

Metodologia para Avaliação de Desgaste Corrosivo na Borda do Cordão de Solda do Aço Inoxidável Ferrítico410D

Carmem Célia Francisco do Nascimento, carmemfn@ifma@edu.br

Vinícius Mainardi de Moraes, v_mainardi@hotmail.com

Gabriel Branquinho Scholz dos Reis, gabrielbscholz@gmail.com

Julia Brito Rocha de Andrade, ju.bra@live.com

Louriel Oliveira Vilarinho, vilarinho@mecanica.ufu.br

Resumo: A ZTA presente nas bordas de cordões é a região mais susceptível à corrosão de uma solda. Devido às pequenas dimensões, as técnicas usadas para medir quantitativamente o desgaste corrosivo na ZTA são limitadas em resolução e precisão. Assim, neste trabalho é descrito uma técnica para quantificar o desgaste por corrosão na borda do cordão de solda. Para tanto, amostras com diferentes fatores de concentração de tensão e níveis de tensão externa foram submetidas ao Cloreto Férrico (FeCl_3). Como material foi usado o aço inoxidável Ferrítico410D soldado no sentido puxando e empurrando com arame austenítico ER 308L. Os ensaios de corrosão foram realizados seguindo uma adaptação da norma ASTM G30-97 (Reapproved 2009), em que amostras foram flexionadas em U entre os cordões. O desgaste foi avaliado por microscopia óptica na borda do cordão por diversas formas, sendo por último proposto a confecção de máscaras na superfície original das amostras soldadas e flexionadas, usando-se como material uma resina polimérica. Os resultados desta última técnica permitiram uma avaliação mais coerente da relação entre as condições (convexidade e intensidade de tensões) e desgaste corrosivo.

Palavras-chave: Corrosão; Convexidade de Cordão; Aço Inoxidável Ferrítico410D, Técnica de quantificação de desgaste corrosivo

1. INTRODUÇÃO

Dentre os mecanismos de degradação comumente observados, a corrosão em meio aquoso é uma das formas de desgaste mais agressiva encontrada em instalações industriais, tendo início em regiões susceptíveis como conjuntos soldados, atacando principalmente a zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) (ANSELMO, 2006).

De acordo com Gentil (2003), as perdas econômicas com corrosão atingem os mais diversos setores de atividades da indústria química, petrolífera, de construção civil, automobilística, na medicina, na odontologia, em obras de arte como monumentos e esculturas, gerando um apotencialidade em pesquisa nesses segmentos.

Segundo Padilha (1995), os aços inoxidáveis apresentam um comportamento à corrosão diferente dos aços ao carbono pela presença da camada passiva. Esta camada é formada por óxidos hidratados de Cr (cromo) e Fe (ferro) e apresenta-se de forma contínua, insolúvel e não porosa, formando uma barreira entre o metal e o meio, evitando o desgaste por corrosão. No entanto, processos de soldagem usados para união de peças e exposição em concentrações apreciáveis de íons halogenetos (Cl^- , Br^-) tendem a romper este filme por diversos fatores de ordem metalúrgica, diminuindo o tempo de vida útil do conjunto soldado. Dentre os aços inoxidáveis, os ferríticos se destacam com a menor relação custo-benefício, pela isenção de níquel em sua composição química e alto teor de cromo, proporcionando uma elevada resistência à corrosão desses materiais (SERNA-GIRALDO, 2006). Um dos maiores problemas desses aços é a perda de ductilidade nas regiões soldadas, que normalmente são frágeis e de menor resistência à corrosão. Geralmente, o elevado crescimento de grão, a formação parcial de martensita e a precipitação de carbonitretos de cromo são as principais causas geradoras desse problema, sendo um dos atrativos para o uso desse material no desenvolvimento desse trabalho.

O aço inoxidável ferrítico Ace P410D, fabricado pela Arcelor Mittal com teor de cromo de 11%, apresenta uma resistência à corrosão abaixo dos aços ligados e acima de materiais usados em construção. De acordo com Arcelor Mittal (2012), esses aços no estado recozido, possuem resistência à corrosão em ambientes úmidos isento de íons cloretos e boas características para construção soldada, onde a ZTA, formada essencialmente por martensita, com baixo teor de carbono e granulometria fina, possui um alto valor de resiliência a baixas temperaturas, tendo uma boa eficiência em usina de beneficiamento de cana de açúcar, recheio em colunas de destilação na indústria do petróleo, dentre outras.

