

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM JUNTAS SOLDADAS DE LIGAS RESISTENTES A CORROSÃO (CRA) PRODUZIDAS ATRAVÉS DA SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA

G.V. B. Lemos ^(1, 2);
C. P. Meinhardt ^(1, 2, 3);
D. Martinazzi ⁽²⁾;
L. Bergmann ⁽¹⁾;
J. F. dos Santos ⁽¹⁾;
T. R. Strohaecker ⁽²⁾.

¹ Helmholtz-Zentrum Geesthacht. Institute of Materials Research. Materials Mechanics. Solid State Joining Processes. Geesthacht, Germany.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

³ Univates, Lajeado, Rio Grande do Sul, Brasil.
guilherme.lemos@ufrgs.br

RESUMO

A utilização de materiais nobres é requisito básico em aplicações onde existe um ambiente corrosivo agressivo como na indústria do óleo e gás. Neste panorama, as ligas resistentes à corrosão (CRA) são frequentemente utilizadas. Assim, é importante o conhecimento dos métodos mais modernos de soldagem destas ligas e as suas consequências nas propriedades destes materiais. Portanto, o presente trabalho faz uma avaliação das propriedades mecânicas, microestruturais e de resistência à corrosão localizada após a aplicação da Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica (SFMM) em chapas de uma liga à base de Níquel (Inconel 625) e também de um material a base de ferro (aço inoxidável super duplex UNS S32760). A união das chapas foi realizada com velocidade de rotação da ferramenta de 200 rpm para a liga Inconel 625 e 400 rpm para o aço inoxidável super duplex com a velocidade de soldagem mantida constante (1mm/s). Em um primeiro momento, os aportes térmicos foram estudados. Além disso, a caracterização das juntas soldadas de CRA foi obtida através da análise microestrutural e em termos de microdureza. Por fim, a avaliação da resistência à corrosão localizada (pite) foi realizada de acordo com a norma ASTM G48 (método A) que propõe o ensaio por imersão em solução de cloreto férrico. Os resultados mostraram que as juntas soldadas de Inconel 625 têm maior resistência à corrosão localizada do que as juntas soldadas de aço UNS S32760.

Palavras-chave: Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica, Inconel 625, aço inoxidável Super Duplex UNS S32760, Corrosão por pites.

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, uma das mais importantes descobertas de petróleo nos últimos 10 anos aconteceu em águas profundas da costa brasileira. Além de maiores profundidades, estes novos cenários apresentaram maiores pressões internas e, em muitos casos, fluidos altamente corrosivos. Dentre os desafios tecnológicos que estão sendo enfrentados para colocar as reservas em produção é a seleção de materiais que resistam a estes fluidos e condições. Neste cenário, o uso de aço ao carbono em poços, risers e tubulações de superfície nas plataformas é quase impossível, exigindo a utilização extensiva de Ligas Resistentes à Corrosão (CRA) [1]. As ligas resistentes à corrosão (CRA) são mundialmente empregadas em ambientes de produção de petróleo e gás devido a sua capacidade em manter a resistência à corrosão mesmo após longo tempo de utilização [2]. Em geral, as ligas CRA são menos suscetíveis a corrosão sob tensão, corrosão fadiga e trincamento sob tensão induzido por sulfeto do que os aços inoxidáveis [3] [4]. Estes componentes incluem colunas de produção/injeção, elementos de segurança, componentes da árvore de Natal, válvulas, tubulações, vasos de pressão, trocadores de calor, etc. Dentro do grande grupo de ligas CRA mundialmente usadas, a superliga de Níquel (Inconel 625) e o aço inoxidável super duplex UNS S32760 têm destaque devido as suas excelentes propriedades de corrosão.

