

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

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

Avaliação Da Suscetibilidade À Corrosão Sob Tensão Da Junta Soldada De Liga De Níquel 182 Em Ambiente De Reator Nuclear

Luciana Iglésias Lourenço Lima¹, Mônica Maria de Abreu Mendonça Schwartzman², Alexandre Queiroz Bracarense³, Marco Antônio Dutra Quinan⁴, Wagner Reis da Costa Campos⁵, Tiago Moreira Pereira⁶

Abstract

The stress corrosion cracking (SCC) has been observed in the regions of welds between dissimilar materials - ASTM A 508 steel and austenitic stainless steel AISI 316L - existing in nuclear reactors like PWR (Pressurized Water Reactor). This work aims to assess the susceptibility to stress corrosion cracking of nickel based alloy 182 used as filler metal in this type of welding when subjected to a similar environment as the primary circuit of a PWR nuclear reactor. This evaluation was performed at a temperature of 325° C and pressure of 12,5 MPa, using *slow strain rate tensile (SSRT) test*. We obtained flow curves in the neutral (nitrogen) and a solution similar of PWR reactors. The test results of SSRT show the effect of PWR on the environment increased susceptibility of alloy 182 to the SCC, being confirmed by fractography analysis obtained by scanning electron microscopy (SEM).

Resumo

A corrosão sob tensão (CST) tem sido observada nas regiões das soldas entre materiais dissimilares - aço de baixa liga ASTM A 508 e aço inoxidável austenítico AISI 316L - existentes em reatores nucleares do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*). Este trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à corrosão sob tensão da liga de níquel 182 utilizada como metal de adição neste tipo de solda quando submetida a um ambiente similar ao do circuito primário de um reator nuclear PWR. Esta avaliação foi realizada à temperatura de 325°C e pressão de 12,5 Mpa, empregando-se o ensaio de taxa de deformação lenta – SSRT (*Slow Strain Rate Test*). Foram obtidas curvas tensão x deformação em meio neutro (nitrogênio) e em uma solução contendo 1200 ppm de boro, 2,2 ppm de lítio e concentrações de 25 cm³ H₂/kg H₂O e 5 ppb de O₂ dissolvidos na água. Os resultados dos ensaios de SSRT mostram que no ambiente estudado ocorreu uma diminuição da ductilidade e da resistência mecânica do material provocada pelo processo de corrosão sob tensão, o que foi confirmado pelas análises fractográficas obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Palavras-chave: corrosão sob tensão, liga de níquel 182, reatores PWR, ensaios de SSRT.

¹ Mestre, Estudante de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais

² Dra, Pesquisadora – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

³ PHD, Professor – Universidade Federal de Minas Gerais

⁴ Dr, Pesquisador – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

⁵ Dr, Pesquisador – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

⁶ Graduando – Universidade Federal de Minas Gerais

Introdução

As soldas entre dois metais diferentes, denominadas soldas dissimilares (dissimilar metal welds – DMWs), são utilizadas em diversos segmentos da indústria. No caso específico de usinas nucleares, tais soldas são comumente usadas para conectar tubulações de aço inoxidável com componentes fabricados em aço carbono. Os materiais de adição empregados neste tipo de solda são as ligas de níquel 82 e 182. Estas ligas, embora originalmente selecionadas por sua elevada resistência à corrosão, mostraram-se suscetíveis ao processo de corrosão sob tensão (CST) quando empregadas em ambiente similar ao do circuito primário de um reator nuclear do tipo PWR – *Pressurized Water Reactor* (Reator a Água Pressurizada) (1,2).