Estudos feitos por Takahashi (1971) têm mostrado que o processo de corrosão é crítico na região da não concordância do cordão de solda com o metal de base, onde o nível de concentração de tensão do processo de soldagem, é um dos fatores preponderantes para esse desgaste. Também foi observado que o fator de forma (raio de

concordância entre a solda e o metal de base) tinha uma influência considerável quanto à geração de tensões, tendendo a diminuir com o aumento desta variável. Portanto, uma transição mais suave entre o cordão de solda e o metal de base, conduz a valores mais baixos da concentração de tensões, aumentando a resistência à corrosão.

Segundo Garcia et al. (2008), as variações microestruturais e as tensões residuais podem causar o colapso dos filmes finos de óxidos aderente e passiva que protegem os aços inoxidáveis da corrosão, gerando um rompimento do filme passivo, diminuindo a resistência à corrosão desses aços. Estudos feitos por Kirkhope et al. (1999) mostraram que o processo de corrosão é crítico na região da não concordância do cordão de solda com o metal de base (borda do cordão de solda). Nessa região, especificamente, a ZTA (zona afetada termicamente pelo calor), além de ser influenciada por variações microestruturais, as tensões que agem sobre ela (residuais, ligadas aos ciclos térmicos de soldagem, somadas às tensões externas) e também os fatores de concentração de tensão (geometria do cordão-metal de base), são os responsáveis por aumentar a susceptibilidade à corrosão.

Este trabalho mostra, mesmo que de forma incipiente, a importância de se estudar o efeito da concordância do cordão de solda com a chapa (ponto de concentração de tensão) sobre a resistência à corrosão de uma junta de aço inoxidável ferrítico soldada. Porém, as técnicas usadas para medir quantitativamente o desgaste provocado pela corrosão são limitadas em resolução e precisão, dificultando a análise de áreas restritas como a ZTA. Dessa forma, neste trabalho foi proposto o desenvolvimento e avaliação de técnicas para quantificar por microscopia óptica a área desgastada por corrosão nessa região.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo proposto, amostras de um aço inoxidável ferrítico Ace P410D foram soldadas em simples deposição com arame austenítico ER 308L pelo processo MIG/MAG com modo de transferência gótica.

A composição química do metal de base fornecida pela ArcelorMittal e do arame fornecida pela Weld-inox usados no processo de soldagem MIG/MAG estão na Tabela 1. O metal de base foi usado na forma de chapa com dimensões de 75 x 200 x 6,35 mm e o arame com diâmetro de 1,2 mm.

Tabela 1. Composição química nominal (%) do metal de base Ace P410D e do arame ER308L

Tipo	Elementos										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	P	S	Cu
Ace P410D	0,01	0,61	0,49	11,22	0,30	0,02	0,02	0,01	-	0,01	-
Arame ER308L	0,02	1,76	0,42	19,83	9,96	0,07	0,05	0,0	0,01	0,01	0,05

A metodologia aplicada para avaliar o desgaste corrosivo na borda do cordão de solda do aço inoxidável ferrítico Ace P410D, envolveu quatro Etapas distintas: (I): soldagem das placas; (II): decapagem e passivação; (III): flexão das amostras e (IV): ataque e avaliação do desgaste corrosivo na borda do cordão de solda. A seguir serão mostrados cada Etapa.

2.1. Etapa (I): soldagem das placas

Na soldagem das placas, utilizou-se uma fonte eletrônica multiprocesso para soldagem MIG/MAG, regulada no modocorrente constante (para facilitar a repetibilidade) para se obter transferência gótica. Para encontrar duas condições distintas de concentração de tensão, as soldas de simples deposição sobre chapa foram feitas no modo puxando (mais convexo) e empurrando (menos convexo), com ângulo de ataque de 10°. Os parâmetros usados para soldar o aço inoxidável Ace P410D estão na Tabela 2 e a Figura 1 mostra a macrografia do perfil dos cordões de solda em uma seção transversal ao cordão. Para medir os ângulos de convexidade foi usado um processador de imagem.

