Análise de Distorção e Corrosão em Perfil Estrutural Soldado Tipo U Dobrado

Josemairon Prado Pereira¹ Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves²

Resumo

Vários fatores podem afetar o desempenho do processo de soldagem industrial, por exemplo, parâmetros de soldagem, consumíveis e o tipo de gás de proteção. No setor de fabricação de estruturas metálicas, as indústrias utilizam amplamente as chapas do ASTM A36 para juntas soldadas de alta qualidade, dois elementos devem permanecer com baixa variabilidade e dentro de limites confiáveis: como a corrosão e distorcão na junta soldada. Este estudo aborda a análise da corrosão e distorcão no perfil estrutural dobrado a frio tipo U, que após a aplicação do processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding). Foram elaborados quatro tipos de juntas experimentais usando-se dois tipos de arame-eletrodo, AWS ER70S-3 e AWS ER70S-6, gás de proteção de 75%Ar-25%CO, e com parâmetros de soldagem que mantiveram a densidade de corrente constante. Portanto, usou-se o método de escaneamento tridimensional para investigar a distorção das amostras antes e depois da soldagem e o método de corrosão acelerada em câmara de névoa salina para análise de corrosão. Quanto aos resultados obtidos verificou-se que a distorção se comporta melhor em perfil com três pontos de solda na junta, não ultrapassando 0,45 mm de distorção, pois durante o processo a retração devido a imposição de calor é minimizada. Em paralelo o fator que pode interferir na corrosão dessas uniões é a diluição da solda no metal de base de forma inesperada, uma vez que formam composições químicas heterógenas, modificando a bipolaridade galvânica. Desse modo, o arame-eletrodo AWS ER70S-6 tem comportamento desoxidante por meio de elementos químicos presentes em sua formulação como o Mn, sendo em torno de 20% maior que o arame-eletrodo AWS ER70S-3, o que propicia a formação da corrosão.

Palavras-chave: Corrosão, Distorção, Junta Soldada, Processo de Soldagem.

1 Introdução

As indústrias de fabricação e montagem de estruturas metálicas aplicam largamente a soldagem em perfis de aços estruturais, e dois fatores precisam permanecer com baixa variabilidade e dentro de limites confiáveis: a corrosão e a distorção na junta soldada.

A distorção é inerente ao processo de soldagem, complexa nos seus efeitos e estudo, e resultado das deformações e tensões internas que atuam no metal de solda e vizinhança, impostas pelo ciclo térmico de soldagem^(1,2).

Distorções excessivas em locais não determinados e imprevisíveis durante a montagem da estrutura metálica geram problemas de empenamento, desalinhamento e ondulações, que dificultam os encaixes e posicionamentos previstos no projeto original, comprometendo o prosseguimento da obra⁽³⁾.

Ademais, essas dificuldades podem ser amplificadas devido às tensões internas introduzidas pelo encruamento microestrutural se perfis estruturais utilizados em tesouras, vigas paralelas, colunas caixa, entre outros elementos construtivos, são fabricados através do dobramento a frio de chapas de aço, principalmente no local conformado⁽⁴⁾.

A definição correta dos procedimentos de soldagem, incluindo-se a sequência na execução das soldas, é requisito precípuo no controle das distorções induzidas pela soldagem, e constitui-se em importante objeto de investigação experimental⁽⁵⁾.

A corrosão em estruturas metálicas é outro fator relevante, porque, de modo geral, exige ações de

¹ Discente da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus Bauru, josemairon@gmail.com

² Ph. D. Docente da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus Bauru, gilberto@feb.unesp.br.

manutenção contínua, no caso de não haver prescrição preventiva adequada⁽⁶⁾. De certo, situações críticas em que a estrutura metálica é exposta a ambientes salinos ou ácidos, portanto, constantemente atacada, por exemplo, pela maresia ou vapores de cloro, os esforços para cessar a degradação do material são imperativos e constantes⁽⁷⁾.

Contudo, nessas circunstâncias, a junta soldada pode ter papel deletério, uma vez que impulsiona a corrosão de maneira localizada. O estabelecimento de par galvânico entre a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona de fusão, ou metal de solda, atributo da variação na composição química entre essas regiões, torna-se a força motriz para desenvolver o fenômeno corrosivo⁽⁸⁾. A taxa da corrosão dependerá fundamentalmente de uma complexa interação entre processo e consumíveis de soldagem escolhidos, preparação da junta, e classe do aço estrutural designado^(9,10).

Agregar conhecimento prévio no que concerne à resposta do material em questões mecânico-metalúrgicas especificas do conjunto estrutural a ser soldado, potencializa, sem dúvidas, a evolução no projeto e na qualidade de todo o produto fabricado, evitando também às práticas custosas de remanufatura do mesmo.

