



SOLDAGEM ROBOTIZADA DE ANDAIMES TUBULARES

Alexandre Gondim Pereira

Vallourec & Mannesmann Tubes, Av. Olinto Meireles, 65, Barreiro, 30640-010, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: alexandre.gondim@vmtubes.com.br

Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: queiroz@vesper.demec.ufmg.br

Resumo. *Com a necessidade de aumentar a produção, mantendo baixos custos de fabricação, as indústrias começaram a procurar soluções para melhorar a qualidade e aumentar a competitividade. Este trabalho trata do desenvolvimento de uma metodologia de soldagem robotizada para ser adotada em uma companhia de porte médio, líder no mercado de equipamentos para construção civil. O processo de soldagem usado atualmente é o GMAW (Gas Metal Arc Welding). A primeira parte da linha de fabricação escolhida para ser robotizada foi a linha de produção de andaimes, o grande desafio foi conseguir compensar com o controle dos parâmetros de soldagem a grande variação dimensional das peças, como são preparadas e como são soldadas manualmente. Para fixação das peças para a soldagem, foi projetado e construído um dispositivo universal para soldar os andaimes com o robô SK6 da Motoman disponível no laboratório. Várias sequências de soldagem foram testadas para a soldagem dos andaimes. Pôde-se observar que o tempo de fabricação dos andaimes tubulares foi reduzido em até 30%, com um considerável aumento na qualidade da solda e excelente acabamento final do produto.*

Palavras-chave: Soldagem, andaimes, robotização, automação.

1 INTRODUÇÃO

O processo de automação de uma linha de produção já é uma realidade enfrentada por muitas indústrias em todo o mundo neste século. Tendo em vista o aumento da produção, mantendo a qualidade dos produtos, as indústrias começaram a modificar suas linhas de produção e a automação surge como uma alternativa para isto.

Uma das empresas interessadas em automatizar sua linha de produtos é a MECAN- Indústria de Máquinas e Equipamentos para à Construção Civil. Seu produto atende o mercado brasileiro, entretanto quando confrontado com padrões de classe mundial, não pode ser oferecido no mercado internacional. O processo de soldagem usado atualmente é o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e toda a soldagem é feita semi-automática, fazendo com que haja perda de tempo, material e clientes. Usando isto como motivação, uma nova estratégia para aumentar a produção, modificando o procedimento de soldagem, foi proposta e a primeira parte da linha de fabricação escolhida para ser robotizada foi a linha de produção de andaimes.

O objetivo desse trabalho foi otimizar o processo de fabricação de andaimes usados na construção civil, sem modificar a forma ou a produção das partes que compõe o andaime. No trabalho procurou-se fabricar andaimes tubulares usando um sistema robotizado para a soldagem a fim de obter a melhor sequência de soldagem. Dentre os andaimes produzidos pela companhia, o mais crítico para ser automatizado é o andaime tubular 1 x 2 m, apesar das soldas realizadas nos andaimes serem iguais em todos os andaimes.

Um estudo para otimizar os parâmetros de soldagem usando um pequeno gabarito foi desenvolvido. Neste estudo, pequenas peças com as mesmas características das peças reais foram soldadas com o robô. Em seguida, um gabarito universal foi construído e projetado para posicionamento das peças para a soldagem robotizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fixadores e Posicionadores para a Soldagem

Na soldagem semi-automática ou automática, os produtos devem ser fixados e posicionados adequadamente, para que o soldador ou sistema de soldagem possa executar a soldagem sem interrupção. Para isso são usados fixadores e posicionadores que podem ser desde simples mesas estacionárias com dispositivos de fixação através de grampos manuais, até sofisticados sistemas servo-motorizados com alimentação e descarga automática [MOTA, 1992].

Quando se utiliza a soldagem completamente automatizada, a presença de fixadores torna-se obrigatória. A sua aplicação pode variar desde uma simples fixação das partes a serem soldadas, ou até utilizar mecanismos complexos, eletricamente ou eletronicamente ou ainda pneumaticamente controlados. O tipo, a forma e a quantidade de fixadores variam conforme a sua aplicação específica, cuja a meta é obter o máximo proveito da soldagem mecanizada ou automatizada, reduzindo os custos de soldagem e aumentando a produtividade.