Definido os parâmetros, as soldas foram feitas sob as chapas planas com os cordões em paralelo e distância entre eles de 12 mm como é mostrado na Figura 1(a). A disposição dos cordões foi necessária para restringir o centro entre os dois que seria submetido ao desgaste corrosivo.

Tabela 2. Mostra os parâmetros de soldagem MIG/MAG com transferência goticular nas condições puxando e empurrando

Arame	Metal de base	VS (mm/min)	Parâmetros operacionais Gás (98% Ar+2% O ₂)				
			Condição puxando				
308 L	410 D	300	Va (mm/min)	Im (A)	Um (V)	Vazão (l/min)	DB CP (mm)
			8000	241	29,0	15,0	21,0
			Condição empurrando				
			Va (mm/min)	Im (A)	Um (V)	Vazão (l/min)	DB CP (mm)
			8000	241	28,5	15,0	21,0

Nota: VS é a velocidade de soldagem

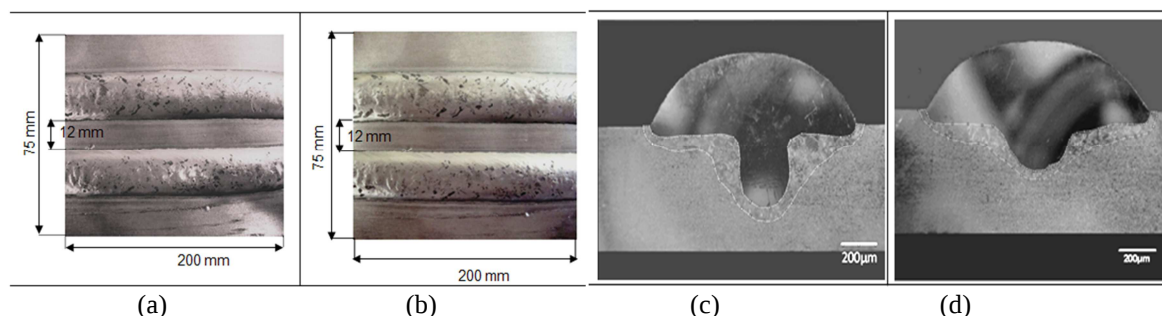


Figura 1. Placas soldadas (a) e (b) e perfis do cordão de solda resultantes (c) e (d); (a) e (c) puxando; (b) e (d) empurrando

2.2. Etapa (II): decapagem e passivação das placas

Após a soldagem, as placas de teste foram submetidas a uma decapagem e repassivação química, usando-se 20% de ácido nítrico (HNO₃) com 2% em peso de dicromato de sódio (Na₂Cr₂O₇.2H₂O), seguindo as normas ASTM A 380-06 (2006) e ASTM A 967-05 (2005), respectivamente, para retirar a camada de óxido do processo de soldagem.

2.3. Etapa (III): flexão das amostras

O ensaio de flexão foi realizado em amostras medindo (25,4 x 75 x 6,35) mm, onde foram flexionadas com o objetivo de deformá-las plasticamente para encaixar parafusos destinados ao ensaio de corrosão. O dobramento foi realizado na máquina de tração universal a uma velocidade de 5 mm/min. Após esta fase, as amostras foram restritas no regime elástico. Assim, decidiu-se fazer furos nas extremidades das amostras e apertá-las com parafuso de 3/8" com auxílio de um torquímetro, usando um torque 8.8 N.m.

2.4. Etapa (IV): ataque e avaliação do desgaste corrosivo na borda do cordão de solda

Após a flexão das amostras, a região entre os dois cordões foi moldada por uma resina polimérica de alta fluidez inicial e elevada dureza final, baseado na técnica de réplica para análise de fratura, onde foram confeccionadas máscaras da superfície original. Em seguida, as mesmas foram submetidas ao ensaio de corrosão usando cloreto férrico (FeCl₃) aquecido a 50 ± 2 °C, com tempo de permanência de (5, 10, 20 e 72 horas), seguindo procedimento adotado na norma ASTM G48-11 (2011). A Figura 2 mostra o procedimento adotado para o ataque.

