

## **ANÁLISE DA MICRODUREZA E CORROSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW NA CHAPA DE AÇO DOBRADA TIPO U**

Josemairon Prado Pereira<sup>1</sup>, Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua João Carneiro Geraldês, 246, Jardim Ubirama, Lençóis Paulista-SP, Brasil, josemairon@gmail.com

### **RESUMO**

*Fatores afetam o desempenho da fabricação e montagem de estruturas metálicas. Nesse ramo, utilizam largamente a chapa dobrada no aço ASTM A36 e CSN Civil-300 para obter juntas soldadas com qualidade e dois elementos precisam ter baixa variabilidade com limites confiáveis: corrosão e microdureza na junta soldada. Focando, a microdureza e corrosão no perfil dobrado U100x50x3,0 mm e 2,7 mm de espessuras, utilizou-se o processo de soldagem GMAW com proteção gasosa de 75%Ar-25%CO<sub>2</sub>, arames-eletrodos AWS ER70S-3 e AWS ER70S-6, e parâmetros de soldagem, que permitiram constante densidade de corrente nas juntas soldadas. Analisaram-se a corrosão, utilizando o método de aceleração por névoa salina e a microdureza pela medição de seus valores. Os resultados mostraram que a corrosão no aço CSN Civil-300 obteve a menor perda de massa de 0.0018 mm/ano e a microdureza nessas uniões evidenciou redução média de 13% usando o metal de adição AWS ER70S-3.*

Palavras-chave: microdureza, corrosão, estruturas metálicas, soldagem.

### **INTRODUÇÃO**

As indústrias de fabricação e montagem de estruturas metálicas aplicam largamente a soldagem em perfis de aços estruturais devido aos seus benefícios [1, 2], dois fatores precisam permanecer com baixa variabilidade e dentro de limites confiáveis: como a corrosão e microdureza na junta soldada; porque não pode haver interrupção nas linhas de produção [3, 4].

A corrosão em estruturas metálicas é outro fator relevante, porque exige ações de manutenção contínua, no caso de não haver prescrição preventiva adequada [5, 6, 7].

Contudo, nessas circunstâncias, a junta soldada pode ter papel deletério, uma vez que impulsiona a corrosão de maneira localizada. O estabelecimento do 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].

As propriedades mecânicas para as estruturas metálicas dependem da dureza nas regiões próximas ao cordão de solda, porque a resistência à tração é o que caracteriza a sua utilização, principalmente nas barras e nas juntas soldadas que suportam solicitações críticas [11]. Neste contexto, as construções em aço adquirem peso próprio expressivos, exigindo perfis estruturais robustos, a fim de garantir a segurança [12].

Porém, a heterogeneidade entre a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona de fusão, resultado da diluição da composição química entre essas regiões, forma um local susceptível a falhas [13]. A dureza também é influenciada pela interação entre processo, consumíveis de soldagem e do tipo de aço utilizado [10, 14].

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

A partir de tais premissas, este estudo expõe os resultados do comportamento de distorção e propriedades mecânicas em aços estruturais, de corrente uso nas estruturas metálicas nacionais, quando submetidos à soldagem a arco elétrico com proteção gasosa ativa, em condições diferenciadas do tipo de arame-eletrodo e modo de preparação da junta.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Materiais

Os aços estruturais ASTM A36 carbono comum e ARBL, patinável, CSN Civil-300, respectivamente, na espessura de 3,0 mm e 2,7 mm, sob a forma de perfil tipo “U” dobrado a frio, foram usados como metais de base. Os arames-eletrodos de especificação AWS ER70S-3 e AWS ER70S-6, respectivamente com diâmetros de 0,9 e 1,0 mm, serviram como metais de adição. A proteção gasosa em todas as soldas foi realizada pela mistura 75%Ar-25%CO<sub>2</sub>, na vazão de  $2,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (12,5 l.min<sup>-1</sup>).

Os teores dos elementos químicos presentes nos metais de base e metais de adição utilizados foram analisados por espectrometria de emissão ótica, exibidos na Tabela 1.

