



PROJETO DE UM SIMULADOR DINÂMICO DE CARREGAMENTO PARA MINIMIZAÇÃO DE DISTORÇÕES E TENSÕES TÉRMICAS E RESIDUAIS GERADAS EM CORDÕES DE SOLDA

Wagner G. Rogana – Mestrando

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos 6627, Campus Universitário, 31.270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Alexandre Q. Bracarense - PhD

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos 6627, Campus Universitário, 31.270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

***Resumo.** Este artigo tem por finalidade apresentar o projeto de um dispositivo capaz de monitorar distorções e tensões térmicas durante uma operação de soldagem. O dispositivo foi projetado com atuadores, sensores de carga e sensores de deslocamento, e é capaz de monitorar a evolução das deformações macroscópicas e das forças produzidas pelas tensões térmicas, devido a operações de soldagem, em diferentes pontos de um corpo-de-prova. Além disto, o dispositivo é capaz de simular carregamentos externos de maneira controlada. Para comprovar que os atuadores e os sensores, posicionados em pontos remotos ao cordão de solda são capazes de descrever a evolução das distorções em tempo real, realizou-se diversas soldagens sobre chapas engastadas em uma extremidade e livre na outra, monitorando a distorção angular, utilizando-se fontes de laser fixadas em posições paralelas e afastadas do cordão de solda. As distorções foram acompanhadas ao longo do tempo posicionando uma folha de papel milimetrada afastada das fontes de laser, e marcando-se os pontos sobre esta folha durante e após a realização do cordão de solda.*

Palavras-chave: Distorção, Tensões térmicas, Tensões residuais.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem representa um dos processos de fabricação mais importantes dos últimos tempos. A evidencia da evolução do processo de soldagem é observada em uma explosiva revolução nas pesquisas, atingindo principalmente a área de automação (robótica). A tecnologia de robótica é atualmente uma das áreas mais importantes na corrida para a produtividade, repetibilidade e melhoria da qualidade de produtos soldados, desde que se façam ajustes, afim de alcançar os resultados esperados (Tremonti, 1998).

Na soldagem robotizada, destaca-se o processo por arame contínuo sob proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding - GMAW) dentre os processos de soldagem a arco elétrico. Este processo se caracteriza por ter um alto rendimento térmico, uma alta produtividade, baixo custo e racionalização do tempo requerido para a execução da tarefa de soldagem (American

Welding Society - AWS, 1991). De forma simplificada, na soldagem GMAW robotizada, ao invés do homem, é o robô o responsável pelo deslocamento da tocha de soldagem. Para isto, toda uma adaptação entre a máquina de soldagem e o manipulador, juntamente com um microcomputador, foi desenvolvida. Com o uso de uma interface, programa-se a trajetória a ser seguida pela tocha de soldagem, os parâmetros de abertura e extinção do arco, assim como os parâmetros de soldagem e deslocamento. Pela otimização dos parâmetros de soldagem e da trajetória da tocha de soldagem, consegue-se aumentar a produtividade garantido a repetibilidade do processo com qualidade assegurada.

A soldagem robotizada exige um melhor desempenho dos dispositivos posicionadores, sensores e das fontes de solda integradas ao sistema lógico e de potência do robô. Também é preciso que sejam garantidas não apenas a qualidade dimensional e intercambialidade das peças, mas a capacidade de repetição do processo, ao longo de toda a produção.

Para se ter um processo automatizado, os parâmetros de soldagem devem ser, além de monitorados, manipulados durante o processo. A manipulação destes parâmetros deve visar a minimização de problemas resultantes da soldagem, como por exemplo, problemas resultantes de efeitos térmicos, tais como tensões residuais e distorções.

Como nem sempre é possível evitar a distorção durante a fabricação, várias técnicas podem ser utilizadas para a sua minimização (Jones et al., 1993). Entretanto, o trabalho para corrigir as distorções não são simples, envolvendo custos e necessitando de uma considerável dose de habilidade para se evitar danos ao componente (Lucas et al., 1998). A adoção de um procedimento de soldagem é usualmente determinada mais por requisitos de produtividade e qualidade do que pela necessidade de controlar a distorção. Mas o processo de soldagem, a técnica e a seqüência influenciam o nível de distorção.

Há várias técnicas de se avaliar as tensões residuais e as distorções, mas a maioria delas não são utilizadas em tempo real (Radaj, 1992). Além disto, os resultados de um teste só podem ser comparados com outros resultados produzidos por este mesmo teste. Esse fato está relacionado com a natureza empírica dos métodos de avaliação (Nelson, 1986).

