

# REDUÇÃO DAS DISTORÇÕES ANGULARES EM CORDÕES DE SOLDA SOBRE CHAPA DE AÇO DE BAIXO CARBONO COM A UTILIZAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO FORÇADA DA POÇA DE FUSÃO

Leonardo Horta Miranda <sup>1</sup>  
Alexandre Queiroz Bracarense <sup>2</sup>

## Resumo

O objetivo desse trabalho foi verificar a evolução da distorção angular em chapas de aço baixo carbono, ASTM A-36, com diferentes geometrias e, utilizando ou não, refrigeração forçada da poça de fusão com dióxido de carbono. A evolução das distorções angulares foi monitorada por sensor óptico (laser). O processo de soldagem utilizado foi o FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) robotizado. A análise dos resultados mostra que é possível utilizar resfriamento da poça de fusão para redução da distorção angular. No início da soldagem, a chapa distorce-se no sentido negativo (expansão) e, posteriormente, começa a distorcer-se no sentido positivo (contração) e em poucos segundos após a soldagem a distorção é estabilizada. Com o resfriamento, as tensões térmicas geradas devido ao processo de soldagem proporcionaram uma redução significativa nas tensões compressivas nas extremidades das chapas, que estão afastadas do cordão de solda, ocorrendo também um aumento da largura da zona de tração próximo ao cordão de solda, gerando uma menor distorção da chapa devido à refrigeração.

**Palavras-chave:** Distorção angular; Tensão térmica; Resfriamento.

## REDUCTION OF ANGULAR DISTORTION IN WELD BEAD IN LOW ALLOY STEEL WITH THE USING OF FORCED REFRIGERATION OF THE WELD POOL

### Abstract

The objective of this work was verify the evolution of angular distortion on low alloy steel plates, ASTM A-36, with different geometry and using or not forced cooling in the weld pool with carbon dioxide. The evolution of the angular distortion was monitor by an optical sensor (laser). The welding process used was robotized FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*). The analyses of the results showed that was possible use cooling in the weld to reduce the angular distortion. In the beginning of welding, the plate distortion in the negative direction (expansion) and after the distortion was in the positive direction (shrinkage) and some time after welding the distortion was estabilized. With the cooling the thermal tensions generated due to the welding process reduction the compressive tensions in the extremity of plates, which are away of the weld bead and increasing of width of tension zone near in the weld bead. The appearance of a compression zone near weld by cause of cooling generate a slower distortion of plate.

**Key words:** Angular distortion; Thermal tension; Cooling.

### 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a soldagem não é aplicada somente a metais. Um conceito antigo a definiu como sendo “união de metais por fusão”; entretanto, hoje, já existem processos em que as peças se unem sem se fundir.<sup>(1)</sup> Os processos de soldagem consistem na deposição do material sobre uma superfície ou uma junta, para a união de peças ou recuperação daquelas desgastadas. O campo de pesquisa em relação à soldagem é ampliado diariamente, pois surgem novas ligas de materiais, que necessitam ser unidas. Estes

estudos objetivam o aperfeiçoamento dos equipamentos e consumíveis de soldagem e, ainda, a diminuição dos efeitos térmicos provocados pelos processos de soldagem, buscando os melhores parâmetros para um cordão de solda de boa qualidade, e que assegure a qualidade do produto final.

Outra área que está revolucionando e trazendo grande avanço tecnológico na soldagem é a robótica. Ela torna o processo muito mais

<sup>1</sup> MC., Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica. Rua Dom Prudência Gomes, 586 Ap.202 - 30535-580 – Belo Horizonte, MG. (leohortamir@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> PhD., Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha - 31270-901 - Belo Horizonte – MG. (bracarense@ufmg.br)

produtivo, ou seja, maior número de peças produzidas por unidade de tempo, além de garantir maior repetitividade das soldas e o produto final possuir acabamento melhor se comparando a processos manuais. Tanto os processos manuais quanto os automatizados devem buscar parâmetros de soldagem que proporcionem uma diminuição dos efeitos térmicos provocados pela soldagem, tais como: distorções e tensões residuais. Os parâmetros de soldagem devem ser monitorados e controlados durante o processo.

