



Tema: Corrosão

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FRENTE À CORROSÃO DA LIGA DE NÍQUEL 182 EM AMBIENTES CONTENDO NaCl E Na₂S₂O₃*

Isabela Costa Mendes Peres¹

Mônica Maria de Abreu Mendonça Schvartzman²

Marco Antônio Dutra Quinar²

Guilherme Marconi Silva³

Resumo

As soldas dissimilares de liga de níquel 182 são utilizadas em usinas nucleares para conectar tubulações de aço inoxidável com componentes fabricados em aço de baixa liga. O procedimento envolvido na soldagem dissimilar pode modificar as propriedades do material, o que afeta diretamente a junta soldada no sentido de aumento da probabilidade de incidência do processo de corrosão. Neste trabalho foi realizado a soldagem dissimilar de corpos de prova dos aços de baixa liga e aço inoxidável austenítico AISI 316L com as ligas de níquel 82 e 182. Estudou-se o comportamento frente à corrosão da junta de solda de liga 182 em ambientes ácidos contendo NaCl e Na₂S₂O₃ empregando-se técnicas eletroquímicas. Ensaios de polarização anódica potenciodinâmica foram utilizados para caracterizar o comportamento de corrosão localizada do material. Os resultados mostraram que o comportamento eletroquímico da junta de solda está relacionado com o aporte térmico e a presença ou não de oxigênio no meio

Palavras-chave: Liga 182; Corrosão eletroquímica; Solda dissimilar.

EVALUATION OF THE CORROSION BEHAVIOUR OF NICKEL ALLOY 182 IN ENVIRONMENTS CONTAINING NaCl AND Na₂S₂O₃

Abstract

Dissimilar welding of nickel alloy 182 is used in nuclear power plants to connect pipes of stainless steel with parts made from low alloy steel. The procedure involved in dissimilar welding can modify the properties of the material, which directly affects the longitudinal weld in order to increase the probability of corrosion incidence. In this work the dissimilar welding of specimens of low alloy steels and AISI 316L austenitic stainless steel and 82 and 182 nickel-based alloys was performed. It was studied the corrosion behavior of the alloy 182 dissimilar weld metal in acidic environments containing NaCl and Na₂S₂O₃ employing electrochemical techniques. Anodic potentiodynamic polarization tests were used to characterize the localized corrosion behavior of the material. The results showed that the electrochemical behavior of the weld metal is related to the heat input and the presence or absence of oxygen in the corrosion susceptibility of the weld metal of alloy 182.

Keywords: Alloy 182; Electrochemical corrosion; Dissimilar weld.

¹ *Graduanda, Engenharia Química, PUC-MG, MG, Brasil.*

² *Dr., Pesquisadora, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Brasil.*

³ *Dr, Professor, CEFET-MG, MG, Brasil.*

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

As soldas entre dois diferentes metais, denominadas soldas dissimilares, são utilizadas em diversos segmentos das indústrias químicas, petroquímicas e nucleares. No caso específico de usinas nucleares, tais soldas são utilizadas para conectar tubulações de aço inoxidável com componentes fabricados em aço de baixa liga. Os materiais de adição mais utilizados neste tipo de solda são as ligas a base de níquel (ligas 82, 182, 52 e 152) ou aço inoxidável austenítico (E308L, E309L ou E316L) [1,2].

Nas usinas nucleares, o tipo da solda dissimilar empregado está relacionado com o tipo de reator, com os materiais envolvidos e com o processo de soldagem utilizado. No entanto, quando dois diferentes materiais de base são soldados, é usual utilizar um dos três métodos, soldagem direta dos dois materiais, soldagem dos dois materiais após o amanteigamento de um deles e o uso de uma peça de transição entre os dois diferentes materiais de base. O amanteigamento é a deposição na superfície de um metal de base de camadas de um material dissimilar, que servirá como camada de transição quando a junta subsequente for executada sobre a camada amanteigada [1-4].