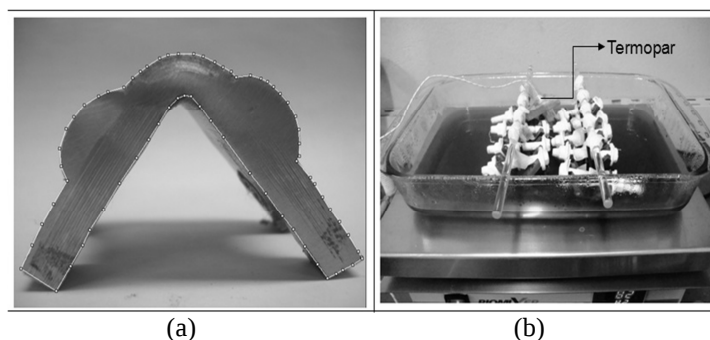


Figura 2. Amostras de aço inoxidável ferrítico 410D soldadas com ER 308 L. (a) Região da amostra de aço inoxidável ferrítico 410D esmaltada e (b) Amostras submetidas ao FeCl_3

Após o desgaste, foi feito um corte transversal e as máscaras foram sobrepostas para cortá-las no mesmo plano da seção transversal da amostra. A diferença entre a área corroída da amostra e a superfície da réplica, permitiu uma avaliação mais coerente da relação entre as condições (convexidade e intensidade de tensões) e desgaste corrosivo, caracterizando com fidelidade a diferença entre a superfície das amostras antes e após a corrosão. A sequência de montagem e corte das máscaras estão representadas na Figura 3. Com esta réplica, foi possível fazer um corte com bisturi seguindo a seção transversal à solda, onde foi identificado um espaço vazio entre as regiões, sendo associado ao desgaste corrosivo pela exposição das amostras ao FeCl_3 variando o tempo, como é mostrado na Figura 3 (III). As máscaras foram coladas na superfície da solda com superbonder para caracterizar por microscopia óptica a região em estudo.

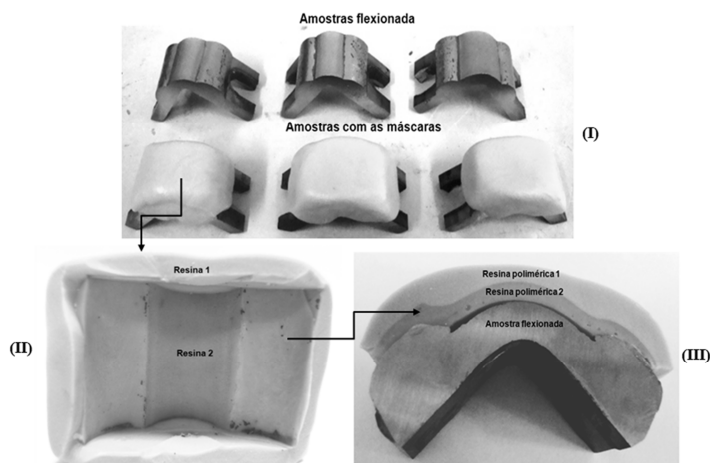


Figura 3. Sequência de montagem das máscaras

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudos reportados por Deepashri (2006) mostraram que a borda do cordão de solda é a região mais susceptível à corrosão de uma solda por uma série de fatores, dentre eles, a não concordância entre cordão e chapa, tensões residuais do processo de soldagem, diferença de granulometria e a presença de microconstituintes e microfases que são as causas principais de processos corrosivos nesta região. Os aços inoxidáveis ferríticos quando expostos em solução aquosa contendo íons cloretos, desenvolvem tipos de corrosão específicas dependendo das condições do meio e da região a ser analisada. Visando mostrar o desgaste corrosivo na ZTA (região mais susceptível ao desgaste da borda do cordão de solda), as amostras nas condições de soldagem, puxando (mais convexa) e empurrando (menos convexa), foram submetidas ao teste de corrosão, variando o tipo e o tempo de exposição da solução, sendo analisado por microscopia óptica.

3.1. Caracterização quantitativa do desgaste corrosivo por microscopia óptica

A caracterização microscópica para revelar a área desgastada foi realizada com auxílio de um microscópio Olympus BX41M com ampliação de 50X. A Figura 4 mostra a área da seção transversal de uma amostra antes e após o desgaste corrosivo.

