

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Análise da resistência à corrosão de juntas soldadas por FCAW e FCAW-CW do aço naval

Lino Alberto S Rodrigues^a, Danyella Crystyane S. Cardoso^b, Sand Queiroz de Oliveira^c,
Eduardo de M. Braga^d

Abstract

The shipbuilding industry is one of the sectors that much demands improvement of welding processes, looking forward its productivity and applicability without changing the quality of the weld metal as well the mechanical properties and corrosion resistance, which should also be an important factor in the choice of material from designing the project. Therefore, the present study aimed to compare the performance as the mass loss in testing by immersion of naval steel and weldments manufactured by FCAW and the FCAW-CW process using different welding parameters. The welds were made using different welding parameters. Both materials, base metal and welded joints, were submitted to an aqueous solution of NaCl (3,5% p.) for different exposure times. Due to the difference in compositions of the different welded joint regions (BM, HAZ and WM) and the activity of chloride, it was detected two predominant forms of corrosion: galvanic and pitting. The galvanic corrosion mode represented a higher weight loss of compared to the pitting corrosion mode. And too, the base metal represented a higher weight loss compared to the weld metal both welding process. As well as metal weld FCAW-CW performed well in relation to weight loss.

Keywords: corrosion resistance; immersion test, sodium chloride, weldments

Resumo

A indústria naval é um dos setores que mais demanda melhorias e aprimoramento dos processos de soldagem, tendo em vista principalmente sua produtividade e a sua aplicabilidade sem alteração da qualidade do metal de solda que além das propriedades mecânicas requeridas, a sua resistência à corrosão também deve ser um fator importante na escolha do material desde a concepção do projeto. Dessa forma, o presente trabalho visa a comparação do desempenho quanto à perda de massa em ensaio por imersão do aço naval e de juntas soldadas tanto pelo processo FCAW, quanto pelo processo FCAW-CW. As soldas foram aplicadas ao aço naval com diferentes parâmetros de soldagem. Ambos os materiais, metal de base e as juntas soldadas foram submetidas à solução aquosa de NaCl (3,5% em massa) em diferentes tempos de exposição. Devido à diferença de composição química dos metais que compõe a junta soldada (MB, ZTA e a MS) e a atividade do íon cloreto foram detectadas duas formas predominantes de corrosão: a galvânica e a por pites. Os resultados mostraram que o modo de corrosão galvânica apresentou maior perda de massa em relação ao modo por pites. O metal de base mostrou a maior perda de massa em relação a ambos os metais de solda. O metal de solda FCAW-CW teve bom desempenho em relação a perda de massa.

Palavras-chave: resistência à corrosão, juntas soldadas, teste por imersão, cloreto de sódio.

^a Mestre, Engenheiro Químico – FEM/LCAM/UFPA

^{b, c} Graduandas, Engenharia Mecânica – FEM/LCAM/UFPA

^d Doutor, Engenheiro Mecânico – FEM/LCAM/UFPA

Introdução

A retomada da indústria naval brasileira tem influenciado a produção de embarcações de diversos portes e plataformas em todas as regiões do país. Não obstante, a região amazônica, também depende de inovações tecnológicas nesse ramo, em virtude de seu elevado potencial de hidrovias e costa Atlântica. Neste contexto, a nova técnica de soldagem FCAW-CW (Flux Cored Arc Welding – Cold Wire), busca a inserção de uma proposta alternativa de soldagem visando o aumento da produtividade a baixo custo, haja vista que o processo utiliza a energia do arco elétrico para fusão de um arame não energizado. Uma das formas de consolidação da viabilidade do processo se dá por conta da avaliação comparativa de propriedades químicas e mecânicas da junta soldada com o processo consolidados, neste caso com o processo FCAW convencional. A corrosão na indústria naval é um dos maiores fenômenos da perda de resistência e geração de falhas em juntas soldadas de embarcações independentemente do porte, esteja em atividade ou até mesmo parada. Os custos relacionados à recuperação de componentes e estruturas navais são elevados e demandam bastante tempo(1). A corrosão em juntas soldadas apresenta difícil identificação de sua causa devido ao grande número de fatores mecânicos, metalúrgicos e químicos envolvidos que tornam sua avaliação e controle um grande desafio (2,3). Este trabalho objetiva principalmente a validação do processo de soldagem FCAW-CW em relação aos aspectos relacionados à perda de massa em ambiente salino em comparação ao processo FCAW convencional.

