

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO HEAT INPUT NA SOLDAGEM TIG AUTÓGENO SOBRE A QUANTIDADE DE AUSTENITA EM AÇO HIPERDUPLEX SAF 2707 HD¹

Rodrigo Bastos Lima²
Uirá Rodrigues da Silveira²
Débora Francielle Dias³
Marília Garcia Diniz⁴
André Rocha Pimenta⁵

Resumo

Aços Inoxidáveis da família duplex vêm apresentando essencial utilização nas indústrias, devido às suas características de elevada resistência mecânica e à corrosão, principalmente em ambientes mais nocivos de gases e elevadas temperaturas. Este projeto objetivou analisar quantitativamente a influência da variação da corrente na soldagem TIG autógeno (*heat input*) do aço inoxidável hiperduplex SAF 2707 HD. Foram utilizadas técnicas de caracterização microestrutural por ataque químico colorido (*collor etching*), microscopia óptica e análise e processamento digital de imagens em amostras soldadas com corrente de soldagem de 25A e amostras soldadas com corrente de 40A. Ambos os grupos foram soldados com gás de proteção argônio adicionado de 2,5% em peso de nitrogênio. Sobre os resultados foi empregada a análise estatística para distribuição t de Student e o teste de Hipótese nula (H_0). A técnica de processamento digital de imagens determinou que a variação de corrente de soldagem de 25A para 40A fez a fração volumétrica de austenita variar de um valor médio de 16,44% com desvio padrão de ± 4 ; 22,08% para 29,46% com desvio padrão de $\pm 19,765\%$. A análise estatística por distribuição t de Student com 95% de confiabilidade revelou que não existe diferença entre as médias obtidas e que, portanto, a variação da corrente não provocou efeito sobre a fração volumétrica de austenita nas juntas soldadas.

Palavras-chave: Aço hiperduplex; Soldagem TIG; Análise e processamento digital de imagens.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VARIATION IN THE HEAT INPUT AUTOGENOUS TIG WELDING ON THE AMOUNT OF THE AUSTENITE IN HIPERDUPLEX STEEL SAF 2707 HD[®]

Abstract

Duplex stainless steels have presented a family key used in industry, due to its characteristics of high mechanical strength and corrosion, especially in adverse environments and elevated gas temperature. This project aimed to analyze quantitatively the influence of the heat input in autogenous TIG welding of hiperduplex stainless steel SAF 2707 HD. Were used techniques of collor etching and optical microscopy and digital image processing for microstructural characterization in samples welded with 25A of current and samples welded with 40A of current. Both groups were welded with argon shielding gas added 2.5% of nitrogen by weight. On the results was used for statistical analysis Student's t distribution test and null hypothesis (H_0). The digital image processing technique determined that the variation of welding current of 25A to 40A made the volume fraction of austenite range from an average of 16.44% with standard deviation of ± 4 ; 22.08% to 29.46% with standard deviation of $\pm 19.765\%$. Statistical analysis by Student's t distribution with 95% confidence revealed no difference between the means obtained and that therefore the variation of the current caused no effect on the volume fraction of austenite in the welded joints

Key words: Hiperduplex steel; TIG welding; Digital image processing and analysis.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Alunos de Graduação de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

³ Eng. Mecânico, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UERJ

⁴ Eng. Metalúrgico, DSc, Prof. Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, UERJ.

⁵ Eng. Mecânico, MSc, Prof. Assistente. Departamento de Mecânica, Instituto Federal do Rio de Janeiro (IFRJ).

1 INTRODUÇÃO

A família dos aços inoxidáveis duplex é caracterizada por materiais compostos de partes aproximadamente iguais das fases austenita e ferrita. Sua resistência à corrosão é bastante elevada em ambientes sulfurosos e com temperatura elevada e, por isso, tais aços encontram uso nas indústrias químicas, petrolíferas e de produção de papel. A preferência por esse material se dá pela alta resistência que tem a ambientes considerados nocivos para os aços inoxidáveis comuns.^(1,2)