*Tabela 1- Teores dos principais elementos químicos analisados nos materiais  
(% em peso)*

<i>Elementos Químicos</i>	<i>Metal de Base</i>		<i>Arame-eletrodo</i>	
	<i>ASTM A36</i>	<i>CSN Civil-300</i>	<i>AWS ER70S-6</i>	<i>AWS ER70S-3</i>
C	0,1100	0,1500	0,1000	0,090
Si	0,0200		0,980	0,640
Mn	0,3900	0,5700	1,480	1,030
P	0,0200	0,0100	0,010	0,020
S	0,0800	0,0100	0,010	0,010
Al	0,0400	0,0400		
Cu	0,0060	0,0100		0,160
Ni	0,0040	0,0100		
Cr	0,0200	0,0100		
Mo	0,0010	0,0030		
V		0,0020		
Nb		0,0020		
Ti	0,0010	0,0040		

### Métodos

As amostras foram conforme as medidas indicadas na Figura 1. Assim, os quatros dígitos, respectivamente, se referem ao tipo do aço, tipo de arame-eletrodo, tipo de junta preparada, sequência de cada corpo de prova e por fim, um quinto e último dígito designando o tipo de ensaio submetido da amostra, “M” para macrografia e “D” para a microdureza.

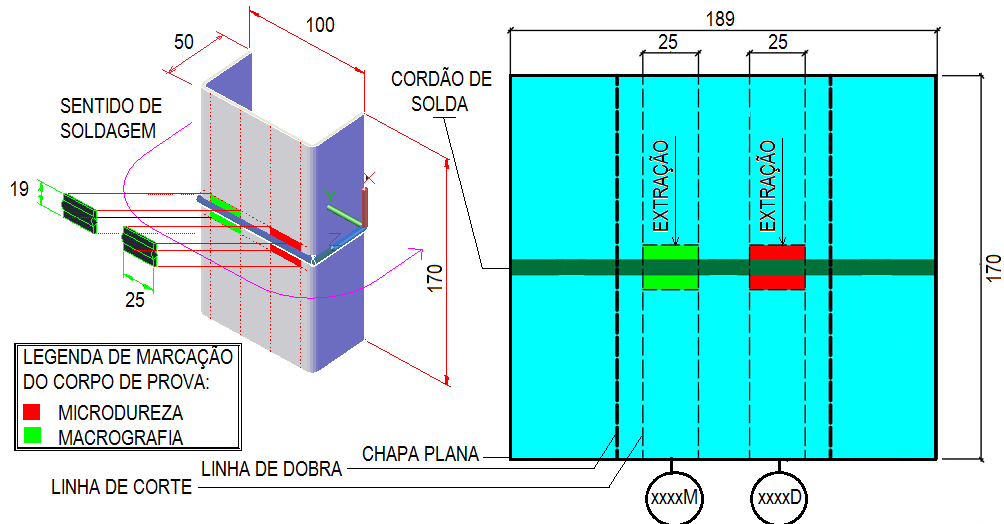


Figura 1. Seccionamento dos corpos de prova para os respectivos ensaios de microdureza e macrografia

### Procedimentos de soldagem

As soldas foram feitas pelo processo MAG (Metal Active Gas) convencional, com deslocamento da tocha feito por um braço robótico Motoman UP6 e controlador Yasnac XRC, adaptado e programado para realizar as operações de soldagem em único passe, da esquerda para direita na posição horizontal.

As juntas de solda foram montadas de topo com os perfis “U”, nas dimensões de 100x50 mm com 3,0 mm de espessura, para o aço ASTM A36 e 2,7 mm para o aço CSN Civil-300, ambos com comprimento de 170 mm, fixados sem e com união precedente por pontos de solda entre eles. Mais especificamente, as juntas previamente unidas por pontos de solda, salienta-se que os mesmos foram efetuados em quantidade de três e cinco pontos, gerando, por conseguinte, duas montagens diferentes de junta.

Em adição, utilizou-se também um quarto tipo de junta, denominada experimental, que consistiu em seccionar transversalmente o perfil dobrado, deixando-o unido apenas por um pequeno elemento do material no meio da superfície superior e nas extremidades das superfícies laterais. A Figura 2 ilustra esquematicamente a configuração da montagem das juntas com e sem os pontos de soldas, e da junta experimental com o seccionamento feito no perfil “U”, fixando abertura média da junta igual a 1,2 mm.