Metodologia

Soldagem das chapas para retirar os cupons

Primeiramente, os corpos de prova soldados foram obtidos em um estaleiro da região com parâmetros de uso cotidiano objetivando a aquisição de dados próximos das condições reais de trabalho. O metal de base escolhido foi o aço naval ASTM A131 grau A, classificado como baixo carbono na forma de chapas com dimensões de 300 mm x 150 mm x 9,5 mm, chanfradas em V com ângulo de chanfro de 45°, abertura de raiz de 3 mm e sem nariz. Já os processos de soldagem foram FCAW convencional e FCAW-CW com adição de arame frio não energizado, conforme esquema representativo da Figura 1.

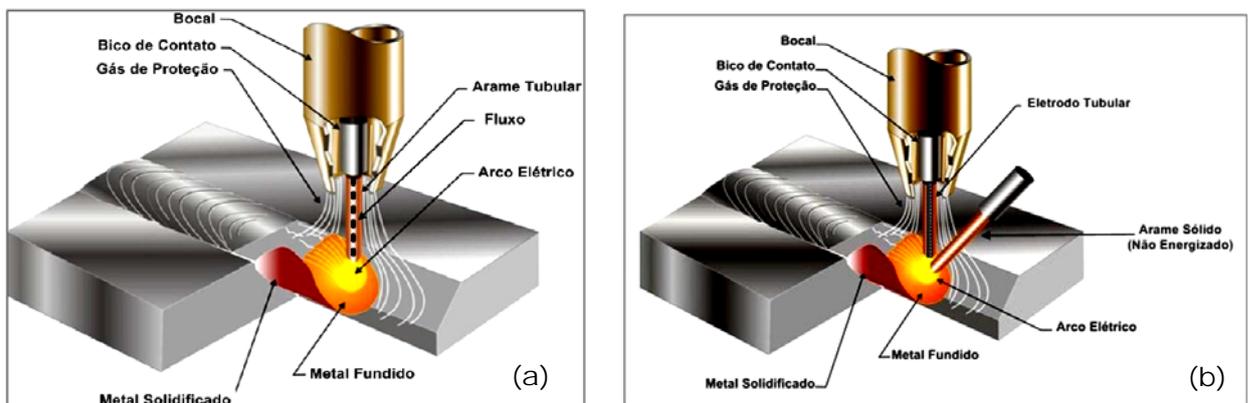


Figura 1 – Processos de soldagem utilizados (a) FCAW convencional e (b) FCAW-CW. (4)

A soldagem foi realizada com a ajuda de um operador qualificado no modo semiautomático na posição plana e no sentido empurrando, com gás de proteção de CO₂ comercialmente puro em vazão de 15 L/min. Foram aplicados dois passes de solda, um passe de raiz FCAW convencional em todas as chapas soldadas com parâmetros iguais, sendo a velocidade de alimentação do arame eletrodo de 8,5 m/min e diâmetro do arame de 1,2 mm com o uso do arame da classe AWS E71T1. Já o passe de enchimento foi realizado primeiramente com o processo FCAW convencional, com o uso do mesmo arame e diâmetro utilizado no passe de raiz em velocidade de 10 m/min e posteriormente utilizou-se o processo FCAW-CW com arame não energizado da classe AWS ER 70S-6 com 1,0 mm de diâmetro em velocidade de 4 m/min. A Figura 2 mostra o soldador utilizando o processo FCAW-CW para soldagem em corpos de provas no sentido empurrando. A Tabela 1 mostra os parâmetros de soldagem utilizados, observando que a corrente e a tensão são valores médios aquisitados em tempo real. Admitiu-se também o valor de 85% de rendimento térmico para o cálculo da energia de soldagem-H (5), conforme equação (1).

$$H = \eta \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$$

Onde:

η : rendimento térmico ($\eta < 1$);

V: voltagem (V);

I: Corrente elétrica (A);

v: Velocidade linear de soldagem (mm/s)

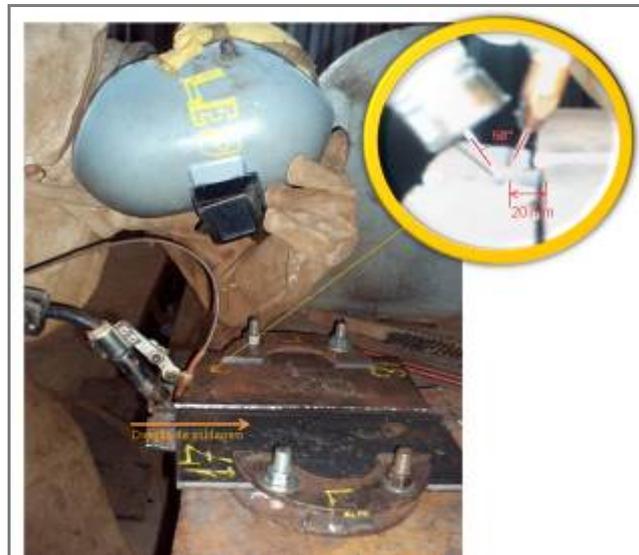


Figura 2 - Disposição da tocha adaptada para o processo FCAW-CW. No detalhe o ângulo entre os arames eletrodo e frio e a direção de soldagem. (6)