A partir de tais premissas este trabalho apresenta a análise do comportamento de distorção e corrosão, desenvolvimento macroestrutural e medidas de dureza, em aços estruturais de corrente uso no mercado nacional de estruturas metálicas, quando submetidos à soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (processo MAG), em condições diferenciadas do tipo de arame-eletrodo e modo de preparação da junta.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

O aço estrutural ASTM A36, na espessura de 3,0 mm, foi utilizado como metal de base. Os arameseletrodos de especificação AWS ER70S-3 e ER70S-6, com diâmetros de 0,9 mm e 1,0 mm, respectivamente, participaram como metais de adição. A proteção gasosa em todas as soldas foi realizada pela mistura 75%Ar-25%CO₂, na vazão de 2,1x10⁻⁴ m³/s (12,5 l/min). A Tabela 1 exibe os teores dos principais elementos químicos do metal de base e arames-eletrodos utilizados.

Tabela 1 –	Principais elementos químicos dos metais
	de base e adição

Material	Composição (% em peso)					
1,10001101	С	Si	Mn	Р	S	
ASTM A36	0,11	0,15	0,39	0,013	0,080	
ER70S-6	0,10	0,98	1,48	0,012	0,011	
ER70S-3	0,09	0,64	1,03	0,012	0,013	



Figura 1 – Montagens das juntas para a soldagem: (a) disposição das partes constituintes; (b) fixação dos perfis "U" (corte "A-A").

2.2 Métodos

As juntas de solda foram compostas pelo metal de base sob a forma de perfis tipo "U", dobrados a frio, nas dimensões de 100 mm x 50 mm x 85 mm, fixados de topo, com e sem união precedente por pontos de solda entre eles. No caso da utilização dos pontos de solda os mesmos foram efetuados em quantidade de três e cinco, colocados diferentemente ao longo da secção transversal da junta. A Figura 1 representa, esquematicamente, as montagens das juntas utilizadas.

As soldas foram executadas pelo processo MAG (Metal Active Gas) convencional, com deslocamento da tocha realizado por um braço robótico especialmente adaptado e programado para realizar as operações de soldagem em único passe, na posição horizontal e no sentido da esquerda para a direita, como indicado na Figura 2.

Tabela 2 –Valores dos parâmetros de soldagem apli-
cados nos agrupamentos metal de base
(MB)/arame-eletrodo

MB/Arame-Eletrodo	Us (V)	Is (A)	Vs (mm/s)
A36-S6	20,5	160,6	10,0
A36-S3	22,6	143,87	7,7

 $\mathbf{U}_{\mathrm{s}}\;\mathbf{I}_{\mathrm{s}},$ e $\mathbf{V}_{\mathrm{s}},$ são, respectivamente, tensão, corrente e velocidade de soldagem.

Durante execução das soldas os valores instantâneos da corrente e tensão de soldagem foram compilados por meio de um sistema de aquisição e processamentos de dados. Em todas as soldas mantevese constante a densidade de corrente nos arameseletrodos em 205 A/mm². A Tabela 2 informa os valores médios da corrente, tensão e velocidade soldagem para as quatro combinações metal de base/arame-eletrodo utilizadas.

Os metais de solda obtidos foram analisados pela técnica espectrometria de emissão ótica por centelhamento na região central dos mesmos.

As distorções devido à soldagem foram investigadas pela aplicação da técnica da sobreposição das imagens da junta antes e depois da cada solda, utilizando um aplicativo computacional de análise de superfícies. Para tanto, em ambas as condições, coletouse uma miríade de pontos superficiais, a partir das imagens produzidas por um "scanner" tridimensional portátil de base giratória, que reproduziu o perfil da junta, de modo a habilitar em diversas plataformas de aplicativos de cascas, para efetuar a sobreposição das imagens das juntas.

A avaliação da resistência à corrosão das juntas soldadas foi realizada em termos da perda de massa decorrente do ensaio de corrosão acelerada em névoa salina, com solução de 5% NaCl, a 32 ± 2 °C, durante 189 horas, em consonância com a norma ASTM B117.

3 Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta os teores dos elementos químicos dos metais de solda obtidos com maior valor da diluição da solda.

Em adição a Figura 4 mostra as imagens sobrepostas das juntas, antes e depois da solda, para as condições, indicando, qualitativamente, o grau de distorção avaliado pela técnica.



Figura 2 – Sistema de deslocamento da tocha: (a) adaptação em braço robótico;
(b) posicionamento na junta e a indicação do sentido de soldagem.

Metal	Composição (% em peso)				
de solda	С	Si	Mn	Р	S
A36-S6	0,09	0,60	0,86	0,02	0,03
A36-S3	0,09	0,32	0,75	0,02	0,02

Tabela 3 –	Teores	dos	elementos	químicos	básicos
	obtidos				

A Figura 5 mostra a distorção ocasionada no corte longitudinal, passando pelo centro do perfil.

