

Estudo do comparativo do comportamento mecânico em uniões soldadas dos aços de alta resistência de 700 e 1.000MPa

Comparative study of mechanical behavior of welded joints of the UHSS of 700 and 1,000MPa

Rodrigo Carlesso, Tiago Mezzomo¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
rodrigocarlesso@yahoo.com.br, tchemezzomo@yahoo.com.br

Resumo. A aplicação de aços de alta resistência está fortemente difundida na indústria metal-mecânica, principalmente em aplicações onde a redução de peso é importante, como, por exemplo, na indústria de implementos rodoviários e maquinário agrícola. Este artigo visa realizar uma análise comparativa no comportamento mecânico (microdureza e ensaio de tração) de juntas soldadas de dois diferentes aços soldados através do processo GMAW – Gas Metal Arc Welding – utilizando diferentes valores de corrente e tensão. O processo de soldagem foi realizado com o auxílio de um sistema robotizado para manter a homogeneidade ao longo da junta, a distância e o posicionamento correto no comprimento total da junta soldada. Foram realizados ensaios de caracterização via microscopia ótica, perfis de microdurezas e ensaios de tração. Os resultados mostraram que, em uma junta soldada de aço estrutural, as propriedades mecânicas entre o metal base e a solda possuem uma importância primordial nos resultados finais dos ensaios.

Palavras-chave: soldagem, microdureza, ensaio de tração, aços de alta resistência e baixa liga.

Abstract. The application of high strength steels is strongly diffused in the engineering industry, especially in applications where weight reduction is important, such as the industry of agricultural machines and trailers industry. This investigation aims at conducting a comparative analysis on the mechanical behavior (micro hardness profile and tensile test) of welded joint by GMAW – Gas Metal Arc Welding – using different values of current power and voltage. The welding process was made using robotic system to maintain homogeneity along the joint, the right distance and position during the total weld joint length. The mechanical behaviors were performed with the optical microscope, micro hardness profiles analysis and tensile test. The results showed that the mechanical properties between the base metal and the weld in a structural steel welded joint have a primary importance in the final test results.

Keywords: welding, micro hardness profile, tensile test, high strength low alloy steel.

Introdução

A preocupação crescente com o meio ambiente e a redução do consumo de combustível tem motivado os fabricantes de automóveis a utilizar materiais mais leves, com maior resistência mecânica e elevada ductilidade. Reduzindo o peso de um carro, pode-se obter me-

nor consumo de combustível, juntamente com menos emissões de CO₂ (Farabi *et al.*, 2010). Com esse intuito, o desenvolvimento de novas tecnologias e processos de fabricação para construção de veículos mais leves e mais seguros tem sido realizado, e os aços avançados de alta resistência mecânica (AHSS) têm sido desenvolvidos (Granbom, 2010).

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Paulo Gama, 110, Farroupilha, 90040-060, Porto Alegre, RS, Brasil.

Além de reduções de peso, os aços de alta resistência possuem vantagens diferenciadas na absorção de impacto. Esse fato traz à indústria automotiva um nível de excelência em termos de segurança, diminuindo, assim, riscos de danos aos passageiros de um automóvel em uma potencial colisão.

Em juntas soldadas de aços de alta resistência, existe também a necessidade de um controle aprimorado de parâmetros de soldagem para garantir aportes térmicos controlados para que as propriedades mecânicas não sejam comprometidas. O grande problema na soldagem de aços de alta resistência é manter sua elevada resistência sem o prejuízo de sua tenacidade, principalmente na região próxima ao cordão de solda. Para isso, diversas pesquisas em paralelo ao desenvolvimento desses aços estão sendo realizadas para manter ao máximo possível as propriedades do material base na região soldada (Rodrigues, 2012).

Loureiro (2002) afirma que juntas soldadas são, por natureza, materiais heterogêneos, apresentando variações nas microestruturas e propriedades mecânicas (dureza, resistência e tenacidade) através do metal de solda (MS) e da zona termicamente afetada (ZTA).

A alta temperatura originada pela solda solubiliza o carbono e outros elementos presentes na matriz, ocorrendo, posteriormente, a transformação da austenita sob altas taxas de resfriamento, produzindo microestruturas frágeis nas regiões próximas ao metal de solda. Por isso, é necessário o controle do teor de carbono e demais elementos de liga presentes no material.