Visando desenvolver uma nova técnica de se avaliar e controlar as tensões térmicas e residuais, bem como as distorções, este trabalho tem como principal objetivo descrever o projeto de um equipamento capaz de monitorar as tensões térmicas e as distorções, além de poder atuar no sistema de maneira controlada durante a realização de uma operação de soldagem. O que está se buscando, então, é a otimização da união entre peças, reduzindo-se custos com a usinagem, com o tempo de posicionamento e com os gastos de energia elétrica, dentre outros fatores, através da análise e do controle das solicitações.

2. TESTES EXPERIMENTAIS

Afim de verificar a viabilidade da utilização de sensores localizados em pontos afastados do cordão de solda no dispositivo a ser criado, testes experimentais de soldagem de cordões sobre chapa foram realizados, onde fontes de laser foram fixadas na extremidade livre de chapas engastadas de aço baixo carbono (ABNT 1020). A abertura do arco ocorreu no ponto base, conforme mostrado na figura 1, e a extinção do arco ocorreu após 35 segundos do início da soldagem. Durante a evolução das distorções devido as tensões térmicas, o feixe de laser varia de posição sobre um papel posicionado à distância. Marcando-se as posições deste feixe, em intervalos de tempo, tem-se a evolução das distorções em função do tempo de monitoramento, em um ponto afastado ao cordão de solda. Para evitar que as marcações do feixe de laser ficassem aglomeradas em apenas uma região, dificultando a definição da seqüência das medições, optou-se por deslocar o sistema de marcação (folha de papel milimetrada fixada em um suporte).

O processo de soldagem utilizado foi o GMAW (Gas Metal Arc Welding) aplicado de forma mecanizada (Felizardo, 1997), em um dispositivo que propiciou o deslocamento da tocha de soldagem com velocidade constante. Utilizou-se uma máquina de soldagem com característica estática do tipo tensão constante, corrente contínua e em polaridade inversa. Procurou-se realizar cordões de solda mantendo-se constante o aporte térmico durante o teste. Para permitir a comparação entre os testes, manteve-se inalterados os parâmetros de soldagem: corrente de $148 \pm 2A$, tensão de soldagem de 22,6V, gás de proteção do tipo MIX 20 (20% CO_2 e 80% Ar) com vazão de 18 l/min, velocidade de soldagem de 2,13 mm/s, eletrodo do tipo ER 70S-6 com diâmetro de 0,8mm, temperatura ambiente de 25°C, distância entre a extremidade do bico de contato e a peça de trabalho ("stick out") de 9,5mm e 2,15g de material de adição depositado por centímetro de solda.

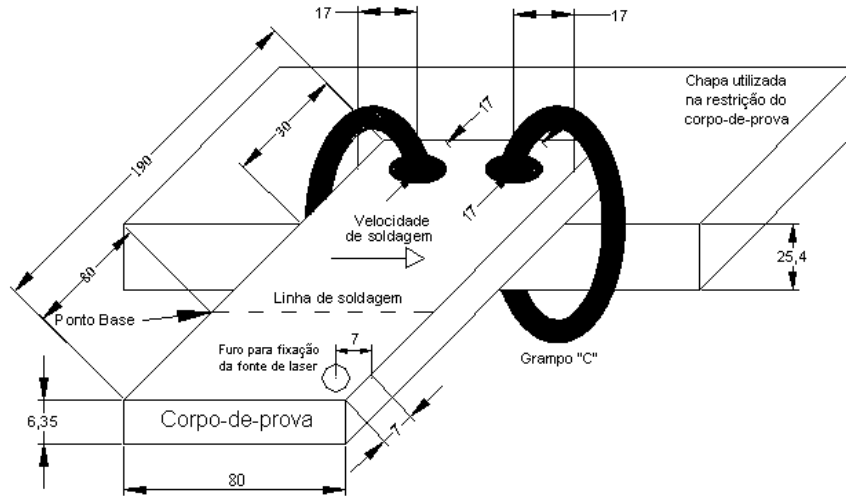


Figura 1 – Geometria dos corpos-de-prova

Após a coleta de dados, foi realizado o processamento dos resultados. Tomou-se como referência, o ponto correspondente ao tempo igual a zero. A variação dos deslocamentos foi medida na direção vertical, sendo igual a diferença entre a posição do feixe de laser no instante de tempo considerado e a referência. A figura 2 mostra a evolução da distorção angular dos testes experimentais realizados.