A corrosão sob tensão é um dos principais mecanismos de envelhecimento que gradualmente introduz danos nos componentes/estruturas, modificando suas características com o tempo de operação. Ela é uma questão muito importante para empresas proprietárias e operadoras das usinas nucleares, pois afeta a operação e a segurança de importantes componentes. Após o aparecimento de uma trinca por CST, a vida útil do componente estará limitada pela velocidade de propagação desta trinca, tornando necessário realizar avaliações que permitam estimar a sua vida útil, bem como estabelecer as condições de manutenção e reposição das partes danificadas (3).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à corrosão sob tensão do metal de adição de liga de níquel 182 utilizada como metal de adição em soldas dissimilares quando submetida a um ambiente similar ao do circuito primário de um reator nuclear PWR. Esta avaliação foi realizada à temperatura de 325°C e pressão de 12,5 MPa, empregando-se o ensaio de taxa de deformação lenta – SSRT (*Slow Strain Rate Test*).

Materiais e Métodos

Material e Junta Soldada

Para a realização da soldagem utilizaram-se como materiais aço de baixa liga do tipo ASTM A508 grau 3 e aço inoxidável austenítico AISI 316L como metais base, e como metais de adição as ligas de níquel 182 e 82. A Tabela 1 mostra a composição química dos materiais realizada por meio da técnica de espectrometria de absorção atômica. As propriedades mecânicas da liga de níquel 182 à temperatura de 325°C são apresentadas na Tabela 2.

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” (buttering) 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 - passe 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*). Após a soldagem a peça teste foi submetida a ensaios não destrutivos de líquido penetrante e radiografia e nenhum defeito

significante foi revelado. Os parâmetros de soldagem utilizados estão resumidos na Tabela 3.

Análise Metalográfica

Após a operação de soldagem, a peça foi cortada para realização de caracterização microestrutural dos materiais. As condições utilizadas nos ataques eletrolíticos foram baseadas no Metals Handbook (5) e otimizadas em testes de laboratório (Tabela 4).

Ensaio de Taxa de Deformação Lenta - SSRT

O ensaio de taxa de deformação lenta, SSRT (*Slow Strain Rate Test*), foi utilizado para avaliar a suscetibilidade à corrosão sob tensão da junta soldada de liga de níquel 182. Neste trabalho, os ensaios foram executados segundo a norma ASTM G 129-95 (6) empregando-se uma taxa de deformação de $3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, a qual permite a observação dos efeitos da corrosão sob tensão no meio estudado. A título de comparação, foram realizados ensaios de tração em N_2 , utilizando-se a mesma taxa de deformação dos ensaios realizados em solução. Os resultados são apresentados sob a forma de curvas tensão-deformação bem como as análises fractográficas feitas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia ótica. Foram realizados dois ensaios para cada condição estudada.

Os ensaios foram conduzidos em uma solução de composição química similar à de operação do circuito primário de um reator tipo PWR (água deionizada contendo 1000 ppm de boro, 1,5-2,0 ppm de lítio, < 5 ppb de oxigênio dissolvido e $25 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/\text{kg H}_2\text{O}$) e em N_2 (meio neutro) à temperatura de 325°C , pressão do meio de 12,5 MPa. Efetuou-se a circulação do meio aquoso a uma vazão de aproximadamente 0,4 l/h. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de CST foram usinados de acordo com a norma ASTM G49 (7) e são mostrados na Figura 1.

Os ensaios foram realizados em uma instalação projetada para avaliar a degradação de componentes de reatores nucleares tipo PWR em conformidade com normas estabelecidas pela ASTM, ISO e DIN. A instalação é composta por uma autoclave com um sistema de tração servohidráulico, controlado por deslocamento ou carga, e de um circuito hidráulico com um sistema de circulação do meio aquoso (8). O deslocamento é medido por um sensor de posição linear (*linear variable differential transformer - LVDT*) e a carga com uma célula de carga. A autoclave é aquecida externamente por um forno elétrico controlado continuamente por um sistema PID (Proporcional – Integral – Diferencial). Durante a execução dos ensaios são realizadas medições “on line” de carga, deslocamento, temperatura, pressão, condutividade e concentração de oxigênio. Um software de aplicação desenvolvido no ambiente LabVIEW[®] é responsável pela aquisição de dados e sua representação gráfica. A Figura 2 mostra a instalação de CST e a Tabela 5 descreve seus principais parâmetros técnicos.

