

ENVELHECIMENTO TÉRMICO A BAIXA TEMPERATURA: EFEITOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO 316L¹

Luísa Lima Silveira Dias²
Wagner Reis da Costa Campos³
Jefferson José Vilela⁴

Resumo

O 316L é amplamente utilizado na indústria nuclear devido a suas excelentes propriedades mecânicas e a sua resistência à corrosão. Essas propriedades devem ser avaliadas com o objetivo de se evitar falhas e prolongar a vida útil dos equipamentos. As soldas de aço austenítico apresentam matriz de austenita com 5-12% de ferrita delta metaestável à temperatura ambiente. No entanto, os componentes das tubulações de reatores de água pressurizada operam em temperaturas na faixa de 290-325°C, estando as soldas susceptíveis a fragilização por envelhecimento térmico após longo tempo de serviço. Segundo a literatura, isso ocorre devido à decomposição espinodal. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar propriedades mecânicas através de ensaios de dureza e de tração antes e após tratamento térmico de soldas de aço 316L. Para isso, duas chapas de aço 316L foram soldadas e em metade do material foi realizado o tratamento térmico a 335°C por 1000 horas. Os ensaios indicaram aumento do limite de resistência de apenas 4% e aumento de dureza de 28% para o material tratado. A microscopia óptica não mostrou alterações na microscopia do material após o tratamento térmico, mas essas alterações podem ser identificadas por microscopia eletrônica de transmissão.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Envelhecimento; Solda; Decomposição espinoidal

LOW TEMPERATURE THERMAL AGING: EFFECTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF 316L STAINLESS STEEL WELDS

Abstract

The austenitic stainless steel 316L is widely used in nuclear industry because of its excellent mechanical properties and corrosion resistance. These properties must be evaluated in order to prevent failure and extend the life of equipment. The microstructure consists on an austenite matrix with 5–12% of delta ferrite metastable at room temperature in the weld fusion zone. However, the pressurized water reactors operate at temperatures in the range 290-325°C, thus welds may be susceptible to thermal aging embrittlement after long service life. According to the literature, this occurs due to the spinodal decomposition. Therefore, the purpose of this study was evaluated the mechanical properties of 316L stainless steel welds by hardness and tensile tests before and after heat treatment. In this regard, two steel plates were welded and part of the material was heat treated at 335°C for 1000 hours. The tests after heat treatment showed an increase of only 4% in ultimate tensile strength and an increase of 28% in hardness. No changes were observed in the material microstructure, however according to literature changes can be identified by transmission electron microscopy.

Keywords: Stainless steel; Aging; Weld; Spinodal decomposition.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Estudante de engenharia metalúrgica. Pesquisador. Serviço de Integridade Estrutural, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenheiro mecânico. Dr. Pesquisador. Serviço de Integridade Estrutural, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro mecânico. Dr. Pesquisador. Serviço de Integridade Estrutural, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável austenítico 316L é utilizado em reatores de água pressurizada PWR (pressurized water reactors) devido a suas adequadas propriedades mecânicas e a sua resistência à corrosão.⁽¹⁾ As soldas nesse aço apresentam, na zona fundida, uma microestrutura constituída por uma matriz de austenita com 5-12% de ferrita delta metaestável à temperatura ambiente.^(1,2) No entanto, os componentes das tubulações de reatores de água pressurizada PWR operam em temperaturas na faixa de 290-325°C, estando as soldas susceptíveis a fragilização por envelhecimento térmico após longo tempo de serviço.

Estudos indicam que essa fragilização ocorre devido à formação de uma fase alfa linha de estrutura CCC rica em cromo.^(1,2) O mecanismo de formação da fase alfa linha é controverso e pode variar entre as ligas, contudo, dependendo da quantidade de cromo e da temperatura de tratamento térmico, a fase pode ser formada por nucleação e crescimento e/ou decomposição espinodal. Em estudos com solda de aço inoxidável austenítico 316L, Abe e Watanabe⁽²⁾ e Chandra et al.⁽¹⁾ apontam a decomposição espinodal como mecanismo de formação de fase alfa linha em temperaturas abaixo de 400°C.

Como não há um conjunto de dados para a taxa de decomposição espinodal da ferrita delta em soldas de aço 316L, é possível utilizar os dados de envelhecimento dos aços inoxidáveis fundidos duplex CF-8 e CF-8M (Figura 1).