Para os próximos anos, a Petrobrás, por exemplo, vai enfrentar desafios na exploração *offshore*, em especial na camada pré-sal. O início dos testes de produção de longa duração no pré-sal ocorreu em Setembro de 2008 no Campo Jubarte na bacia de Santos. Desde então, dentre os muitos desafios que podem ser citados, está o de que os materiais para os poços devem ser altamente resistentes a altos teores de CO₂ (mais de 5%) e pressões de até 600 bar. Neste aspecto, devem ser conduzidos estudos de soldabilidade, qualificação de processos específicos de soldagem, de corrosão-fadiga e fragilização pelo hidrogênio em materiais candidatos às aplicações citadas. Existe a necessidade de atendimento aos desafios relacionados ao uso de materiais mais resistentes e que tenham adequada soldabilidade, bem como parâmetros de soldagem muito bem determinados. As condições extremas de produção de óleo e gás dão destaque para a seleção de materiais e para a qualificação de processos de soldagem através de uma completa caracterização de todas as etapas envolvidas na obtenção de soldas que façam frente a crescentes temperaturas e pressões de CO₂ e H₂S, maiores profundidades, geologias mais complexas e instáveis e óleos pesados. Há necessidade de ensaios específicos nas condições simuladas daquele campo. Dentro deste contexto, a qualificação de um processo de baixo aporte térmico (TIG autógeno) para aços LRC's (Ligas Resistentes a Corrosão), em especial os aços do tipo família duplex, e a procura por melhores e mais adequadas juntas soldadas, caracteriza uma demanda frente ao grande número de processos de soldagem existentes e as variadas situações envolvendo estes aços, bem como a necessidade crescente das indústrias de petróleo e gás natural, principalmente no estado do Rio de Janeiro, devido à sua vocação natural para serviços relacionados a indústria do petróleo e gás.⁽³⁾

Para os Aços do tipo duplex, o aumento das quantidades de cromo e nitrogênio leva à formação da nova subclasse de aço inoxidável austenítico/ ferrítico denominado aço hiperduplex.⁽⁴⁾

Este projeto objetivou analisar quantitativamente a influência da variação da corrente na soldagem TIG autógeno do aço inoxidável hiperduplex comercialmente denominado SAF 2707 HD. Foram utilizadas técnicas de caracterização microestrutural por ataque químico colorido (*collor etching*), microscopia óptica e análise e processamento digital de imagens em amostras soldadas com corrente de soldagem de 25A e amostras soldadas com corrente de 40A. Ambos os grupos foram soldados com gás de proteção argônio adicionado de 2,5% em peso de nitrogênio. Sobre os resultados foi empregada a análise estatística para distribuição t de Student e o teste de Hipótese nula (H₀).

A caracterização de juntas soldadas do aço hiperduplex visa contribuir para a geração de métodos e qualificação de soldagem TIG autógeno para aços inoxidáveis do tipo duplex, onde se busca parâmetros de soldagem que permitam a obtenção de juntas soldadas com características mecânicas e metalúrgicas mais

adequadas para suas aplicações, isto é, mais próximas às características do metal de base.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foi uma liga de aço inoxidável da família duplex, denominado UNS S32707, classificado pela norma ASTM como ASTM A- 789- 01A, que apresenta composição química conforme a Tabela 1 e resistência equivalente por pites (PRE) de 49%.⁽⁵⁾ A matéria-prima foi fornecida na forma de tubos sem costura, no estado recozido, com diâmetro externo de 19,05 mm (3/4") e espessura de 2,24 mm.

Tabela 1. Composição química (% em peso) do aço hiperduplex SAF 2707 HD com denominação ASTM UNS S32707⁽⁵⁾

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	N
0,019	0,22	0,92	0,013	0,001	26,68	6,37	4,77	0,96	0,38

Os corpos de prova foram soldados pelo processo TIG, solda autógena, utilizando a máquina de solda Fronius modelo Transtig 1.600*, arco pulsado, alta frequência, grau de proteção IP 23, tensão de corrente de 220 V, faixa de corrente de soldagem para TIG variando de 2A até 160A, ciclo de trabalho para TIG: 160A (40%) e 110A (100%), tensão operacional para TIG: variando de 10,1 V até 16,4 V e valores de *heat input* utilizados no processo de soldagem mecanizada de 130 J/m para as amostras de 25A e 214 J/m para as amostras de 40A. A soldagem foi de recobrimento (um único passe) radial e realizada com a peça presa a um torno mecânico, com a tocha numa posição de topo em relação à mesma. Este procedimento garantiu permanência da distância, velocidade e posicionamento do eletrodo. As amostras soldadas foram divididas em dois grupos (Tabela 2), ambos soldados com 2,5% de nitrogênio adicionado no gás de proteção (argônio), com a variação apenas das correntes de soldagem. Foram obtidas 4 amostras de cada grupo. As juntas soldadas foram resfriadas 1 minuto ao ar tranquilo e em seguida imersas em água. A penetração para amostras soldadas com 25A foi de 0,56 mm e a penetração para amostras soldadas com 40A foi de 1,20 mm.