Os processos tradicionais de soldagem com fusão envolvem altas temperaturas e procedimentos de soldagem adequados são necessários para obtenção de soldas com boa qualidade. Porém, é sabido que eles promovem uma estrutura bruta de fusão e podem ocasionar problemas relacionados à segregação, porosidades, fragilização, distorção e tensões residuais [5, 6]. Além disso, a soldagem com fusão pode provocar precipitação de carbonetos ricos em Cr, fases Laves e delta e o crescimento de grãos em materiais resistentes a corrosão (CRA), constituintes microestruturais que tendem a reduzir a resistência à corrosão [7, 8, 9]. Por outro lado, o método de união no estado sólido geralmente alcança temperaturas de picos menores, mas suficientes para que ocorra a recristalização do material. Assim, esta técnica de

união no estado sólido, que não ocasiona a fusão do material, tende a resultar em melhores propriedades mecânicas para as juntas soldadas.

A corrosão é um fenômeno de superfície que inicia na interface entre o material e o meio corrosivo. Geralmente, a resistência à corrosão é avaliada através de técnicas eletroquímicas, ensaios de imersão e ensaios de corrosão associados a esforços mecânicos [10]. Visto a relevância da aplicação das ligas resistentes à corrosão (CRA) em ambientes corrosivos que exigem alto grau de confiabilidade, o estudo do comportamento destes materiais frente à corrosão é extremamente importante, mesmo que eles possuam uma notável resistência à corrosão [11]. Um ensaio comum para a avaliação da resistência à corrosão de ligas CRA é o ensaio por imersão em solução aquosa de cloreto férrico. Este ensaio é padronizado pela norma internacional ASTM G48 [12] e apresenta uma boa correlação com o desempenho dos materiais em meios agressivos reais como a água do mar em condições de baixo pH e altas concentrações de cloretos.

O presente trabalho buscou realizar um estudo preliminar da resistência à corrosão de chapas soldadas de ligas resistentes a corrosão, mundialmente conhecidas como ligas CRA, obtidas através do processo SFMM.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste estudo foram a superliga de Níquel (popularmente conhecida como Inconel 625) e o aço inoxidável super duplex UNS S32760, na forma de chapas com 3,0 mm de espessura. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a composição química dos materiais estudados.

Tabela 1. Composição química (% em massa).

	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Mn	Al+Ti	C	N	Cu	W
<i>Inconel 625</i>	Bal.	21,7	4,7	8,6	3,38	0,09	0,31	0,015			
<i>UNS S32760</i>	6,97	25,3	Bal.	3,6	-	0,64	-	0,028	0,23	0,59	0,63

As juntas soldadas foram produzidas na configuração de topo. A preparação da superfície das chapas consistiu na limpeza prévia das juntas

com remoção de gorduras, óxidos e impurezas. Após a limpeza foi realizada a fixação e alinhamento das chapas na mesa de soldagem. De acordo com os testes preliminares, a preparação inicial das chapas mostrou-se uma etapa importante para a qualidade superficial das juntas soldadas.

O processo de soldagem no estado sólido foi realizado em uma máquina rígida em forma de pórtico equipada com servomotores e sistemas de controle automatizados. Uma ferramenta não consumível de Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (pcBN) grau Q70 foi utilizada com ombro de 25 mm de diâmetro e pino de 3 mm de comprimento. A rotação da ferramenta foi no sentido anti-horário e, sendo assim, o lado esquerdo do cordão de solda foi o retrocesso (LR) e o lado direito o lado de avanço (LA). A direção de soldagem seguiu à direção de laminação da chapa. Para a obtenção dos cordões de solda, foi considerado um ângulo de ataque da ferramenta de $1,5^\circ$ em relação à vertical. Além disso, uma atmosfera de argônio foi empregada para minimizar a oxidação da superfície da junta soldada e também da ferramenta durante o processo de soldagem.

Para as análises metalográficas, as amostras foram cortadas por eletroerosão e seguiram as práticas básicas de lixamento e polimento. Para a liga chapa soldada de Inconel 625, as amostras foram atacadas com o reagente Adler e, no caso das juntas soldadas de aço UNS S32760, o ataque eletrolítico utilizado foi uma solução aquosa de 40% NaOH. As macroestruturas das juntas soldadas foram realizadas na face superior e na seção transversal. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para avaliação das juntas soldadas após os ensaios de corrosão.

