de infravermelho, medindo a radiação térmica da peça. A monitorização também pode ser combinada com sensores de corrente e tensão do arco, ou até com a emissão acústica produzida durante o processo de soldagem.

e) *Controle de qualidade da soldagem:*

Uma vez que o processo de soldagem tenha finalizado, entram em operação os sensores para avaliar a qualidade do cordão de solda, identificando problemas como excesso de solda ou defeitos que requerem reparação ou modificações no processo. Para esta aplicação, podem ser utilizados sensores óticos ou sensores de ultra-som em contato direto com a peça.

f) *Segurança na área de trabalho:*

A finalidade dos sistemas de segurança é basicamente a proteção do operador quando este está trabalhando próximo ao lugar de soldagem. Os sensores utilizados para esta aplicação devem detectar a violação do ambiente de soldagem durante as operações do robô. Os sensores de segurança também podem ser utilizados como sensores auxiliares ao sensor utilizado para detecção de obstáculos, de forma a evitar colisões entre o robô e o ambiente de operação. Os sensores normalmente empregados utilizam métodos óticos como cortinas de luz, sensores ultra-sônicos, dispositivos mecânicos usados como barreiras, e dispositivos sensíveis à pressão.

8.8 – PROBLEMAS DA ROBOTIZAÇÃO DA SOLDAGEM

Uma boa maneira de se soldar com qualidade em elevadas velocidades de soldagem (acima de 60 cm/min) é consultar o manual do fabricante do robô, ou consultar diretamente o fabricante. Para isso, é necessário o correto posicionamento da tocha (inclinação e ângulo de ataque da tocha de soldagem), uma adequada escolha do tipo de transferência do metal (função da espessura e tipo do material, do gás de proteção, da fonte de energia e da corrente e da tensão de soldagem) e uma exata determinação dos parâmetros de soldagem. A não observância nesses

fatores poderá produzir descontinuidades como: porosidade, falta de fusão, falta de penetração, mordedura, perfil incorreto da solda e trincamento.

Um engenheiro de soldagem que trabalha em uma empresa que está implantando soldagem robotizada deve ter em mente que o robô é uma máquina quase perfeita. Ele segue todas as instruções que foram predeterminadas para ele seguir. Por outro lado, a soldagem é um processo complexo e impreciso, quase imperfeito. Assim, quando se vai realizar uma soldagem utilizando o robô, deve-se levar em conta todos os fenômenos possíveis de acontecer, desde o sopro do arco por correntes de vento até problemas de condução de calor em regiões da peça onde a dissipação é limitada. Um robô que não utiliza sensores não poder ver a solda, nem tem sentimento do que está fazendo. Não é como o soldador humano que ajusta o deslocamento da tocha (ângulo, distância, etc.) para compensar eventuais problemas durante a soldagem.

8.9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A robotização de um processo produtivo tem vários benefícios: aumento da produtividade, redução dos custos de mão-de-obra, redução dos custos com materiais, redução do número de operadores requeridos na soldagem de um componente, aumento da qualidade e alto grau de segurança (redução do número de afastamentos de empregados por lesões). Entretanto, antes de se decidir sobre a automatização de um processo utilizando robôs para soldagem, deve-se verificar diversos fatores como: definição das metas a atingir (aumento de volume ou melhoria da qualidade), necessidade de melhoria do ajuste entre as peças, tempo de retorno do investimento, definição dos tipos de equipamentos e acessórios necessários, forma de integração com outros sistemas e a capacidade de armazenamento de programas na memória do robô.

8.10 - REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY, *Jefferson's Welding Encyclopedia*, 18 ed., Miami, 1997.
- AMERICAN WELDING SOCIETY, *Welding handbook*, v.1 e 2, 8 ed., Miami, 1991.
- ASM, "Welding, Brazing and Soldering", In: *ASM Handbook*, v. 6, 1994.
- NOMURA, H., "Sensors and Control Systems in Arc Welding", In: *Technical Commission on Welding Processes*, Japan Welding Society, 1991.
- THE LINCOLN ELECTRIC CO., *The procedure handbook of arc welding*, 13 ed., Miami, 1994.
- FILHO, T. F. B., *Seguimiento y Análisis de Entornos de Soldadura por Arco Automatizada Mediante Ultrasonidos*, Ph.D. Dissertation, Universidad Complutense de Madrid, Espanha, 1995.
- CULLISON, A., "Get that Spatter Under Control", *Welding Journal*, Miami, p.43-45, 1999.
- BRACARENSE, A. Q., *Estudo da Sensibilidade do Arco de Soldagem TIG à Variações Geométricas do Anodo*, Dissertação de Mestrado, DMT/UFMG, 119p, 1986.
- AMERICAN WELDING SOCIETY, *74th Annual AWS Convention Abstracts*, 352 p., Houston, 1993.
- CHIN, B. A., MADSEN, N. H., GOODLING, J.S., "Infrared Thermography for Sensing the Arc Welding Process", In: *Welding Journal*, v. 62, N. 9, pp. 229s-234s, 1993.
- BONCROFT Corp., "Adaptive welding cells: trend of the future", *Welding Journal*, Miami, p.62-63, 1989.
- GARCÍA, C., "Exámenes Radiográficos y por Ultrasonidos. Optimización con Ayuda de Ordenador", *Metalurgia y Electricidad*, N. 596, pp. 58-63, 1988.
- UMEAGUKWU, C., MCCORMICK, J., "Investigation of an Array Technique for Robotic Seam Tracking of Weld Joints", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. IE-38, N. 3, pp. 223-229, 1991.