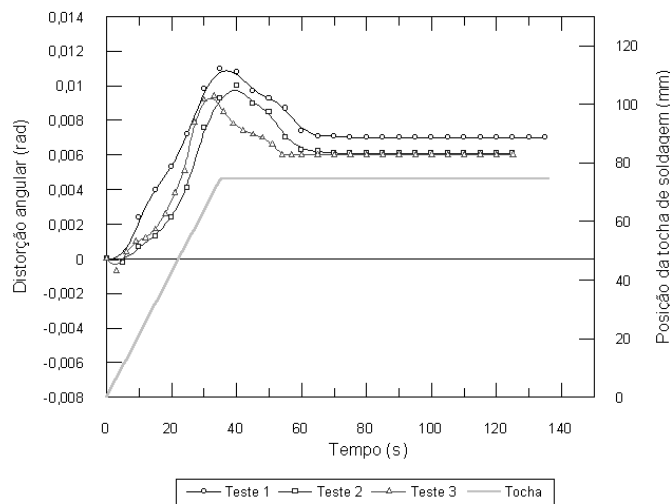


Figura 2 – Evolução da distorção angular em função do tempo.

A figura 3 mostra a curva de regressão polinomial cúbica feita nos testes. A curva foi obtida utilizando-se como ferramenta, o programa "MINITAB 11". Traçou-se o diagrama de dispersão dos pontos, assim como a curva correspondente a regressão polinomial cúbica (e a sua equação) e o intervalo de confiança de 80%. O valor "R-Sq" (r^2) igual a 0,758 corresponde a variação explicada pela curva de regressão (75,8%). Valores inaceitáveis de regressão ocorrem quando $r^2 < 0.5$ e boas regressões ocorrem quando $r^2 > 0.7$ (Juran, 1988; Costa Neto, 1977; Stevenson, 1981).

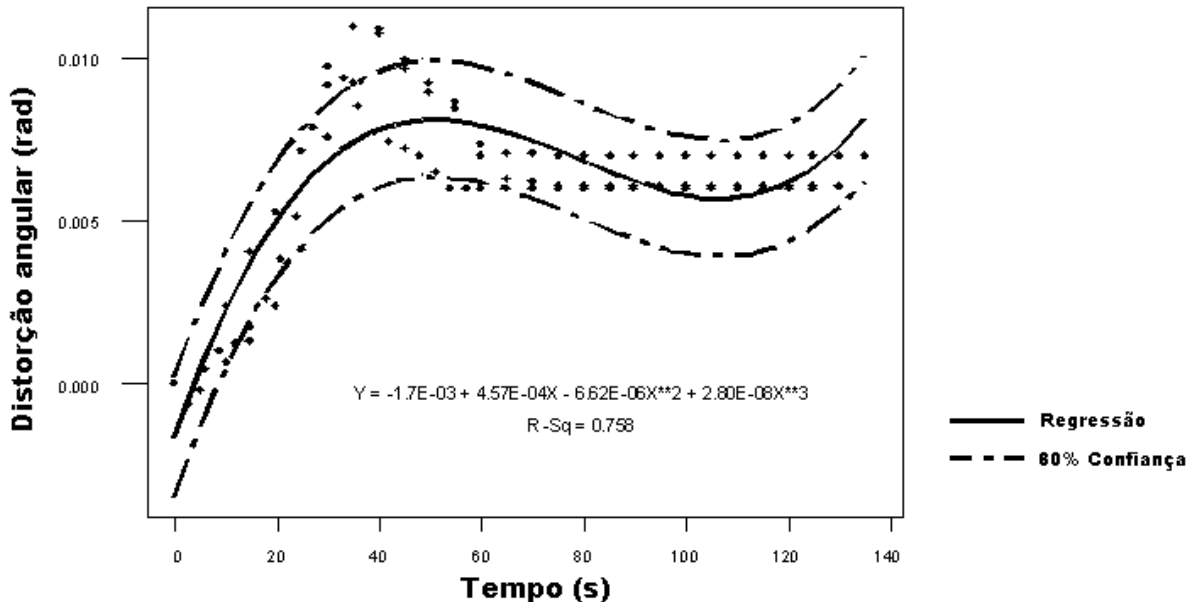


Figura 3 - Regressão polinomial cúbica da distorção angular em função do tempo.

Embora as curvas correspondentes a evolução da distorção angular não tenham apresentado semelhança visual, se comparadas com a curva correspondente ao polinômio de terceiro grau, foi considerado que os testes eram repetitivos. Por conseguinte, sensores posicionados na extremidade de uma chapa foram capazes de monitorar as deformações produzidas pelos ciclos térmicos, devido a soldagem.