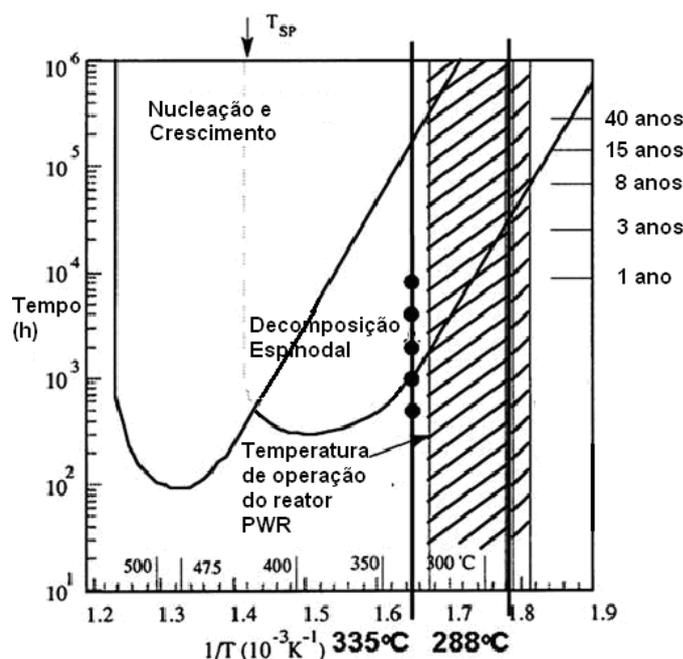


Figura 1. Dados de envelhecimento para os aços CF-8 and CF-8M.⁽²⁾

A fase alfa linha encontra-se finamente dispersa na ferrita, com tamanho reduzido, na faixa de 20 a 200 Å, e com similaridade estrutural e com pouco contraste em relação à matriz ferrítica.⁽³⁾ Assim, a fase alfa linha é difícil de ser observada através de microscopia ótica e eletrônica. Estudos indicam ser possível observar a fase alfa linha por microscopia eletrônica de transmissão.^(1,2) Essa fase é responsável pelo fenômeno da fragilização que ocorre em aços inoxidáveis ferríticos e dúplex, na faixa de 270 a 550°C.⁽⁴⁾ Quando a fase é formada, a dureza, o limite de escoamento e o limite de resistência do aço são aumentados, enquanto o alongamento, a resistência ao impacto e a resistência à corrosão são diminuídos. As mudanças nas

propriedades mecânicas se devem à diminuição da mobilidade das discordâncias devido aos precipitados ricos em cromo da fase alfa linha na matriz ferrítica. A diminuição na resistência à corrosão ocorre devido à criação de regiões empobrecidas em cromo ao redor dos precipitados, tornando o material mais susceptível à corrosão localizada.⁽³⁾

A questão da confiabilidade dos componentes das plantas nucleares, devido ao envelhecimento do parque industrial brasileiro, tornou-se um fator importante a ser investigado nas centrais nucleares, no que diz respeito à segurança e à extensão da vida útil das instalações. Sendo assim, investimentos para monitorar as condições operacionais dos componentes mais vulneráveis à ocorrência de falhas, com o objetivo de prolongar a vida útil dos equipamentos, são justificados por questões econômicas e ambientais.⁽⁵⁾ Na avaliação da integridade estrutural do setor nuclear, é necessário conhecer o comportamento mecânico dos materiais.⁽⁶⁾ Dessa forma, este trabalho tem a finalidade de analisar as propriedades mecânicas de soldas de aços inoxidáveis austeníticos 316L antes e após tratamento térmico em temperatura e duração que simula as condições de operação de um reator nuclear tipo PWR.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Neste estudo foram utilizadas duas chapas laminadas de aço inoxidável austenítico AISI 316L com dimensões de 300x150x12,7mm. O metal de adição utilizado na soldagem foi o aço AWS 316L. As composições químicas dos aços estão indicadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 316L (Metal Base)

Material	Cr	Mo	Si	Mn	C	S	P	Ni
AISI 316L	16,00	2,00	0,75	2,00	0,03	0,03	0,05	10,00

Tabela 2. Composição química do aço inoxidável austenítico AWS 316L (Metal de Adição)

