

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS EM TUBOS CASING

Raphael José Elinio da Silveira, raphaeljose@id.uff.br¹

Mateus Campos Martins, mateuscampos@id.uff.br¹

Maria Cindra Fonseca, mcindra@vm.uff.br¹

¹UFF – Universidade Federal Fluminense – Departamento de Engenharia Mecânica /PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil.

Resumo: A exploração de petróleo e gás em lugares pouco convencionais e de difícil acesso impulsionou o desenvolvimento de aços especiais e de alta resistência para estas aplicações. Novos processos de soldagem, tais como o processo de soldagem por resistência de alta frequência (ERW - Electric Resistance Welding), foram desenvolvidos para permitir a soldagem de tubulações com mínima distorção e grande produtividade. Assim sendo, o estudo das tensões residuais e das propriedades mecânicas nas tubulações soldadas por novos processos, usadas para revestimento de poços de petróleo se torna necessário, para melhor compreender o comportamento desses aços nas condições de serviço. Neste trabalho, foram analisadas as tensões residuais oriundas da soldagem ERW nos tubos Casing fabricados de aços API 5CT N80Q e API 5CT P110 e caracterizadas as propriedades mecânicas de resistência à tração, dureza e tenacidade. As tensões residuais, analisadas por difração de raios-X, pelo método do $\sin^2\psi$, foram tratativas e de elevadas magnitudes na região da junta soldada do aço N80Q, enquanto que o aço P110 apresentou tensões residuais compressivas.

Palavras-chave: Soldagem ERW, Tubos Casing, Aços API N80Q e P110, Tensão residual, Difração de raios-X.

1. INTRODUÇÃO

A ampliação da exploração de petróleo em áreas mais críticas impacta diretamente no aumento do consumo de produtos com alto aporte tecnológico, como tubulações fabricadas com aços de alta resistência (Sofrygina, 2010). A produção de óleo e gás de reservatórios subterrâneos requer o uso de tubulações de aço chamadas de tubulações de revestimento (*casing*) e tubulações produção (*tubing*) para permitir o fluxo do fluido controlado e prevenir perdas para outros estratos da rocha. Os materiais usados para tal aplicação devem resistir às condições ambientais nos reservatórios e possuir alta resistência (Still *et al* 1989).

A produção de petróleo proveniente de lugares de difícil acesso e menos convencionais demandou o desenvolvimento de aços especiais e de alta resistência. Uma das inovações tecnológicas na exploração do petróleo é a utilização de tubulações *casing* simultânea à perfuração, sendo capaz de reduzir tanto os problemas de estabilidade dos poços quanto os custos de construção. Atividades de perfuração a pressões mais altas nas tubulações e cargas mecânicas atuantes por períodos mais longos fazem com que as tecnologias de revestimento tenham que se desenvolver continuamente (Xu *et al*, 2012). A perfuração de um poço é feita em etapas e cada uma dessas etapas é concluída com a colocação de uma coluna de revestimento e sua cimentação. Para sustentar as paredes de um poço de petróleo é usada uma estrutura formada por tubos de aço conectados entre si. Essas tubulações podem chegar a um custo de até 50% do custo total da perfuração em terra e de 15 a 20% do custo de perfuração offshore (Thomas, 2004).

Com o desenvolvimento dos processos de manufatura dessas tubulações também foram aperfeiçoadas as técnicas de fabricação de tubulações usando o processo de soldagem por resistência elétrica (*Electric Resistance Welding* - ERW) (Still *et al*, 1989).

Considerando que o processo ERW é uma técnica relativamente recente no seu emprego para fabricação de tubulações, o conhecimento dos campos de tensões residuais gerados no processo ainda é pequeno. Tensões residuais são tensões auto-equilibradas existentes nos materiais, em condições de temperatura homogênea e sem carregamento

externo. Tensões residuais trativas são prejudiciais por se somarem às tensões de serviço, diminuindo a vida em fadiga das estruturas ou tubulações. Na soldagem, o surgimento de tensões residuais é intrínseco ao processo, pois estão presentes elevados gradientes de temperatura, distorções e transformação de fases (Cindra Fonseca, 2000).