Tabela 1- Parâmetros de soldagem

Processo de Soldagem	Vel. Arame Eletrodo (m/min)	Vel. Arame Frio (m/min)	I _m (A)	U _m (V)	H (KJ/mm)
FCAW	10	-	163	31,0	14,175
FCAW-CW	10	4	226	34,6	14,770

Parâmetros de soldagem: I_m: Corrente média; U_m: tensão média

A Tabela 2 mostra os valores quantitativos dos elementos de liga para os arames de soldagem, conforme dados do fabricante, assim como, os valores para o metal de base.

Tabela 2 – Composição química dos consumíveis de soldagem

Consumível de soldagem	Elementos Químicos (% em peso)									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
Arame Eletrodo (AWS E71T-1)*	Balanço	0,05	< 0,05	1,20	-	0,012	-	-	-	-
Arame Frio Não Energizado (AWS ER70S-6)*		0,08	0,90	1,50	-	0,035	-	-	-	-
Metal de base (Aço ASTM A 131 grau A)		0,19	0,166	0,807	0,022	0,03	0,014	0,016	0,032	0,01

*Fonte: Fabricante

Para o ensaio metalográfico, as chapas soldadas foram cortadas e lixadas nas granulometrias de 80, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000 e 2000 e polidas com pasta de alumina com as granulometria de 6 µm, 3 µm e 1 µm. A aquisição das imagens foi realizada em microscópio ótico nos aumentos de 200X, 500X e 1000X antes e após os cupons serem submetidos ao ensaio de perda de massa. A Figura 3 mostra o modelo para a retirada dos corpos de prova.

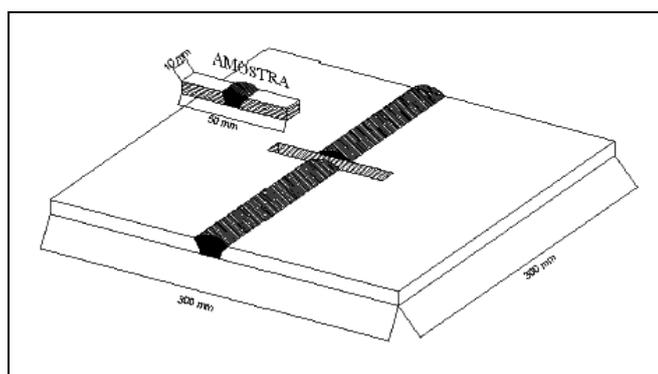


Figura 3 – Representação esquemática da retirada dos corpos de prova

As dimensões para todos os cupons se mantiveram aproximadamente constante, ou seja, 35 mm x 20 mm x 9,5 mm (comprimento, largura e espessura). Para uma melhor análise de perda de massa, os cupons foram usinados para a retirada do reforço do cordão de solda. Foi

realizado também, um furo para que os cupons pudessem ser mantidos no seio do banho salino, conforme mostrado na Figura 4.



Figura 4 – Tamanho padrão dos cupons do metal de base

Ensaio de Imersão

O ensaio de corrosão por imersão em laboratório para metais fundamenta-se na norma NACE/ASTM TM0169/G0031 12a (7), que utiliza o método não eletroquímico para estudos comparativos da taxa de perda de massa de juntas soldadas em solução neutra de cloreto de sódio (3,5% em massa) com agitação. De acordo com a mesma norma foram imersos três cupons do metal de base, da junta soldada FCAW convencional e da junta FCAW-CW. As amostras para cada condição ficaram expostas em 1,5 L de solução durante os tempos de 24 h, 48 h e 72 h a uma temperatura média de $42^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Após a retirada de cada cupom foi realizado o procedimento padrão de limpeza, conforme a norma ASTM G1-04. A Figura 5 mostra a disposição dos equipamentos e acessórios durante o ensaio.