Tensões térmicas podem originar tensões residuais em estruturas soldadas. O nível de tensões residuais e de tensões térmicas depende do nível de restrição a qual a peça estiver submetida. Quando o material apresenta baixo nível de restrição, as tensões térmicas se manifestarão em distorções e em tensões residuais. Quando o material soldado não possuir restrição ele ficará somente distorcido.<sup>(2)</sup>

A distorção é um problema freqüente em soldagem devido ao aporte térmico introduzido pelo processo. Existem algumas técnicas para minimizá-la, tais como: pré-deformação, pré-aquecimento e seqüência de soldagem.

Este trabalho visa diminuir a distorção angular em chapas de aço de baixo carbono utilizando-se dióxido de carbono para resfriar a poça de fusão.

## 2 METODOLOGIA

Foram realizados testes experimentais no laboratório de robótica, soldagem e simulação da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Utilizou-se o processo de soldagem de arame contínuo e proteção gasosa *Flux Cored Arc Welding - FCAW*<sup>(3)</sup> e um robô Motoman, no qual foi acoplado uma tocha de soldagem.

Para monitoração das distorções angulares utilizou-se um sensor de deslocamento (laser), que foi colado a uma chapa dobrada de aço galvanizado com cola resistente a altas temperaturas e, na sua base inferior, foi fixado um imã. Posicionou-se este dispositivo na extremidade esquerda dos corpos-de-prova, conforme Figura 3, e a outra ficou engastada. A direção do feixe de laser varia de posição, de acordo com a evolução das distorções, devido à operação de soldagem. Essas variações do feixe de laser projetadas sobre um papel milimetrado foram monitoradas com uma filmadora digital, antes, durante e após soldagem. Dessa forma, teve-se o histórico das distorções em um ponto afastado do cordão de solda.

A Figura 1 mostra a descrição geométrica dos corpos-de-prova em formato retangular (testes I a 10); a Figura 2 mostra os corpos-de-prova de formato *halter* (testes II a 30) e a Tabela I mostra o procedimento experimental adotado para ambos os casos. Utilizou-se uma máquina de soldagem MotoArc 450, de fabricação da Motoman, de tensão constante, corrente contínua e tocha de soldagem conectada no pólo positivo da fonte de energia (polaridade inversa) para a execução do cordão de solda. Para permitir a comparação entre os testes, mantiveram-se inalterados os parâmetros de soldagem: corrente de  $220 \pm 5$  ampères, tensão de 21,5 volts, gás de proteção Star Gold Tub da White Martins (25% CO<sub>2</sub> e 75% Ar) com vazão de 17,5 L/min, a velocidade de soldagem utilizada foi de 3 mm/s, o arame utilizado foi o tubular ET IT-1 da ESAB de diâmetro de 1,2 mm, temperatura ambiente de 25°C, distância entre a extre-

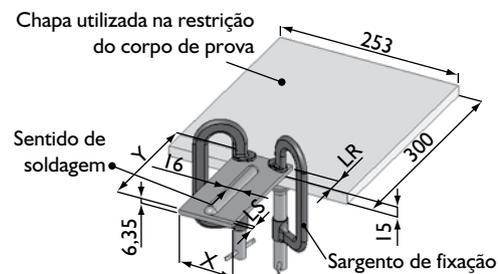


Figura 1. Geometria dos corpos-de-prova dos testes de I a 10 (Chapa retangular). Unidades: mm.

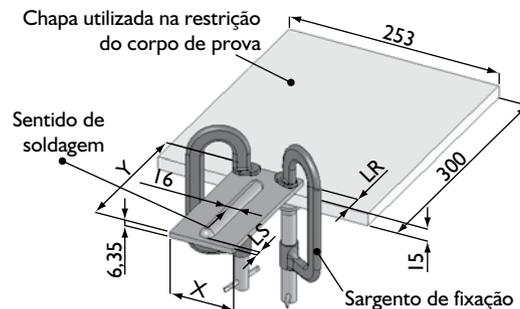


Figura 2. Geometria dos corpos-de-prova dos testes de II a 30 (Chapa "halter"). Unidades: mm.