Um posicionador é um dispositivo que suporta e move o produto para a posição desejada para uma determinada tarefa, como por exemplo, manter a solda na posição plana. Em alguns casos, o posicionador pode mover a peça com a soldagem progredindo ao longo da junta. O fixador para a soldagem pode ser montado no posicionador. Na Fig. (1) pode ser visto um sistema de fixação e posicionamento das peças para a soldagem robotizada.

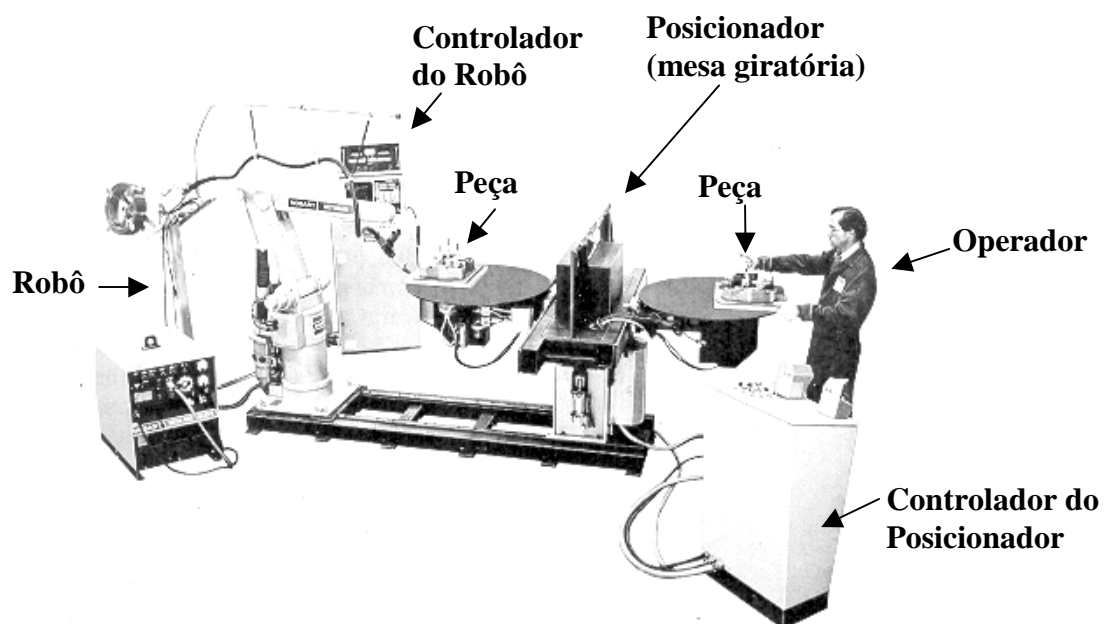


Figura 1. O operador faz a montagem das peças na mesa giratória numa estação de soldagem robotizada [CARY, 1989].

Como pôde ser visto, uma das principais funções dos posicionadores de peças para a soldagem é manter a peça a ser soldada firmemente presa evitando assim deformações e conseqüentemente distorções devido a soldagem. Portanto, para um posicionador para soldagem ser completamente eficiente é necessário um controle rigoroso de distorção e tensões residuais.

2.2 Distorções em Soldagem

Um dos maiores problemas enfrentados na construção de estruturas soldadas é o desenvolvimento de tensões residuais resultantes das operações de soldagem, as quais favorecem o aparecimento de distorções, principalmente quando as partes a serem soldadas não estão pré-ponteadas e, além disso, não estão preparadas corretamente para a soldagem robotizada. Neste trabalho todas as partes para a soldagem foram preparadas para a soldagem manual (como foi mostrado no 1ª artigo), porém foram soldadas usando um robô. Esse foi o grande desafio do trabalho.

Muitos esforços têm sido feitos para elaborar técnicas para medição de distorção em produtos soldados [MASUBUCHI, 1991]. Os seguintes sistemas têm sido desenvolvidos e usados.