As propriedades mecânicas foram avaliadas em termos de medições de dureza Vickers. Os perfis de microdureza ao longo da superfície e da seção transversal das juntas soldadas foram obtidos com carga de 500 g e distância entre indentações de 0,2 mm.

A avaliação da corrosão por pites seguiu as recomendações da norma ASTM G48 método A, que indica a utilização do reagente cloreto férrico. Porém, como os materiais CRA estudados têm elevada resistência a corrosão, este ensaio foi realizado com temperatura de 60°C mantida constante durante três dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Material de base

Os materiais CRA utilizados no presente estudo são similares, mas não idênticos. A superliga a base de Níquel (Inconel 625) é um material austenítico praticamente isotrópico ao longo das suas direções com estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC). Por outro lado, o aço inoxidável super duplex (UNS S32760) é material a base de Ferro composto de duas fases, a austenita (fase clara) e a ferrita (fase escura) em proporções semelhantes. Assim, com base nas características particulares de cada um dos materiais avaliados, era de se esperar que os parâmetros do processo de Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica fossem diferentes para estes materiais, o que de fato ocorreu.

3.2 Aparência superficial de topo da junta soldada

A soldagem por fricção e mistura mecânica é capaz de produzir juntas soldadas com excelente acabamento superficial. A qualidade superficial das soldas é um bom indicativo da escolha correta dos parâmetros de processo. O princípio básico do processo é resumido através da Figura 1. Os números indicam as principais variáveis envolvidas neste método de união, são elas: 1) peça de trabalho, 2) ferramenta de soldagem, 3) ombro da ferramenta, 4) pino da ferramenta, 5) face da solda, 6) o lado de retrocesso da solda, 7) o lado de avanço da solda e 8) buraco de saída. Desta maneira, as superfícies de topo das juntas soldadas dos materiais estudados são apresentadas na Figura 2 e os parâmetros de processo podem ser vistos na Tabela 2

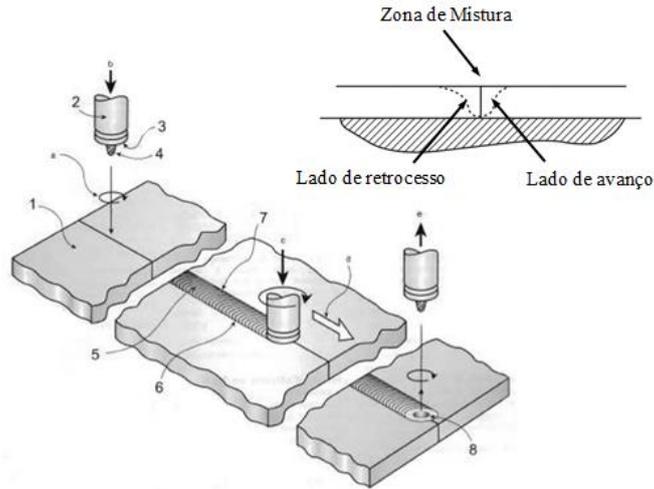


Figura 1. Princípio básico do processo de Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica (de acordo com a norma ISSO 25239-1:2011).

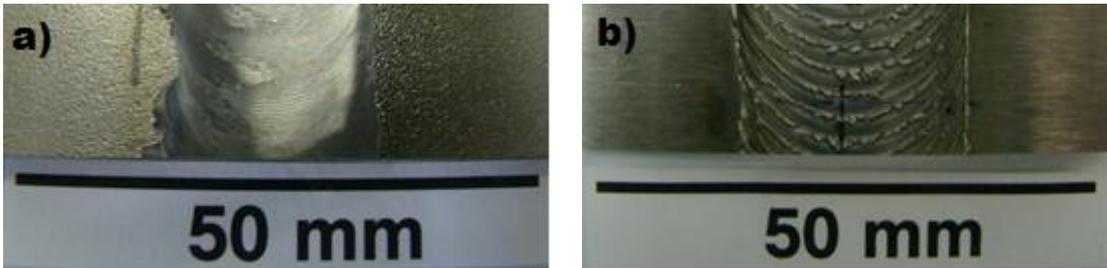


Figura 2. Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica:
a) Inconel 625, b) Aço inoxidável super duplex UNS S32760.