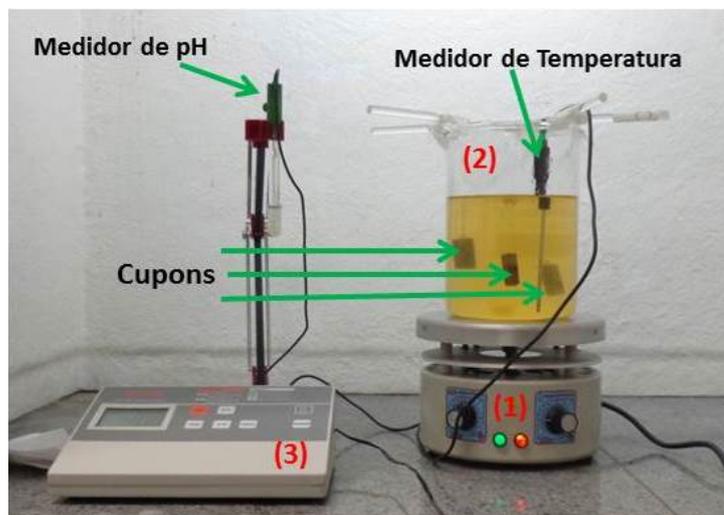


Figura 5 – Equipamentos utilizados no ensaio de imersão de laboratório: (1) Agitador magnético com aquecimento, (2) Béquer com os bastões suportando os cupons e (3) Medidor de pH e temperatura.

As peças ficaram disponíveis sobre o béquer com a solução em disposição triangular, objetivando a não interferência da simetria quanto à influência da velocidade gerada pela agitação (8).

Resultados e discussão

Microestrutura

A Figura 6 apresenta esquematicamente o cupom com suas respectivas áreas de estudo. A microestrutura obtida do metal de base (MB), da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de solda (MS) estão mostradas na Figura 7. Observa-se por essa figura que o metal de base apresenta microestrutura predominantemente de ferrita e perlita, conforme padrão de norma. Na ZTA as microestruturas presentes foram a ferrita e perlita, com pequenas alterações microestruturais em relação as que apresentaram o metal de base, causadas pela transferência de calor durante o processo de soldagem (Figura 7b). Na ZTA, em zonas superiores adjacentes ao metal de solda ocorreram formações de estruturas morfologicamente diferenciadas, ou seja, ferrita de segunda fase, conhecidas como alotrimólicas e de Widmanstätten (Figura 7c). Já os metais de solda, FCAW e FCAW-CW apresentaram ferrita de segunda fase, principalmente na forma acicular (Figura 7d e 7e).