- Um laser interferômetro capaz de fazer medições usando um sistema de grade claro e escuro (*bright-and-dark*) sensível a luz produzido por uma fonte de laser de baixa potência;
- Um sistema de visão a laser capaz de fazer medições sem contato de deformações. Isso é feito através da medição de distâncias entre a fonte de laser e os pontos de medição;
- Um sistema mecânico chamado de “polvo” (*octopus*) capaz de medir o raio de curvatura em quatro direções ao redor de um ponto de medição. Isso é feito usando um conjunto de oito *strain gages* localizados ao longo de um círculo nas vizinhanças de um ponto de medição.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

Os principais materiais utilizados para a soldagem dos andaimes foram tubos de aço AISI 1010 com costura de fabricação da empresa MECAN. Os tubos que foram usados para a soldagem já estavam cortados na medida, portanto, não houve necessidade de nenhuma outra preparação. Como metal de adição foi escolhido o arame cobreado ER70S-6 enrolado capa a capa com 1,2 mm de diâmetro da ESAB S.A. Esse arame é classificado segundo norma AWS ASME SFA A5.18. A Tab. (1) fornece a especificação química e propriedades mecânicas para o arame AWS ER70S-6. Optou-se em usar um gás de proteção comercial desenvolvido pela “WHITE MARTINS” para soldagem robotizada. A composição química exata deste gás não foi revelada pela empresa. Entretanto, sabe-se que o “STARGOLD ROBOT”, como é chamado, é uma mistura ternária de CO₂ + O₂ + Argônio em balanço, classificada segundo norma DIN 3256 - Grupo M3.

Tabela 1. Especificação química e as propriedades mecânicas para o arame ER70S-6.

Especificação química para o arame ER70S-6					
C	Mn	Si	P	S	Cu
0,07 a 0,15	1,4 a 1,85	0,8 a 1,15	0,025	0,035	0.5
Propriedades mecânicas para o arame ER70S-6					
Limite de resistência mínimo		Limite de escoamento mínimo		Elongação mínima em 2 polegadas, %	
Ksi	Mpa	Ksi	Mpa		
72	500	70	420		

Para a soldagem foi utilizado um robô MOTOMAN SK6 interfaceado com uma fonte de soldagem, modelo MOTOARC 450, para o processo GMAW. Esta fonte tem faixa de operação de 75A/15V a 450A/38V, mantendo ciclo de trabalho de 100%, mesmo na faixa de operação máxima.

Para a medição de distorções durante e após da soldagem, foram usados fontes de laser encontradas no mercado. Essa fontes foram acopladas a pequenos dispositivos previamente preparados e adaptáveis aos tubos dos andaimes.

Para ensaios mecânicos, mais especificamente para o ensaio de tração das juntas soldadas, foi usada uma máquina de ensaio marca INSTRON modelo 8800, com capacidade de 25 toneladas. Para os ensaios metalográficos foram usados todos os equipamentos normalmente utilizados para este fim, ou seja: polícor, embutidora, politriz, estero-microscópio, etc.

3.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental dividiu-se nas cinco etapas descritas abaixo:

- 3.2.1) Testes de soldagem robotizada usando o mini-gabarito: para avaliar os parâmetros de soldagem, inicialmente foi usado um mini gabarito. Esse gabarito, como pode ser visto na Fig. (2) permitiu testar seis diferentes combinações de parâmetros em uma mesma seqüência de soldagem, facilitando assim a determinação das condições de soldagem. Os tipos de juntas usados neste mini-gabarito foram exatamente os mesmos usadas para fabricação dos andaimes. Neste caso, foram testados os seguintes parâmetros de soldagem: corrente e tensão de soldagem, *stick-out*, tipo e vazão de gás de proteção.

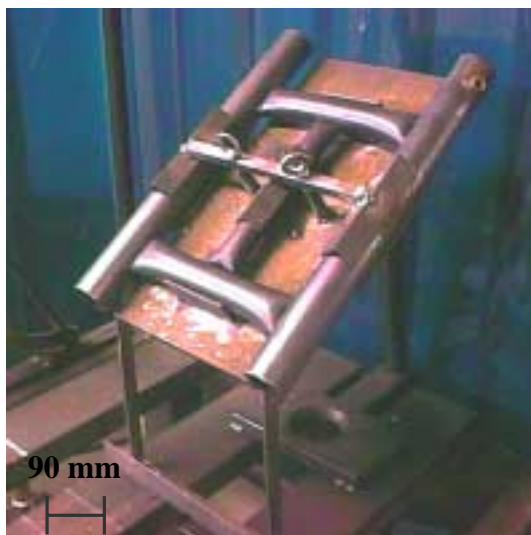


Figura 2. Foto mostrando o mini-gabarito com o protótipo posicionado para ser soldado.