CULLEN, C.P., "An Adaptive Robotic Welding System Using Weld-Wire Touch Sensing", *Welding Journal*, v. 67, N. 11, pp. 17-21, 1988.

CYCLOMATIC INDUSTRIES Inc., "Joint Tracker Attacks Uneven Fitup". *Welding Journal*, 64 p., Miami, 1989.

PLACKO, D., CLERGEOT, H., MONTEI, F., "Seam Tracking Using a Linear Array of Eddy Current Sensors", *Proceedings of the 5th Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls*, Kempston UK, IFS, pp. 557-568, Amsterdam, 1985.

TAYLOR, D. S., *Welding and Metal Fabrication*, 58(6), pp. 200-204, 1990.

KARASTOJANOV, D. N., NACHEV, G. N., "Adaptative Control of Industrial Robots for Arc Welding", *Proceedings of the 9th Triennial World Congress of IFAC*, Pergamon Press, pp. 2405-2410, Budapest, 1984.

GOLDBERG, F., "Inductive Seam-Tracking Improves Mechanized and Robotic Welding", *Automation and Robotization in Welding and Allied Processes*, Pergamon Press, pp. 393-400, Strasbourg, 1985.

SADLER, H. A., "A Look at the Fundamentals of Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal*, Miami, p.45-47, 1999.

DUTRA, J. C., OLLÉ, E L.F., XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, pp. 245-264, 1991.

PEREZ, J.B., "Consideraciones sobre la Evolución de la Aplicación de los Ensaíos con Ultrasonidos y sus Criterios de Aceptación en Soldadura de Aceros", *Deformaciones Metálicas*, N. 63 pp. 38-45, 1981.

AGAPAKIS, J.E., Wittels, N., Masubuchi, K., "Automated Visual Weld Inspection for Robotic Welding Fabrication", In: *Automation and Robotisation in Welding and Allied Processes*, Pergamon Press, pp. 151-160, Strasbourg, 1985.

JONES, L. A., EAGAR, T. W., LANG, J. H., "Images of a steel electrode in Ar-2%O₂ shielding during constant current gas metal arc welding", *Welding Journal*, p.135s-141s, Miami, 1998.

DORN, L. e RIPPL, P., "Fundamental and Practical Approaches to the Reliability of Welded Structures", *Japan Welding Society*. pp. 37-42, 1982.

TREMONTI, M. A., e ALVES, A. S., "Soldagem Robotizada: o caso de sucesso da substituição da soldagem a arco elétrico com proteção gasosa manual pela robotizada." *Soldagem & Inspeção*, n.12, pp.14-28, São Paulo, 1998.

BONNEY, M. C. e YONG, Y. F., "Robot Safety", IFS (Publications) Ltd., UK, 1985.

Cook, G.E. et al., *Proceedings of the Second Int. Conf. Developments in Automatic and Robotic Welding*, The Welding Institute, paper 7, 1987.

JOHNSEN, M. R., "Automated system keeps steel rolling in one door and out the other", *Welding Journal*, Miami, p.49-51, 1996.

SCHNEE, M., "What to know before choosing a robotic welding system", *Welding Journal*, Miami, p.59-62, 1993.

HOWARTH, M.P. e GUYOTE, M.F., "Eddy Current and Ultrasonic Sensors for Robot Arc Welding", *Sensor Review*, pp. 90-93, 1983.

GUSTAFSON, N. D., *Welding Journal*, v. 72 , n. 5, pp. 43-45, 1993.

CARLSON, N. M. e JOHNSON, J.A., "Ultrasonic Sensing of Weld Pool Penetration", *Welding Journal*, v. 67, n. 11, pp. 239-246, 1987.

MODENESI, P.J., Ph.D. Dissertation, Cranfield Institute of Technology, 308p, 1990.

PANASONIC FACTORY AUTOMATION, "Robotics Enhance Auto Parts Production", *Welding Journal*, Miami, pp.63-65, 1990.

FENN, N. e STROUD, R.R., "Development of an Ultrasonically Sensed Penetration Controller and Seam Tracking System for Welding Robots", *U.K. Robotics Res.*, IMECHE Conf. Pub. London, Mechanical Engineering Publications Ltd., pp. 105-108, 1984.

FENN, R., "Ultrasonic Monitoring and Control during Arc Welding", *Welding Journal*, pp. 18-22, 1985.

KSIAZKIEWICZ, R., e GUSTAFSON, N., "Robotic GTAW may prove key to higher gas turbine engine production", *Welding Journal*, Miami, p.33-37, 1996.

NAGARAJAN, S., BANERJEE, P., CHEN, W., e CHIN, B. A., "Control of the Welding Process Using Infrared Sensors", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. RA-8, n. 1, pp. 86-93, 1992.

MITA, T., SAKABE, A. e YOKOO, T., *Welding International*, v. 2, pp.152-159, 1989.

MITA, T., *Welding International*, v. 3, pp. 227-231, 1989.

CHEN, W. e CHIN, B.A., "Monitoring Joint Penetration Using Infrared Sensing Techniques", *Welding Journal*, v. 69, n. 5, pp. 181-185, 1990.

ARATA, Y., INOUE, K., FUTAMATA, M. e TOH, T., "Effect of Welding Method and Welding Condition of Welding Arc Sound", *Transactions of JWRI*, v 8, n. 1, pp. 25-31, 1979.