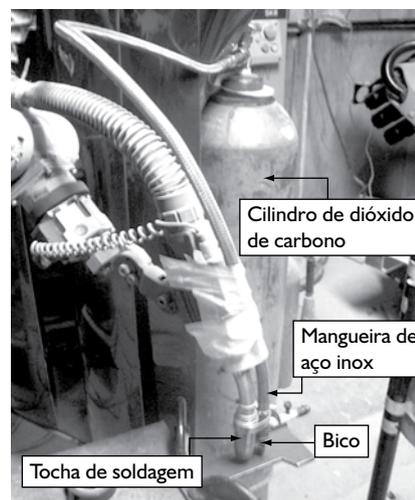


Figura 3. Montagem experimental dos testes 21 a 30.

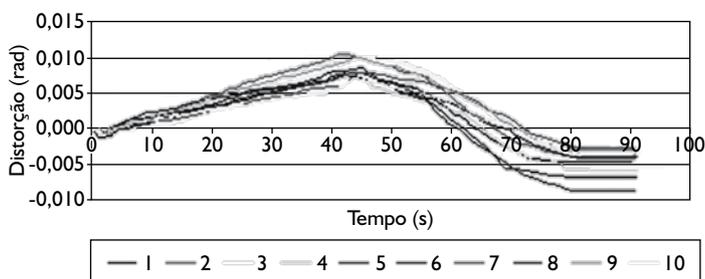
Tabela I. Procedimento experimental

Corpo-de-prova	I a 30
Tempo de soldagem (s)	40
Comprimento do cordão de solda (mm)	127
Comprimento dos corpos-de-prova engastado "LR" (mm)	28
Distância do início do cordão de solda a extremidade dos corpos-de-prova "LS" (mm)	7
Largura dos corpos-de-prova "X" (mm)	76
Comprimento dos corpos-de-prova "Y" (mm)	164

midade do bico de contato da tocha e a peça de trabalho (*stick out*) de 14 mm. Nos testes 21 a 30, se utilizou um cilindro de dióxido de carbono conectado a uma mangueira flexível de aço inoxidável, resistente a baixas temperaturas (em torno de  $-200^{\circ}\text{C}$ ). Na ponta da mangueira foi rosqueado um bico de aço com diâmetro de saída de 0,4 mm, com o objetivo de aumentar a pressão de saída e o dióxido de carbono liquefeito transformar-se em gelo seco solidificado. A mangueira foi presa à tocha de soldagem e o bico injetor ficou a uma distância de 25 mm da tocha de soldagem, e a uma altura de 7 mm dos corpos-de-prova, como apresentado na Figura 3.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizaram-se os testes de 1 a 10, utilizando chapas de formato retangular (Figura 1), mantendo-se constante os parâmetros de soldagem. A análise direta dos resultados (Figura 4) mostra que após o início da soldagem a chapa distorce-se no sentido negativo (expansão) e posteriormente distorce-se angularmente no sentido positivo (contração) até um pouco depois da operação de soldagem a qual possui distorção angular máxima. A continuidade do monitoramento mostrou que a distorção angular vai diminuindo (sentido negativo) até atingir um ponto estável quando se terminou o monitoramento.



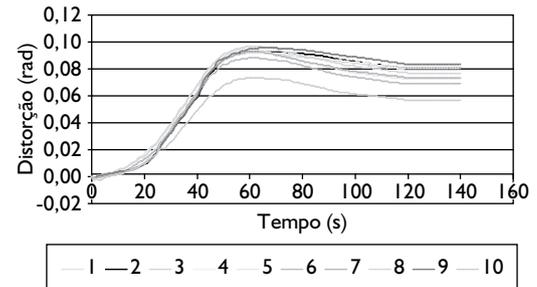
**Figura 4.** Evolução da distorção angular das chapas retangulares em função do tempo (Testes 1 a 10).

Nos primeiros 2 s de soldagem dos testes de 1 a 10, verificou-se que a chapa sofre uma distorção angular negativa (expansão), isto é, com o início da soldagem o arco elétrico forma uma poça de fusão na chapa,<sup>(4)</sup> promovendo uma relaxação de tensões neste local.<sup>(5)</sup> Como estes materiais, geralmente, já possuem tensão residual devido a processos de fabricação, este relaxamento, somado às tensões térmicas geradas pela expansão do metal de base, promovem a expansão da chapa.