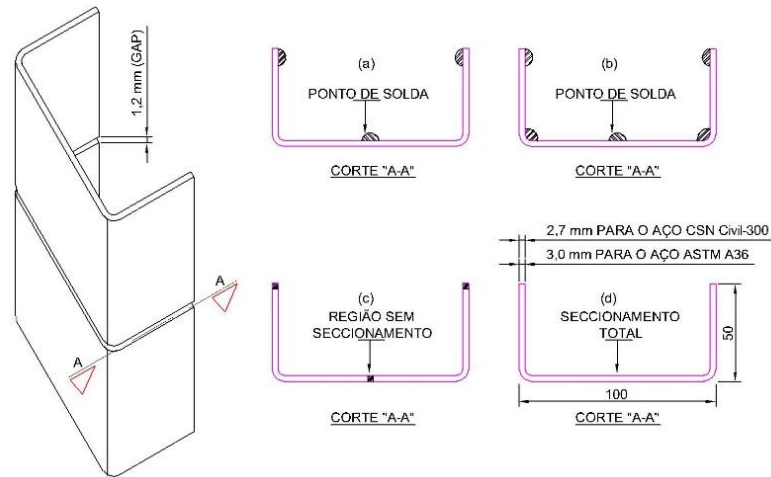


Figura 2. Montagens das juntas preparadas para o processo de soldagem, representadas pelos cortes "A-A": (a) junta com três pontos de solda, (b) junta com cinco pontos de solda, (c) junta experimental e (d) junta normalmente seccionada.

Nessas condições, foram montadas vinte juntas para cada par, metal de base/arame-eletrodo, contemplando cinco repetições por condição de soldagem, perfazendo, portanto, um total de oitenta juntas para soldagem.

Durante a execução das soldas, os valores instantâneos da corrente e tensão de soldagem, mais a velocidade de alimentação do arame-eletrodo, foram compilados por meio do sistema de aquisição e processamentos de dados SAP-V4.23-IMC. A Tabela 2 disponibiliza esses números em termos de valores médios. Em todas elas procurou-se manter constante a densidade de corrente nos arames-eletrodos em 205 A/mm<sup>2</sup>.

Tabela 2- Valores médios dos parâmetros de soldagem utilizados

Conjunto amostral	$U_s$ (V)	$I_s$ (A)	$V_a$ (mm.s <sup>-1</sup> )	$V_s$ (mm.s <sup>-1</sup> )
A1	20,51	160,58	108,30	10
A2	22,65	143,87	108,30	7,7
B1	19,72	151,97	108,30	10
B2	22,39	144,07	108,30	7,7

$U_s$ ,  $I_s$ , e  $V_s$ , são, respectivamente, tensão, corrente e velocidade de soldagem;  $V_a$  é a velocidade de alimentação do arame-eletrodo

### Avaliação da microdureza nas juntas soldadas

A avaliação da microdureza na zona de fusão, na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de base, realizado pelo método Vickers, aplicando carga 1,0 Kgf, com distância entre pontos de 0,25 mm, formando três linhas no sentido longitudinal na junta soldada, resultando um conjunto de valores abrangendo o metal de base, a ZTA e a zona de fusão, como mostra a Figura 3.

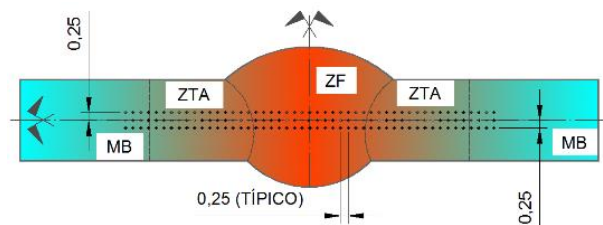


Figura 3. Disposição dos pontos das medidas de microdureza na amostra

Para tanto, foram selecionadas 16 amostras preparadas com a prática metalográfica convencional e realizado as fotomicrografias das secções transversais das juntas soldadas foram inseridas no aplicativo AutoCAD e digitalizadas, uma para cada condição de soldagem, no propósito de determinar a largura dos cordões de solda e das respectivas ZTAs, a penetração, e a diluição do metal de base.

#### Avaliação da corrosão nas juntas soldadas

A resistência à corrosão das juntas soldadas, particularmente na zona de fusão e seu entorno, foi avaliada através do ensaio de corrosão acelerada por névoa salina, em consonância com a norma ASTM B117.