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O EQUIPAMENTO

A primeira etapa do projeto foi a definição clara dos objetivos do dispositivo ou equipamento. Após a análise da fotografia de um equipamento existente na Alemanha, traçou-se as necessidades que o Equipamento para Monitoramento e Controle das Distorções e Tensões devido à Soldagem – EMCDDTS - deveria satisfazer.

Após a definição dos objetivos, deu-se início a fase de questionamentos. A primeira concepção que se teve foi a de que o equipamento seria de teste. Entretanto, após uma análise mais minuciosa dos componentes, verificou-se que o EMCDDTS também seria capaz de simular carregamentos e condições externas impostas. Portanto, o EMCDDTS possui também a finalidade de monitorar, controlar e simular solicitações em peças submetidas ao processo de soldagem.

Através de uma revisão bibliográfica, analisou-se vários artigos para se verificar o tempo máximo necessário para o completo resfriamento de um corpo-de-prova cuja espessura não exceda 25,4 mm (AWS, 1991; Mazzaferro e Machado, 1992; Michaleris e DeBiccari, 1997; Dong et al., 1997; Ravichandran et al., 1997; Jones et al., 1993; Agapakis e Masubuchi, 1984). Contudo, as mudanças de tendência dos gráficos das tensões térmicas ou

deslocamentos em função do tempo, ocorrem em faixas bem específicas. Logo, o tempo previsto para a execução de um teste (monitoramento, ou controle, ou simulação) não deve ser superior a três horas.

A vida útil do EMCDTs não é fator de grande relevância para a fabricação de um protótipo. Como esse equipamento possui caráter didático e de pesquisa, os componentes não precisam ser dimensionados segundo critérios de fadiga do material de seus componentes. Entretanto, se no futuro for projetado mesas posicionadoras de peças para trabalhar em processos seriados, seguindo os princípios do EMCDTs, deve-se refazer os cálculos de dimensionamento no sentido de avaliar a influência da fadiga na vida útil desejada.

O custo dos componentes eletrônicos e mecânicos deve ser viável comercialmente, ou seja, não poderá ultrapassar o valor de um robô de soldagem. Essa restrição é imposta, uma vez que se deseja no futuro projetar mesas posicionadoras para peças a serem soldadas por robôs de soldagem em processos seriados.

Com relação ao tamanho do equipamento, inicialmente, trabalhou-se com um corpo-de-prova de dimensões limites de 700x400x20 mm. Porém, considerando que a intensidade das tensões térmicas é uma função, dentre outras variáveis, da espessura do material, um cuidado especial deve-se ter quanto as solicitações provenientes dos ciclos térmicos aplicados a peça.

4. ESBOÇO DO EQUIPAMENTO E DESCRIÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DOS ATUADORES

Após a fase de definição dos objetivos do equipamento, fez-se um esboço do EMCDTs, conforme mostrado na figura 4. Após o esboço do equipamento, analisou-se a influência da movimentação dos atuadores no corpo-de-prova fixado no equipamento, observando que o tipo de distorção definido tem como referência o volante móvel, podendo este não corresponder ao tipo de distorção definido pela literatura (Okumura e Taniguchi, 1982).

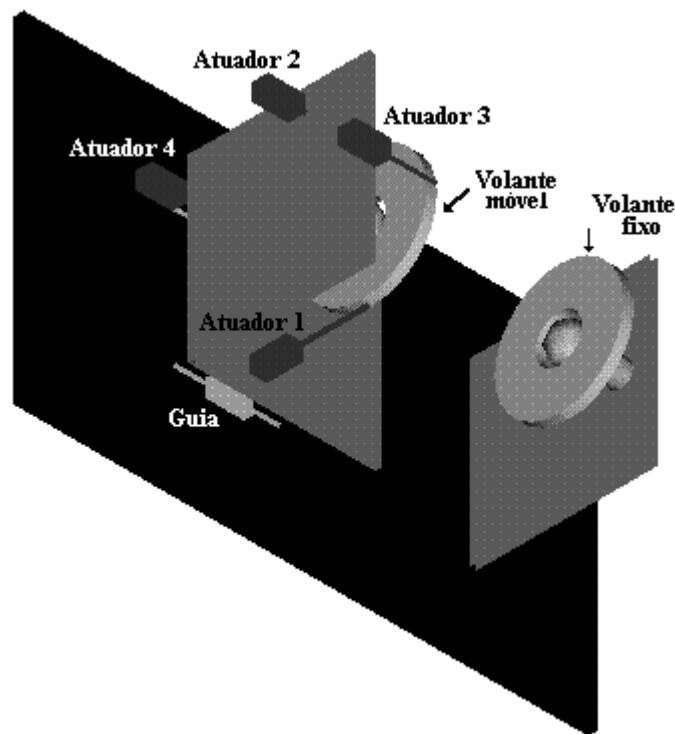


Figura 4 - Esboço do EMCDTs.