Com o avanço do cordão de solda após os 2 s iniciais, este trecho começa a se resfriar e tensões térmicas longitudinais de tração<sup>(3)</sup> começam a surgir e superam as tensões térmicas longitudinais de compressão que a poça de fusão gera, promovendo a contração ou distorção angular positiva desse material.

A contração do material permanece até em torno de 43 s, um pouco após o término da soldagem (40 s). Posteriormente, o cordão de solda começa a se solidificar e produzir tensões térmicas transversais de compressão e tensões longitudinais de tração,<sup>(3)</sup> reduzindo assim a distorção angular. Em torno de 80s as chapas não apresentaram variação significativa da distorção. Os testes 11 a 20 (Figura 4), foram realizados para verificar se a evolução da distorção angular varia

em função das diferentes geometrias dos corpos-de-prova, utilizando os mesmos parâmetros de soldagem. O formato desses corpos-de-prova denominados halter, estão descritos na Figura 2. A análise direta dos resultados (Figura 5) mostra que a distorção angular máxima, com essa geometria de corpos-de-prova, foi significativamente maior que a distorção angular máxima com a geometria retangular. Com essa geometria, o calor teria maior



**Figura 5.** Evolução da distorção angular das chapas halter em função do tempo (Testes 11 a 20).

massa para se propagar por condução, e as regiões mais frias da vizinhança funcionariam como restrições e a distorção angular seria menor, ou seja, a geometria dos corpos-de-prova funciona como restrição à distorção.<sup>(6)</sup>

Nos testes 11 a 20 (Figura 5), se observou a expansão dos corpos-de-prova somente no primeiro segundo, comportamento relativamente próximo às chapas retangulares.

Após o tempo de 3 s de início da soldagem, as peças começaram a se contrair (expansão angular positiva), até aproximadamente 60 s. As regiões da vizinhança que são mais frias por onde o calor poderia se propagar são menores, promovendo, então, um maior acúmulo de calor numa menor massa e resultando em uma maior distorção angular. O tempo de contração desses corpos-de-prova foi superior ao dos corpos-de-prova de geometria retangular, pois o calor pode ter se concentrado nas extremidades dessa região central, sendo a propagação mais lenta. Após aproximadamente 60 s, e com o arco elétrico já extinto, a chapa distorce-se no sentido negativo. Após aproximadamente 120 s, ocorre a estabilização da distorção da chapa.

Os testes 21 a 30 (Figura 6), foram realizados com a mesma geometria dos corpos-de-prova dos testes 11 a 20, pois foi a geometria que teve maior distorção angular comparando aos testes 1 a 10. Para isso, utilizaram-se os mesmos parâmetros de soldagem e se acoplou um bico a uma mangueira flexível de aço inoxidável presa a uma tocha de soldagem. O objetivo foi injetar dióxido de carbono liquefeito, que sob expansão se solidificaria para promover um resfriamento da poça de fusão

e, sendo assim, diminuir a distorção angular da chapa. A análise direta dos resultados (Figura 7) mostra que a distorção angular diminui, em média, aproximadamente 25%, utilizando resfriamento da poça de fusão considerando a distorção já estabilizada. Com o resfriamento, as tensões térmicas geradas devido ao processo de soldagem, proporcionam uma redução significativa nas tensões compressivas nas extremidades das chapas, que estão afastadas do cordão de solda, ocorrendo, também, um aumento da largura da zona de tração próximo ao cordão de solda. Isto foi atribuído ao aparecimento de uma zona de compressão ao redor da solda, por causa do rápido resfriamento da mesma, gerando uma menor distorção da chapa.<sup>(7)</sup>

No início da soldagem, em torno de 1 s, as chapas dos testes 21 a 30, se distorcem angularmente, no sentido negativo (expansão), como nos outros testes.