- 3.2.2) Construção de um dispositivo para soldagem robotizada dos andaimes: depois de testada a soldagem robotizada usando o mini-gabarito construiu-se outro gabarito que permitiu soldar andaimes sem necessidade de ponteamto anterior. Este novo gabarito consiste de uma grade tubular com apoios (cantoneiras) que tem como objetivo suportar os tubos que formaram os andaimes na posição correta. Para permitir uma maior versatilidade, foi feita uma estrutura ajustável para soldagem dos vários modelos de andaimes. Adicionalmente, grampos de fixação rápida foram incluídos no projeto, visando facilitar a colocação e retirada dos tubos no gabarito e suportando as possíveis distorções geradas pela soldagem.
- 3.2.3) Definição de parâmetros para soldagem robotizada: depois de serem executados vários testes de soldagem, foram definidos os parâmetros para a soldagem dos andaimes usando o robô. Após a definição das possíveis variáveis de soldagem, foi feita uma avaliação das juntas soldadas.
- 3.2.4) Avaliação das juntas soldadas: para avaliação das juntas soldadas, foram feitos dois tipos de ensaios: ensaios macrográficos e ensaios mecânicos, no caso, o ensaio de tração.

3.2.5) Medição de distorções durante a soldagem: foi feito um estudo para monitorar as distorções durante a soldagem dos andaimes, para isso foram fixadas fontes de laser em pontos próximos as juntas a serem soldadas dos andaimes. Durante a evolução das distorções devida a operação de soldagem, as projeções dos lasers variam de posição num anteparo posicionado à frente dos mesmos. Marcando-se as posições projetadas em intervalos de tempo, teve-se o histórico das distorções monitorada em um ponto afastado do cordão de solda. Nestes testes, a medida que a soldagem era executada, marcava-se pontos em um painel localizado à dois metros de distância do gabarito, sendo que a primeira marcação correspondeu ao momento antes da soldagem (ponto 0). A segunda ao final da soldagem do primeiro lado do andaime (ponto 1). A terceira depois da soldagem do outro lado do andaime (ponto 2), e a última, dois minutos após o fim da soldagem e abertura dos grampos que prenderam os tubos (ponto 3). Repetiu-se cada sequência de soldagem pelo menos cinco vezes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Testes de Soldagem Robotizada Usando do Mini-gabarito

Com o auxílio do mini-gabarito, uma seqüência de soldagem foi elaborada de modo que conseguiu-se realizar soldas distribuindo bem o calor elevado. Isso significa que as possíveis distorções e consequentes tensões residuais a que estariam submetidos os andaimes, seriam substancialmente reduzidas, sem prejudicar no entanto a produtividade, uma vez que o tempo de deslocamento do robô é desprezível. Com essas diretrizes, a Fig. (3a) apresenta a seqüência de soldagem com o robô e a Fig. (3b) apresenta o aspecto visual do cordão de solda realizado com o robô.

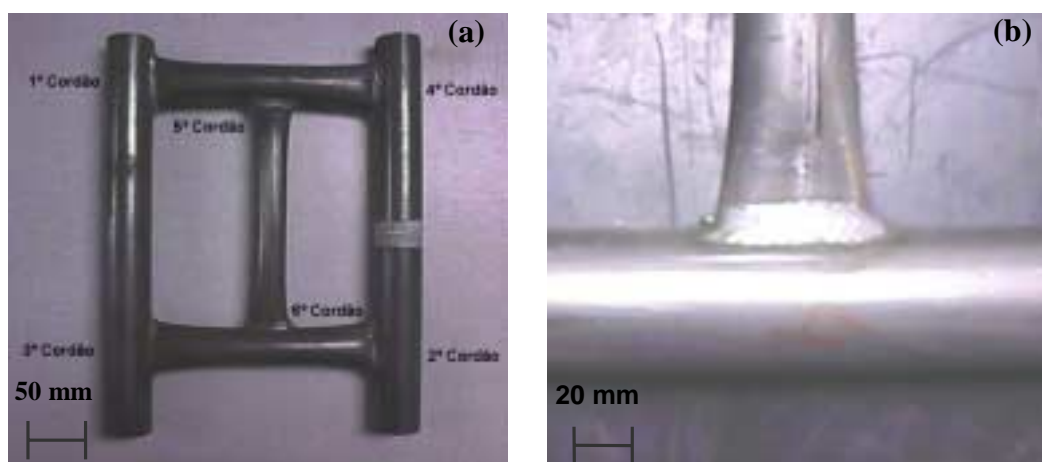


Figura 3. Em (a), uma seqüência de soldagem utilizando o robô e em (b), o aspecto visual da solda obtida pelo processo robotizado.