Material	Cr	Mo	Si	Mn	C	S	P	Ni
AWS 316L	18,60	2,80	0,50	1,70	<0,02	-	-	11,30

2.2 Soldagem

As chapas de aço AISI 316L foram chanfradas em uma das laterais com ângulo de 30° e soldadas em múltiplos passes utilizando-se soldagem TIG (Tungsten Inert Gás). Utilizou-se como metal de adição arames de aço inoxidável austenítico AWS 316L com 1,6 mm de diâmetro. A vazão de argônio na tocha foi de 15 L/mim, a tensão foi de 20-22 V e a corrente foi de 100 A no passe de raiz e de 130 A nos passes subsequentes. A velocidade de soldagem foi de aproximadamente 66 mm/min para o passe de raiz e variou entre 111 mm/min e 176 mm/min para os dez passes subsequentes. Utilizou-se cobre junta no reverso da solda para se evitar contaminação, oxidação e empenamento do material.

2.3 Tratamento Térmico

O tratamento térmico foi realizado em metade da chapa soldada, a 335°C por 1000 horas em forno Instron SFL. O resfriamento ocorreu à temperatura ambiente.

2.4 Ferritoscopia

Com o auxílio do ferritoscópio Fischer MP3, mediu-se a porcentagem de ferrita delta presente na zona fundida da solda do material não tratado e do material tratado. Realizaram-se 10 medidas no centro e 10 medidas nas laterais da solda.

2.5 Preparação de Amostras para Metalografia

Uma amostra tratada e uma amostra não tratada foram cortadas, embutidas e lixadas com lixas de granulometria 80, 180, 280, 400, 600, 1200 e 2000 mesh. O polimento foi realizado com panos de polimento com pasta de diamante (3 μ m e 1 μ m). O ataque eletrolítico foi realizado com solução de ácido nítrico 40%, 1,5V por 30 segundos. Após o ataque as amostras foram lavadas com álcool e secas para posterior observação no microscópio óptico.

2.6 Corpos de Prova

Os corpos de prova redondos para ensaio de tração foram usinados com 4 mm de diâmetro, 50 mm de comprimento, com centro dentro da região de solda (Fig. 2). Os corpos de prova foram orientados transversalmente à direção da solda (Fig. 3).

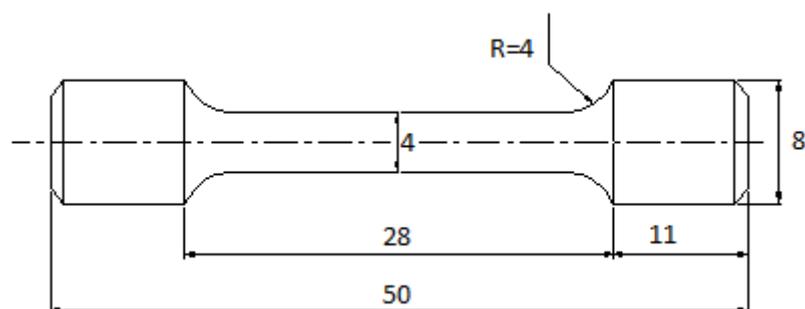


Figura 2. Dimensões do corpo de prova redondo para ensaio de tração.⁽⁷⁾

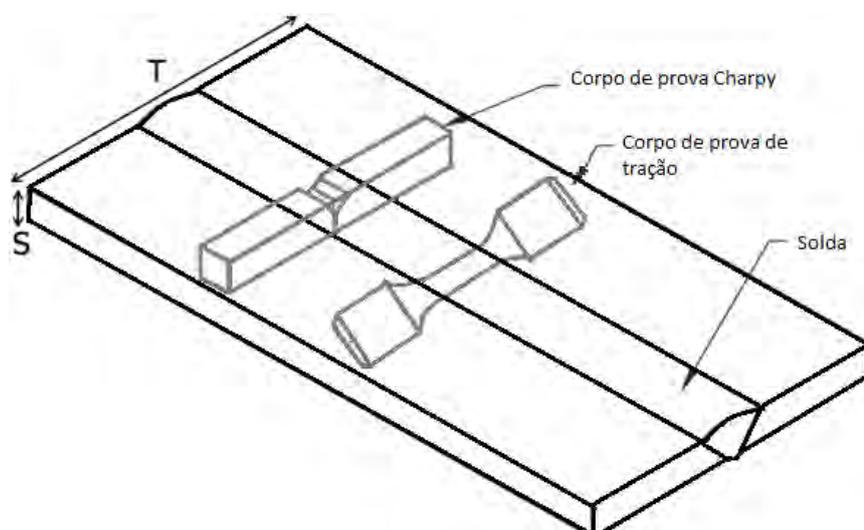


Figura 3. Diagrama esquemático demonstrando as orientações dos corpos de prova em relação à solda.⁽¹⁾