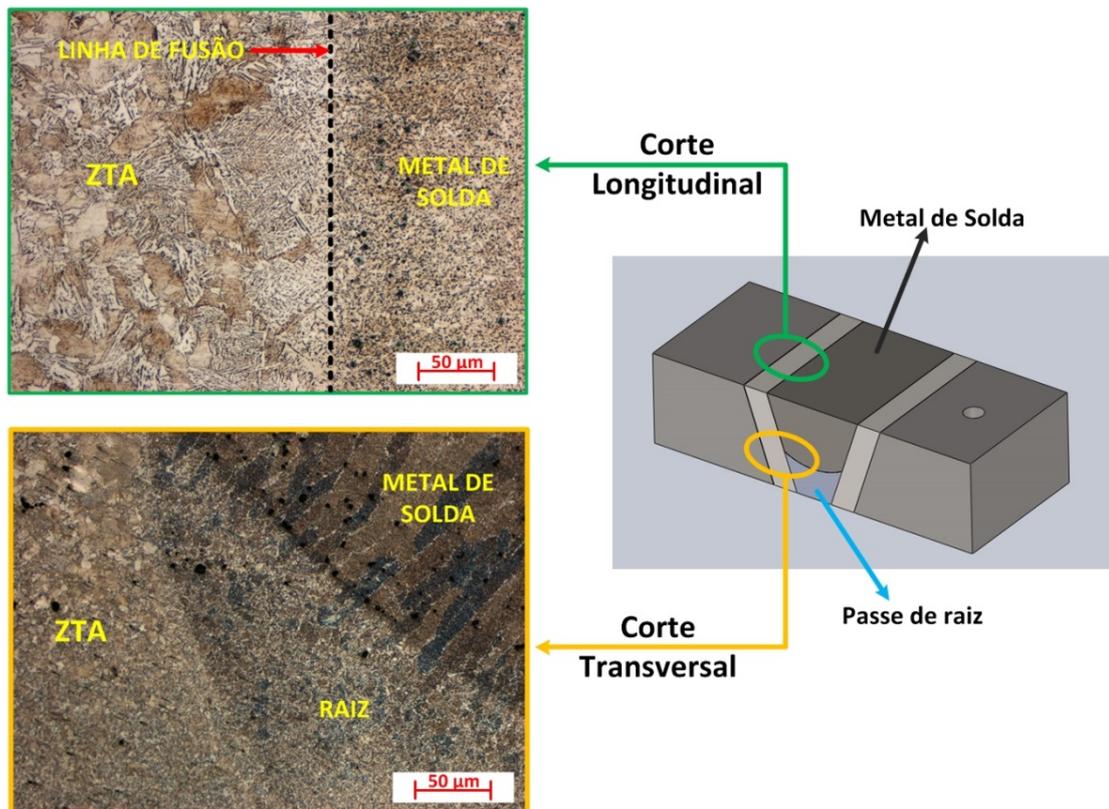


Figura 6 – Representação esquemática das áreas de estudo em um cupom.

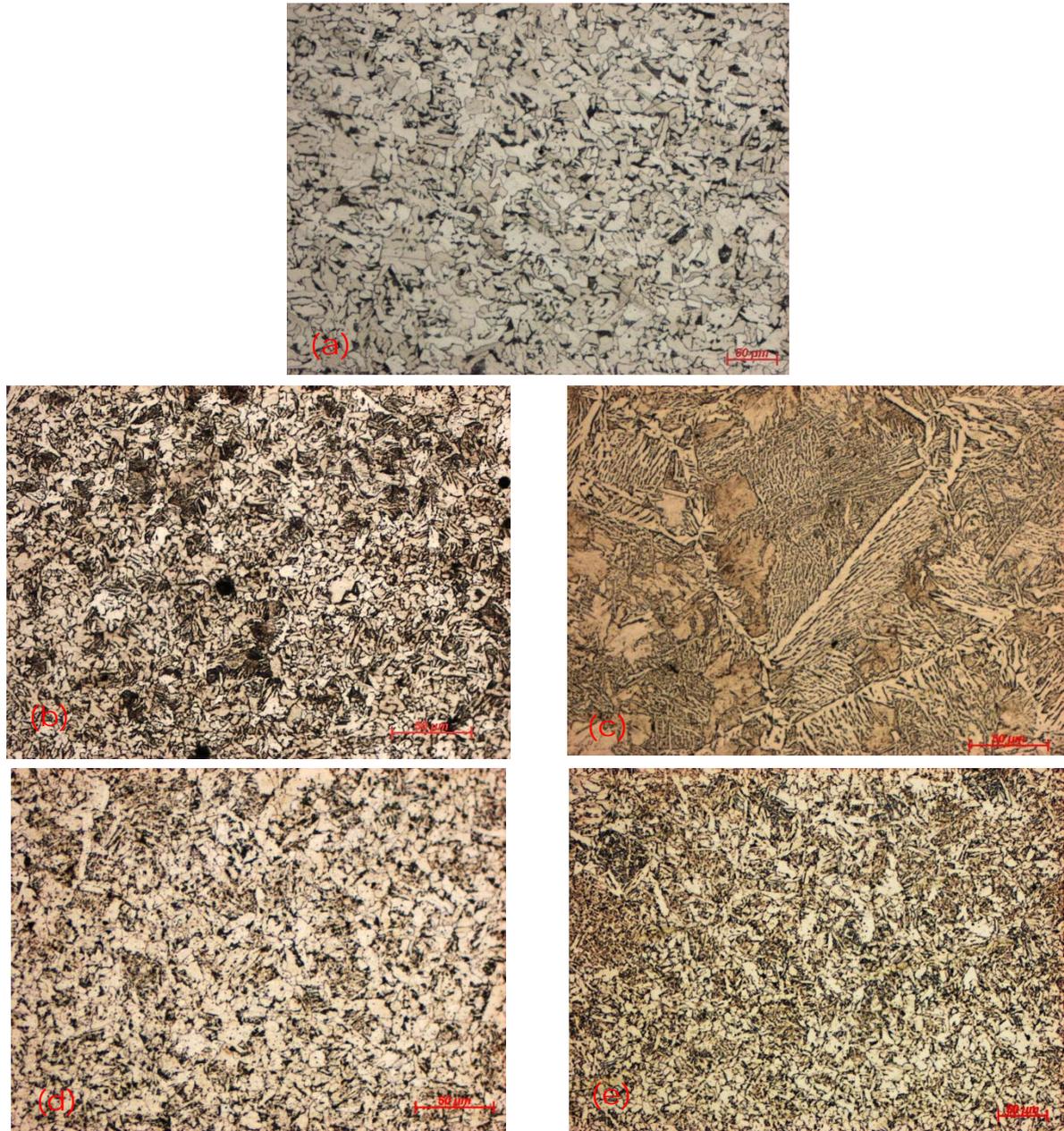


Figura 7 – Micrografias realizadas em M.O. Ataque com Nital (2%) mais Picral (4%). (a) Metal de base. (b) Zona termicamente afetada. (c) Zona termicamente afetada próxima à linha de fusão. (d) Metal de solda (FCAW convencional). (e) Metal de solda (FCAW-CW).