4.2 Construção de um Dispositivo para a Soldagem Robotizada dos Andaimes.

Como já tinha sido dito, o tipo de robô utilizado foi um robô Motoman SK6, cujo espaço de trabalho é insuficiente para realizar a soldagem de todos os andaimes da linha de fabricação da MECAN e, portanto, escolheu-se realizar todos os testes com o andaime tubular 1x1.

Na Fig. (4) está apresentado o projeto renderizado do gabarito definitivo com os andaimes tubulares 1 x 1, 1 x 1,5 e 1 x 2. Na Fig. (5), pode-se observar o gabarito com o andaime 1 x 1 posicionado para a soldagem.



Figura 4. Desenho renderizado do gabarito com os andaimes tubulares .



Figura 5. Foto mostrando o gabarito com o andaime tubular 1 x 1 posicionado para a soldagem.

4.3 Definição de Parâmetros para a Soldagem Robotizada.

Para determinar os parâmetros de soldagem foram feitos testes envolvendo três tipos de análise: inspeção visual, análise macrográfica e ensaio de tração.

Para uma melhor visualização da seqüência de operação, a Fig. (6) ilustra a trajetória do arco elétrico programada no robô.

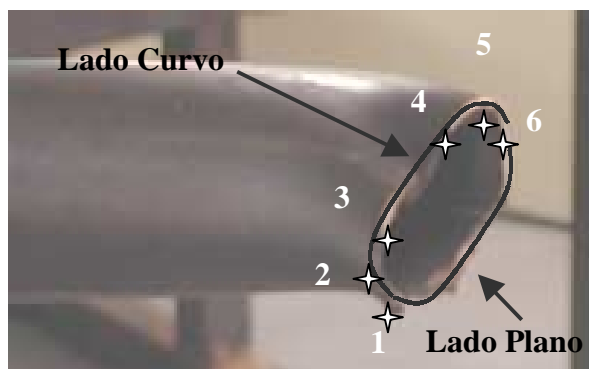


Figura 6. Foto mostrando o corte do tubo

Devido a geometria da junta variar em função do corte do tubo, trabalhou-se com dois conjuntos de parâmetros de soldagem. Voltando a Fig. (6), observa-se que um dos lados do tubo, na posição do corte, é mais linear que o outro, portanto, este lado foi chamado de lado plano e o outro, que apresenta uma trajetória mais circular, foi chamado de lado curvo.

Foram testadas cinco seqüências de soldagem. A Tab. (2) mostra um desenho esquemático de um andaime com letras identificando cada cordão de solda e também a ordem que os cordões foram executados para cada seqüência de soldagem. Ao se girar o andaime a seqüência do outro lado é a mesma.

Tabela 2. Posição de cada cordão no andaime 1x1 e as seqüências de soldagem usadas.

Posição do Cordão	Seqüências de Soldagem				
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
A	1°	1°	3°	4°	1°
B	4°	3°	2°	2°	4°
C	3°	4°	1°	1°	2°
D	2°	2°	4°	3°	3°

A Tab. (3) apresenta uma faixa de parâmetros de soldagem usados nos testes experimentais.

Tabela 3. Faixa de parâmetros usados para a soldagem robotizada dos andaimes tubulares.

Parâmetros Variados					Valores Constantes
Corrente (A)	Voltagem (V)	Stick Out (mm)	Velocidade (mm/s)	Tempo médio para cada cordão (s)	Vazão do gás: 20 l/min Argônio + CO ₂ + O ₂ Arame: ER70S6 com 1,2 mm de diâmetro
180 a 240	19 a 20	15	32 a 40	10	

4.4 Avaliação das Juntas Soldadas

A Fig. (7) mostra a macrografia dos cordões de solda do lado curvo e plano realizados pelo robô. Em ambos os casos é possível observar uma forma bem simétrica do cordão de solda.