O atuador nº 1 é o responsável pela torção do volante. Quando apenas esse atuador avançar ou retrain, o movimento produzido no corpo-de-prova será o de distorção angular. A figura 5 mostra o resultado produzido pelo seu avanço.

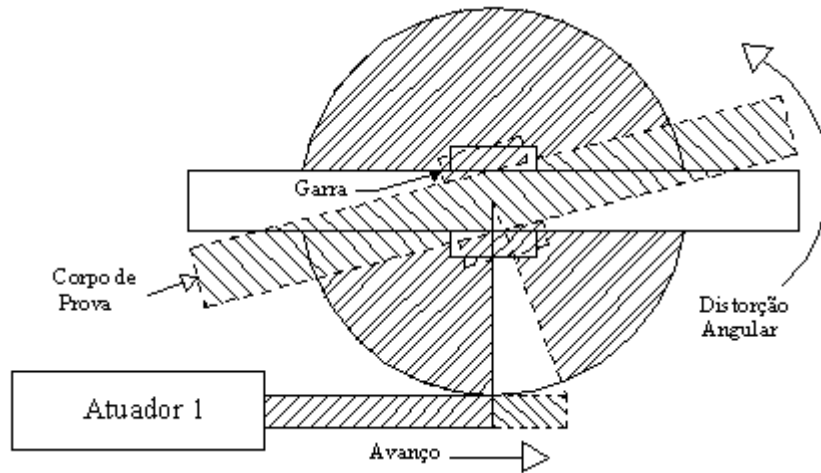


Figura 5 - Movimentação de avanço do atuador nº 1.

O atuador nº 2 é o responsável pela torção horizontal do volante. Quando apenas esse atuador avançar ou retrain, o movimento produzido no corpo-de-prova será o de distorção rotacional no plano. A figura 6 mostra o resultado produzido pelo seu avanço.

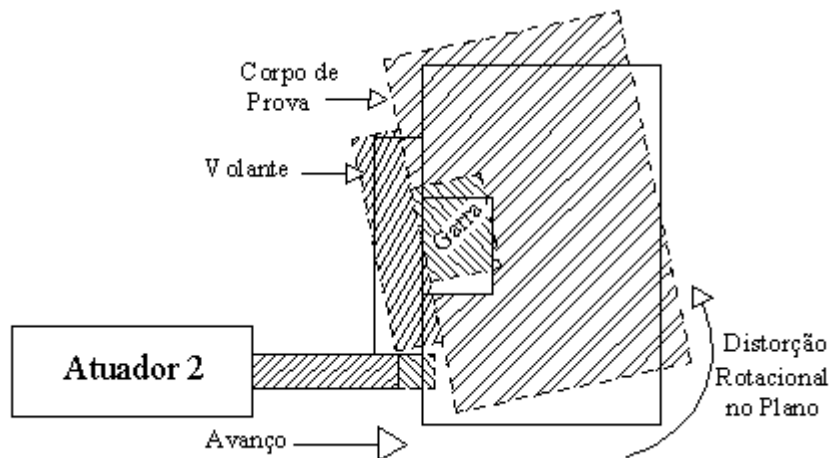


Figura 6 - Movimentação de avanço do atuador nº 2.

O atuador nº 3 é o responsável pela torção vertical do volante. Quando apenas esse atuador avançar ou retrain, o movimento produzido no corpo-de-prova será o de flexão longitudinal. A figura 7 mostra o resultado produzido pelo seu avanço.

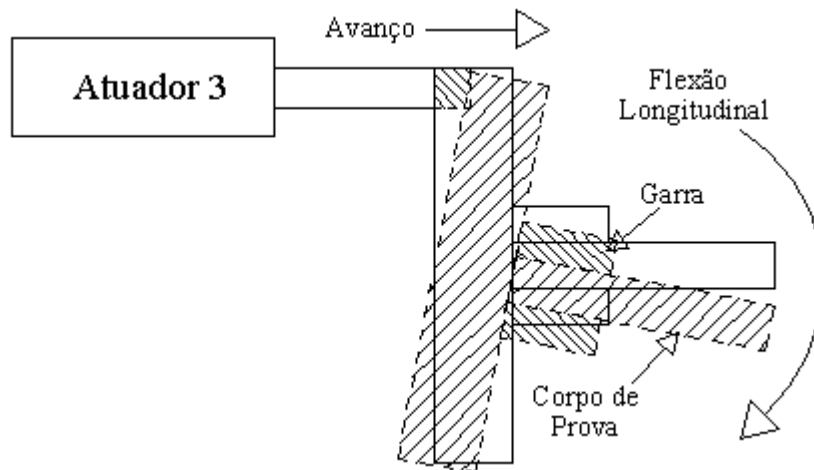


Figura 7 - Movimentação de avanço do atuador nº 3.