A Liga de níquel 600 assim como seus metais de adição (ligas 82 e 182) de composições similares e utilizada em processos de soldagem é encontrada nos principais componentes de usinas nucleares: no vaso de pressão, geradores de vapor, pressurizadores e suas conexões. Sua utilização foi devido ao fato destes materiais possuírem elevada resistência mecânica, grande ductilidade e alta resistência à corrosão nas condições de operação das centrais nucleares tipo PWR. O procedimento envolvido na soldagem dissimilar pode modificar as propriedades metalúrgicas e de resistência à corrosão, afetando potencialmente a junta soldada e aumentando a probabilidade de incidência do processo de corrosão.

Este trabalho consistiu na soldagem dissimilar de corpos de prova dos aços de baixa liga (ASTM A 508 G3) e aço inoxidável austenítico AISI 316L com as ligas de níquel 82 e 182, empregando-se dois procedimentos de soldagem: a primeira reproduziu uma solda dissimilar existente em uma usina nuclear PWR (parametrização normal de soldagem) e a segunda empregando-se um aporte térmico três vezes maior. Posteriormente, avaliou-se o comportamento eletroquímico da junta soldada em solução ácida aerada e desaerada, contendo sulfeto e cloreto, empregando-se o ensaio de polarização anódica potenciodinâmica. Foi possível comparar o efeito do aporte térmico e da presença ou não de oxigênio na suscetibilidade à corrosão do metal de adição de liga 182.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da soldagem utilizaram-se como materiais aço de baixa liga do tipo ASTM A508 grau 3 e o aço inoxidável austenítico AISI 316L como metais de base. Como metais de adição foram empregados o eletrodo revestido AWS A5.11 ENiCrFe-3 (liga de níquel 182) e o arame AWS A5.14 ENiCr-3 (liga de níquel 82), com diâmetros de 4 mm e 2,4 mm, respectivamente. A composição química nominal dos metais de base e dos metais de adição é apresentada na Tabela 1.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 1 – Composição química dos materiais base e de adição (% em peso).

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti	Mo
316L	0,02	1,46	0,47	0,02	0,003	16,7	9,8	0,02	-	2,1
SA 508	0,21	1,34	0,22	0,05	0,003	0,1	0,72	-	-	0,5
182	0,05	5,80	0,57	0,01	0,006	14,9	71,8	1,9	0,18	-
82	0,04	2,81	0,09	0,01	0,001	19,6	73,1	2,4	0,35	-

A soldagem do aço de baixa liga ASTM A-508 grau 3 ao aço inoxidável austenítico AISI 316L foi realizada manualmente. Na chapa de aço baixa liga ASTM A-508, pré-aquecida a 150°C, foi aplicada uma camada de “amanteigamento”, com 5 passes de solda, com espessura entre 5 - 8 mm utilizando-se a liga de níquel 82 como metal de adição e o processo de soldagem a arco manual com proteção gasosa GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*). Após o “amanteigamento” a peça foi usinada e tratada termicamente a uma temperatura de 600°C por 2 horas, para alívio de tensões residuais. A união da chapa de aço ASTM A-508 “amanteigada” à chapa de aço AISI 316L foi realizada empregando-se o processo GTAW e vareta da liga de níquel 82 e 3 passes de raiz. Para o preenchimento do chanfro restante foi utilizada a liga de níquel 182 como metal de adição e o processo de soldagem a arco manual com eletrodo revestido SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) [5, 6]

O processo GTAW foi executado na operação de amanteigamento do aço de baixa liga e para o passe de raiz, por ser considerado um processo que permite um melhor controle de arco garantindo-se assim uma solda de melhor qualidade do ponto de vista de sanidade, ou seja, um aporte térmico controlado com menor afetamento térmico do metal de base, uma poça de fusão onde se pode controlar a diluição e a taxa de deposição e, conseqüentemente menor incidência de defeitos. Em soldas das estruturas de reatores nucleares, devido ao risco de vazamento de materiais radioativos, há necessidade de se obter soldas de elevado nível de sanidade e estanqueidade, desta forma, o processo GTAW se apresenta como um dos mais adequados para utilizações em passes de raiz e amanteigamentos.

A soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW) é um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e as peças que estão sendo unidas. Este processo foi utilizado somente para a operação de enchimento da junta dissimilar por permitir uma maior flexibilidade e um menor custo. Os eletrodos revestidos oferecem uma melhor operacionalidade no chanfro e na solda de filetes na posição plana e nas demais posições.

Após a soldagem a peça teste não foi tratada termicamente. Ela foi submetida a ensaios não destrutivos de líquido penetrante e radiografia e nenhum defeito foi revelado. Na Figura 1 é apresentada a configuração da junta soldada e na Tabela 2 e 3 são descritos os parâmetros de soldagem utilizados na reprodução de uma solda dissimilar existente em uma central nuclear PWR.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

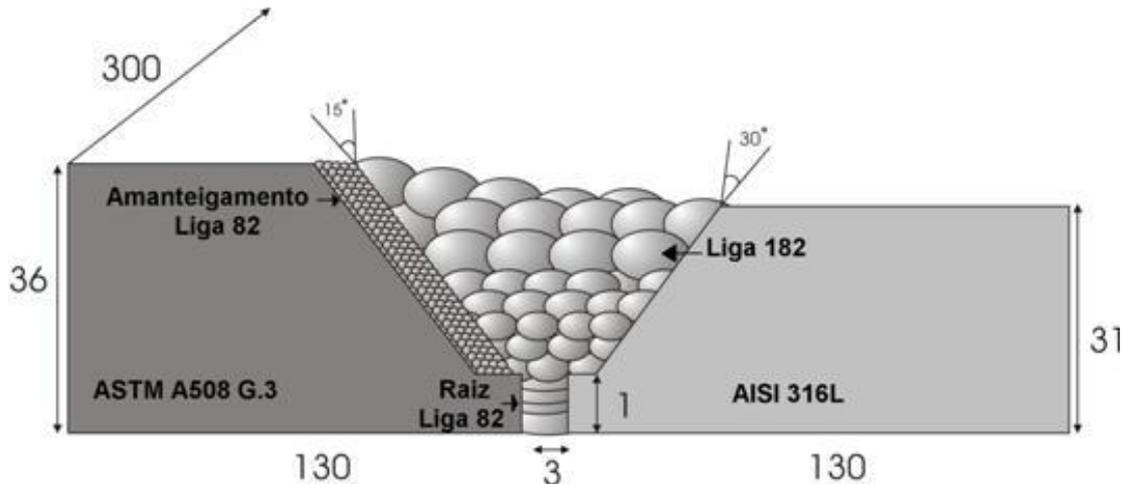


Figura 1. Representação esquemática da solda dissimilar entre o aço AISI 316L e o aço ASTM A-508 G3.

Tabela 2 – Parâmetros de Soldagem de uma solda dissimilar de reator PWR

Cordões	Processo	Metal de Adição	ϕ do eletrodo (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (mm/s)
Buttering	GTAW	82	2,5	90 - 130	17,5 - 18	1,8 – 3,0
Passe de raiz	GTAW	82	2,5	126 - 168	20 - 22	1 – 1,2

Tabela 3 - Parâmetros do processo de enchimento com eletrodo revestido aplicados aos blocos

Parâmetros	Bloco 1	Bloco 2
Diâmetro do Eletrodo	4 mm	4 mm
Corrente	120/130 A	170/180A
Tensão	18 a 25 V	18 a 25 V
Velocidade de Soldagem	3 a 4 mm/s	0,5 a 1,5 mm/s
Aporte Térmico	850 J/mm	2500 J/mm
Temperatura entre Passes	150 a 200 °C	150 a 200 °C

Neste trabalho estudou-se o comportamento frente à corrosão eletroquímica das juntas soldadas de liga de níquel 182. As amostras foram retiradas de dois blocos de teste preenchidos com o eletrodo de liga 182 (Figura 2). No bloco de teste 1 procurou-se reproduzir uma junta soldada dissimilar de um bocal do pressurizador de um reator do tipo PWR (aporte térmico de 850 J/mm). Baseando-se nos parâmetros definidos para a soldagem do bloco 1, triplicou-se o aporte térmico para a soldagem do bloco 2 (aporte térmico de 2500 J/mm).