Conforme Modenesi (2011), qualquer que seja o processo de soldagem empregado é importante garantir baixa energia de soldagem

e assegurar-se de que o nível de hidrogênio na junta soldada seja mínimo, visto que altos níveis de hidrogênio poderão formar trincas. Portanto, a determinação de consumíveis de baixo hidrogênio, secagem adequada dos consumíveis e boa limpeza da junta durante o processo irá reduzir a possibilidade dessas descontinuidades.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma comparação do comportamento mecânico do aço de alta resistência de 700MPa – 3mm de espessura e do aço 1000MPa – 2mm de espessura na soldagem MAG robotizada.

Materiais e métodos

Materiais

Material de base

As juntas soldadas foram confeccionadas utilizando-se como material base chapas de aço de alta resistência de 1.000MPa com 2mm de espessura e 700MPa com 3mm de espessura. Os valores típicos de composição química e propriedades mecânicas conforme especificações dos fornecedores estão descritos nas Tabelas 1 a 3.

Material de adição

O metal de adição utilizado na confecção das juntas soldadas é o arame maciço do tipo AWS A5.28 (AWS, 2005), com a classificação ER120S-G, com 1mm de diâmetro. A ESAB é fornecedora do eletrodo que comercializa esse metal de adição com o nome comercial OK AristoRod 79 (ESAB, 2012). A Tabela 4 apresenta a composição química e as características

Tabela 1. Composição química dos Aços de Alta Resistência estudados (Usiminas, 2012; SSAB, 2014).
Table 1. Chemical composition of the Ultra High Strength Steels studied (Usiminas, 2012; SSAB, 2014).

	C % Máx.	Si % Máx.	Mn % Máx.	P % Máx.	S % Máx.	Al % Min.	Nb % Máx.
700 MPa	0,15	0,55	2,1	0,030	0,015	0,010	0,120
1000 MPa	0,15	0,5	1,5	0,010	0,002	0,040	0,015

Tabela 2. Propriedades Mecânicas do Aço de Alta Resistência 700MPa (Usiminas, 2012).
Table 2. Mechanical Properties of Ultra High Strength Steel 700MPa (Usiminas, 2012).

Material	Espessura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento		Dobramento 180°
				BM	(%min)	
700 MPa	3	≥700	≥750	5,65vS ₀	12	0,0E

Tabela 3. Propriedades Mecânicas do Aço de Alta Resistência 1.000MPa (SSAB, 2014).**Table 3.** Mechanical Properties of Ultra High Strength Steel 1,000MPa (SSAB, 2014).

Material	Espessura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento A80 (%min)	Dobramento 90°
1000 MPa	2	700-950	1000-1200	7	2,0xt

Tabela 4. Composição química e características mecânicas do consumível de soldagem (ESAB, 2012).**Table 4.** Chemical composition and mechanical properties of weld consumable (ESAB, 2012).

Elementos Químicos	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
%	0,1	0,8	1,9	0,4	2,1	0,6

Características Mecânicas	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de alongamento (%)
OK AristorodTM 79	850	890	18

mecânicas do consumível conforme previsto pelo fabricante.

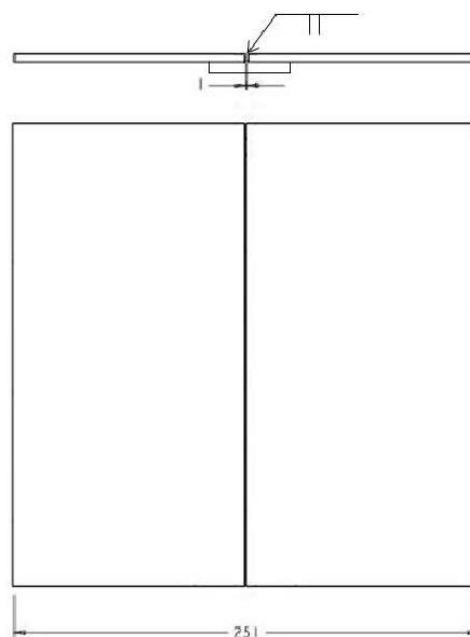
Procedimento de soldagem

As juntas foram preparadas por processo mecânico de guilhotina em placas retangulares de 125 por 250mm. A direção de laminação foi orientada perpendicularmente em relação à maior dimensão do corpo de prova.