O atuador nº 4 é o responsável pelo deslocamento linear do conjunto formado pelos outros atuadores, o volante e seus componentes, além da chapa de encosto e o eixo de suporte do volante. Quando apenas esse atuador avançar ou retrair, o movimento produzido no corpo-de-prova será o de deformação transversal. A figura 8 mostra o resultado produzido pelo seu avanço.

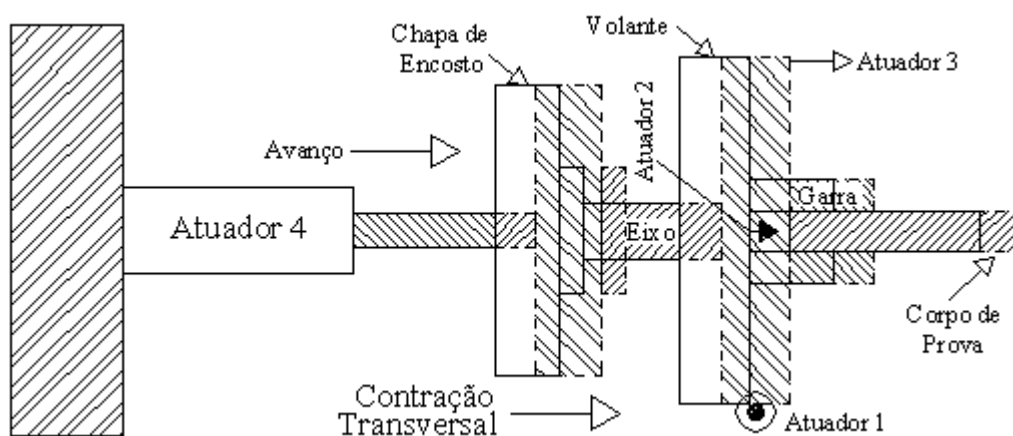


Figura 8 - Movimentação de avanço do atuador nº 4.

5. MONITORAMENTO DAS DISTORÇÕES

Para se realizar o monitoramento das distorções, deve-se prender um corpo-de-prova nas garras de fixação. O EMCDDTS permite o posicionamento do corpo-de-prova segundo os diversos os diferentes tipos de juntas: de aresta, em ângulo, de topo e sobrepostas. Primeiro, prende-se uma das juntas (ou uma lateral do corpo-de-prova) na garra de fixação do corpo-de-prova adjacente ao volante do equipamento. A seguir, fixa-se a outra junta (ou o outro lado do corpo-de-prova) na outra garra. Finalmente, posiciona-se o corpo-de-prova conforme o tipo de junta desejado. Caso o tipo de junta seja em ângulo, deve-se girar o suporte de fixação da garra do corpo-de-prova até o ângulo desejado. Caso o tipo de junta seja de aresta ou de topo ou sobreposta, deve-se verificar o posicionamento (alinhamento) entre as juntas, fazendo-se usos de "calços" (ou chapas finas) para o correto posicionamento.

O segundo passo é fixar o sensor de deslocamento (transdutor linear) na retaguarda dos atuadores, utilizando-se a sua haste e o suporte de fixação do transdutor linear, como mostrado na figura 9. Finalmente, deve-se configurar o sistema, informando-o que se deseja realizar o monitoramento de distorções. Isto significa que os atuadores funcionarão apenas como guias (não realizam trabalho), podendo-se deslocar nos dois sentidos. As distorções serão avaliadas pelo transdutor linear posicionado na retaguarda do atuador.