Resultados e Discussão

Caracterização Macro e Microestrutural

A macrografia da junta soldada é apresentada na Figura 3, onde se pode observar a distinção entre as regiões da solda dissimilar, região de amanteigamento liga 82, região da solda liga

182 e os metais de base ASTM A 508 e AISI 316L. Observa-se a orientação das dendritas evidenciando a direção de resfriamento máximo durante a soldagem.

O metal base de aço de baixa liga tipo ASTM A-508 grau 3 (Figura 4) possui uma microestrutura composta de grãos de ferrita fina, equiaxiais e alongados, com finos carbonetos dispersos. A Figura 5 apresenta a micrografia do metal de base de aço inoxidável austenítico AISI 316L. A microestrutura consiste de grãos equiaxiais de austenita e de pequena quantidade de ferrita delta.

As microestruturas das regiões do passe de raiz, zona fundida e amanteigamento são mostradas na Figura 6. Observa-se uma microestrutura completamente austenítica da zona fundida e do amanteigamento, uma vez que não sofrem transformações alotrópicas durante a operação de soldagem (9). Pode-se também observar uma microestrutura composta de dendritas com direção, espaçamento e tamanho variando para cada região e cuja orientação é definida pelo fluxo de calor gerado pela soldagem (10,11). Nota-se também a presença de precipitados tanto intra quanto interdendríticos.

Avaliação da corrosão sob tensão

A Figura 7 e a Tabela 6 apresentam as curvas tensão versus deformação e as propriedades mecânicas, respectivamente, obtidas para a liga à base de níquel 182 nos ensaios ao nitrogênio (meio neutro) e no meio PWR. Os valores expressos nesta tabela referem-se a cada ensaio realizado. É evidente, nos resultados destes ensaios, a diferença na resposta do material quando exposto ao meio PWR e ao meio neutro: observa-se uma expressiva perda de ductilidade e redução da resistência mecânica do material.

A Figura 8 mostra as microfractografias das superfícies laterais dos corpos de prova ensaiados no meio neutro e em meio PWR obtidas em microscópio eletrônico de varredura. Observa-se que somente as amostras ensaiadas no meio PWR apresentaram trincas nas superfícies laterais. De acordo com Brown e Mills (12) a presença de microtrincas secundárias nas superfícies dos corpos de prova é também uma evidência do processo de fragilização do material por CST.

As fractografias das superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados em CST no meio neutro e em meio PWR são mostradas na Figura 9 e Figura 10, respectivamente. As fractografias referentes aos corpos-de-prova ensaiados em N₂ (Figura 9) mostram o aspecto dúctil da fratura em toda a sua extensão, tanto nas bordas como no centro, comprovando a ruptura puramente mecânica. Nos corpos de prova ensaiados em meio PWR (Figura 10) foi observada a presença de regiões com aspecto frágil nas bordas com sinais de trincamento intergranular e aspecto dúctil no centro dos corpos-de-prova. As trincas iniciadas na superfície externa se propagaram para o centro dos CPs em várias regiões, chegando a uma profundidade máxima de cerca de 500 µm.

A Figura 11 mostra as microanálises feitas por EDS na superfície de fratura do corpo de prova ensaiado em meio PWR, evidenciando a presença dos principais elementos de liga: Cr, Ni e Fe e também picos associados aos elementos C, Si, Mn, Ti, Nb e Al. Estes picos sugerem a presença de carbonetos de nióbio, titânio e cromo e segregações de alumínio, silício e manganês (13,14).