Da região desgastada pelo cloreto férrico, foi feita uma separação pela extensão linear da ZTA em (ZTAG e ZTAF) usando um programa de tratamento de imagens, seguindo as etapas da Figura 5.

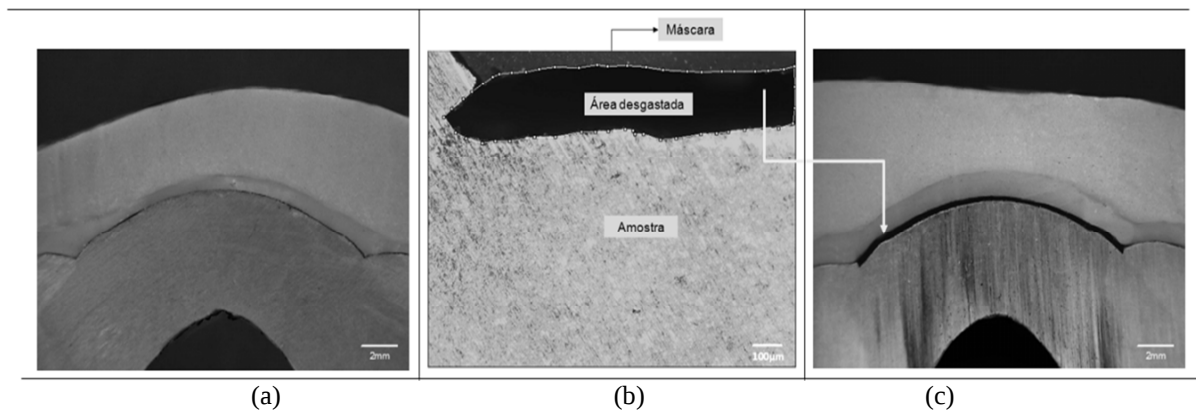


Figura 4. Seção transversal de uma amostra soldada no sentido puxando. (a) Macrografia da amostra sem corrosão; (b) micrografia da área desgastada; (c) Macrografia de amostra atacada com cloreto férrico (FeCl_3) por 5 horas

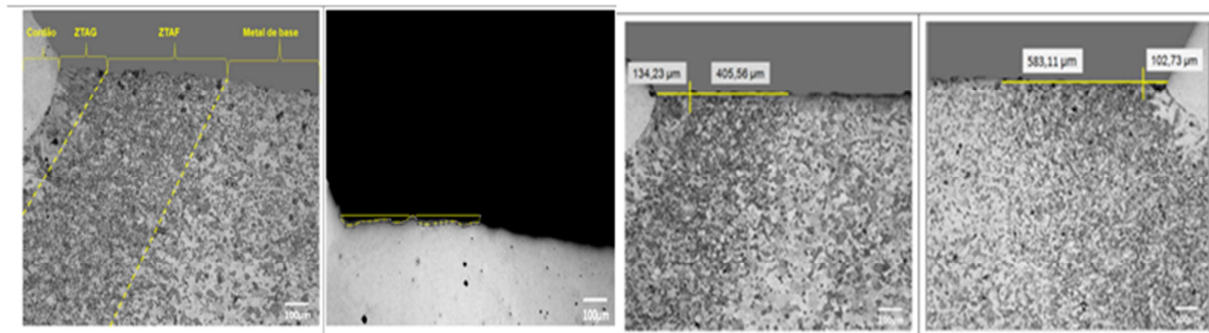


Figura 5. Etapas para avaliar o desgaste corrosivo nas condições puxando e empurrando. Ataque com cloreto férrico (FeCl_3) por 5 horas. Em seguida com Água Régia por 60 s

Em seguida, foi utilizado as micrografias das amostras com as máscaras para calcular a área desgastada por região como é mostrado na Figura 6.