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

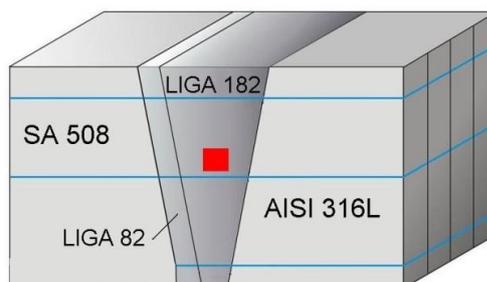


Figura 2. Representação esquemática da região onde foram retiradas as amostras para a caracterização microestrutural e os ensaios eletroquímicos.

Para a realização das análises metalográficas as amostras da liga 182 foram embutidas, lixadas e polidas até $1\mu\text{m}$ e imersas em solução contendo 10mL de ácido hidroclorídrico, 10mL de ácido acético e 10 mL de ácido nítrico, para identificação da estrutura e revelação de contornos de grãos. As amostras foram observadas e fotografadas em microscópio ótico Leica DM4500P.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas amostras não embutidas. Eles foram conduzidos em célula eletroquímica do tipo “flat cell”, utilizando-se como eletrodo de referência Ag/AgCl (KCl 3 mol/L) e um eletrodo auxiliar de platina (Pt) (Figura 3).

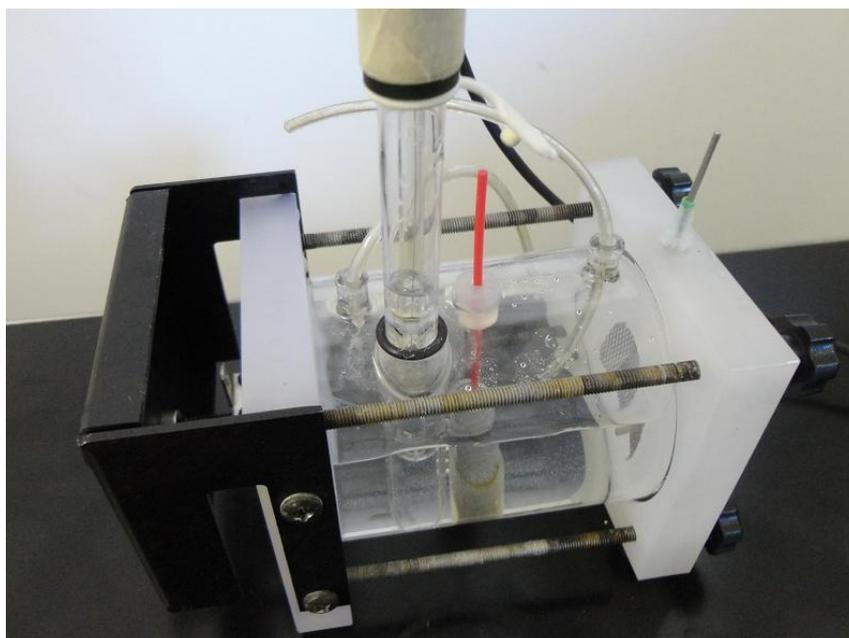


Figura 3. Montagem utilizada nos ensaios eletroquímicos.

As amostras foram lixadas manualmente com lixa de carbetto de silício em granulometria de 600#. Após o lixamento, elas foram limpas com álcool etílico, lavadas com água destilada e secadas ao ar.

Neste estudo, foram utilizadas soluções aquosas, aerada e desaerada, contendo NaCl 5% + 0,01M de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (tiosulfato de sódio) em pH 4,0, como uma alternativa ao estudo de corrosão em meio *sour service*. Para ensaios que exigiam solução desaerada, foi realizado o borbulhamento do meio com gás nitrogênio, durante 1h, a fim de reduzir a concentração de oxigênio dissolvido.