Tabela 2. Grupos de amostras gerados

Grupo (Argônio + N ₂)	Corrente de Soldagem
1	25A
2	40A

As amostras contendo as juntas soldadas foram submetidas à preparação metalográfica para obtenção de superfície especular. Em seguida, foi realizado ataque químico por 120 segundos com a técnica *color etching*, reagente Behara.⁽⁶⁾ A solução utilizou água destilada e deionizada, ácido clorídrico e metabissulfito de potássio. Após o ataque químico foram obtidas imagens das regiões de metal de base (MB), da zona termicamente afetada (ZTA) e da zona de fusão (ZF) através de um microscópio óptico modelo Axiolmager M1m Zeiss, com captura digital de imagem através de uma câmera digital acoplada.

Após a identificação das fases ferrita e austenita através do ataque químico, seguiram-se etapas de análise e processamento digital das imagens das juntas soldadas utilizando-se o programa Imlab.⁽⁷⁾ As etapas de análise e processamento digital de imagens incluíram pré-processamento, segmentação, pós-processamento,

extração de atributos e quantificação das frações volumétricas de ferrita e austenita na ZF das juntas soldadas.⁽⁸⁾ Foi utilizado um programa de planilha de cálculo para a obtenção dos percentuais e áreas ocupadas pelas fases identificadas como ferrita e austenita.

As etapas de preparação metalográfica, ataque químico e obtenção de imagens foram repetidas num total de três sequências de operações (três bateladas), para todas as amostras estudadas o que permitiu obtenção de imagens de três seções transversais (ou profundidades) distintas das amostras testadas. Somente as imagens da ZF foram consideradas para as etapas de análise e processamento digital de imagens. A Tabela 3 apresenta o número total de imagens obtidas para a região de ZF para os grupos 1 e 2.

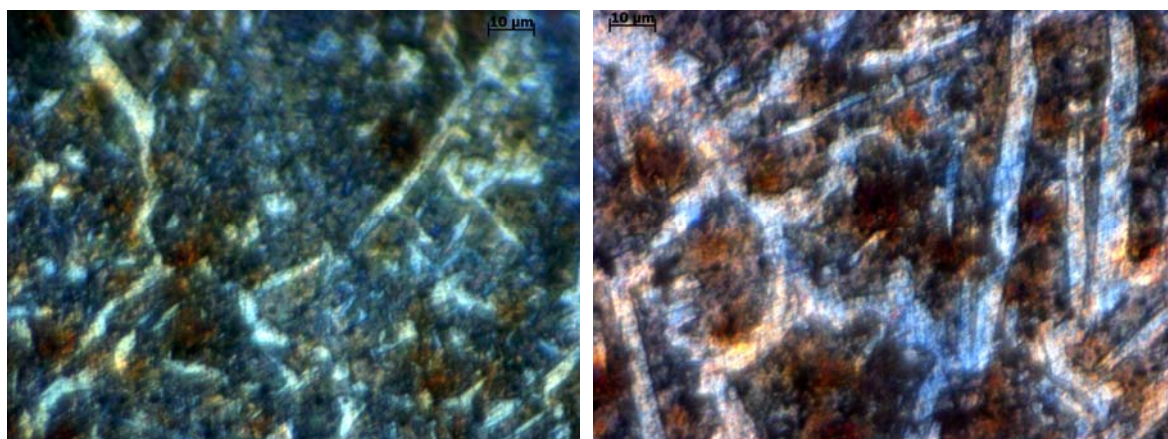
Tabela 3. Número de imagens obtidas para a zona de fusão (ZF) para os grupos testados em cada batelada