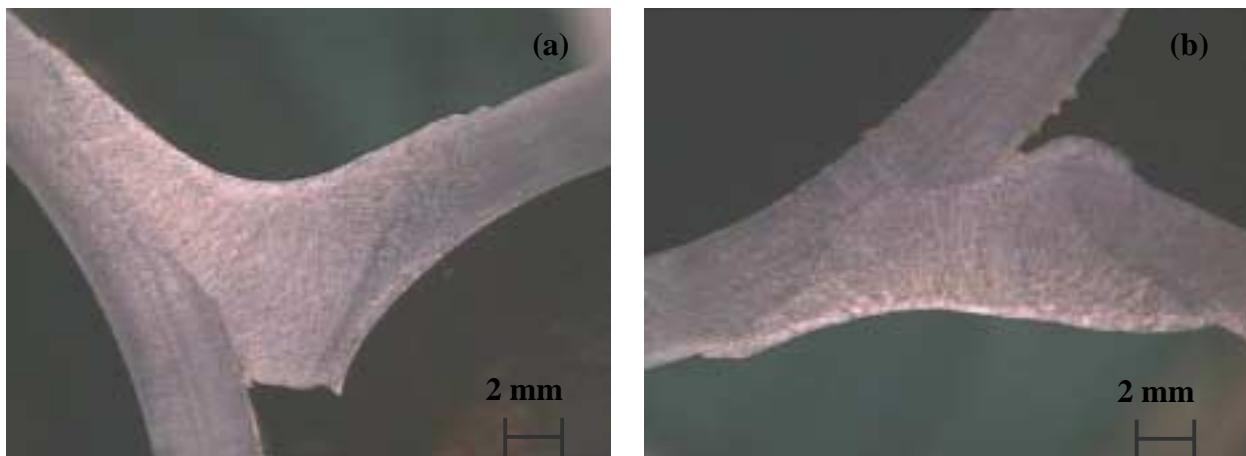


Figura 7. Macrografia do cordão de solda realizado no tubo. A foto (a) representa a junta não plana e a foto (b) representa a junta plana.

Na Fig. (8) estão apresentadas duas fotos de corpos de prova (CP) usados para os ensaios de tração. O CP mostrado na Fig. (8a) foi soldado manualmente, na empresa, e o CP apresentado na Fig. (8b) foi soldado com o robô, em laboratório. A idéia de usar corpos de prova na forma de um T vem do fato de que nos andaimes as juntas são todas em T.



Figura 8. Fotos dos corpos de prova usados para o ensaio de tração soldados manualmente em (a) e soldados pelo robô (b).

Pelas fotos verifica-se que a ruptura a tração dos CP's soldados com o robô ocorreu longe da ZTA, confirmando desta maneira a qualidade da soldagem feita nas juntas soldadas com o robô. Pela figura ampliada dos cordões de solda, nota-se que não houve qualquer modificação visível no cordão de solda depois do ensaio.

A resistência das juntas soldadas ao ensaio de tração ficou na faixa de 11 toneladas mantendo uma resistência bem próxima àquelas soldadas manualmente, com uma diferença marcante, a ruptura, no caso dos corpos de prova soldados manualmente, ocorreu na ZTA e no caso dos corpos de prova soldados no robô, a ruptura ocorreu no tubo, bem afastada do cordão de solda. Portanto, considerando que a ruptura ocorreu no tubo e não na solda, independe de quanto foi o valor da ruptura, visto que o ponto de interesse no caso, o cordão de solda não sofreu alterações.

Em alguns ensaios à tração, o tubo do CP rompeu com valores bem abaixo do esperado, comprovando desta forma a baixa resistência do tubo ao ensaio de tração. Isso pode ser consequência de problemas inerentes ao processo de fabricação e corte dos tubos para montagem dos andaimes.

4.5 Medição de Distorções Durante a Soldagem

De acordo com a metodologia apresentada, realizaram-se testes de medição de distorção do andaime durante a soldagem, utilizando-se lasers posicionados em quatro pontos, próximas as juntas a serem soldadas.

Como resultado do comportamento dos lasers, obteve-se os gráficos conforme mostrados na Fig. (9), para uma das sequências testadas (no caso a sequência S_1). Os gráficos para cada posição do laser foram colocadas na folha obedecendo a mesma posição do andaime.