Conclusões

Os ensaios de taxa de deformação lenta (SSRT) mostraram que, em meio similar ao do circuito primário de um reator PWR (solução contendo 1200 ppm de boro, 2,2 ppm de lítio e concentrações de 25 cm³ H₂/kg H₂O e 5 ppb de O₂ dissolvidos em água deionizada - temperatura de 325°C e pressão de 12,5 Mpa) o metal de adição de liga de níquel 182 perdeu resistência mecânica e, particularmente, tenacidade, evidenciando sua degradação por CST, quando comparado com seu comportamento em meio neutro (N₂).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, a Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, a Eletronuclear- Eletrobrás Termonuclear S.A e ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN pelo apoio financeiro. Agradece-se também aos técnicos, Antônio Edicleto Gomes Soares, Antônio Eugênio de Aguiar e Geraldo Antônio Scoralick Martins pelas contribuições à pesquisa.

Referências bibliográficas

1. SCOTT, P.M. An Overview of Materials Degradation by Stress Corrosion in PWRs. Eurocorr- Annual European Corrosion Conference of the European Federation of Corrosion, Nice, Acropolis, 12 – 16 de Setembro, 2004.
2. GOMEZ-BRICEÑO, D., SERRANO, M. Aleaciones Base Níquel em Condiciones de Primario de Los Reactores Tipo PWR. Materiales, Março, 2005.
3. JONES, R. H. Stress corrosion cracking - materials performance and evaluation. Ohio: American Society of Metals International, 1992.
4. ASME – American Society of Mechanical Engineers – Boiler and Pressure Vessel Code – Seção IX, Welding and Brazing Qualification, 2004.
5. ASM – American Society for Metals – Metals Handbook 8º ed – In: Metallographic Technique for Specific Metals and Alloys, v. 8, p.101, 1973.
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G129 - Standard practice for slow strain rate testing to evaluate the susceptibility of metallic materials to environmentally assisted cracking. In: Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken. 1995.
7. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G49 - Standard practice for preparation and use of direct tension stress-corrosion test specimen. In: Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, USA, 2000.
8. NEVES, C. F. C.; SCHVARTZMAN, M. A. M.; MOREIRA, P.A.L.D.P.L.P. Método de queda de potencial para monitorar o crescimento de trincas causadas por corrosão sob tensão. In: NATIONAL MEETING OF RECTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, 13. Rio de Janeiro: ABEN, 2002.
9. DEHMOLEI, R., SHAMANIAN, M., KERMANPUR, A. Microstructural Characterization of Dissimilar Welds Between Alloy 800 and HP Heat-Resistant Alloys. Materials Characterization, 2008, N. 59, p. 1447-1454.
10. SIREESHA, M., SHANKAR, V., ALBERT, SHAJU K., SUNDARESAN, S. Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800. Materials Science and Engineering, 2000, N. 292, p. 74-82.

11. PENG, Q. J. , SHOJI, T., YAMAUCHI, H., TAKEDA, Y. Intergranular Environmentally Assisted Cracking of Alloy 182 Weld Metal in Simulated Normal Water Chemistry of Boiling Water Reactor. Corrosion Science, 2007 N. 49, p. 2767-2780.
12. Brown, C.M., Mills, .W.J. Effect of Water on Mechanical Properties and Stress Corrosion Behavior of Alloy 600, Alloy 690, EN82H Welds, and EN52 Welds. Corrosion, Vol. 55, N° 2, 1999.
13. CIELESKA, M. J. The Welding and Solidification Metallurgy of Alloy 625. Welding Journal, 1991, February, V 70, p. 49s-56s.
14. [27] PENG, Q.J., YAMAUCHI, H., SHOJI, T. Investigation of Dendrite-Boundary Microchemistry in Alloy 182 using Auger electron spectroscopy Analysis. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, September, V 34A, p. 1891-1899.