		Grupo 1 (25A)	Grupo 2 (40A)
Nº IMAGENS DA BATELADA 1	ZF	5	4
Nº IMAGENS DA BATELADA 2	ZF	4	8
Nº IMAGENS DA BATELADA 3	ZF	1	6

Com o intuito de avaliar se a variação de aporte térmico no processo de soldagem foi suficiente para afetar o percentual de austenita na ZF das juntas soldadas, utilizou-se o teste t de Student. Foi considerada a hipótese nula $H_0 = \mu_1 = \mu_2$ (25A e 40A respectivamente), 95% de confiabilidade, $\alpha/2 = 0,025$ ou $\alpha = 0,05$ e valor de t tabelado = 2,120. Para aplicação do teste os experimentos foram realizados de modo completamente randômico, as populações completamente independentes e as variâncias iguais.⁽⁹⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1a e 1b apresentam exemplos para os aspectos micrográficos obtidos para a ZF das juntas soldadas para os grupos 1 e 2, respectivamente. Nestas imagens, podem ser observadas as respectivas geometrias dos grãos de cada fase presente e que foram geradas pelo processo de soldagem utilizado. Para a fase ferrita os grãos apresentaram coloração escura, em formato arredondado, isto é, equiaxial. Durante o processo de solidificação da poça de fusão, a formação da ferrita se dá em primeiro lugar.⁽¹⁰⁾ A fase austenita, formou-se à partir da fase ferrita em processo difusional, por precipitação nos contornos dos grãos da ferrita.^(10,11) Essa fase apresentou um formato acicular e uma coloração mais clara, conforme já mostrado pela literatura.⁽¹⁰⁾



(a) Aspecto micrográfico da zona de fusão (ZF). Ataque químico Behara, aumento 500X, corrente de soldagem 25A, *heat input* = 130 J/mm.

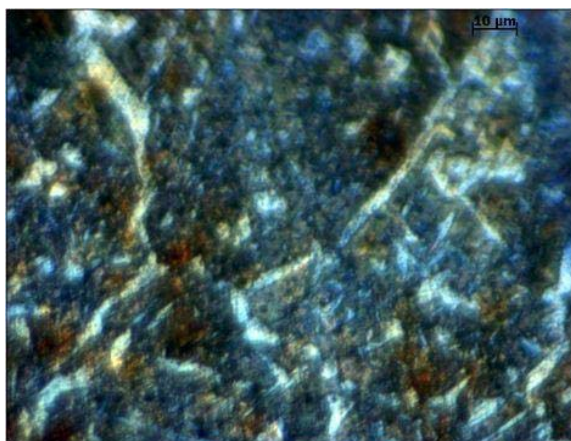
(b) Aspecto micrográfico da zona de fusão (ZF). Ataque químico Behara, aumento 500X, corrente de soldagem 40A, *heat input* = 214 J/mm.

Figura 1. Imagens que exemplificam os aspectos micrográficos obtidos (ZF) para as amostras dos grupos 1 e 2.

Como o resfriamento da junta soldada foi feito rapidamente de modo a evitar o aparecimento de fases deletérias, não houve tempo suficiente para a formação da fase austenita em grandes quantidades, podendo-se observar qualitativamente que a mesma se forma na região de contorno de grão da ferrita e em quantidades aparentemente menores.⁽¹⁰⁻¹²⁾ Não foi verificado se houve uma variação significativa no tamanho de grão da ferrita entre os grupos 1 e 2. A norma ASTM E 1181-02 (2008)⁽¹³⁾ é utilizada para obtenção de tamanho de grão ASTM de aços duplex e a norma ASTM E1382-97 (2010)⁽¹⁴⁾ é a recomendada pela ASTM para medidas automáticas ou semi-automáticas de tamanhos de grão ASTM utilizando-se um número significativo de imagens do material (que podem ser bifásicos como os da família duplex).