A partir de 1s, ela começa a se distorcer no sentido positivo (contração), como nos outros experimentos. A distorção angular máxima é reduzida, principalmente por diminuir as tensões térmicas longitudinais de tração que surgem na contração da chapa em relação aos testes 11 a 20, devido à injeção de dióxido de carbono solidificado, cuja temperatura de trabalho é de, aproximadamente, -75°C sobre a poça de fusão. Com esse resfriamento, o tempo de

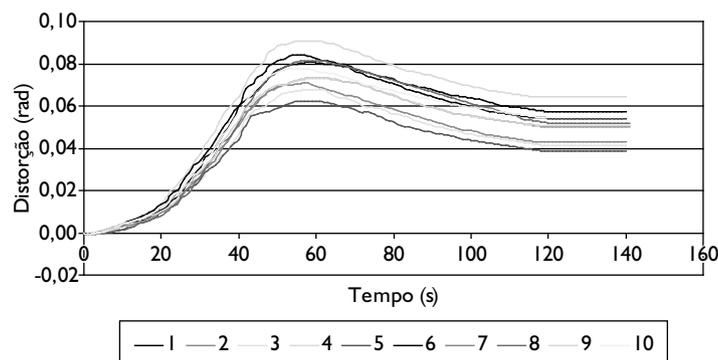


Figura 6. Evolução da distorção angular das chapas halter com refrigeração em função do tempo (Testes 21 a 30).

## REFERÊNCIAS

1. FELIZARDO, I. **Estudo da evolução dos campos de temperatura gerados durante a soldagem**. 1997. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 1997.
2. RADAJ, D. **Heat effects of welding**. [S.l.]: Springer, 1992.
3. AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding technology**. 8.ed. [S.n]: 1991. (Welding handbook, 1)
4. KIM, S.- D.; NA, S.-J. Effect of weld pool deformation on weld penetration in stationary gas tungsten arc welding. **Welding Journal**, v. 75, n. 5, p.174-193, May 1992.
5. MICHALERIS, P.; SUN, X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld buckling distortion. **Welding Journal**, v. 76, n. 11, p.451-456, Nov. 1997.
6. DONG, Y.; TSAI, C.L. Finit element modeling of residual stresses in pipe girth welds. In: AWS CONVECTION: WELDING MECHANIC AND DESIGN, 1996, Chicago. [S.n.], 1996. p.44-52.
7. AA, E.M.; VANDER, M.J.M.; HERMANS, M.J.M.; RICHARDSON, I.M. **Welding with a trailing heat sink: how to optimise the cooling parameters?** Netherlands: Institute for Metals Research, 2005.

Recebido em: 26/09/07

Aceito em: 23/11/07

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro, RJ. São Paulo: ABM, 2006.

distorção angular positiva (contração) é menor em relação aos testes 11 a 20, em torno de 53 s.

Após, aproximadamente 53 s, a chapa distorce-se no sentido negativo, sendo a distorção estabilizada aproximadamente em 115 s, que é menor que nos testes 11 a 20, como observado na Figura 7.

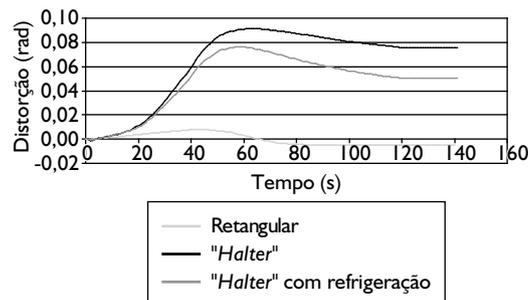


Figura 7. Evolução das médias das distorções angulares em função do tempo (Chapas retangulares, halter e halter com refrigeração).

## 4 CONCLUSÕES

Os ensaios experimentais confirmaram que é possível diminuir a distorção angular utilizando dióxido de carbono sobre a poça de fusão. Este trabalho apresenta uma solução tecnológica para um problema industrial ligada à qualidade de trabalho e acabamento geométrico de produtos soldados e, ainda, pode-se concluir que a geometria dos corpos-de-prova influencia no nível de distorção angular da chapa. Isto pode ser observado comparando-se os resultados das distorções angulares dos testes 1 a 10 e 11 a 20 (Figura 7).