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

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti	Cu	Mo	Al	Fe
316L	0,023	1,458	0,475	0,021	0,003	16,732	9,834	0,0199	0,029	0,142	2,097	0,011	Bal.
508	0,213	1,336	0,227	0,005	0,003	0,089	0,682	0,002	0,001	0,0559	0,505	0,011	Bal.
182	0,047	6,160	0,3410	0,0103	0,009	14,33	70,30	2,07	0,049	0,0118	0,239	0,0108	Bal.
82	0,051	6,3	0,32	0,0107	0,009	19,6	70,30	2,02	0,045	0,0358	0,234	0,0098	Bal.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da junta soldada – Liga de níquel 182.

Temperatura	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Deformação (%)
325°C	359	590	48

Tabela 3 – Parâmetros de Soldagem.

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
Junta soldada	SMAW	182	4	119 - 135	22 - 26	1 - 3,5

Tabela 4 – Condições de ataque metalográfico dos diferentes materiais.

Amostra	Condições de Ataque
Aço do tipo ASTM A508 cl. 3	Nital 2% - 20 segundos (Imersão)
Amanteigamento – Liga 82	Nital 2% - 20 segundos (Imersão)
Aço Inoxidável – AISI 316	Ácido fluorídrico 10% -1A, 2V, 60 segundos (Ataque Eletrolítico)
Cordão de Solda – Liga 182	Ácido oxálico 10% - 1A, 2V, 30 segundos (Ataque Eletrolítico)

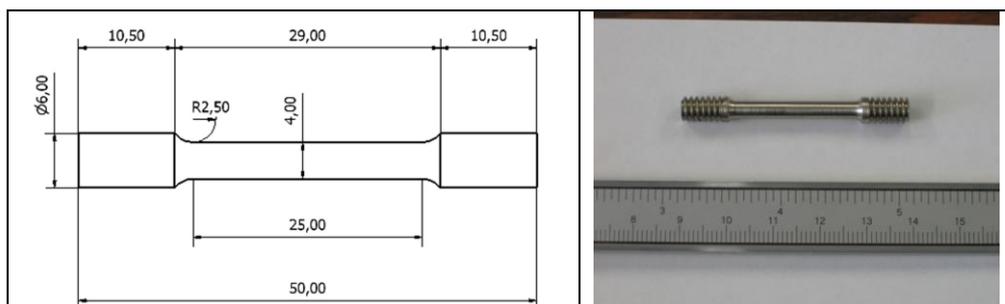


Figura 1 – Corpo de prova de tração utilizado nos ensaios de CST.



Figura 2 – Instalação para ensaios de corrosão sob tensão.

Tabela 5 – Principais parâmetros técnicos da instalação para ensaios de CST em ambiente de reator nuclear.

Item	Parâmetro	Valor
Autoclave	Temperatura máxima	325°C
	Pressão máxima	12,5 MPa
Sistema de tração	Carregamento Máximo	60kN
	Deslocamento Máximo	50 mm
	Taxa de Deslocamento Mínima	10^{-10} m.s ⁻¹
	Taxa de Deslocamento Máxima	10^{-4} m.s ⁻¹

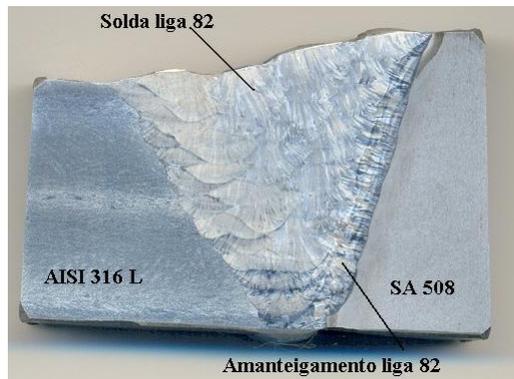


Figura 3 – Macrografia da junta soldada.

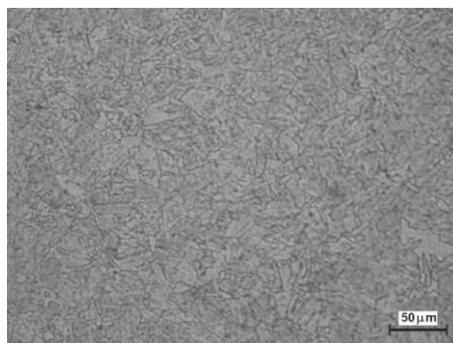


Figura 4 – Micrografias do aço de baixa liga ASTM A 508 grau 3 em região afastada da solda.