Pelos gráficos foi possível verificar qual laser apresentou maior deslocamento, ou seja, deformação em relação aos eixos X e Y. Analisando os gráficos da Fig. (9) (sequência S_1) tem-se que, como todas as soldas foram realizadas na posição vertical descendente, sem ponteamento, no momento em que se começa o cordão, os tubos têm tendência a girar por causa da contração transversal das soldas. A contração faz com que os lasers se desloquem para a esquerda (no caso das posições 2 e 3) e para a direita (no caso das posições 1 e 4) e a rotação faz com que os laser se desloquem para baixo (no caso das posições 1 e 2) e para cima (no caso das posições 3 e 4). Após terminada a soldagem marcou-se o segundo ponto de cada linha do gráfico apresentado. Todo o raciocínio até agora foi para o primeiro lado da estrutura a ser soldado. Depois de ter realizado toda a soldagem do primeiro lado, girou o gabarito e posicionou o segundo lado do andaime para ser soldado. O terceiro ponto de cada linha corresponde a soldagem do segundo lado do andaime. Neste momento o andaime já estava todo travado e impossibilitado de rodar. Então, pelo gráfico, nota-se

que os lasers se deslocaram mais fortemente para a direita ou para esquerda e bem menos para cima ou para baixo. Esse deslocamento foi causado pela contração transversal ocorrida, no sentido contrário do primeiro lado do andaime.

No caso das demais sequências (S_2 , S_3 , S_4 e S_5), o comportamento foi análogo ao da sequência S_1 , porém com uma pequena diferença imperceptível nos valores dos deslocamentos para cada sequência de soldagem.