As curvas de polarização anódica potenciodinâmica foram levantadas utilizando-se um potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT20 acoplado a um microcomputador. Os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente (25 ± 2)°C. Todas as

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

varreduras anódicas foram realizadas a uma taxa de 0.5 mV/s. O potencial inicialmente aplicado foi de -20 mV em relação ao potencial de corrosão, estabelecido após 50 minutos de imersão. Os ensaios foram realizados em triplicata para cada amostra e condição estudada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Metalográfica

A macrografia da seção transversal das juntas soldadas dissimilares é apresentada na Figura 4. Observa-se a orientação das dendritas evidenciando a direção de resfriamento máximo durante a soldagem. As dendritas com similaridade na orientação cristalográfica crescem sempre na direção oposta ao fluxo de calor. Como cada cordão foi depositado no mesmo sentido, a orientação cristalográfica das dendritas tende a se manter inalterada entre os diversos cordões. Este tipo de microestrutura está condizente com os estudos realizados por Scott e Meunier [7]. Nesta figura pode também ser observada a diferença na largura dos cordões de solda em cada bloco. Nota-se que a largura dos cordões de solda no bloco 2 é aproximadamente três vezes maior que a largura dos cordões no bloco 1.

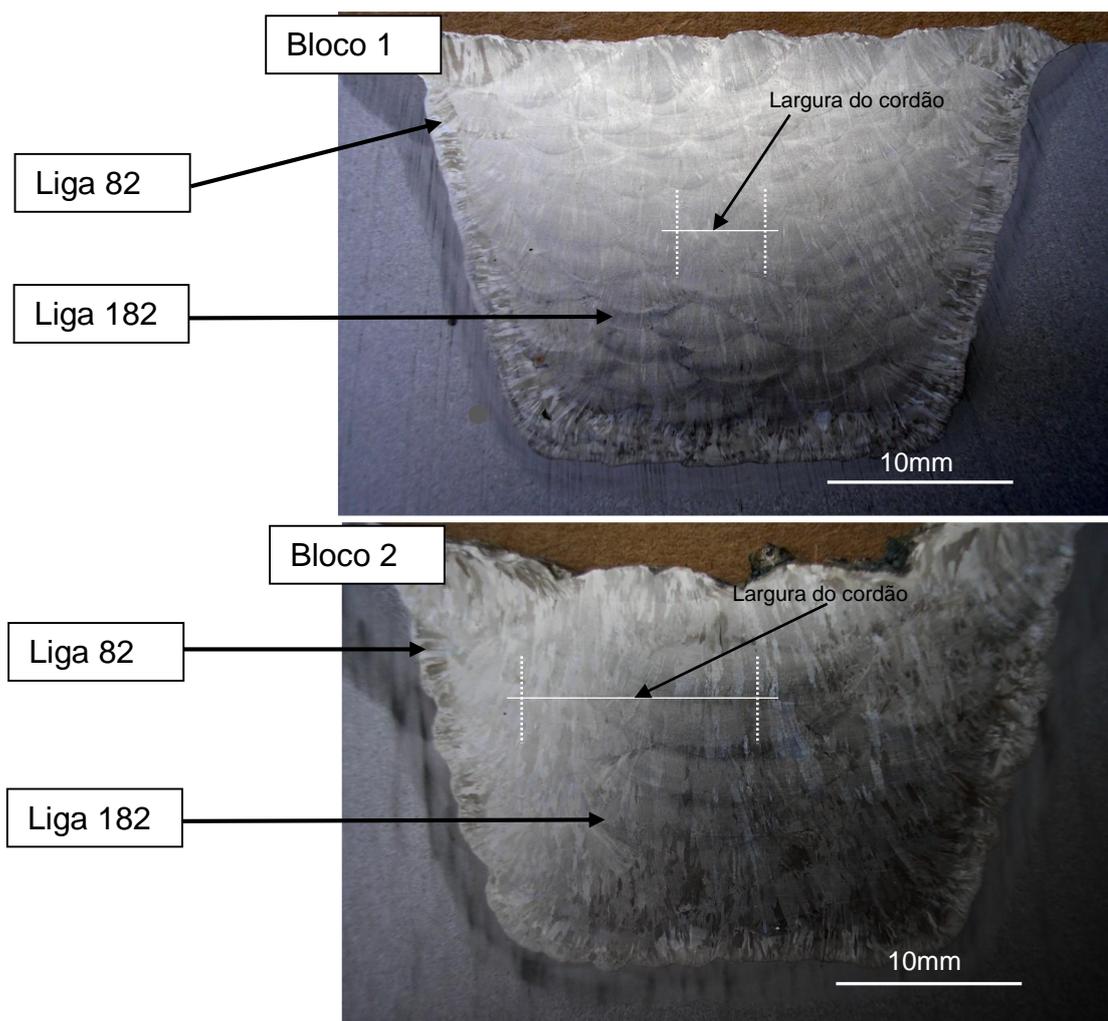


Figura 4. Aspecto macrográfico dos dois blocos de teste evidenciando as regiões da solda. Nota-se a diferença na largura dos cordões dos blocos 1 e 2.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

3.2 Curvas de Polarização Anódica Potenciodinâmica

Nas Figuras 5 e 6 são mostradas as curvas de polarização anódica potenciodinâmica obtidas em meio ácido contendo 5% de NaCl e 0,01M de Na₂S₂O₃, das juntas soldadas de liga 182, com aportes térmicos 1 e 2, em meio aerado e desaerado, respectivamente. Pode-se observar que ocorre um deslocamento dos potenciais de corrosão para valores mais negativos com o aumento do aporte térmico sugerindo que o material possui comportamento menos nobre nesta condição, em meio aerado e desaerado.

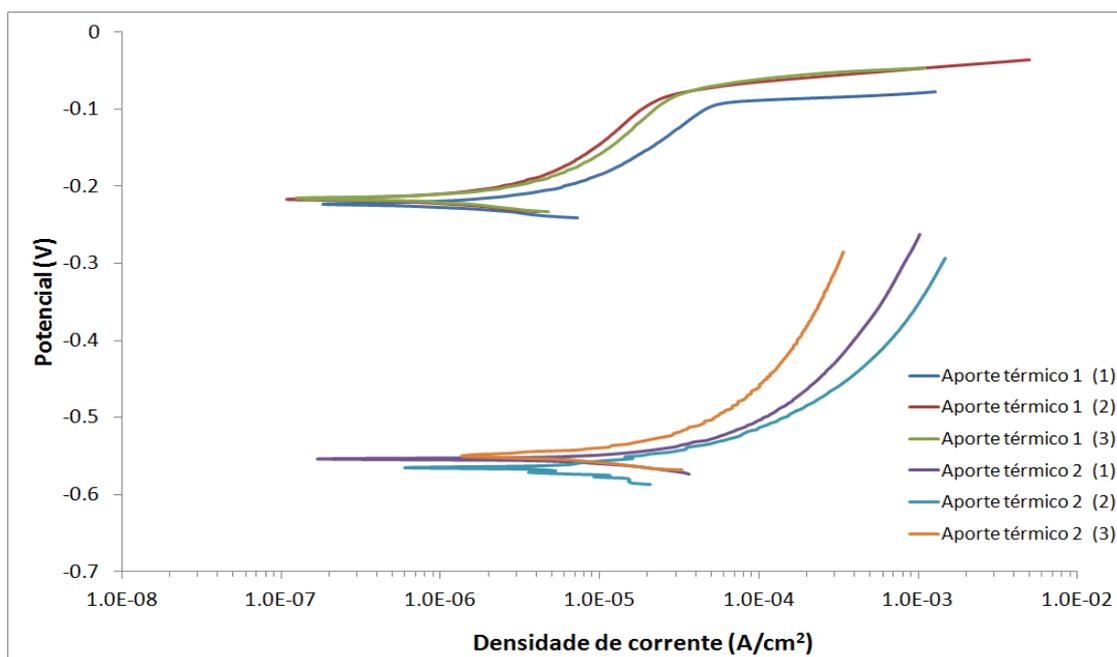


Figura 5. Curvas de polarização anódica potenciodinâmica das juntas soldadas de liga 182, com aportes térmicos 1 e 2, em meio aerado.