Para a soldagem dos corpos de prova, as amostras previamente cortadas foram dispostas face a face, formando uma junta de topo, mantendo uma distância máxima entre elas de um milímetro. Um cobre junta com 30mm de largura e mesmo material e espessura do metal base foi utilizado para a confecção das juntas soldadas dos corpos de prova. A Figura 1 ilustra o exposto.

Todas as soldas dos corpos de prova foram confeccionadas em uma junta na forma de topo, na posição plana horizontal de soldagem, conforme norma DIN EN ISO 6947 (DIN, 2011). A tocha de soldagem da solda MAG ficará perpendicular à junta a ser soldada, e a distância da extensão do arame após o bico de contato será de 20mm, conforme ilustração da Figura 2. As soldas somente foram aplicadas de um lado da junta.

Neste estudo, foram fixados os valores de corrente e tensão, sendo corrente de 160A, tensão de 22V e velocidade de soldagem de 10mm/s. Durante o processo de soldagem, o aporte térmico sofreu variação 0,25 – 0,30KJ/cm.

**Figura 1.** Disposição dos corpos de prova para soldagem.**Figure 1.** Disposition of samples for welding.

Análise química

Análise química foi obtida por espectrometria de emissão ótica, em corpos-de-prova extraídos das juntas soldadas pelo processo GMAW, objetivando determinar os teores dos principais elementos presentes nos metais de solda.

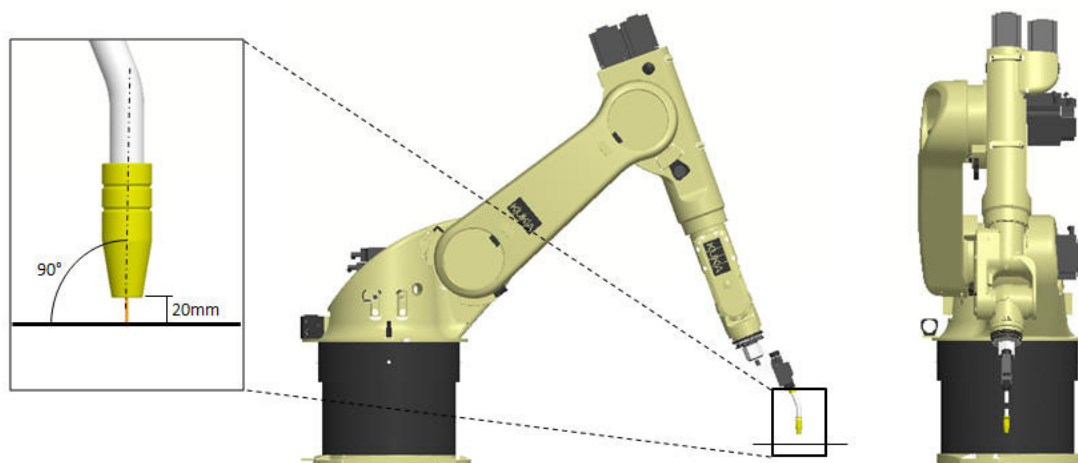


Figura 2. Posicionamento tocha de soldagem em relação ao eixo do cordão de solda.
Figure 2. Positioning of the welding torch in relation to the axis of the fillet weld.

Ensaaios mecânicos

Para cada junta soldada, foram confeccionados corpos de prova para ensaios de tração, microdureza e macrografia. Os ensaios de dureza foram executados em corpos-de-prova retirados transversalmente ao cordão de solda. Realizou-se a análise de macrografia dos metais de solda utilizando-se microscopia ótica. A preparação das amostras consistiu da técnica convencional de lixamento e polimento, seguida de ataque químico com reagente Nital 3,5%. Os corpos de prova para teste de tração para determinação das propriedades mecânicas da junta soldada seguiram as orientações da norma AWS B4.0 (AWS, 2007).

Conforme Schaeffer (2001), existem vários métodos de avaliação de propriedades mecânicas de chapas de aço, sendo que o mais utilizado, pela sua facilidade na obtenção de resposta, é o ensaio de tração.

Resultados e discussões

A análise química dos materiais utilizados resultou em valores similares quando comparados aos valores estabelecidos pelos fornecedores. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 5.

A Figura 3 apresenta as macrografias resultantes do processo de solda das juntas. Pode-se verificar que houve total preenchimento da junta, assim como também a inexistência de marcas de mordedura provenientes do processo de solda.