Tabela 2. Visão geral dos parâmetros de soldagem.

Material CRA	Velocidade de soldagem, mm/s	Força Axial, kN	Velocidade de rotação, rpm	Aparência superficial da junta soldada
<i>Inconel 625</i>	1	60	200	Excelente
<i>UNS S32760</i>	1	40	400	Excelente

3.3 Aporte térmico

O aporte térmico [26] das juntas soldadas foi calculado em função da velocidade de rotação e do torque de acordo com as seguintes equações:

$$HI = \frac{P}{v} \quad (1)$$

$$P = \frac{2\pi\Omega T}{60} \quad (2)$$

onde P é a potência em kW, Ω é a velocidade de rotação em rev/min, T é o torque do fuso da máquina em Nm, HI é o aporte térmico (J/mm) e v é a velocidade de soldagem (mm/seg). Assim, os valores de aporte térmico podem ser vistos na Tabela 3. Um aumento na velocidade de rotação (rpm) ocasionou um maior aporte térmico (junta soldada de UNS S32760). Ainda, como a chapa soldada de aço UNS S32760 alcançou os maiores valores de aporte térmico, este fato sugere que maiores temperaturas atingidas. Por outro lado, uma menor velocidade de rotação (junta soldada de Inconel 625) ocasionou um menor aporte térmico, mas ao mesmo tempo elevou o torque para 110 N.m.

Tabela 3. Aporte térmico em função da velocidade de rotação e do torque.

Liga CRA	Velocidade de rotação, Rpm	Torque, Nm	Aporte térmico, kJ/mm
<i>Inconel 625</i>	200	110	2.30
<i>UNS S32760</i>	400	66.8	2.41

3.4 Análise metalográfica

As macroestruturas da superfície de topo e da seção transversal da junta soldada de Inconel 625 são apresentadas pelas Figuras 3 e 5. Para o caso da chapa soldada de aço UNS S32760, as macroestruturas são mostradas pelas Figuras 4 e 6. Notou-se um comportamento mais homogêneo na superfície da junta soldada de Inconel 625 quando comparada a superfície da junta soldada de UNS S32760, fato que está coerente com as imagens apresentadas na Figura 3. Para as seções transversais das juntas soldadas em análise, percebeu-se que a chapa soldada de Inconel 625 apresentou uma região escura que pode ter relação com o desgaste da ferramenta de pcBN inerente ao processo. Entretanto, as duas juntas soldadas apresentaram visível refino de grão oriundo da recristalização provocada pela soldagem no estado sólido.



Figura 3. Superfície de topo da junta soldada de Inconel 625.

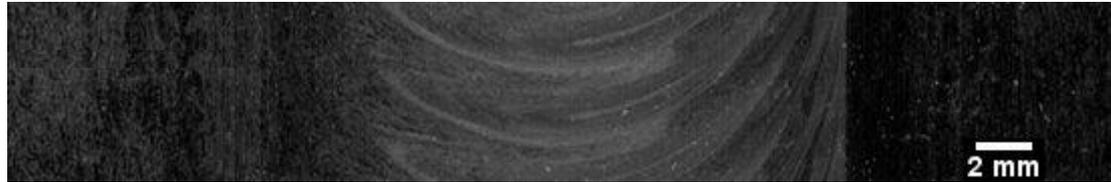


Figura 4. Superfície de topo da junta soldada de aço UNS S32760.



Figura 5. Seção transversal da junta soldada de Inconel 625.



Figura 6. Seção transversal da junta soldada de UNS S32760.