Para realizar a análise evolutiva do processo corrosivo acelerado, as amostras utilizadas passaram primeiramente por pesagem em balança de precisão, e depois inseridas na câmara de ensaio para exposição em nevoa salina com solução NaCl 5%, em temperatura de  $35 \pm 2$  °C, durante 189 horas. Após esse tempo as amostras foram limpas com água e seca em estufa a 40 °C, por aproximadamente 20 minutos e pesadas outra vez para determinar a perda de massa ocorrida.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos resultados de corrosão por névoa salina verificou-se que o tipo de aço ASTM A36 apresenta, como esperado, a menor resistência à corrosão, como pode ser visto na Figura 4, que mostra as curvas de perda de massa.

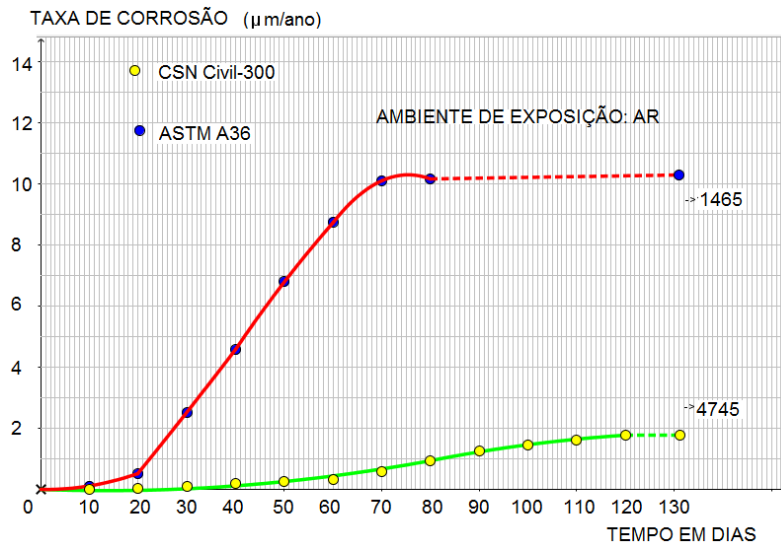


Figura 4. Diagrama da taxa de corrosão para os aços ASTM A36 e CSN Civil-300

Em estrutura metálica a associação da corrosão, por causa da perda de massa, com a área efetiva necessária para atender aos carregamentos.

A ruptura da estrutura metálica ocorrerá quando os esforços ( $Q$ ) pela área efetiva ( $A_f$ ) resultante da corrosão, logo ultrapasse a tensão última de ruptura  $\sigma_u$ , existindo assim uma função da área da seção do perfil projetado ( $A_0$ ) decrescido pela taxa de corrosão na seção ( $\Delta e$ ) no decorrer do tempo, onde se atinge o limite de ruptura. A Figura 5, ilustra a propagação da corrosão na superfície do material.

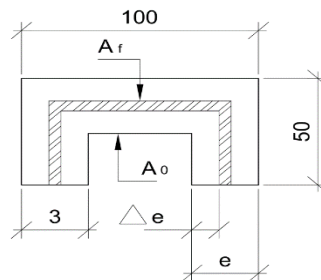


Figura 5. Desenvolvimento da perda de massa nos perfis devido à corrosão

Com os resultados da taxa de corrosão, aplicadas à equação (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.

$$\sigma_f = \frac{Q}{A_f}, \text{ para } \sigma_f < \sigma_u \quad (3.a)$$

A correlação da corrosão com a estrutura metálica, para os aços ao carbono ASTM A36 e aços de baixa liga patináveis CSN Civil-300, está diretamente

relacionada à tensão nominal e ruptura; 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 (Figura 4). Uma vez que a corrosão atingindo uma massa final última a estrutura entrará em colapso, na seção transversal. Isto implicará necessariamente que a seção resistente passe do regime elástico para o plástico, ocasionando deformações demasiadamente grandes.

O material de aço imerso num ambiente natural, à temperatura de 25 Cº, a princípio conserva suas propriedades mecânicas. Partindo deste instante a corrosão inicia a aceleração até 50 dias, como mostra o diagrama do aço ao carbono ASTM A36, depois uma desaceleração a um valor quase constante de saturação de óxidos na superfície, período este muito pequeno comparando com a longevidade do processo degradativo do material até o seu consumo, ocorrendo discreto acréscimo no último ponto com 1465 dias. Até os quatro primeiros meses a taxa de corrosão atinge praticamente o seu valor máximo para o ambiente estudado.

Com relação ao aspecto macroestrutural das soldas, as fotomicrografias das amostras dos grupos A e B, presentes na Figura 6, mostram as dimensões variáveis na geometria do cordão de solda, porém de bom aspecto e todos com penetração, evidenciando o reforço no verso da junta soldada.