A Figura 4 apresenta o perfil de microdureza para amostras soldadas. As amostras de 700MPa indicaram maior dureza no centro dos cordões, fator justificado por termos utilizado um metal de solda com maior resistência quando comparado ao metal base. Amostras do material de 1.000MPa apresentou valores elevados de dureza na região próxima ao metal de solda (RCG – região de crescimento do grão). Analisando somente a microdureza, pode-se afirmar que, provavelmente, a presença dos microconstituintes formados justifique a presença de uma fase dura nessa região. Ambas as amostras tiveram um decréscimo de dureza na região de refino de grão (RRG).

Observando os perfis resultantes, todas as peças apresentaram, no metal de solda, um acréscimo de dureza, se comparado ao metal base. Isso ocorre devido ao fato de o arame utilizado no processo de solda possuir propriedades mecânicas superiores às propriedades mecânicas do material de base. Essa relação é conhecida como *overmatching*.

A extensão da ZTA apresentou-se diferente nas amostras analisadas. Conforme Pinto (2006), extensão da ZTA é bastante influenciada pela geometria da junta, pela espessura da chapa, pelas propriedades de condutibilidade térmicas do material, pela temperatura de preaquecimento e, principalmente, pelo aporte térmico e respectivos parâmetros de soldagem.

A Tabela 6 resume as informações relevantes de microdureza das amostras soldadas.

Segundo Modenesi (2012), para aços carbono, aços alta resistência e baixa liga, e aços

Tabela 5. Composição química das amostras analisadas.

Table 5. Chemical composition of the samples analyzed.

Amostra	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Nb %	Ti%
700MPa	0,1215	0,0128	13,944	0,0258	0,0074	0,0399	0,0986
1.000MPa	0,14	0,47	1,38	0,004	0,004	0,016	0,0043

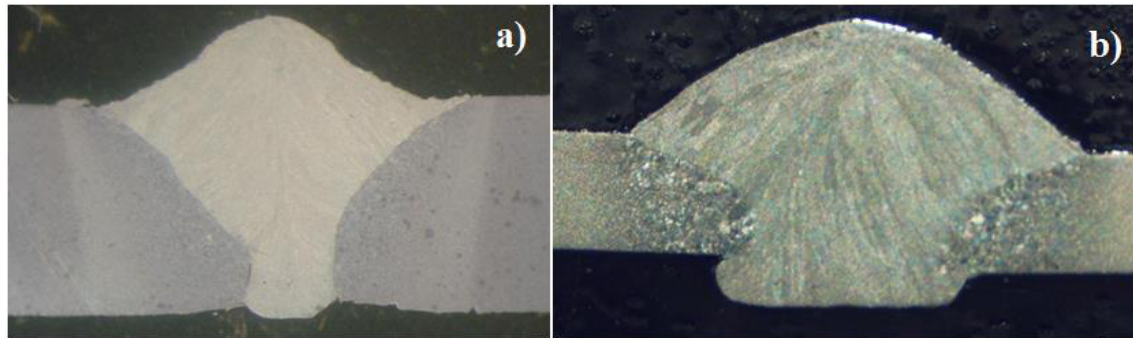


Figura 3. Macrografias referente às amostras – (a) 700Mpa; (b) 1.000Mpa.

Figure 3. Macrographs related the samples – (a) 700MPa; (b) 1,000MPa.

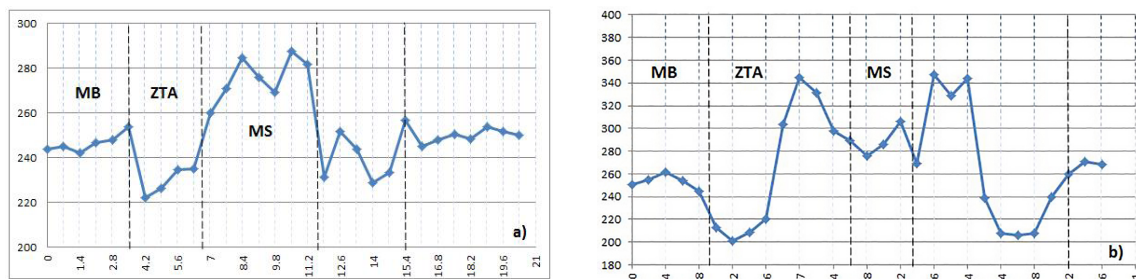


Figura 4. Microdureza referente às amostras – (a) 700MPa, (b) 1.000MPa.