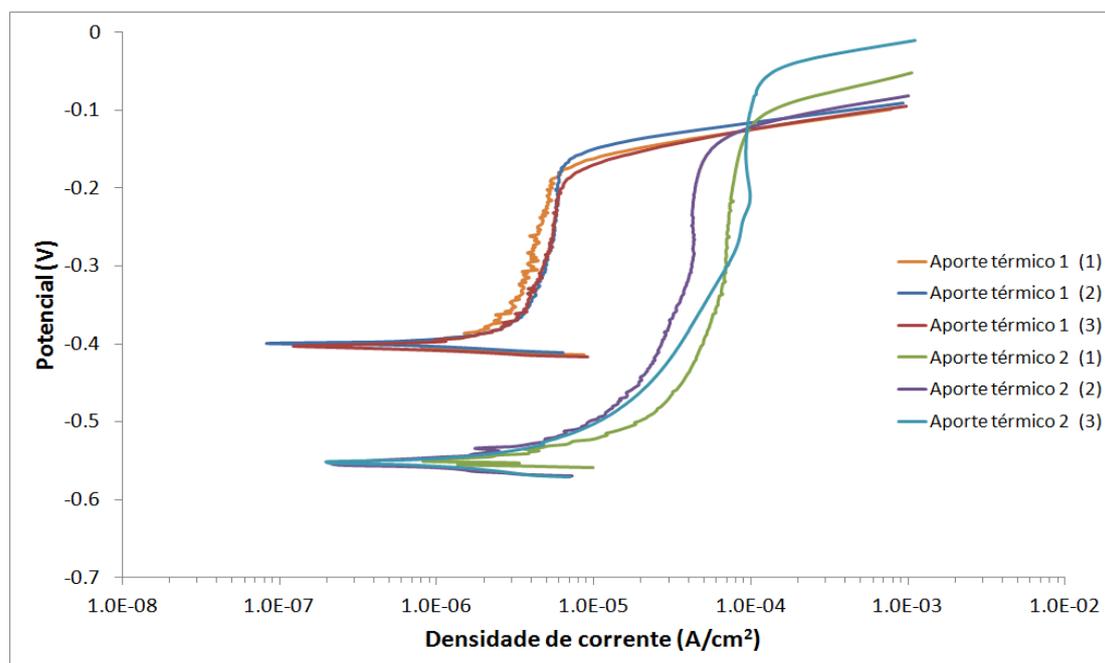


Figura 6. Curvas de polarização anódica potenciodinâmica das juntas soldadas de liga 182, aportes térmicos 1 e 2, em meio desaerado.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros eletroquímicos obtidos nas curvas de polarização anódica potenciodinâmica e seus respectivos desvios-padrão destes valores, nas diferentes condições estudadas.

Na Figura 5 pode-se observar que, em meio aerado e ácido, a junta soldada com menor aporte térmico apresentou comportamento ativo-passivo, na faixa de potencial de -190 mV a -88 mV. Enquanto a junta soldada com maior aporte térmico não apresentou comportamento ativo-passivo neste meio.

Observando-se as curvas de polarização obtidas em meio desaerado, nota-se que a junta soldada com menor aporte térmico apresentou um maior potencial de corrosão sugerindo uma maior resistência à corrosão nesta condição, o que evidencia que seria necessário impor um potencial superior para se iniciar o processo de corrosão. Logo após o potencial de corrosão, ocorre uma zona de ativação com posterior passivação numa faixa de potencial de -402 mV até próximo a -170 mV. Verifica-se que o valor médio da densidade corrente de passivação é de cerca de uma ordem de grandeza inferior à da junta soldada com maior aporte térmico, sugerindo a formação de uma camada de óxido mais protetora.

Pode-se observar nas curvas de polarização anódica da Figura 6 que a junta soldada com maior aporte térmico apresentou uma extensa faixa de passivação (aproximadamente 460 mV), desde -570 mV até aproximadamente -112 mV. Para potenciais superiores, é verificado um acréscimo progressivo da densidade de corrente devido à transpassivação do material.