Figura 5 – Micrografia do aço inoxidável austenítico AISI 316L.

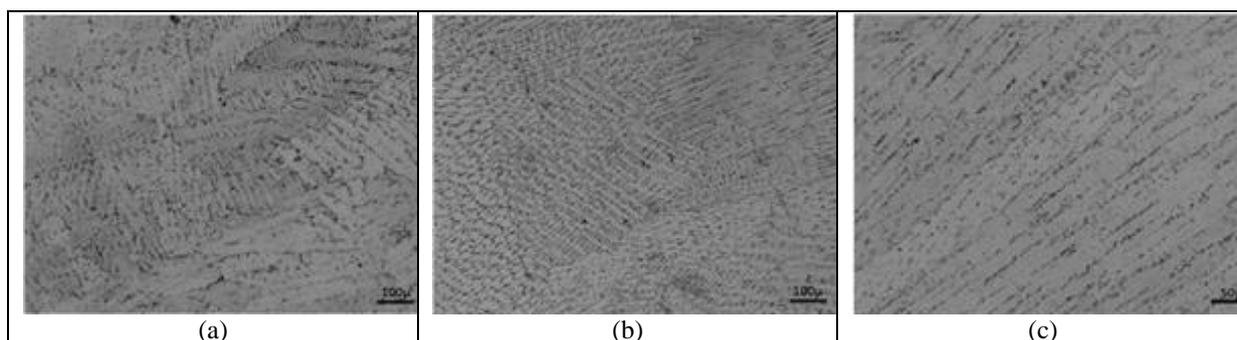


Figura 6 – (a) Amanteigamento, (b) Passe de Raiz, (c) Zona Fundida da junta soldada de liga de níquel 182.

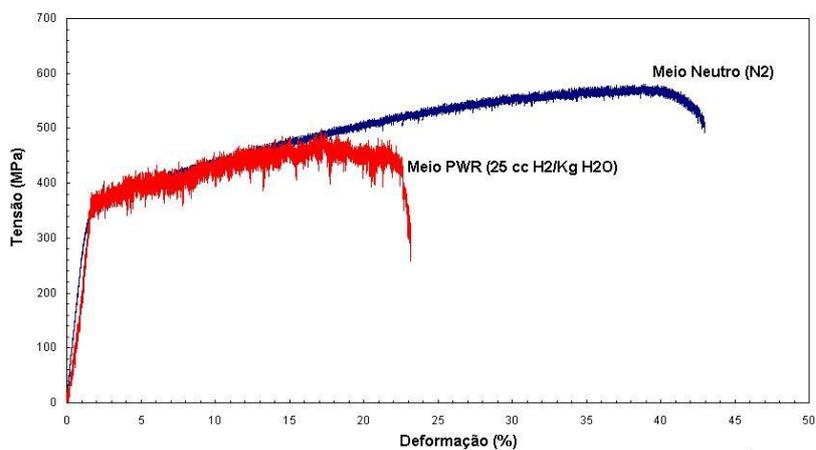


Figura 7 – Curva tensão x deformação obtidas nos ensaios de CST, com taxa de deformação lenta, da junta soldada de liga de níquel 182, na temperatura de 325°C em meio PWR e em meio neutro. Taxa de deformação: $3,0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de SSRT da junta soldada de liga de níquel 182 a 325°C.