3.5 Microdureza

As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados de microdureza Hv 0,5 para a superfície de topo e para a seção transversal das juntas soldadas, respectivamente. Com respeito ao metal de base, picos de dureza podem ser observados, os quais podem estar relacionados a precipitados presentes nos materiais. No geral, considerando uma região afastada da solda, o metal de base, a liga Inconel 625 alcançou os menores valores de microdureza (248 e 265 Hv) para as medições na superfície e transversal, respectivamente. O refino de grão proveniente da soldagem no estado sólido foi a principal causa para o aumento de dureza juntas soldadas. Em média, a superfície de topo da junta soldada de Inconel 625 alcançou valores ligeiramente superiores do que os dados encontrados para a superfície da junta soldada de aço UNS S32760. Por fim, as medições de microdureza na seção transversal das juntas soldadas mostraram uma diferença significativa entre as soldas, onde a chapa soldada de aço UNS S32760 atingiu valores de até 377 Hv na zona de mistura.

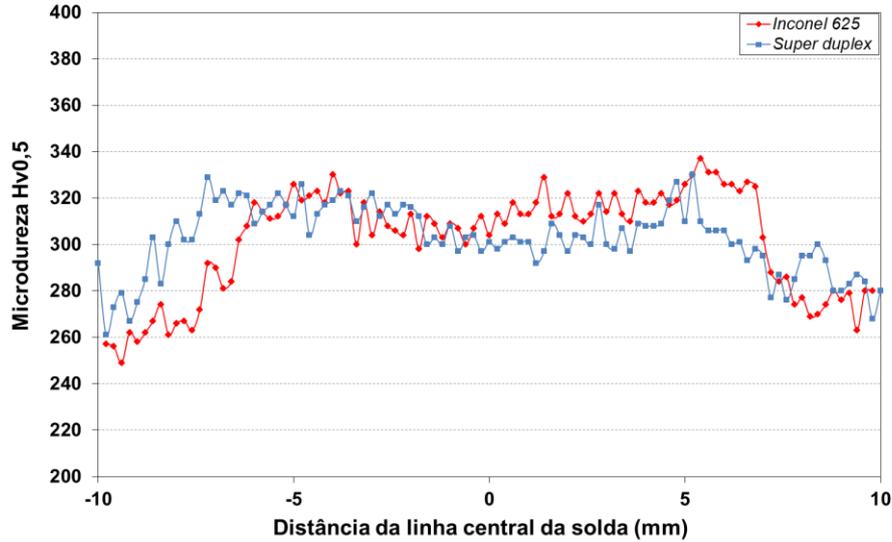


Figura 7. Perfil de microdureza na superfície de topo das juntas soldadas.

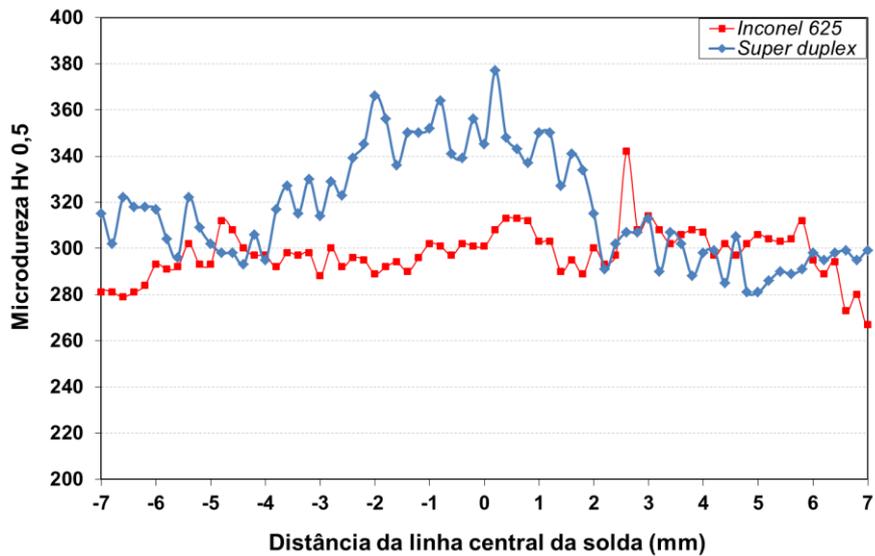


Figura 8. Perfil de microdureza na seção transversal das juntas soldadas.