Os corpos de prova para ensaio de impacto Charpy foram usinados com dimensões de 10 mm de largura, 10 mm de espessura e 55 mm de comprimento (Fig. 4). Foram entalhados em Brochadeira Blacks Equipment Limited com entalhe tipo V de 2 mm de profundidade, no centro da solda, com orientação TS. A primeira letra designa a direção normal ao plano do entalhe e a segunda letra, a direção de propagação da trinca (Fig. 3).

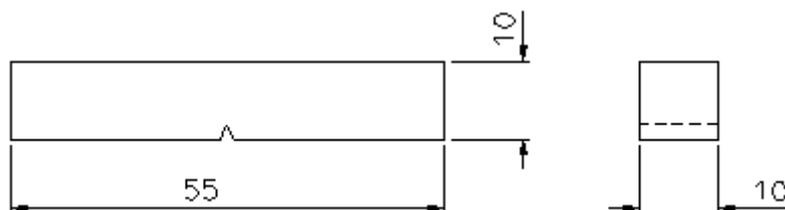


Figura 3. Dimensões do corpo de prova SE(B) para ensaio de impacto Charpy.⁽⁸⁾

Foram usinados 6 corpos de prova do tipo Charpy e 3 corpos de prova para ensaio de tração, tanto para o material tratado quanto para o não tratado. Os corpos de prova a partir do material tratado só foram usinados após o tratamento térmico de metade da chapa soldada.

2.7 Ensaio de Dureza

O ensaio foi realizado à temperatura ambiente em equipamento Wolpert Wilson Instruments 930N. Realizaram-se 12 medidas de dureza Vickers (6 no centro e 6 nas laterais), por amostra (tratada e não tratada), com carga de 10Kg.

2.8 Ensaio de Tração

O ensaio foi realizado à temperatura ambiente, com velocidade de 2 mm/min, em máquina Instron 5882 e célula de carga com capacidade de 100KN. Realizaram-se 3 ensaios para cada condição (tratada e não tratada).

3 RESULTADOS

3.1 Ferritoscopia

Para uma caracterização quantitativa da fração volumétrica de ferrita delta, que é um componente magnético, foram realizados ensaios de ferritoscopia em material não tratado e em material tratado termicamente.

Tabela 3. Fração de ferrita delta em material tratado e não tratado

Material		Fração de ferrita delta (%)	Desvio Padrão
Não tratado	Laterais	9,10	0,47
	Centro	10,00	0,20
Tratado	Laterais	8,63	0,57
	Centro	9,80	0,28

3.2 Metalografia

A microestrutura da solda de aço 316L, antes e após tratamento térmico, é apresentada na Figura 5.

3.3 Ensaio de tração

As curvas de tensão-deformação obtidas durante os ensaios de tração são apresentadas na Figura 6.

As propriedades obtidas após o teste de tração são apresentadas na Tabela 4.

3.4 Ensaio de dureza

Os valores médios obtidos, os desvios padrão e a variação do valor de dureza foram indicados na Tabela 5.