Tabela 4. Parâmetros eletroquímicos obtidos nas curvas de polarização anódica potenciodinâmica nas diferentes condições estudadas

Tipo de ensaio	Aporte térmico 1			Aporte térmico 2		
	E_{trans} (mV _{Ag/AgCl})	E_{corr} (mV _{Ag/AgCl})	i_{pass} (μ A/cm ²)	E_{trans} (mV _{Ag/AgCl})	E_{corr} (mV _{Ag/AgCl})	i_{pass} (μ A/cm ²)
Média e desvio padrão						
Aerado	-88±6	-223±5	15,1±4,8	-	-559±1	-
Desaerado	-168±11	-402±3	4,8±0,7	-97±42	-554±2	54,5±20

A soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW) é um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e as peças que estão sendo unidas. À medida que o metal é resfriado até seu ponto de solidificação, um pequeno agrupamento de átomos começa a se arranjar numa estrutura cristalina formando grãos colunares. Uma série de condições influencia o tamanho dos grãos. A taxa de resfriamento e a temperatura têm grande influência na estrutura de grãos solidificada, no tamanho de grão e na composição. Neste trabalho foi observado que os cordões de solda do bloco 1 (menor aporte térmico) apresentaram cordões de solda com menor largura ocasionando um resfriamento e uma solidificação mais rápida da solda quando comparada com a solda com maior aporte térmico que possui grãos colunares de maior dimensão. Sugere-se que o resfriamento mais lento favoreceu à formação de uma maior quantidade de precipitados diminuindo o teor de cromo na matriz e a resistência à corrosão do material. Isto deve ser comprovado com a realização de estudos complementares.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Tanto no meio aerado quanto no meio desaerado, a junta soldada de liga 182 com menor aporte térmico (850 J/mm) apresentou um potencial de corrosão mais elevado, indicando um comportamento mais nobre no meio estudado.
- As juntas soldadas com os dois aportes térmicos apresentaram, no meio desaerado, comportamento ativo-passivo típico, sendo que a de maior aporte térmico, apesar de possuir um menor potencial de corrosão, mostrou uma maior extensão da região de passivação.

Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições: Fundação de Amparo Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN pelo apoio financeiro. Agradecem, também, aos técnicos Antônio Edicleto Gomes Soares e Antônio Eugênio de Aguiar pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Mitev R, Taylor NG. General review of dissimilar metal welds in piping systems of pressurized water reactors, including WWER designs. European Commission DG-JRC/IE, Petten, Netherlands, EUR 22469 EN, 2006.
- 2 Faidy C, Gilles P. Assessment of Dissimilar Weld Integrity: Final Report of the NESC-III project. European Commission, EUR 22510 EM, 2006.
- 3 Davis JR. Corrosion of Dissimilar Metal Weldments. In: ASM – American Society for Metals, Corrosion of Weldments, 2006, cap 9, p. 170.
- 4 Fallatah MG, Sheikh KA, Khan Z, Boah KJ. Reliability of Dissimilar Metal Welds subjected to Sulfide Stress Cracking. KFUPM - King Fahd University of Petroleum & Minerals, 2002. The 6th Saudi Engineering Conference, Dhahran, Saudi Arabia, December, v. 5, p. 297-312.
- 5 Silva GM, Bracarense AQ, Schvartzman MMAM. Weld Heat Input and Stress Corrosion Cracking of Alloy 182 Filler in a Pressurized Water Reactor Nuclear Reactor Coolant Environment. Corrosion. v. 67, p. 076001, 2011.
- 6 Lima LIL, Silva GM, Chilque ARA, Schvartzman MMAM, Quinan MAD. Caracterização Microestrutural de Soldas Dissimilares dos Aços ASTM A-508 e AISI 316L. Soldagem e Inspeção, 2010; 15: 112-120.
- 7 Scott P, Meunier M-C. Materials Reliability Program: Review of Stress Corrosion Cracking of Alloys 182 and 82 in PWR Primary Water Service (MRP-220). EPRI, Palo Alto, CA: 1015427, 2007.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.