Figure 4. Micro-hardness profiles related to the samples – (a) 700MPa, (b) 1,000MPa.

Tabela 6. Valores de Microdureza na ZF, ZTA e MB das juntas soldadas.

Table 6. Values of Micro-hardness on ZF, ZTA e MB of weld joints.

	ZF			ZTA			Metal Base
	HV Máximo	HV Mínimo	HV Médio	HV Máximo	HV Mínimo	HV Médio	HV Médio
700 MPa	287,6	271,1	275,8	251,9	222	234,2	248,8
1000 MPa	306	269	285,2	347	201	268,6	255

transformáveis tipo carbono-manganês, valores de dureza superiores a 325 ou 350HV na ZTA são considerados excessivos e podem indicar fragilização e sensibilização à trinca. Dessa forma, devido aos parâmetros utilizados neste estudo, o aço de 1.000MPa pode estar sujeito a esse tipo de problema quando submetido a um ensaio dinâmico.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de todas as amostras analisadas. Todos os corpos de prova, indiferentemente do metal base utilizado, romperam na ZTA. As duas amostras mantiveram um comportamento mecânico similar independentemente de estarmos comparando materiais com propriedades mecânicas diferentes antes da soldagem.

Outro fator que pode ter auxiliado na variação das propriedades mecânicas foi a utilização de um arame de solda com propriedades mecânicas superiores ao material base. Koçak (2010) observou que a prática do *overmatching* protege a zona soldada de deformações e, portanto, limita o risco de falhas na junção da solda. Conforme Thaulow e Toyoda (1997), ZTA *overmatched* vai agir como uma barreira contra a deformação plástica do metal base. Em um certo nível de carga, haverá uma ruptura, e redução da seção.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios mecânicos, percebe-se uma probabilidade de ocorrer uma não intencional *undermatching* nas amostras do aço de 1.000MPa. Conforme Dexter (1997), em aços de alta resistência, pode ocorrer *undermatching* não in-

tencional quando o valor real do limite de escoamento do metal de solda e do material base não é sabido. A junta soldada pode ser inadvertidamente *undermatching*, devido ao fato de o limite de escoamento ser maior que o mínimo especificado pelo fabricante. Por exemplo, as especificações para o aço de 1.000MPa requerem que o limite de escoamento permaneça na faixa de 700 – 950MPa. Considerando o mínimo especificado, 700MPa, nominalmente, a junta soldada seria 21% *overmatching*. Analisando o máximo limite de escoamento permitido, 950MPa, a junta passaria a ser 11% *undermatching*. Os dados do ensaio mostram que essa variação pode ter influenciado nos resultados encontrados.

Conclusões

Neste trabalho, foi verificado o comportamento mecânico da junta soldada nos aços 700MPa – 3mm espessura e do aço 1.000MPa – 2mm de espessura durante o processo de soldagem.

O processo GMAW (MAG) e o parâmetro utilizado são viáveis e adequados para a soldagem dos aços estudados, tendo-se em vista a ocorrência de uma boa fusão e o preenchimento da junta, efeito constatado nas macrografias realizadas no presente trabalho.

As amostras apresentaram níveis satisfatórios de microdureza, sendo que ambas tiveram um decréscimo similar de dureza na região de refino de grão (RRG). Valores elevados de dureza na ZTA das amostras do aço de 1.000MPa

Tabela 7. Propriedades mecânicas das amostras submetidas aos ensaios de tração.

Table 7. Mechanical properties of samples subjected to the tensile test.

Aço 700 MPa	Limite de escoamento [MPa]	Resistencia à Tração [MPa]	Alongamento [%]
Amostra 1	599,2	793,3	11%
Amostra 2	576,6	674,8	8%
Amostra 3	615,8	788,5	8%
Média	597,2	752,2	8%
Aço 1000 MPa	Limite de escoamento [MPa]	Resistencia à Tração [MPa]	Alongamento [%]
Amostra 1	615,9	813,4	7,60%
Amostra 2	624,8	819,6	7,90%
Amostra 3	606,9	812,7	9%
Média	615,8	815,2	8%

podem indicar fragilização e sensibilização à trinca quando submetido a um ensaio dinâmico.