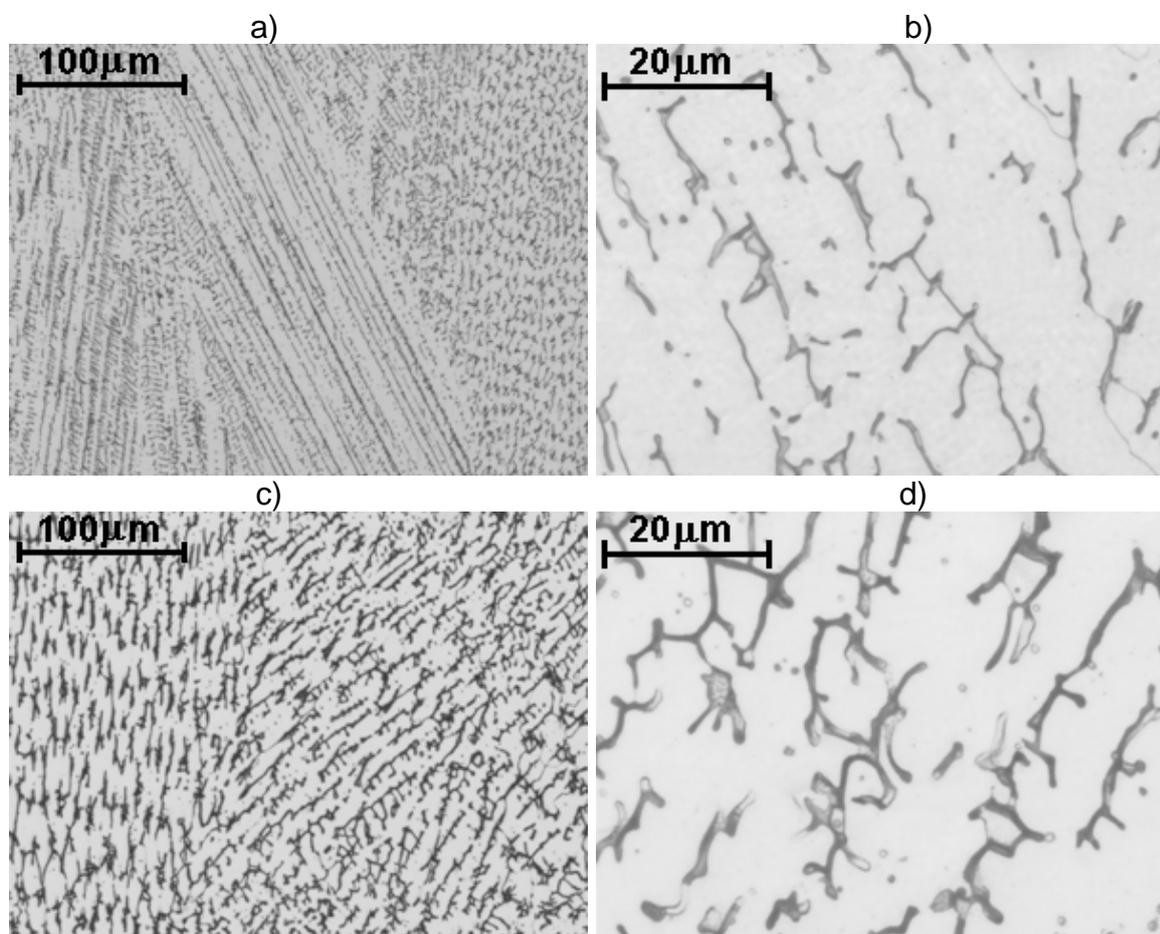


Figura 5. Microestrutura da solda de aço 316L para amostra não tratada a) aumento de 200 vezes b) aumento de 800 vezes, e amostra tratada termicamente c) aumento de 200 vezes d) aumento de 800 vezes.

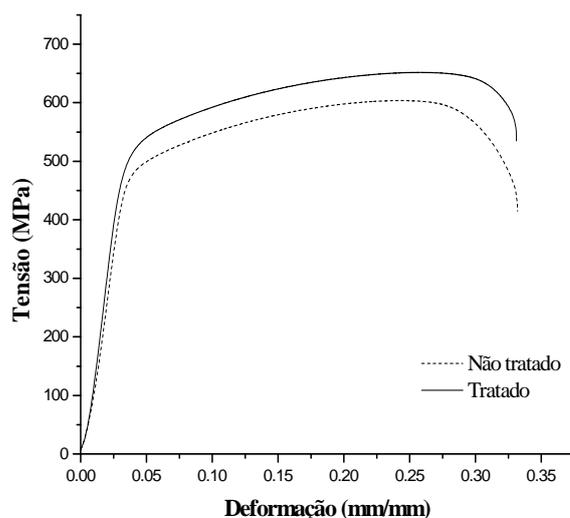


Figura 6. Curvas de tensão-deformação para solda de aço 316L antes e após tratamento térmico.