O procedimento usado para medir o desgaste corrosivo se mostrou sensível à avaliação do desgaste na borda do cordão solda, caracterizado pela diferença entre as superfícies das amostras antes e após a corrosão. Esta diferença indicada pela máscara polimérica após imersão no cloreto férrico (FeCl_3), mostrou que as tensões geradas nesta área aumentaram a corrosão da ZTA de granulometria grossa (ZTAG) e da ZTA de granulometria fina (ZTAF), sendo seu efeito, caracterizado com fidelidade pela réplica desenvolvida para auxiliar nesta caracterização. Segundo Garcia et al. (2008), as tensões residuais e/ou externas podem causar o colapso dos filmes finos de óxidos aderente e passiva que protegem os aços inoxidáveis da corrosão.

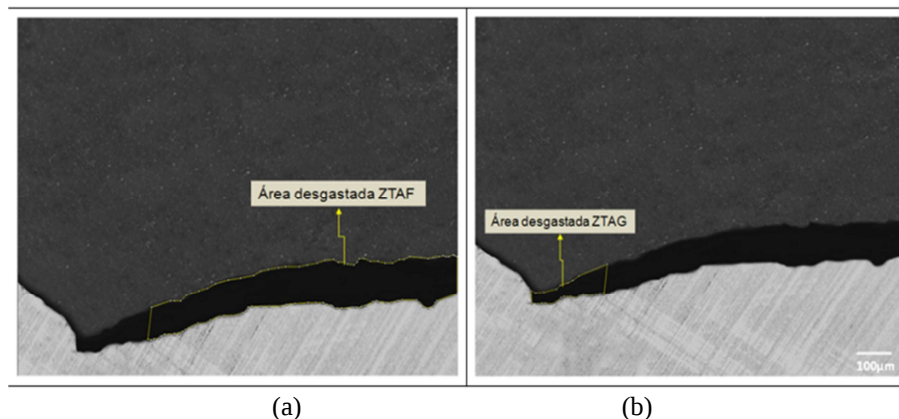


Figura 6. Micrografia de áreas desgastadas de uma amostra soldada no sentido puxando, após ensaio de corrosão com cloreto férrico (FeCl_3) por 5 horas. (a) Área desgastada da ZTAF; (b) Área desgastada da ZTAG

A Figura 7 (a) mostra que a corrosão aumenta com o tempo de exposição das amostras no cloreto férrico e que este aumento foi mais significativo para a condição de soldagem puxando. Dessa forma, esta condição fica sendo caracterizada como a que gerou mais tensões na concordância cordão-chapa.

A partir do exposto acima, partiu-se para executar os ensaios de resistência à corrosão com as amostras flexionadas restritas (usando torque de 8.8 N.m) e não restritas no sentido de soldagem puxando. A Figura 7 (b) mostra que a corrosão foi maior para aquelas com restrição, evidenciando o efeito das tensões localizadas na concordância cordão x chapa que tendem a diminuir a resistência desta propriedade. Dessa forma, optou-se por escolher amostras restritas para avaliar o desgaste por corrosão na região de não concordância do cordão x chapa.

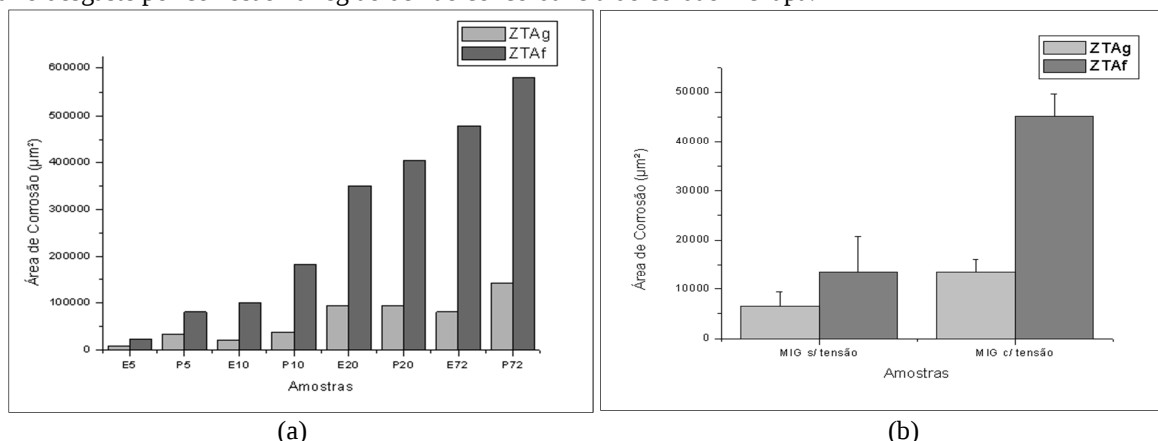


Figura 7. (a) Área de corrosão das amostras nas condições puxando e empurrando deformadas em função do tempo de ataque com cloreto férrico (FeCl_3); (b) Área de corrosão das amostras na condição puxando deformada, sob tensão, em função do tempo de ataque com cloreto férrico (FeCl_3)