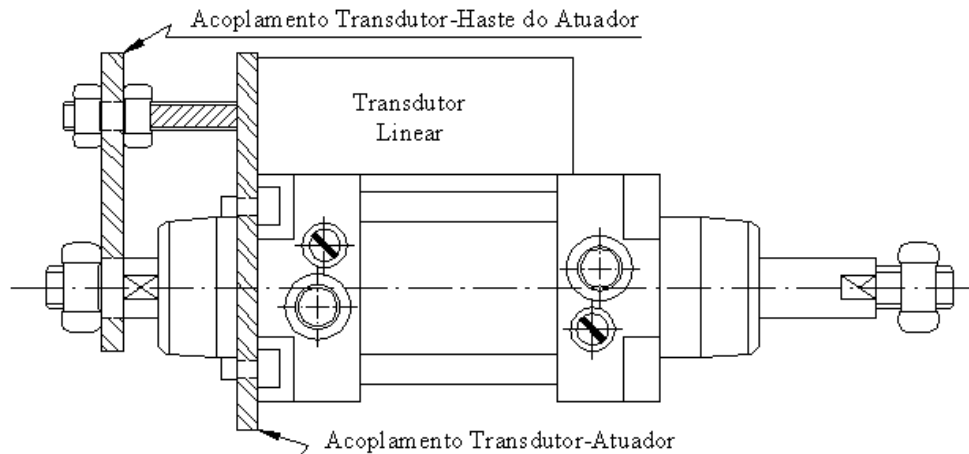


Figura 9 - Posição do transdutor linear.

Tendo em vista que o EMC DTS monitora os deslocamentos, em apenas um ponto (segundo um sistema de coordenadas espaciais), a solução para analisar vários pontos, ao longo do corpo-de-prova, é realizar vários testes mantendo-se constante os parâmetros de soldagem, as características do corpo-de-prova e o processo de soldagem, porém variando-se as coordenadas de monitoramento. Pode-se, por exemplo, cortar cinco corpos-de-prova de dimensões e material iguais. A seguir, divide-se o comprimento longitudinal do corpo-de-prova por seis, marcando sobre cada um, os intervalos encontrados, numerando-os sucessivamente. Finalmente, realiza-se os cinco testes em cada posição pré-definida, mantendo-se os demais parâmetros do processo constantes. A análise deste teste apresentará o histórico das distorções em um corpo-de-prova, ao longo de seu eixo longitudinal.

6. MONITORAMENTO DAS TENSÕES TÉRMICAS

Inicialmente, o corpo-de-prova é fixado na garra de fixação. O segundo passo é impedir o deslocamento da haste de cada cilindro pneumático, utilizando-se o travamento do atuador. Finalmente, deve-se configurar o sistema informando-o que se deseja realizar o monitoramento de tensões térmicas. Isto significa que os atuadores não realizam trabalho, sendo que o sensor de carga, posicionado entre a haste do atuador e a articulação esférica (ou acoplamento compensador angular), avaliará o seu carregamento devidas às tensões térmicas, em tempo real (figura 10).

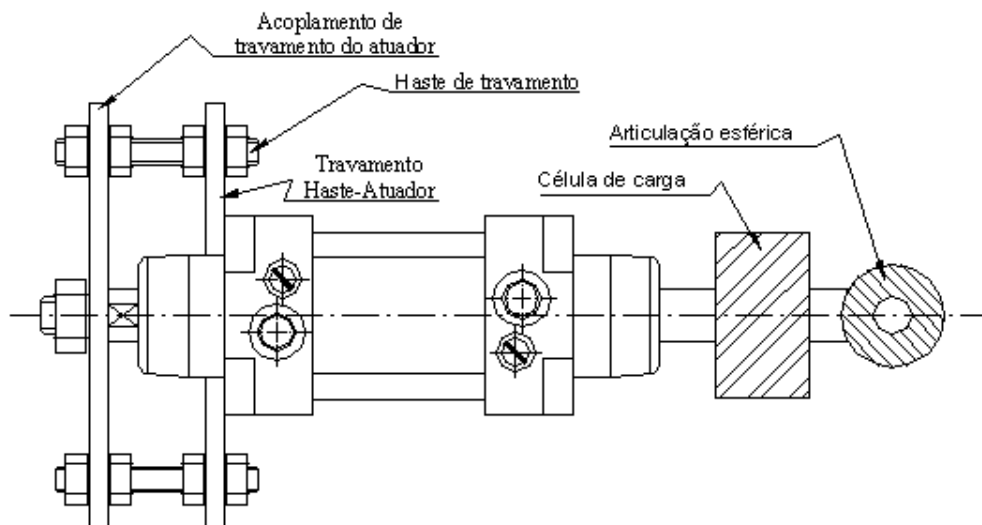


Figura 10 - Posição do sensor de carga.