O presente trabalho tem por objetivo a análise das tensões residuais nas juntas tubulares soldadas de dois aços, API 5CT N80Q e API 5CT P110, pelo processo ERW. A caracterização das propriedades mecânicas e microestruturais do metal de base e das juntas soldadas complementam o estudo, para permitir o melhor entendimento do comportamento mecânico dessas juntas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram estudados dois tubos de aços microligados, usados para revestimento de poços de petróleo (tubos *casing*), conforme especificado pela norma API 5CT, fabricados por laminação e soldados pelo processo ERW (*Electric Resistance Welding*) pela empresa Apolo Tubulars. Um tubo de aço API 5CT N80Q, com 140 mm de diâmetro e 7,7 mm de espessura e um segundo tubo fabricado de aço API 5CT P110 com 141 mm de diâmetro e 8,15 mm de espessura, cujas composições químicas (em % de peso) estão apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Composição química do tubo de aço N80Q.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Co	Ti	Nb	B
N80Q	0,271	0,161	1,29	0,012	0,0046	0,049	0,024	0,023	0,051	0,0048	0,0011	0,012	<0,0005
P110	0,253	0,223	1,39	0,018	0,005	0,02	0,014	0,028	0,01	0,006	0,002	0,01	<0,0005

As propriedades mecânicas em tração, estabelecidas pela Norma API 5CT e os valores informados pelo fabricante dos tubos estudados estão mostradas na Tab. 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos tubos estudados.

	Tensão limite de escoamento σ_{LE} (MPa)		Tensão limite de resistência σ_{LR} (MPa)
	Min	Max	Min
Norma API 5CT N80Q	552	758	689
Tubo N80Q	690		780
Norma API 5CT P110	758	956	862
Tubo P110	809		900

As tensões residuais geradas na soldagem pelo processo ERW nos tubos, foram analisadas no centro dos mesmos, nas direções, transversal (T) e longitudinal (L), nas regiões da zona fundida (ZF), da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de base (MB). As análises foram feitas no Laboratório de Análise de Tensões – LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica, por tensometria de raios-X, pelo método do $\sin^2\psi$, usando radiação $\text{CrK}\alpha$, difratando o plano (211) do material, utilizando o analisador de tensões X-stress3000, fabricado pela *Stresstech*, mostrado na Fig. 1.

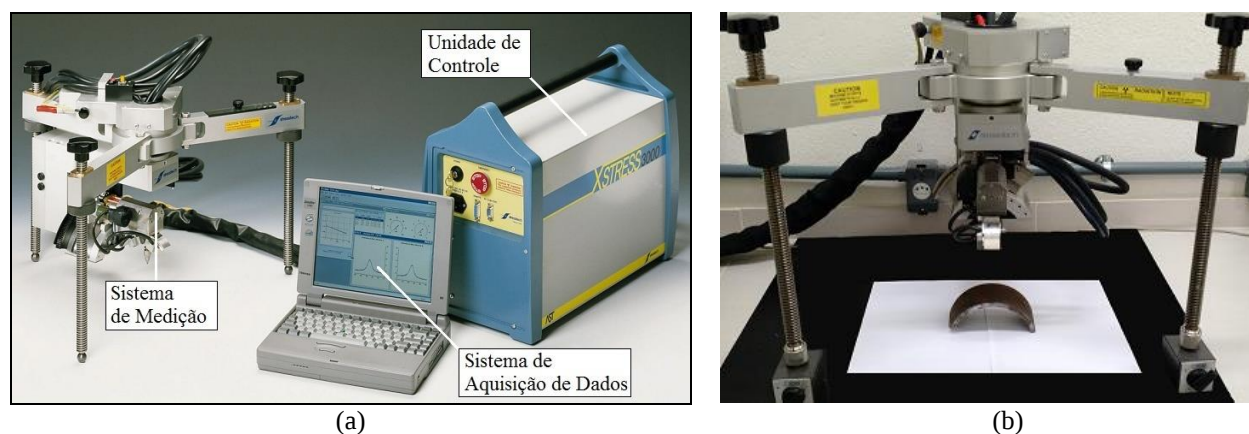


Figura 1. a) Analisador de tensões X-Stress3000; b) Amostra analisada.