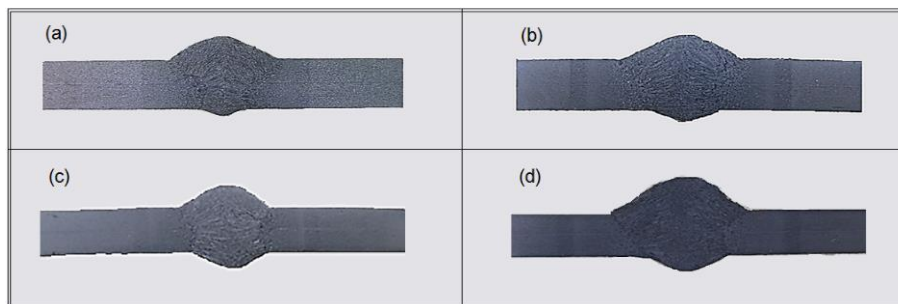


Figura 6. Fotomicrografias das juntas soldadas nos diferentes conjuntos de amostras de metal de base com metal de solda; (a) no aço ASTM A36 com arame-eletrodo AWS ER70S-6 (conjunto A1), (b) no aço ASTM A36 com arame-eletrodo AWS ER70S-3 (conjunto A2), (c) no aço CSN Civil-300 com arame-eletrodo AWS ER70S-6 (conjunto B1) e (d) no aço CSN Civil-300 com arame-eletrodo AWS ER70S-3 (conjunto B2)

Além disso, a zona fundida observa-se que o tamanho da zona de fusão tem acentuada variação entre as soldas, com melhor contorno de linha de fusão definida



para as condições de soldagem do grupo B. Assim, o grupo B exibiu um cordão de solda no formato cálice e para as amostras do grupo A evidenciou duas formas básicas de formato cálice e “finger”.

Em contrapartida o conjunto B1, apresentou um cordão de ótima simetria no eixo longitudinal da chapa e de boa convexidade dos reforços, tornando propícia a segurança por se tratar de único passe. Outras observações positivas para a junta soldada de topo são quanto ao ângulo da solda, contorno coerente dos reforços e isenção de mordedura.

No que concerne à ZTA, Figura 6, os quadros (b) e (d) mostram que as larguras desta região são semelhantes e maiores que os utilizando o arame-eletrodo AWS ER70S-6, indicando que apesar de ser mantida a densidade de corrente constante pode ter havido introdução de energia maior nestas condições.

As diluições calculadas, de certo modo, evidenciam essa possível partição térmica entre as condições A e B, pois no caso das soldas com o arame-eletrodo AWS ER70S-3 um acréscimo no valor de 6%. Isto representou um aumento razoável no volume de cordão de solda depositado. Na Tabela 5, segue os valores da diluição.

*Tabela 5 - Diluição da solda nos aços ASTM A36 e CSN Civil-300*

<i>Conjunto de amostras</i>	<i>Diluição média (%)</i>
A1	42,3
A2	47,7
B1	44,9
B2	51,2

Com os resultados das medições de microdureza de cada grupo de amostra, o comportamento das medidas de microdureza está exposto na Figura 7, a qual representa a linhas dos valores médios de cada conjunto de amostras, passando pelo metal de base, zona termicamente afetada e zona de fusão.

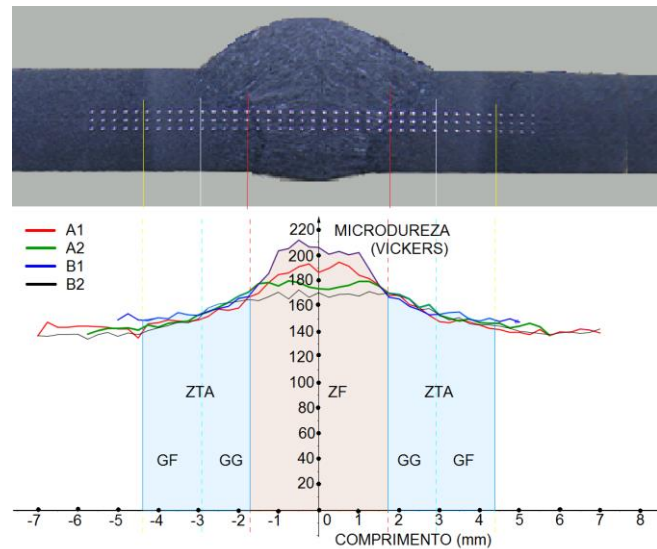


Figura 7. Curvas da microdureza para os conjuntos A1, A2, B1 e B2

Os valores medidos apresentam a média dos valores dos corpos de provas.