3.6 Avaliação da corrosão

Os materiais CRA são mundialmente utilizados na indústria do óleo e gás e possuem alta resistência a corrosão localizada que, em geral, pode ser estimada através do número equivalente de resistência ao pite (*PREN - Pitting Resistance Equivalent Number*) conforme a equação 3. Assim, os valores de PREN foram calculados para ambos os materiais avaliados e podem ser visualizados na Tabela 4. Nota-se que a superliga a base de Níquel alcançou um maior PREN quando comparada ao aço UNS S32760 e, portanto, tende a apresentar melhor comportamento frente à corrosão em meios contendo cloreto. Por outro lado, os valores de PREN não consideram as alterações

microestruturais provocadas pelo processo SFMM e as suas consequências na resistência à corrosão por pites.

$$\text{PREN} = \%Cr + 3.3(\%Mo + 0,5\%W) + 16\%N \quad (3)$$

Tabela 4. Número equivalente de resistência ao Pite (PREN).

	Inconel 625	UNS S32760
PREN	50	42

Além da estimativa inicial da resistência a formação de pites com base na composição química do material, é comum a utilização do ensaio de imersão em cloreto férrico (ASTM G48A) para avaliação da resistência ao pite. Em termos de perda de massa, as amostras não apresentaram diferenças significativas em relação aos seus pesos iniciais. Além disso, a solda de Inconel 625 não apresentou corrosão por pites. Porém, a junta soldada de aço UNS S32760 apresentou embolamento e formação de pites com tamanhos variados em uma região ao lado da solda (local onde haviam sido formados precipitados (Figura 9)).

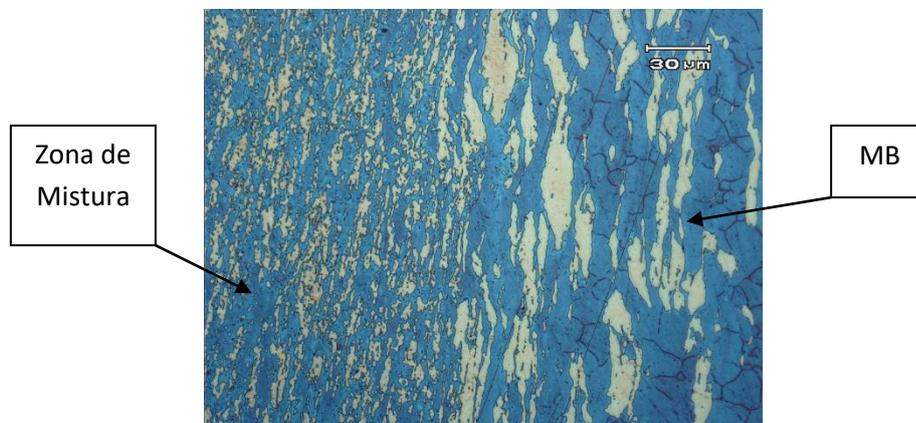


Figura 9: Microestrutura da superfície de topo da junta soldada de aço UNS S32760 mostrando a precipitação de intermetálicos em uma região adjacente a solda.

A morfologia da corrosão observada após o ensaio de imersão em cloreto férrico, conforme apresentado nas Figuras 11 (a) e 11 (b), sugere-se que a corrosão foi iniciada nas regiões adjacentes ao precipitado previamente formado. Isto permitiu a entrada da solução em uma região subsuperficial do

aço UNS S32760 e a evolução para uma corrosão localizada. Na Figura 11 (c), a formação de pites pode ser observada macroscopicamente na amostra ensaiada. Uma semana após os ensaios, a corrosão localizada transformou-se em um grande pite na região adjacente a junta soldada.