Ensaio de perda de massa

Metal de base

Os resultados com relação ao metal de base apresentaram características similares aos encontrados na literatura (9), ou seja, baixa resistência à corrosão do aço naval. A forma de corrosão predominante foi o modo generalizado em todos os três cupons independentemente do tempo de imersão, conforme pode ser observado na Figura 8. A presença de pites como também já era previsto, devido à atividade química do íon cloreto foi evidenciada (Figura 9). Em estudos anteriores (10,11) considerou-se que a nucleação dos pites iniciava-se a partir do sulfeto de manganês (MnS) na forma de inclusões pontuais e alongadas. Devido a esse fator, a nucleação dos pites ocorreu na direção transversal dos cupons. Outra descontinuidade comum

nos aços que também pode influenciar no ataque por pites é a presença de porosidades. Neste trabalho, verificou-se a presença de micro poros ao longo de todos os cupons, o que pode ter ocasionado a nucleação de pites.

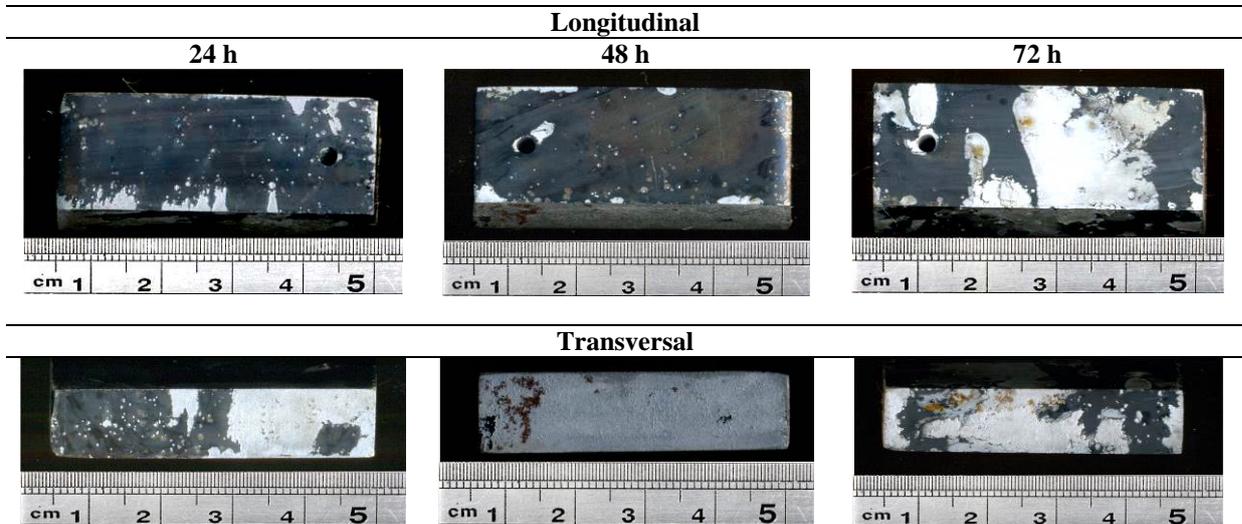


Figura 8 – Cupons do aço naval após ensaio de imersão

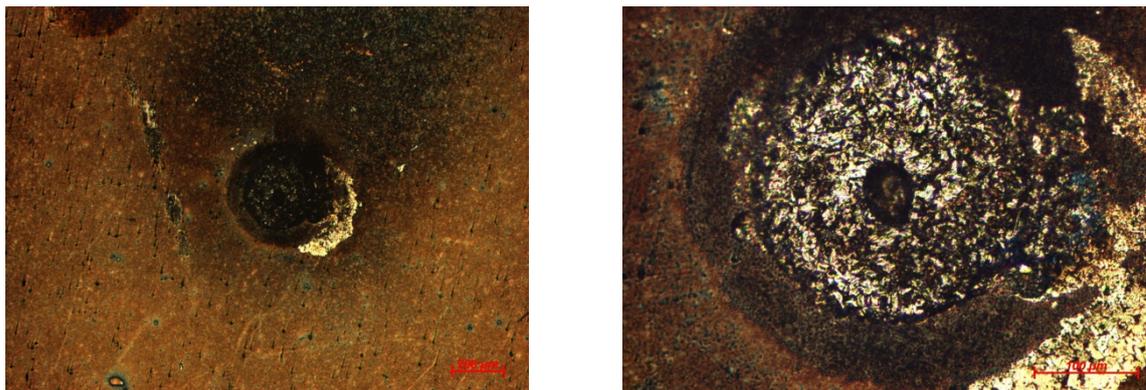


Figura 9 – Pite nucleado no aço-carbono durante a imersão de 24 h.