Os corpos de prova (cps) para ensaio de tenacidade ao impacto Charpy e as amostras para análises, microestrutural e de microdureza Vickers, foram retirados por corte mecânico a frio dos tubos de aço N80Q e P110. Foram fabricados cps do metal de base (MB) e da zona fundida (ZF), cortados no sentido longitudinal de laminação e no sentido transversal ao cordão de solda, respectivamente, como mostra a Fig. 2. Foram fabricados 3 cps para cada região da junta, por usinagem, conforme a Norma ASTM A370-08. Para os ensaios de tenacidade ao impacto Charpy foi usado um martelo pendular da marca Heckert, com capacidade de 300 J, à temperatura ambiente.

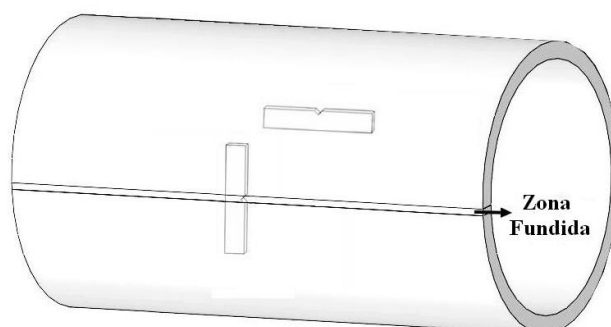


Figura 2. Locais de retirada dos corpos de prova nos tubos.

A análise microestrutural foi realizada por microscopia óptica. O processo de preparação das superfícies foi realizado por um lixamento sequencial, com lixas 100, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200, seguido de limpeza ultrassônica, para retirada de possíveis resíduos gerados durante o lixamento. Após a limpeza, realizou-se o polimento com pasta de alumina, e novamente uma limpeza ultrassônica. Finalmente, a superfície foi atacada pelo reagente Nital 2% e analisada em microscópio óptico para identificação das fases presentes.

As análises de microdureza Vickers foram realizadas com carga de 0,98 N e tempo de aplicação de 15 s. As medidas foram realizadas em 3 pontos de cada região da junta. Os resultados foram analisados utilizando os valores médios de cada região.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tensões residuais analisadas nas amostras tubulares foram trativas e mais elevadas no tubo de aço N80Q e compressivas de menores magnitudes no tubo de aço P110, conforme apresentadas na Tab. 3 e na Fig. 3, onde fica evidente as diferenças dos campos de tensão residual presentes nos dois tubos.

Tabela 3. Tensões residuais no centro das amostras tubulares.

Regiões	Tensões Residuais (MPa)			
	Tubo N80Q		Tubo P110	
	L	T	L	T
ZF	295	240	-149	-119
ZTA	242	250	-93	-154
MB	198	180	-102	-117