Nos metais de solda, as diferenças foram pequenas, quando se compara com a média geral no grupo A, que abrange os conjuntos A1 e A2 onde o valor de 182 HV, enquanto para o Grupo B 185 HV, como também é possível visualizar. Os indícios destas pequenas variações nas medidas de microdureza mostram que o metal de base ASTM A36 tem participação na redução da microdureza no cordão de solda, quando diluído com os arame-eletrodos utilizados.

Na ZTA há uma taxa média coincidente com declínio de 12% na medida de microdureza, independente do aço e arame-eletrodo.

## CONCLUSÕES

A resistência à corrosão do aço CSN Civil-300 apresenta perda de massa três vezes menor que a do aço ASTM A36.

A taxa de corrosão do aço ASTM A36 é superior à do aço CSN Civil-300.

A menor perda de massa nas juntas soldadas ocorreu com a utilização do arame-eletrodo AWS ER70S-3, quando se compara a perda de massa com a peça soldada.

Os cordões de solda executados com o arame-eletrodo AWS ER70S-6 apresentaram os menores volumes depositados.

Conjunto B1 foi as soldas que mostraram as melhores configurações geométrica de cordão para fim de projeto.

As soldas, utilizando o arame-eletrodo AWS ER70S-6, demonstraram a submissão de menores efeitos térmicos na ZTA, ao contrário do AWS ER70S-3 que mostrou as maiores ZTAs.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNESP – Campus de Bauru – SP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MVOLA, B., et. al. Applications and benefits of adaptive pulsed GMAW. **Mechanika**, v. 1, n.1, p. 694-701, 2013.
- [2] 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.
- [3] CHEN, Z.; et. al. Influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure. **Ocean Engineering**, v. 106, n. 1, p. 271-280, 2015.
- [4] ABDULLAH, B., ISMAIL, S. AND 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, 61-65, 2015.
- [5] SEIDU, S. O. AND 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, 95-100, 2013.
- [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, 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**. v.1, p. 16-27, 2015.
- [10] SALIU OJO SEIDU, B. J. K. Effect of heat treatments on corrosion of welded low-carbon steel in acid and salt environments. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v.1, p. 95-100, 2013.
- [11] JOSEPH O. O.; ALO F.I. an assessment of the microstructure and mechanical properties of 0.26% low carbon steel under different cooling media: analysis by one-way ANOVA. **Industrial Engineering Letters**, v. 4, n.7, p. , 2014.
- [12] MONDAL B. K.; et. al. Microstructural characterization and fatigue performance evaluation of MIG-welded ship hull steel. **Steel Research International**. v. 83, n.3, p. 218-229, 2012.
- [13] EROGLU M.; AKSOY M. Effect of initial grain size on microstructure and toughness of intercritical heat-affected zone of a low carbon steel. **Materials Science and Engineering**. v. A286, n. 1, p. 289-297, 2000.
- [14] MVOLA B.; et. al. Welding of dissimilar non-ferrous metals by GMAW processes. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 38, n. 1, p. 125-137, 2014.

## ABSTRACT

*Several factors may affect the performance of companies manufacturing and setting of metal structures, such as those inherent in the manufacturing process. In this business, industries widely use the plate folded in the ASTM-A-36 and CSN-CIVIL-300 steel for welded joints of high quality and two elements must remain with low variability and within reliable limits: corrosion and micro hardness in the joint welded. This paper focuses, on the analysis of the micro hardness and distortion in the bended profile type U 100x50x3,0 and 2,7 mm of thickness, after the application of GMAW process using two types of electrode wire, AWS ER70S-3 and AWS ER70S-6, shielding gas of 75% AR25% CO<sub>2</sub>, and the welding parameters which allowed maintaining a constant current density in the welded joint. Corrosion were analyzed using the accelerated method by salt spray and the hardness by measuring their values. Results showed that the corrosion in the steel Civil-CSN 300 showed the lowest weight loss of 0.0018 mm/year and micro hardness these joints showed an average reduction of 13% using the filler metal AWS ER70S-3.*

Keywords: micro hardness, corrosion, metal structures, welding.