Junta soldada

A composição química dos metais de solda foi determinada e os resultados mostraram que a maioria dos elementos de liga possui percentuais baixos que pouco influenciaram fenômenos metalúrgicos ou químicos significativos. Porém, o elevado percentual do Mn pode ter influenciado a formação de sulfetos que nucleiam os pites como já foi mencionado.

Tabela 3 – Composição química dos metais de solda

Metal de Solda	Elementos Químicos (% em peso)									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
FCAW	Balanço	0,056	0,47	1,12	0,018	0,007	0,028	0,020	0,017	0,014
FCAW-CW		0,057	0,707	1,56	0,019	0,008	0,031	0,029	0,027	0,031

Com relação à resistência à corrosão, as diferentes composições químicas das juntas soldadas imersas na solução de cloreto favoreceram a formação de corrosão galvânica, conforme previsto na literatura consultada (2,9). Neste sentido, observou-se que tanto nas soldas pelo processo FCAW convencional quanto nas obtidas pelo processo FCAW-CW ocorreram perdas de massa ao longo da junta soldada conforme mostra a Figura 10.

A Tabela 4 apresenta os dados da perda de massa para os diversos materiais analisados neste trabalho. Observa-se que a perda de massa foi mais acentuada no metal de base e em menor proporção para os cupons soldados pelo processo FCAW convencional, para os diversos tempos de exposição. Para uma melhor visualização os dados da tabela foram colocados na forma gráfica, conforme se observa na Figura 11. Por esse gráfico verifica-se aumento da perda de massa em relação ao tempo de exposição para todos os cupons estudados. Verifica-se também que a perda de massa foi quase 30% menor, quando da comparação do cupom soldado pelo processo FCAW-CW em relação ao cupom do metal de base no tempo de 72 h. Já em comparação do cupom do metal de base em relação ao cupom soldado pelo processo FCAW convencional, a perda de massa foi menor em 47%, considerando o mesmo tempo de exposição.

Quando da comparação entre os processos, observou-se que ocorreu uma menor perda de massa do cupom que foi soldado pelo processo FCAW convencional, em torno de 15%. Entretanto o cupom soldado pelo processo FCAW-CW apresenta perda de massa menor do que o metal de base, o que o torna apto em relação a esse estudo realizado.

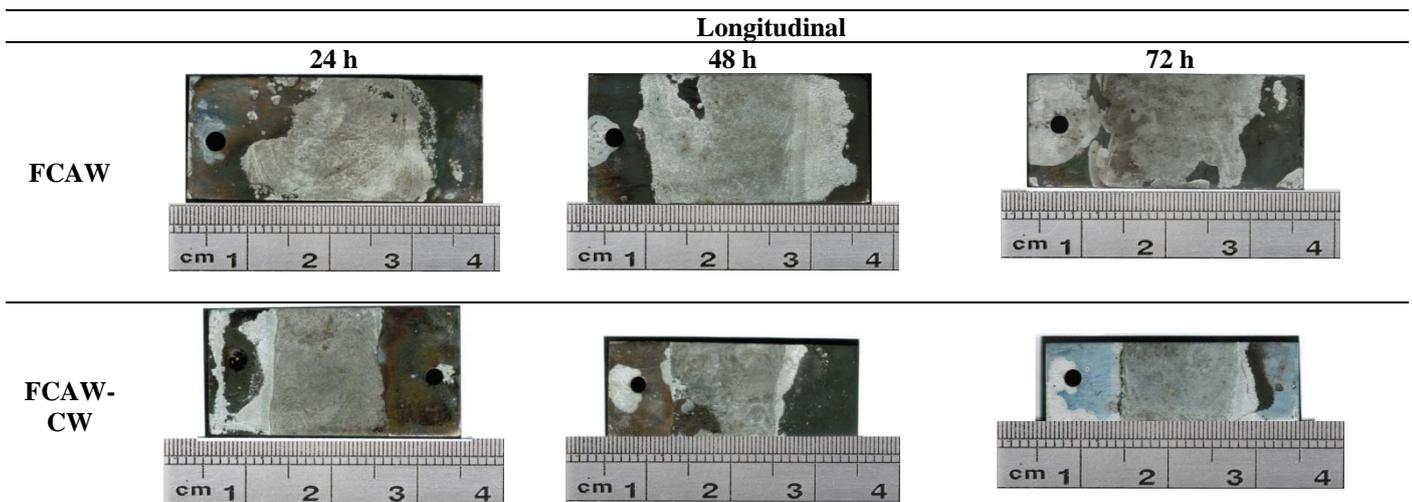


Figura 10 – Ataque preferencial dos cordões de solda.