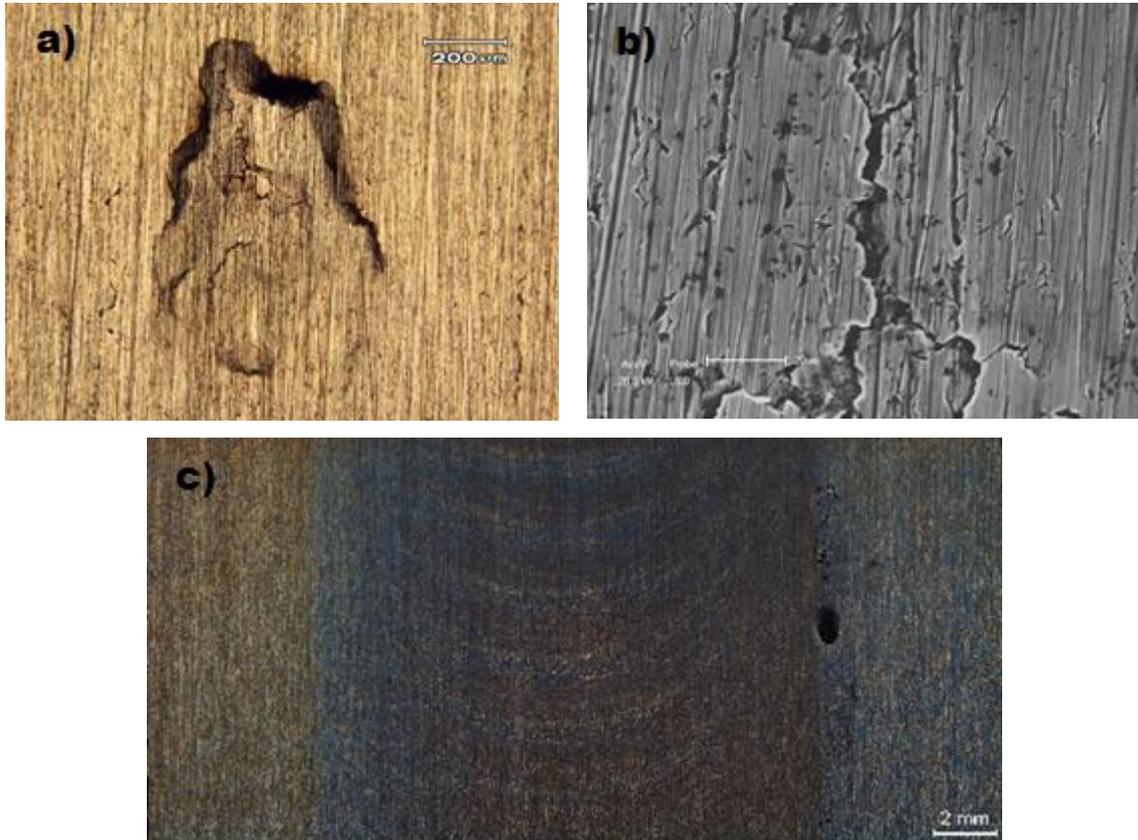


Figura 10. Junta soldada de aço UNS S32760 após ensaio de imersão em cloreto férrico: (a) embolamento e corrosão localiza, (b) corrosão localizada em detalhe (Microscopia Eletrônica de Varredura) e (c) evolução da corrosão localizada para um grande pite na região adjacente a junta soldada.

4. CONCLUSÕES

O processo de Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica pode ser utilizado para união de chapas fabricadas em ligas resistentes à corrosão (tanto a liga Inconel 625 como o aço UNS S32760). Ambas as juntas soldadas apresentaram refino de grão proveniente da soldagem no estado sólido. O ensaio de imersão em cloreto férrico para as juntas soldadas de materiais CRA, proposto pela norma ASTM G48, comprovou a maior resistência à corrosão da

junta soldada da liga a base de Níquel (Inconel 625) quando comparada a chapa soldada a base de Ferro (aço inoxidável super duplex UNS S32760).