7. LIMITAÇÃO DO EQUIPAMENTO

A principal limitação do EMCDDTS é que os dados coletados são provenientes da resultante das tensões térmicas produzidas durante a soldagem. Consequentemente, a obtenção de um modelo matemático é considerado como a principal dificuldade no controle das distorções no material. Embora o equipamento possibilita o desenvolvimento das distorções em apenas uma direção, bastando para isso fixar três atuadores e monitorando o deslocamento do quarto, a formulação matemática a partir desta análise pode levar a erros significativos, não validando o modelo proposto.

8. CONCLUSÕES

A partir do exposto neste artigo, pode-se concluir que:

- 1) Os ensaios experimentais mostraram que é possível monitorar as deformações em chapas submetidas a ciclos térmicos devido a operações de soldagem, através dos dados coletados por sensores de deslocamento em pontos afastados do cordão de solda;
- 2) O equipamento projetado e descrito deve ser capaz de monitorar os carregamentos de um corpo-de-prova submetido a um procedimento de soldagem térmico, em diferentes direções. Além disto, os dados adquiridos poderão ser analisados como dados discretos para uma formulação matemática das tensões térmicas (em tempo real), ou poderão ser re-introduzidos no controle do processo para fins de comparação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo auxílio financeiro recebido e a FESTO Ltda. pelo suporte técnico para o projeto do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agapakis, J. E., Masubuchi, K., 1984, Analytical modeling of thermal stress relieving in stainless and high strength steel weldments, *Welding Journal*, p.187-196.

- American Welding Society, 1991, Welding Handbook: Welding Technology. 8.ed., vol.1, Miami.
- Costa Neto, P. L. O., 1977, Estatística, Edgard Blücher, São Paulo.
- Dong, Y., Hong, J. K., Tsai, C. L., Dong, P., 1997, Finite element modeling of residual stresses in austenitic stainless steel pipe girth welds, Welding Journal, vol. 76, n. 10, pp.442-449.
- Felizardo, I., 1997, Estudo da evolução dos campos de temperatura gerados durante a soldagem, dissertação, UFMG, Belo Horizonte.
- Jones. B. K., Emery, A. F. and Marburger, S. J., 1993, An analytical and experimental study of the effects of welding parameters on fusion welds, Welding Journal, vol. 72, n. 2, pp.51-59.
- Juran, J. M., 1988, Juran's quality control handbook, McGraw-Hill Book Company.
- Lucas, B., Verhaeghe, G., Leggatt, R., Mathers, G., 1998, Distorção: Técnicas corretivas, Soldagem & Inspeção, ano 4, n.9, pp. 11-13.
- Mazzaferro, J. A. E., Machado, I. G., 1992, Método computacional para previsão de distorções em chapas de alumínio soldadas a topo pelo processo MIG, Soldagem & Materiais, n.4, p.36-41.
- Michaleris, P., DeBiccari, A., 1997, Prediction of welding distortion, Welding Journal, vol. 76, n. 4, pp.172-181.
- Nelson, D., 1986, Finding the stress hidden in parts, Machine Design, p.125-131.
- Okumura, T. e Taniguchi, C., 1982, Engenharia de soldagem e aplicações Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Cap.5, p.153-178: Distorções e tensões residuais devidas à soldagem.
- Radaj, D., 1992, Heat effects of welding, Springer-Verlag.
- Ravichandran, G., Raghupathy, V. P., Ganesan, N., Krishnakumar, R., 1997, Prediction of axis shift distortion during circumferential welding of thin pipes using the finite element method, Welding Journal, vol. 76, n. 1, pp.39-55.
- Stevenson, W. J., 1981, Estatística aplicada à administração, Harper & Row do Brasil, São Paulo.
- Tremonti, M. A. e Alves, A. S., 1998, Soldagem robotizada: o caso de sucesso da substituição da soldagem a arco elétrico com proteção gasosa manual pela robotizada, Soldagem & Inspeção, n.12, p.14-28.

MINIMIZATION OF DISTORTION AND THERMAL AND RESIDUAL STRESSES IN WELD BEAD THROUGH A SIMULATOR OF SELF-LOADING

Abstract. *This paper describes a device capable to monitor distortions and thermal stresses during welding. The device was designed with actuators and load and displacement sensors capable to monitor microscopic deformation evolution and loads produced by the weld on different points of a specimen. The device is also capable to simulate external loads under controlled way. To assure that the actuators and sensors are capable to describe the distortion evolution in real time, several bead on plate welds were deposited. The plate was fixed on one side and free on the other and the distortion was monitored using lasers pens fixed on the free side of the plate. The distortions were registered along time through a graph paper positioned away from the plate and following the laser spot evolutions.*

Key Words: Distortion, Thermal stresses, Residual stresses.