Lobo e Rocha⁽¹²⁾ observaram qualitativamente que a diferença no *heat input* (25A e 40A) parece ter ocasionado diferença no tamanho do grão ferrítico nas zonas de fusão de juntas soldadas por processo TIG autógeno de um aço superduplex. Entretanto, não houve diferença significativa na quantidade da fase austenita que durante o processo de solidificação da poça de fusão. O aço analisado por Lobo e Rocha foi o UNS S32760 e foi utilizado o processamento digital de imagens para a quantificação da ferrita e austenita nas juntas soldadas.⁽¹²⁾

Foram processadas 8 imagens para as ZF das amostras soldadas com 25A e 10 imagens para as ZF das amostras soldadas com 40A. A Figura 2 exemplifica o resultado obtido até a etapa final de segmentação do processamento digital de imagens e que possibilitou a quantificação das frações volumétricas das fases austenita e ferrita presentes.



(a) Imagem original da ZF (grupo 1), Ataque Behara, 500X.



(b) Imagem obtida após aplicação de todas as etapas de análise e processamento digital sobre a imagem (a). Os objetos claros: austenita.

Figura 2. Imagens que exemplificam o processo que possibilitou a segmentação de uma das fases (austenita) para a quantificação das duas principais fases presentes na ZF de todas as juntas soldadas.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a fração volumétrica de austenita na ZF de todas as amostras testadas. Os valores nulos se referem às amostras as quais não foi possível gerar imagem. A variação de corrente de soldagem de 25A para 40A fez a fração volumétrica de austenita variar de um valor médio de $16,44\% \pm 4,22\%$ para $29,46\% \pm 19,76\%$. A não obtenção de imagens que pudessem ser submetidas a processamento digital mostrou que o ataque químico algumas vezes não foi efetivo para revelar as juntas soldadas, ou que a etapa prévia do lixamento/ polimento não foi realizada de modo adequado. As etapas de preparação metalográfica mostraram afetar fortemente a etapa subsequente de ataque químico. Para a Hipótese Nula considerada de que a média de fração volumétrica de austenita para as amostras de 40A era igual à média de fração volumétrica das amostras de 25A, com $\alpha = 0,05$ (95% confiabilidade), com o valor tabelado $t_{0.05/2, 16} = 2,120$ e com o valor calculado $t_{0.05/2, 16} = 1,8196$ para ambas as famílias, a Hipótese Nula proposta foi aceita. Assim, pôde-se concluir que, a variação das correntes de soldagem não influenciou na fração volumétrica de austenita das ZF obtidas para os grupos 1 e 2.

Os resultados obtidos por Lobo e Rocha⁽¹²⁾ para o efeito do *heat input* na presença da quantidade de austenita na ZF de juntas soldadas por processo TIG autógeno e gás de proteção mistura de argônio com 2,5% de nitrogênio para aço superduplex (25A e 40A) estão de acordo com os obtidos no presente trabalho para o aço hiperduplex SAF 2707 HD, muito embora o número de imagens processadas por Lobo & Rocha tenha sido muito pequeno quando comparado ao número de imagens processadas no presente trabalho, o que garante uma maior precisão.

Stenvall e Holmquist,⁽¹⁵⁾ elaboraram um estudo das propriedades mecânicas da solda TIG do aço SAF 2707 HD com gás inerte argônio com adição de N₂ a 2% de concentração. Os autores afirmam que uma análise da junta soldada determinou uma fração volumétrica de ferrita de 45%, conseqüentemente, uma presença da fase austenita de 55%. Tal fato pode ser atribuído ao uso de metal de adição na soldagem, diferentemente do TIG autógeno utilizado na presente pesquisa.

Tabela 4. Imagens obtidas para a zona de fusão (ZF) para os grupos testados em cada batelada e a fração volumétrica % de austenita presente em cada imagem. A % da fase ferrita é o complemento até o valor de 100% na região da imagem analisada

% Austenita		
Amostras	25 A	40 A
Batelada 1		
1	15,63	0,00
2	20,73	0,00
3	22,45	24,84
4	15,29	23,66
Batelada 2		
1	11,69	19,63
2	20,30	11,86
3	13,64	26,99
4	0,00	13,14
Batelada 3		
1	0,00	72,22
2	11,76	33,38
3	0,00	55,52
4	0,00	13,36

5 CONCLUSÕES

Com os resultados restritos às amostras analisadas e condições utilizadas, pode-se concluir que:

- a técnica de *color etching* mostrou-se eficiente para diferenciar as fases presentes através de colorações típicas e realçar as regiões dos contornos de grãos;
- os aportes térmicos utilizados 130 J/m (25A) e 214 J/m (40A), não geraram regiões termicamente afetadas (ZTA's) que pudessem ser observadas através das técnicas utilizadas; e
- a técnica de processamento digital de imagens determinou que a variação de corrente de soldagem de 25A para 40A fez a fração volumétrica de austenita variar (valor médio de 16,44% ± 4,22% para 29,46% ± 19,76%, respectivamente), entretanto, a análise estatística por distribuição t de Student com 95% de confiabilidade mostrou que a diferença obtida não foi significativa para considerar que a variação no *heat input* de 25A para 40A fosse considerada efetiva para que as amostras pertençam a um grupo de "famílias" distintas, uma vez que a hipótese nula H_0 foi atendida.

Agradecimentos

Os autores agradecem a **Faperj** pelo apoio financeiro através do Edital E-26/110.074/2011, a **Transcontrol** (em particular aos Engenheiros **Luiz César** e **Renato Ferreira**) pela soldagem do material utilizado e à **Sandvik do Brasil** pelo material fornecido.

REFERÊNCIAS

- 1 SOUZA, Alan; PEREA, Eduardo; SIGNORELLI, Rodrigo. **SAF 2707 HD (UNS S32707) - Um aço Inoxidável Hiperduplex para ambientes severos contendo Cloretos**. Artigo Técnico da Sandvik, <http://www.smt.sandvik.com/br> (acessado em 16 de Maio de 2011).
- 2 MERELLO, R.; BOTANA, F.J.; BOTELLA, J.; MATRES, M.V.; MARCOS, M. **Influence of chemical composition on the pitting corrosion resistance of non-standard low-Ni high-Mn-N Duplex stainless steels**. Corrosion Science. Volume 45, p.909-921, 2003.
- 3 Marcelo de Castro-Rebello, **Cadernos Técnicos da Revista Metalurgia, Materiais e Mineração**, volume 67, Março/Abril de 2011.
- 4 TAVARES, S. S. M.; PARDAL, J. M.; PONZIO, E. A. Loureiro and J. A. de Souza. **Influence of microstructure on the corrosion resistance of Hyper Duplex stainless steel**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2009. DOI: 10.1002/maco.200905386.
- 5 Datasheet- Sandvik SAF 2707 HD, <http://www.smt.sandvik.com/br> (acessado em 16 de Maio de 2011).
- 6 METALS HANDBOOK. v.9, Color Metallography, USA: ASM (American Society for Metals) p.230, 1992.
- 7 <http://imlab.sourceforge.net/> (Acessado em 20 de Dezembro de 2012).
- 8 PACIORNIK, S.; MAURÍCIO, M. H. P. Digital Imaging. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Handbook metallography and microstructures. Ohio: American Society for Metals, cap. 2, p. 368-402, 2004.
- 9 MONTGOMERY, Douglas C. Design and analysis of experiments. 5ª Edição. New York: John Wiley & Sons, 2001
- 10 ALVES NETO, S. A., CAMPOS, J. B. de, DINIZ, M. G., PIMENTA, A. R., **Análise de parâmetros da soldagem autógena em juntas soldadas de aço superduplex através da utilização de análise e processamento digital de imagens**, 66 Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, 18 a 22 de Julho, São Paulo, Brasil, ISSN 1516-392X.
- 11 DONATO, Gustavo H. B. **Fração volumétrica de fase sigma durante envelhecimento de Aço Inoxidável Duplex SAF 2205**. São Paulo: Fundação Educacional Inaciana, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos, 2002. Dissertação de Iniciação Científica.
- 12 ROCHA, Juliana Modesto; LÔBO, Natalia de Carvalho. **Análise da influência de parâmetros de soldagem autógena em características metalúrgicas de juntas soldadas de aço superduplex**. Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2010.
- 13 http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?+/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE_PAGES/E1181.htm (consulta realizada em 11 de Maio de 2012).
- 14 http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/REDLINE_PAGES/E1382.htm (consulta realizada em 11 de Maio de 2012).
- 15 STENVALL, Peter; HOLMQUIST, Martin. Weld **Properties of Sandvik SAF 2707 HD**. Artigo Técnico da Sandvik de 2008, <http://www.smt.sandvik.com/br> (acessado em 16 de Maio de 2011).