Tabela 4 - Resultados obtidos através do ensaio por imersão

Peças	Tempo de Exposição 3600 s (h)	Área Superficial $m^2 \times 10^{-4}$ (cm ²)	Perda de massa $kg.m^{-2} \times 10^{-2}$ (mg/cm ²)
Metal de Base	24	21,9222	5,59
	48	22,1114	8,99
	72	22,2446	19,23
FCAW convencional	24	16,4097	3,05
	48	17,261	6,47
	72	16,3103	10,19
FCAW -CW	24	17,7722	3,51
	48	14,6616	7,25
	72	13,3276	13,38

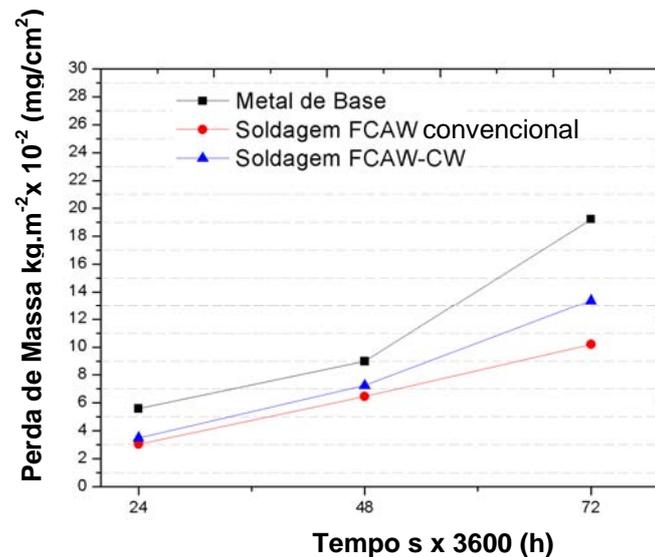


Figura 11 – Curva mostrando o crescimento da perda de massa ao longo do tempo.

Conclusões

Conforme proposto pelo trabalho, pode-se concluir que o metal de base isolado possui taxa de perda de massa acima de qualquer valor medido nos cupons soldados, apresentando uma forma de corrosão generalizada e a presença de pites nos cupons. Porém os cupons soldados com FCAW-CW apresentaram uma taxa de perda de massa maior que as soldas com FCAW convencional, embora os resultados não invalidem tal proposta de soldagem. Já que a taxa de perda de massa continua sendo abaixo da perda de massa do metal de base.

Referências bibliográficas

- (1) REVISTA CORROÇÃO & PROTEÇÃO. Rio de Janeiro: ABRACO, Bimestral. ANO 09, Nº 40, jan-abril, 2012. p.11-13. ISSN 0100-1485.
- (2) BOND, S. Corrosion of Welded Components in Marine Environments. In: **Prevention and Management of Marine Corrosion**. Lloyds List Events. Londres, Abril 2003. 10p.
- (3) ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Corrosion of Weldments**. Ohio: Materials Park, 2006. 225 p.
- (4) CRUZ, JÚNIOR; CABRAL, T. S. **Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Federal do Pará, Belém. 2008. 78p.
- (5) NORRISH, J. **Advanced welding processes**. IOP Publishing. London 1992. 361p.
- (6) SILVA, F.G. **Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem FCAW com Adição de Arame Frio, Aplicado a Indústria Naval**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará. 2010. 148p.
- (7) RODRIGUES, L.A.S. **Caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas de soldas do aço ASTM grau A 131 pelos processos FCAW convencional e com adição de arame frio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. 2011.
- (8) NACE/ASTM TM0169/G0031 12a - **Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals**. 2012. 13p.
- (9) REVIE, R. W. UHLIG, H. H. **Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. New Jersey: John Wiley & Sons, 4th ed. 2008. p. 121, 130.
- (10) WRANGLIN, G. **Pitting and sulphide inclusions in steel**. Corrosion Science, Pergamon Press. Stockholm, Sweden (Printed in Great Britain). 1974, Vol. 14, p. 33-349.