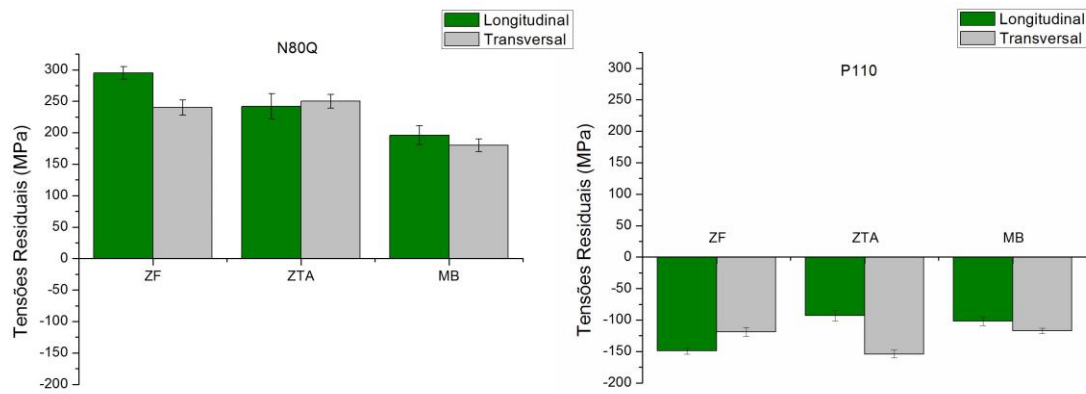


Figura 3. Tensões residuais nas juntas soldadas dos aços N80Q e P110.

As tensões residuais geradas na soldagem do tubo de aço P110 são compressivas em todas as regiões analisadas (MB, ZF e ZTA), ao contrário do tubo de aço N80Q, que apresentou tensões residuais trativas em todas as regiões analisadas. Analisando os do tubo de P110, é possível perceber que a ZTA apresentou um valor de tensão compressiva cerca de 60 % menor do que a zona fundida e, ainda, ligeiramente inferior ao metal de base adjacente. Comparando ambos os aços, P110 e N80Q, com microestruturas martensíticas semelhantes, estes resultados diferentes das tensões residuais podem ser atribuídos aos diferentes regimes de tratamento térmicos de têmpera e revenido aos quais eles foram submetidos, o que resultou em maior microdureza na junta soldada do aço P110 em relação ao tubo N80Q.

As análises de microscopia óptica são apresentadas na Figura 4, que mostra microestruturas semelhantes para ambos os aços. As Figuras 4(a) e (b) mostram a microestrutura do metal de solda e do metal de base do aço N80Q, com martensita revenida predominante ao longo de toda a junta, sendo que a microestrutura do metal de base é mais homogênea e uniforme. As Figuras 4 (c) e (d) apresentam as microestruturas do metal de solda e do metal de base do aço P110, com características similares ao aço N80Q.