De modo geral, conforme indica a Figura 4, a utilização dos arames-eletrodo AWS ER70S-6 ou AWS ER70S-3 apresentou distorção desprezível (menor que 0,02 mm) fora do plano das abas dobradas, onde permaneceram praticamente indeformáveis na maioria das amostras.

Com relação à Figura 5, tomando-se a distorção média de cada amostra, nota-se seu comportamento sob o efeito do aquecimento e resfriamento do processo de soldagem na depressão que surgiu no sentido longitudinal do perfil, ocasionado pelo acúmulo de calor do único sentido de soldagem, quando a tocha passa pela primeira dobra da chapa até atingir 50% do trajeto de soldagem. Os conjuntos soldados A36-S6 (3P), A36-S6 (5P), A36-S6 (SP), A36-S3 (3P), A36-S3 (5P), A36-S3 (SP), apresentaram uma média global, da amplitude da distorção, de 0,29 mm. Nos conjuntos A36-S6 (3P) e A36-S3 (3P), por exemplo, sãos as amostras que apresentaram as menores deformações



Figura 4 – Distorção do grupo soldado ASTM-S6 e ASTM-S3.



Figura 5 – Distorção longitudinal no centro do perfil de aço ASTM A36.

com média de 0,11 mm. Por outro lado as amostras A36-S6 (5P) e A36-S3 (5P) obtiveram uma média de 0,28 mm; os corpos de prova A36-S6 (SP) e A36-S3 (SP) obtiveram a média de 0,29 mm.

As distorções nas amostras A36-S6 (SP) e A36-S3 (5P), apresentaram maiores desvios da média.

Nos aços ao carbono ASTM A36 os resultados da distorção apresentaram discretamente valores superiores nas amostras com mais pontos de solda, acredita-se ser pela razão da minimização da deformação da junta pela presença dos pontos de solda, deformação essa gerada pelo aquecimento e resfriamento causando a dilatação e retração que de certa forma é impedida.

As abas serviram de suporte para distorção o que levou ao empenamento dos cantos na ordem de 0,4 mm. De modo geral apresentaram discretamente a distorção global relativamente expressiva, as abas apresentaram deformações da ordem de 0,02 mm fora do plano da aba e na alma houve um repuxo de maior dimensão, provavelmente por causa da maior capacidade de suporte das abas, da ordem de 0,23 mm que leva ao empenamento menor de 0,27 mm.

Com respeito à corrosão, os resultados da sua aceleração na câmara de névoa salina é apresentada na Figura 6.

Verificou-se que o aço ASTM A36 se apresentou como se esperava com pequena resistência à corrosão.

A ruptura da estrutura metálica ocorrerá quando as solicitações (Q) pela área efetiva A_f resultante da corrosão, logo ultrapasse a tensão última de ruptura σ u, existindo assim uma função da área da seção do perfil projetado A_0 decrescido pela taxa de corrosão na seção Δe no decorrer do tempo, onde se atinge o limite de ruptura. A Figura 7 ilustra a propagação da corrosão na superfície do material.



Figura 7 – Desenvolvimento da perda de massa nos perfis.

Com os resultados da taxa de corrosão aplicadas a expressão (3.a) é possível prever a vida útil da estrutura metálica, pois a tensão nominal tenderá sair do regime elástico para o plástico, com a perda gradual de massa:

$$\sigma_f = \frac{Q}{A_f}$$
, para $\sigma_f < \sigma u$ (3.a)



Figura 6 – Diagrama da taxa de corrosão para os aços ASTM A36.

A correlação da corrosão com a estrutura metálica, para o aço ao carbono ASTM A36, está diretamente relacionada à tensão nominal e ruptura, e para aplicação da equação (3,a) é necessário conhecer a área ou massa final da seção aplicada no projeto e a taxa de corrosão do aço do diagrama da Figura 6. Após a corrosão atingir uma massa final última a estrutura entrará em colapso, o que deve ser evitado com a proteção superficial na produção.

Ao decorrer do tempo a corrosão degrada o material que diminui gradativamente sua área tendenciado a seção sair do regime elástico para o regime plástico, e visualmente tendo deformações demasiadamente grandes.

O material de aço imerso num ambiente natural, a temperatura de 25 C°, a princípio conserva suas propriedades mecânicas, partindo desse instante a corrosão inicia a aceleração até 50 dias como mostra o diagrama do aço ao carbono ASTM A36, e depois uma desaceleração a um valor quase constante de saturação de óxidos na superfície e esse período é muito pequeno comparado com a longevidade do processo degradativo do material até o seu consumo ocorrendo discreto acréscimo no último ponto com 1465 dias, desprezível matematicamente.