Temperatura (°C)	Limite de Escoamento (0,2%) (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Deformação (%)
Meio Neutro (N ₂)	353-360	553,3-576,4	36-41
Meio PWR (25 cc H ₂ / Kg)	356-360	480-498	20-26

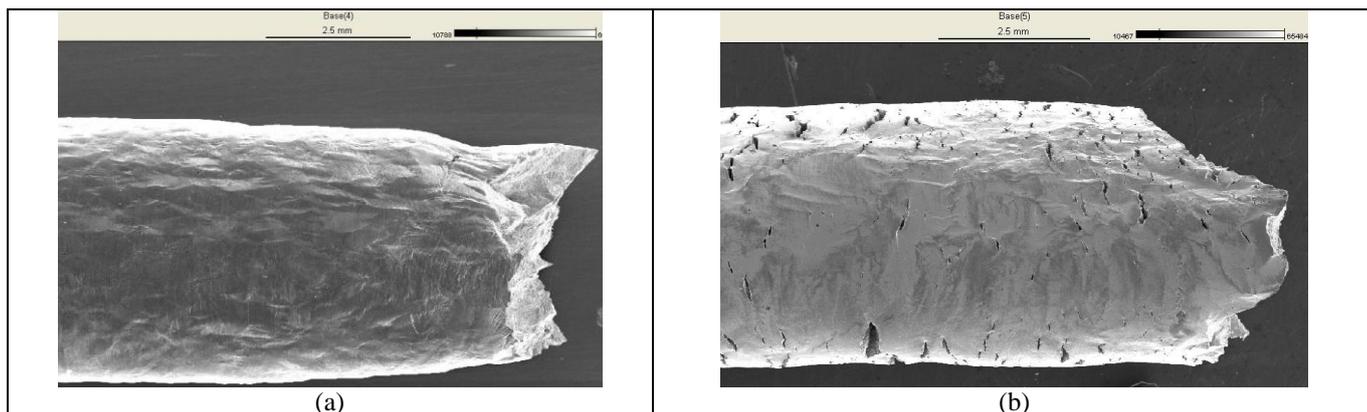


Figura 8 – Microfractografias das superfícies do corpo de prova da junta soldada de liga de níquel 182, (a) no meio neutro (N₂) e (b) em meio PWR obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura – MEV.

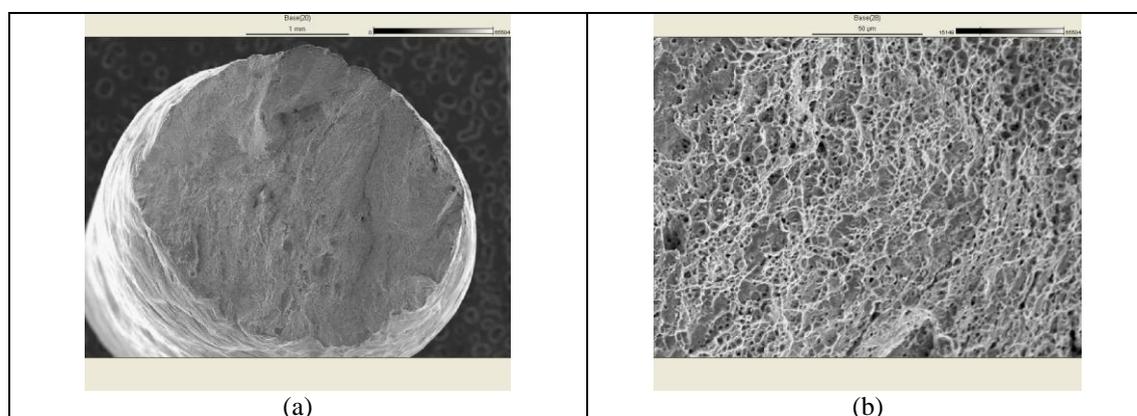
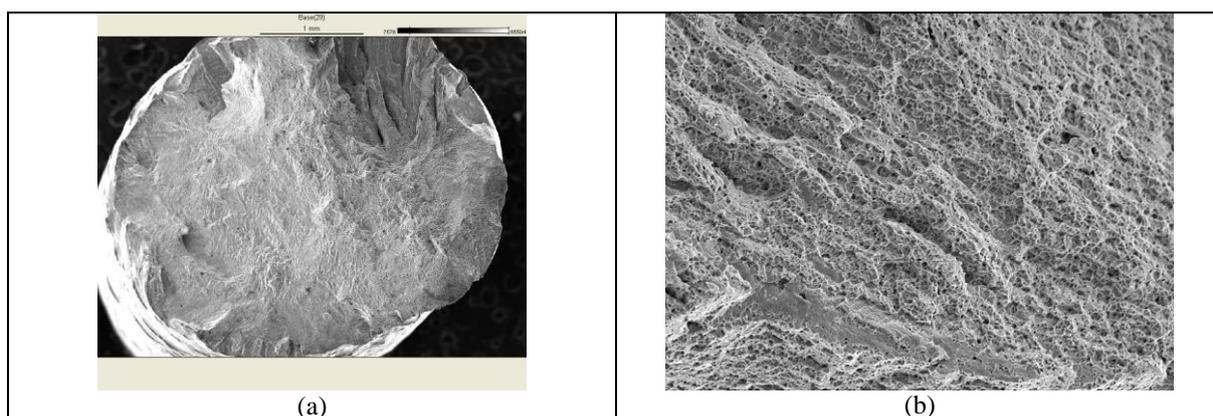