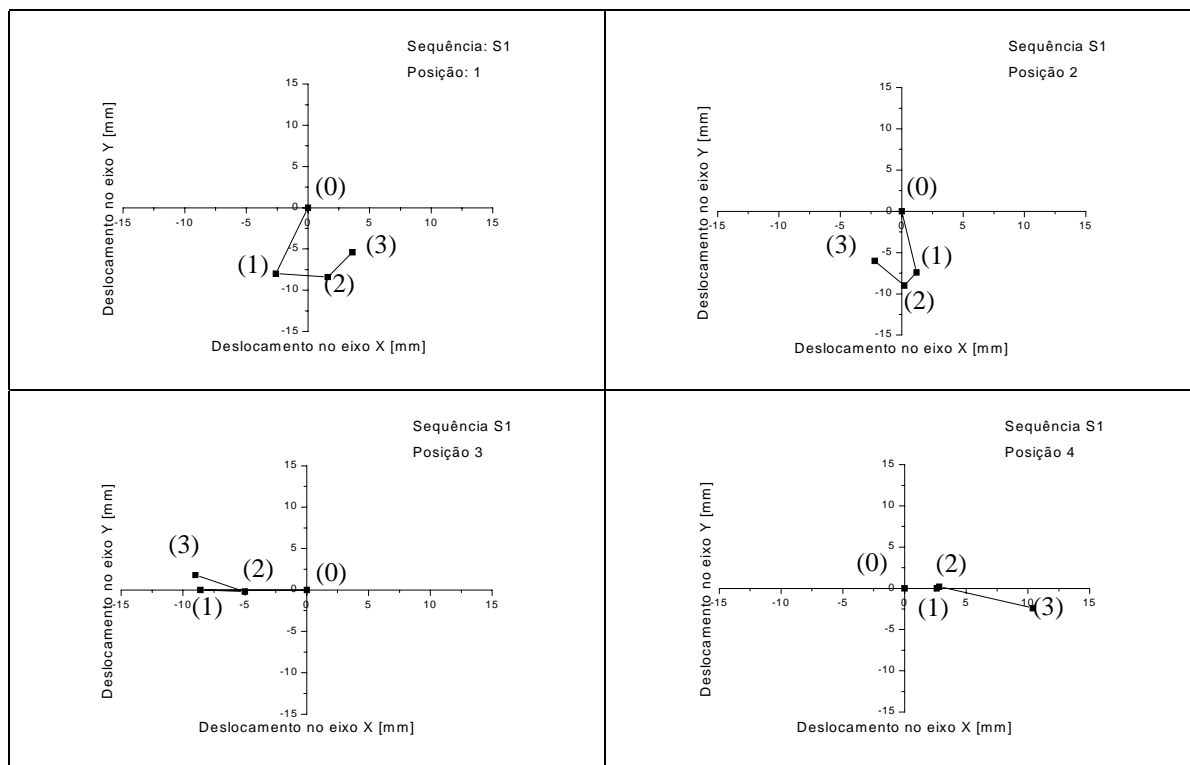


Figura 9. Gráficos mostrando as trajetórias descritas pelos lasers para a sequência S_1 , colocado nas quatro posições. A ponto (0) é uma marcação feita antes de soldagem; o ponto (1) após a soldagem do primeiro lado do andaime; o ponto (2) após a soldagem do segundo lado do andaime e o ponto (3) após a abertura dos grampos.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos corresponderam ao esperado. Para o andaime tubular 1x1 conseguiu-se reduzir o tempo de fabricação de 20 % em relação ao tempo de soldagem manual. Para os outros dois modelos de andaimes tubulares, respectivamente para os andaimes tubulares 1 x 1,5 e 1 x 2, fez-se uma estimativa dos tempos de soldagem robotizada, encontrando valores estimados de 28% e 30% de economia de tempo em relação a soldagem manual. O ponteamto, uma das etapas do processo de fabricação, pode ser eliminado, contribuindo, desta forma para redução do tempo de fabricação dos andaimes sem prejudicar a qualidade dos mesmos. Comprovou-se, através da análise macrográfica, melhoria na penetração dos cordões de soldas e, através de ensaios mecânicos, aumento da resistência a tração das juntas.

Um estudo de sequências de soldagem que minimizam o aparecimento de distorções e tensões residuais foi desenvolvida. A partir desse estudo, comprovou-se que com um sistema eficiente para travamento dos tubos para a soldagem, não houve variações significativas de distorções, certamente geraram poucas tensões residuais. A variação dimensional dos produtos acabados diminuiu consideravelmente em relação aos produtos soldados manualmente.

Quanto ao dispositivo construído e usado para a soldagem, comprovou-se sua funcionalidade, tornando possível soldar em todo contorno das juntas sem a necessidade de retirar a peça, além de facilidade de colocação e de retirada da peça do dispositivo.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FINEP, pelo auxílio financeiro através do projeto nº 1576/96, “Robótica – Automação Industrial de Processos de Soldagem” e à MECAN – Indústria de Máquinas e Equipamentos para Construção Civil, por disponibilizar materiais suficientes pelo projeto. O autor Alexandre Gondim gostaria de agradecer à CAPES pela bolsa de mestrado.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Welding Society - AWS, *Welding Handbook*; Welding Technology, Miami, 8º ed., Vol. 1 e 2, 1987.
- “Automação da Soldagem” – Reportagem especial da revista Soldagem & Materiais, ABS, Vol. 4 - Nº 1. P. 10-11, Jan./Mar 1992.
- Bracarense, A. Q. & Rogana, W. G. – “Fixadores e Posicionadores para Soldagem Robotizada”. Revista Soldagem e Inspeção – Associação Brasileira de Soldagem. Ano 6 - Nº 2, Maio/2000.
- Cary, H. B., *Modern Welding Technology*. 2º ed., 1989.
- Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem - FBTS, Rio de Janeiro, 1983, Vol. 1.
- Gondim, A. “Soldagem Robotizada de Andaimos”, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Dissertação de Mestrado Nº 160, Belo Horizonte, 2001, 124p.
- Mandal, N. R. & Sundar, I. G. “Analysis of Welding Shrinkage” – Welding Journal, Miami (EUA), P. 233-238, Jan/1997.
- Masubuchi, K. “Research Activities Examine Residual Stress and Distortion in Welded Structures”. Welding Journal, p.41-47, Dezembro/1991.
- Mota, J.C. “Robôs com Periferias Padronizadas Simplificam Operações em Soldagem”. Revista Soldagem & Materiais, ABS, Vol. 4 - Nº 1. P. 21-24, Jan./Mar 1992.
- Okumura, T. & E Taniguchi, C. “Engenharia de Soldagem e Aplicações”. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 456p., 982.

ROBOTIZED WELDING OF TUBULAR SCAFFOLDS

Abstrat: *With the need to increase the production, keeping products costs on low level, the industries started to look for solutions to enable them to improve quality and to increase competency. This work address a case study of a methodology of welding robotization adopted in a medium size company, leader in the market of equipments for civil construction. The welding process used now it is GMAW (Gas Metal Arc Welding). The first part of the line of chosen production to be robotizada was the line of production of scaffolds, the great challenge it was to get to compensate with the control of the welding parameters the great dimensional variation of the pieces, as they are prepared and as they are welded manually. For fixation of the pieces for the welding, it was projected and built an universal jig to weld the scaffolds with the robot SK6 of Motoman available in the laboratory. Several welding sequences were tested for the scaffolds on the welding. It can be noted that the time of tubular scaffolds production was reduced by 30%, besides a considerable increase in the welding quality and product finishing.*