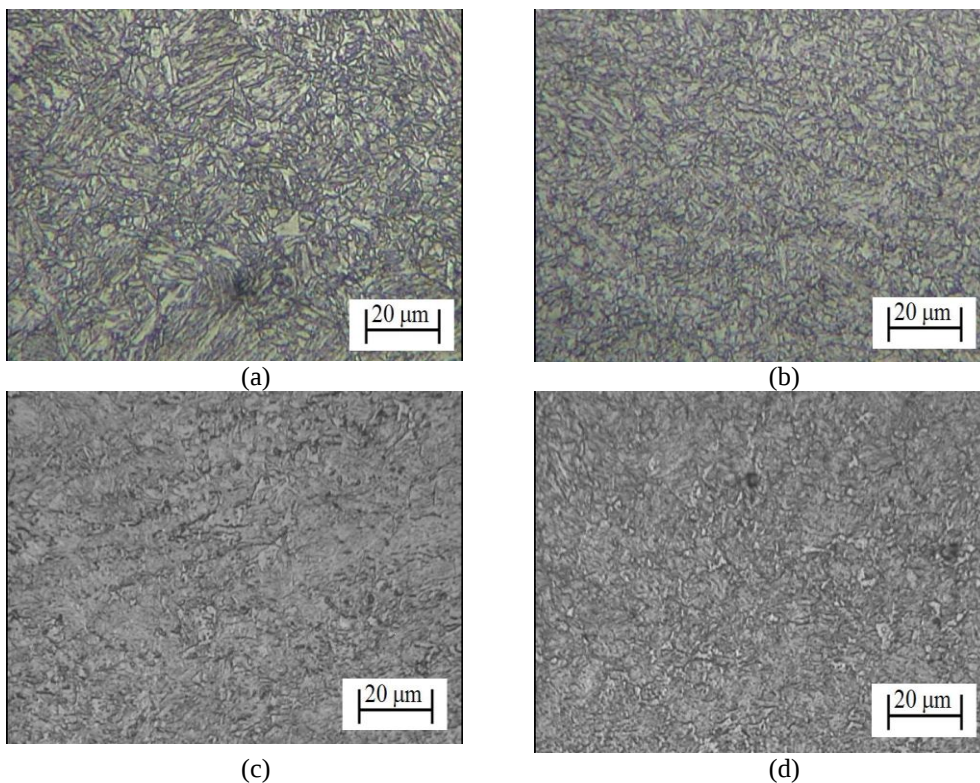


Figura 4. Microestruturas por microscopia óptica: a) Metal de solda N80Q. b) Metal de base N80Q; c) Metal de solda P110 e d) Metal de base P110.

A Figura 5 mostra os resultados das análises de microdureza Vickers. Foram feitas medições nas diferentes regiões da junta, obtendo altos valores de microdureza em ambos os materiais. Entretanto, o aço P110 apresentou microdureza mais elevada em todas as regiões, quando comparada aos resultados observados no aço N80Q.

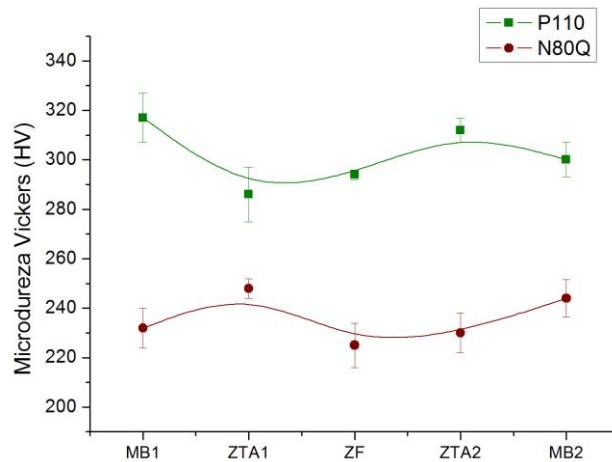


Figura 5. Microdureza Vickers nas diferentes regiões da junta soldada.

Os resultados do ensaio de tenacidade ao impacto Charpy estão apresentados na Tab. 4 e na Fig.6. É possível perceber que os maiores valores de energia absorvida foram encontrados no MB tanto no aço P110 quanto no N80Q. Entretanto, o tubo de aço P110 apresentou valores ligeiramente maiores, tanto no MB, quanto na ZF em relação ao N80Q, o que não está coerente com os resultados de microdureza das juntas. Quando comparado o MB com a ZF, é possível perceber que a soldagem reduziu a tenacidade ao impacto da junta soldada em mais de 50% para ambos os materiais, sem, entretanto, comprometer a integridade da junta conforme os requerimentos da Norma API 5CT (API 5CT-2005) e coerente com os resultados obtidos por Liu et al., 2016.

Tabela 4. Energia absorvida no ensaio de impacto Charpy.

Região	Energia absorvida (J)	
	Tubo N80Q	Tubo P110
ZF	28	37
MB	92	97

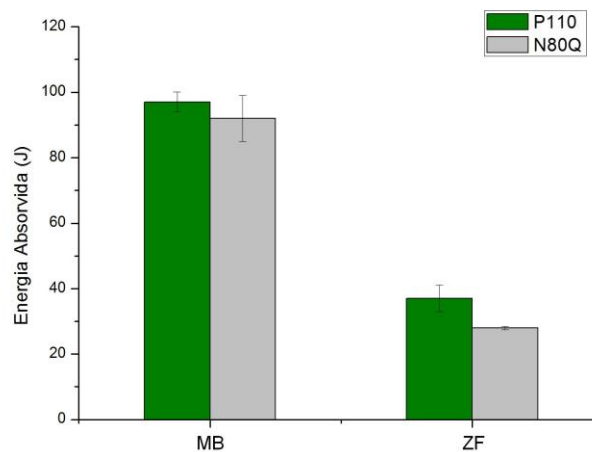


Figura 6. Energia absorvida no ensaio de tenacidade ao impacto Charpy.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo o estudo das tensões residuais em juntas tubulares de tubos *casing* e caracterização mecânica das juntas, permite as seguintes conclusões:

1. O processo de soldagem ERW gerou tensões residuais trativas na junta do aço N80Q enquanto o aço P110 apresentou tensões compressivas. Apesar de os dois materiais apresentarem microestruturas semelhantes, os tratamentos térmicos de cada material devem ser os responsáveis por essa diferença.
2. O aço N80Q apresentou elevados valores de tensão residual trativa, atingido 295 MPa na zona fundida no sentido longitudinal da solda. Esse valor equivale a aproximadamente 42% do limite de escoamento do material, o que pode ser prejudicial à vida em serviço da tubulação, dependendo dos carregamentos em serviço.
3. Os materiais apresentaram microestrutura martensítica revenida semelhante, no entanto, o aço API 5CT P110 apresentou maior microdureza em comparação com o N80Q em todas as regiões analisadas.
4. Os dois materiais estudados tiveram a tenacidade ao impacto severamente reduzida pelo processo de soldagem, sem, entretanto, comprometer a integridade da junta prevista pela norma.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelo suporte financeiro, que permitiu a realização do presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- API 5CT-2005, A.S., Specification for Casing and Tubing, 2005.
- ASTM - American Society for Testing and Materials, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products - ASTM A 370 – 08a", United States, 2008.
- Cindra Fonseca, M. P., 2000, "Evolução do Estado de Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Tubulação Durante Ciclos de Fadiga", Dissertação de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ.
- Liu Z.Y., Li H., Jia Z.J., Du, Li, X.G., 2016, "Failure analysis of P110 steel tubing in low-temperature annular environment of CO₂ flooding wells", Engineering Failure Analysis 60, pp. 296–306.
- Still, J. R., Nelson, P., 1989, "Use, Inspection and Failure of some Oil Production Materials", Materials & Design Vol. 10 no. 6. pp. 307-314.
- Thomas, J. E., "Fundamentos de engenharia de Petróleo". Editora Interciência, 2ª Edição.
- Xu, T., Jin, Z., Feng, Y., Song, S., Wang, D., 2012, "Study on the static and dynamic fracture mechanism of different casing-drilling steel grades", Materials Characterization, Vol. 67, pp. 1–9.
- Zhukova, O.A., Bityukov, S.Y., Pyshmintsev, I.Y., 2010, "Economical Steels for the Manufacture of High-Strength Oil Pipe (According to the API Spec5CT Standard)", Steel in Translation. Vol. 40, no.7, pp. 616–621.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND RESIDUAL STRESS ANALYSIS IN CASING TUBES

Raphael José Elino da Silveira, raphaeljose@id.uff.br¹

Mateus Campos Martins, mateuscamp@id.uff.br¹

Maria Cindra Fonseca, mcindra@vm.uff.br¹

¹UFF – Universidade Federal Fluminense – Departamento de Engenharia Mecânica /PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil.

Abstract. *The oil and gas exploitation in unconventional places and difficult to access spurred the development of special and high strength steels for these applications. New welding processes, such as high-frequency resistance welding (ERW - HF), were developed to allow the welding of pipes with minimal distortion and high productivity. Therefore, the study of residual stresses, and mechanical properties of pipes welded by new processes used for casing of oil wells is necessary to better understand the behavior of these steels in service. In this work, were analyzed the residual stresses arising from ERW in casing pipes made of API 5CT N80Q steels and API 5CT P110 and characterized the mechanical properties of microhardness and toughness. The residual stresses, analyzed by X-rays diffraction technique, by the $\sin^2\psi$ method were tensile and had higher magnitudes in the region of the welded joint of N80Q steel while in the P110 steel residual stresses were compressive with low magnitude.*

Keywords: *ERW welding, Casing tubes, API N80Q and P110 steel, Residual stress, X-ray diffraction.*