Referências:

1. HENRIQUES, C. C. D.; JOIA, C. J. B. M.; BAPTISTA, I. P.; GUEDES, F. M. F. Material Selection for Brazilian Presalt Fields. Proceedings of The Offshore Technology Conference, Society of Petroleum Engineers: Richardson, TX, 2012.
2. CRAIG, BD.; SMITH, L. Corrosion Resistant Alloys (CRAs) In The Oil And Gas Industry. Nickel Institute Technical Series. (1):0073. 2011.
3. REBAK, R. Environmentally Assisted Cracking of Nickel Alloys-A Review. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA; 2004.
4. IMO. Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels. 2º Edition, 2009.
5. Avery, R. E.; Tuthill, A. H. Guidelines for Welded Fabrication of Nickel Alloys for Corrosion Resistant Service. (1994) pp. 1-35.
6. Sorensen, C. D.; Nelson, T. W. Friction stir welding of ferrous and nickel alloys. Friction stir welding and processing. (2007) pp.111-21.
7. Davis, J. R., ed. Corrosion of Weldments. ASM International, 2006.
8. Meinhardt C.P. Caracterização Microestrutural de Soldas por Fricção em Aço Inoxidável Austenítico UNS S36763 e Aço Inoxidável Dúplex UNS S31308. 113f. PPGE3M, UFRGS, 2013.
9. Lemos, G. V. B.; Simoni, L.; Bergmann, L.; Souza, D ; Araujo, D. B.; Dos Santos, J. F.; Strohaecker, T. R.; Schroeder, R. M. Caracterização Preliminar da Microestrutura em Cordões de Solda da liga 625 produzidos através dos processos de SFMM e MIG. XLI Congresso Nacional De Soldagem, Salvador - Bahia. 2015
10. DUPONT, J.N.; VAN GEERTRUYDEN, W.; CAIZZA, A.; ESPOSITO, A. Corrosion Behavior Of Alloy 600 And 622 Coextruded And Weld Overlay Coatings. NACE International, 2010
11. GANESAN, P.; RENTERIA, C. M.; CRUM, J., R. Versatile Corrosion Resistance of INCONEL” alloy 625 in Various Aqueous and Chemical Processing Environments. Superalloys 718, 625 and Various Derivatives Edited by Edward A. Loria The Minerals, Metals & Materials Society, pg. 663 – 680, 1991.
12. ASTM G48-11 Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. American Society for Testing and Materials, 2011.

CORROSION EVALUATION OF THE FRICTION STIR WELDED JOINTS OF CORROSION RESISTANT ALLOYS

Abstract: *The use of noble materials is a basic requirement in applications where there is an aggressive corrosive environment such as in the oil and gas industry. In this scenario, the corrosion-resistant alloys (CRA) are often used. Thus, it is important to know modern methods of welding these alloys and their consequences on the properties of these materials. Therefore, this study evaluates the mechanical properties, microstructure and localized corrosion resistance after Friction Stir Welding (FSW) application in Nickel-based alloy (Inconel 625) and super duplex stainless steel sheets. The joining of the sheets was performed with rotational speed of 200 rpm tool for Inconel 625 alloy and 400 rpm for the super duplex stainless steel (UNS S32760), and the constant welding speed (1 mm / s). At first, the heat input was studied. Furthermore, the characterization of welded CRA joints was obtained by microstructural and microhardness analysis. Finally, an evaluation of the resistance to localized corrosion (pitting) was performed according to ASTM G48 (Method A) which proposes the immersion test in ferric chloride solution. Results showed that the welded joints of Inconel 625 have greater corrosion resistance than the joints of super duplex stainless steel.*

Key-words: *Friction Stir Welding, super duplex stainless steel, Inconel 625, pitting corrosion.*