Os ensaios de tração indicaram resultados positivos no comportamento mecânico das amostras do material 700MPa quando comparado ao 1.000MPa com a utilização de um metal de solda com melhores propriedades mecânicas - respeitado o valor mínimo especificado para resistência a tração do metal base de 700MPa. Fator não constatado nas amostras do material de 1.000MPa, pois as mesmas tiveram um decréscimo de aproximadamente 20% resistência mecânica. Esta constatação reforça o fato de que ZTA *overmatching* protege a junta soldada contra deformação plásticas durante o ensaio de tração.

Referências

- AWS B4.0. 2007. *Standard Methods for Mechanical Testing of Welds*. 7th ed., Miami, American Welding Society, 154 p.
- AWS A5.28. 2005. *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*. 3rd ed., Miami, American Welding Society, 26 p.
- DIN EN ISO 6947. 2011. *Welding and allied processes – Welding positions*. Berlin, DIN Deutsches Institut für normung, 24 p.
- DEXTER, R.J. 1997. Significance of Strength Undermatching of Welds in Structural Behaviour. In: Mismatching of Interfaces and Welds – Second International Symposium. Lüneburg, Alemanha. *Proceedings...* Lünenberg, p. 55-74.
- ESAB. 2015. Product Data Sheet OK AristoRod 79. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=0031109&tab=2>. Acesso em: 10/05/2015.
- FARABI, N.; CHEN, D.L.; LI, J.; ZHOU, Y.; DONG, S.J. 2010. Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints. *Materials Science and Engineering*, **A527**:1215-1222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.051>
- GRANBOM, Y. 2010. Structure and mechanical properties of dual phase steels – An experimental and theoretical analysis. Estocolmo. Tese de Doutorado. School of Industrial Engineering and Management, 66 p.
- KOÇAK, M. 2010. Structural Integrity of Welded Structures: Process - Property – Performance (3P) Relationship. In: 63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding. Istanbul, Turkey, 2010. *Proceedings...* Istanbul, p. 3-19
- LOUREIRO, A.J.R. 2002. Effect of Heat Input on Plastic Deformation of Undermatched Welds. *Journal of Materials Processing Technology*, **128**(1-3):240-249. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00457-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00457-0)
- MODENESI, P.J. 2012. *Soldabilidade de aços transformáveis*. Belo Horizonte, MG. Universidade Federal de Minas Gerais, 77 p. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>. Acesso em: 08/03/2014.
- MODENESI, P.J. 2011. *Soldabilidade de algumas ligas metálicas*. Belo Horizonte, MG. Universidade Federal de Minas Gerais, 27 p. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>. Acesso em: 08/03/2014.
- PINTO, P.M.A.S. 2006. *Soldagem circunferencial do tubo API 5L X80 empregando processo manual e semi-automático*. Rio de Janeiro, RJ. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 113 p.
- RODRIGUES, S.M. 2012. *Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas de aços bifásicos de alta resistência mecânica*. Porto Alegre, RS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 105 p.
- SCHAEFFER, L. 2001. Novos Desenvolvidos em Conformação Mecânica com Ênfase em Chapas Metálicas na Indústria Automobilística. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ldtm/pesquisa/novosdesenvolvimentos/novosdesenvolvimentos.htm> Acesso em: 04/04/2014.
- SSAB SWEDISH STEEL. 2014. Docol DP/DL Cold reduced dual phase steels. Disponível em: <http://www.ssab.com/en/Brands/Docol1/Products/Docol-1000-DP/> Acesso em: 08/03/2014.
- THAULOW, C.; TOYODA, M. 1997. Strength Mismatching Effect on Fracture Behaviour of HAZ. In: Mismatching of Interfaces and Welds – Second International Symposium. Lüneburg, Alemanha, 1997. *Proceedings...* Lünenberg, p. 75-98.
- USIMINAS. 2012. Aços para longarinas e rodas. Disponível em: LTQ – Tiras a Quente. <http://www.usiminas.com/irj/portal?windowId=WID1398089477930&standAlone=true&NavigationTarget=navurl://b9550c6a5ba15c7c7e5f-f882496a52b2&>. Acesso em: 08/03/2014.

Submetido: 19/10/2014

Aceito: 03/12/2014