4. CONCLUSÕES

Durante o desenvolvimento desse trabalho, foi avaliado uma técnica que mediu o desgaste por corrosão na borda do cordão de solda. Dentre as avaliações usando microscopia óptica, chegou-se às seguintes conclusões:

- O uso da microscopia óptica para avaliar desgaste na borda do cordão de solda mostrou-se ser limitada quanto ao uso e identificação, sendo possível avaliar quantitativamente o desgaste dessa região com o uso dessa ferramenta.
- A técnica de identificação do desgaste corrosivo com o uso de uma máscara a base de resina polimérica moldando a superfície original das amostras soldadas, permitiu uma avaliação mais coerente da relação entre a existência de concentradores de tensão (concordância cordão-chapa) e intensidade de tensões com o desgaste corrosivo na borda do cordão de solda.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEMIG, através do Proc. TEC-PPM-00316-10, pelo suporte financeiro, à FAPEMA, pela bolsa de pós-graduação para um dos autores, à CAPES, através do programa Dinter UFU-IFMA e à Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, pelo suporte de infraestrutura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSELMO, N., Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel in aerated and CO_2 -saturated synthetic seawater, *Materials Science and Engineering A*, v.428, p. 73-79, 2006.
- ARCELOR MITTAL. Aço inoxidável Ferrítico Ace P410D. <http://www.arcelormittalinoxbrasil.com.br/port/arquivos/AcoInoxPortuguesP410D.pdf>. Acesso em 25 fev. 2012.
- ASTM A 380-06. Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems. 2006.
- ASTM A 967-05. Standard Specification for Chemical Passivation Treatments for Stainless Steel Parts. 2005.
- ASTM G48-11. Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. 2011.
- DEEPASHRI, D. N.; RAJA, V. S. *Corrosion Science*. 48. 2317, 2006.
- GARCIA, C.; MARTIN, F.; TIEDRA, ; BLANCO, T. Y.; LOPEZ, M. Pitting Corrosion of Welded Joints of Austenitic Stainless Steels Studied by Using an Electrochemical Minicell. *Corrosion Science* v. 50. p. 1184–1194. 2008.
- GARCIA, C.; MARTIN, F.; TIEDRA, ; BLANCO, T. Y.; LOPEZ, M. Pitting Corrosion of Welded Joints of Austenitic Stainless Steels Studied by Using an Electrochemical Minicell. *Corrosion Science* v. 50. p. 1184–1194. 2008.
- GENTIL, V. *Corrosão*, 4ª edição. 2003.

- KIRKHOPE, K. J.; BELL, R.; CARON, L.; BASU, R. I.; MA, K. T. Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques. Part 1: review. *Marine Structures*, n.12, p. 447- 474, 1999.
- LU, B. T.; CHEN, Z. K.; LUO, J. L.; PATCHETT, B. M.; XU, Z. H. Pitting and stress corrosion cracking behavior in welded austenitic stainless steel, *Electrochim. Acta* v. 50. p. 1391–1403. 2005.
- PADILHA, A.F., GUEDES, L.C. Aços Inoxidáveis Austeníticos. ABM. 1995.
- SERNA-GIRALDO, C. A., Resistência à Corrosão Intergranular UNS S43000: Avaliação por Método de Reativação Eletroquímica, Efeito de Tratamento Isotérmico e Mecanismo de Sensitização. 196 f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- TAKAHASHI, K.; Ito, A. Effect of External Geometry of Reinforcement on the Fatigue Strength of a Welded Joint. *Journal Japanese Welding Society*, v. 40, n.3, p. 13, 1971.