Tabela 4. Propriedades obtidas após ensaios de tração em solda de aço 316L antes e após tratamento térmico

Material	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)
Não tratado	609	454	27	73
Tratado	636	458	24	68
Variação	Aumento de 4%	Aumento de 1%	Diminuição de 13%	Diminuição de 7%

Tabela 5. Medidas do ensaio de dureza

Material	Dureza (HV10)	Desvio Padrão	Variação (%)
Não tratado	238	12	0
Tratado	303	14	28

4 DISCUSSÃO

4.1 Ferritoscopia

Apesar da pequena variação da fração volumétrica de ferrita, podendo esta variação estar dentro do desvio padrão, há um indício de diminuição dessa fração com o tratamento térmico. Assim, o ensaio sugere que há formação da fase alfa linha, uma fase paramagnética⁽³⁾ e não identificada pelo ferritoscópio, a partir da ferrita original ferromagnética.

3.2 Metalografia

As micrografias da amostra não tratada e da amostra envelhecida termicamente não apresentam diferenças significativas quanto à microestrutura aparente observada através de microscopia ótica. Isso confirma que a fase alfa linha não pode ser observada por microscopia ótica devido ao seu tamanho reduzido e similaridade estrutural com a matriz ferrítica.

3.3 Ensaio de tração

Observa-se que, após o tratamento térmico, houve um pequeno aumento tanto do limite de resistência quanto do limite de escoamento, enquanto houve pequena diminuição de alongamento e estrição, representando uma pequena diminuição da ductilidade. As variações nessas propriedades foram pequenas, no entanto demonstram um indício de alteração na microestrutura do aço e sugerem a ocorrência de decomposição espinodal.

3.4 Ensaio de dureza

Observa-se um aumento significativo de dureza de 28% após tratamento térmico. Em ensaios de microdureza em cada fase individual, realizados por Abe e Watanabe⁽²⁾ e Chandra,⁽¹⁾ verificou-se que apenas a dureza da fase ferrita é aumentada com o tempo de envelhecimento enquanto que a dureza da fase austenita não se altera. Assim, esse aumento de dureza provavelmente deve-se a alterações na fase ferrita, com formação da fase alfa linha.

4 CONCLUSÃO

- O tratamento térmico simulando as condições de operação de um reator nuclear tipo PWR teve pouco efeito sobre as propriedades mecânicas da solda em aço 316L determinadas pelo ensaio de tração. No entanto, apesar de serem pequenas as variações, o aumento do limite de resistência e do limite de escoamento e a diminuição do alongamento e da estrição sugerem a mudança na microestrutura do material devido a provável formação da fase alfa linha.
- O tratamento térmico teve efeito significativo sobre a dureza do material, sugerindo formação da fase alfa linha.
- O ensaio de ferritoscopia não se mostrou uma ferramenta com boa sensibilidade para determinação da presença da fase alfa linha.
- A microscopia óptica não foi ferramenta suficiente para identificar a formação da fase alfa linha após tratamento térmico, sendo necessária a utilização de microscopia eletrônica de transmissão.

Agradecimentos

Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig).
 Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN).
 Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- 1 CHANDRA, K. et al. Low temperature thermal aging of austenitic stainless steel welds: Kinetics and effects on mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. v. 534, p. 163-175, fevereiro 2012.
- 2 ABE, H., WATANABE, Y., Low-Temperature Aging Characteristics of Type 316L Stainless Steel Welds: Dependence on Solidification Mode. *Metallurgical and Materials Transactions A*. v. 39, p. 1392-1398, junho 2008.
- 3 FONTES, T. F. *Efeito da Fase Alfa Linha nas Propriedades Mecânicas e de Resistência à Corrosão do Aço Inoxidável Duplex Ur 52n+*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). São Paulo, 2009.

- 4 MAGNABOSCO, R. *Cinética das Transformações de Fase em Aço Inoxidável Superdúplex*. Relatório final submetido ao CNPq. Departamento de Engenharia Mecânica Centro Universitário da FEI, 2010.
- 5 CARVALHO, J. D. *Avaliação da Tenacidade à Fratura Dinâmica do Aço Inoxidável ABNT 316L Sensitizado*. Trabalho de Graduação. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2006.
- 6 RODRIGUES, B.J.F. *Avaliação da Fratura Dinâmica no Aço Inoxidável Austenítico 316 através do Ensaio de Impacto Instrumentado Charpy*. Trabalho de Graduação. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2004.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, E8; *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, dezembro 2009.
- 8 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, E23; *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, julho 2007.