Figura 9 – Microfractografias das superfícies do corpo de prova da junta soldada de liga de níquel 182 ensaiada no meio neutro (N₂) obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura, a) visão geral do corpo de prova – Aumento: 35x, b) detalhe da superfície na região central do cp – Aumento: 750x.



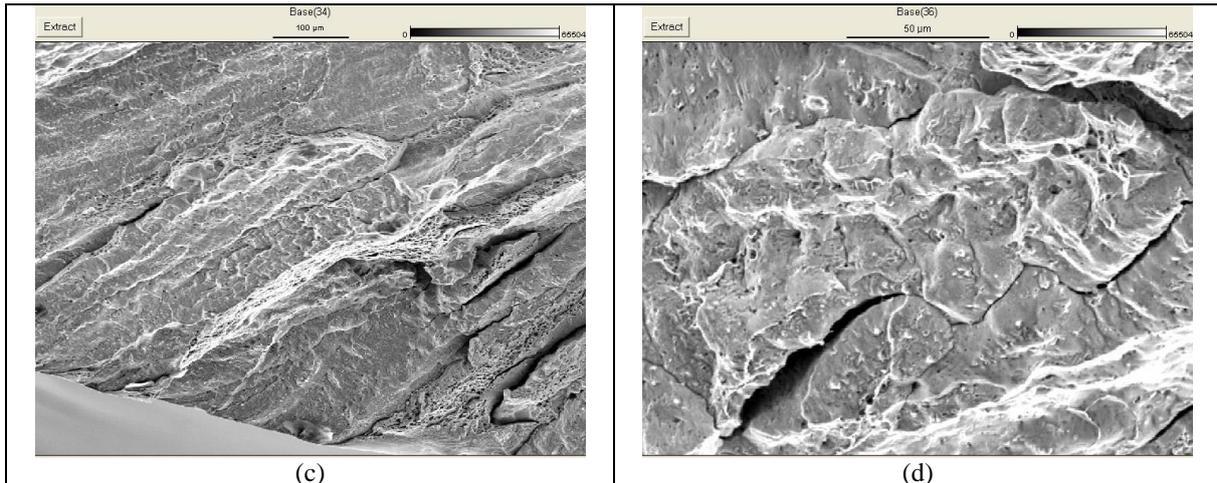


Figura 10 – Microfractografias das superfícies do corpo de prova da junta soldada de liga de níquel 182 ensaiada no meio PWR obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura, a) visão geral do corpo de prova, b) detalhe da superfície na região central do cp evidenciando a fratura dúctil, c) e d) detalhe da superfície na região de fratura frágil.