Até os quatro primeiros meses a taxa de corrosão atingiu praticamente o seu valor máximo para o ambiente estudado.

4 Conclusões

O perfil dobrado no aço ASTM A36 apresenta distorção semelhantes, não ultrapassando o valor máximo de 0,45 mm, quando o sentido de soldagem for o mesmo.

Como é muito utilizado o perfil de chapa dobrada na fabricação, a presença de abas na chapa de aço estrutural dobrado impõe resistência à distorção, o que é um fator relevante para o projeto estrutural.

Sob a perspectiva da deformação, devido à influência térmica do processo de soldagem, sempre é maior no lado onde se inicia o cordão de solda. A expansão causada pelo aquecimento, a deformação e empenamento na junta soldada, foram em pequenas proporções, e as vezes de difícil percepção visual. Porém, a diferença a composição química apresentou menor teor de Mn com o uso do arame-eletrodo AWS ER70S-6, tendendo à maior tenacidade. Condição essa que, é favorável ao projeto de treliças.

Em relação à montagem da estrutura metálica quando se prepara as juntas soldadas, o melhor comportamento da distorção foi no perfil preparado com pontos de solda não instalados nas curvas, devido à retração impedida pelos pontos à frente do percurso de soldagem.

Na estrutura metálica como o aço ASTM A36 apresentou baixa resistência à corrosão, com taxa de perda de massa na ordem de 0,101 mm/ano, necessita de tratamento superficial adequado ao ambiente de exposição.

A velocidade e taxa de corrosão do aço ASTM A36 é susceptível ao ambiente de exposição.

A diluição da solda não é homogênea, o que se torna prejudicial ao comportamento frente à corrosão. Para o arame-eletrodo AWS ER70S-3 resulta uma corrosão discretamente menor devido à sua composição química quando se compara a perda de massa com a peça soldada.

Em relação ao consumível, o arame-eletrodo AWS ER70S-3 produz cordão de solda, contendo o 15% de teor de Mn menor que o AWS ER70S-6 favorecendo a resistência à corrosão, o que garante a vida útil da estrutura metálica.

Ainda na ótica de longevidade da construção em aço, a velocidade e taxa de corrosão do aço ASTM A36 é bastante alta, o que mostra que deve haver critérios de utilização pela exposição em que a estrutura metálica for submetida.

Como estrutura metálica tem inúmeras ligações soldadas em diferentes aplicações, a menor corrosão mostrada na amostra soldada usando o arame-eletrodo AWS ER70S-3, devido à sua composição química quando se compara a perda de massa com a peça soldada, se torna uma das opções importantes a serem aplicadas em ambientes abrasivos.

Tendo em vista que a região interfacial entre a ZTA e o MS é a região vulnerável à corrosão, logo precisa de tratamento superficial especialmente adequado ao ambiente.

5 Referências

[1] Fu, G., Lourenço, M. I.; Duan, M. Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures. Marine Structures, vol. 46, p. 30-55, 2016.

[2] Abdullah, B., Ismail, S.; Hafizuddin, M. Investigation on corrosion rate of butt-joint in gas metal arc welding, flux core arc welding and submersible arc welding, Jurnal Teknologi, vol. 76, n. 6, p. 61-65, 2015.

[3] Seidu, S. O.; Kutelu, B. J. Effect of heat treatments on corrosion of welded low-carbon steel in acid and salt environments. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, vol. 1, p. 95-100, 2013. [4] Vergilio, S. A. L. Ligações em estruturas metálicas com ênfase em perfis formados a frio. 2011. 157 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2011.
[5] Soares, H. C. G. Estudo de sequência de soldagem para redução e eliminação de distorções. 2006. 95 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, 2006.
[6] Ribeiro, J. C. R. S. Análise de tensões residuais e deformações em soldadura. 2010. 71 f. Dissertação (Mestre em Engenharia da Soldadura) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

[7] Antunes, P. D. Influência do metal de adição na susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas do aço inoxidável ferrítico AISI 444 em meios contendo cloreto de magnésio. 2010. 124 f. Dissertação (Mestre em Ciências dos Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

[8] Silva, A. B.; *et al.* Inibidores de corrosão para meios de elevada salinidade COPPE UFRJ. vol. 1, n. 1, p. 1-2, 2012.

[9] Caimacan, Dumitru; Mishchenko; Scotti, Américo. Avaliação do uso de curto-circuito controlado em soldagens de passes de enchimento por MIG/MAG duplo arame. Soldagem & Inspeção vol. 1, p. 16-27, 2015.

[10] Saliu Ojo Seidu, B. J. K. 2013. Effect of Heat Treatments on Corrosion of Welded Low-Carbon Steel in Acid and Salt Environments. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, vol. 1, p. 95-100, 2013.