

RESISTÊNCIA À FADIGA DE UM AÇO API 5L X80 SOLDADO PELO PROCESSO HF/ERW

M. P. do Nascimento^{1*}, V. M. C. Gomes¹, C. C. Batista²

¹UNESP/FEG-Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Grupo de Fadiga e Materiais Aeronáuticos/Grupo de Pesquisa em Engenharia de Petróleo/Gás Natural, Energia e Meio Ambiente, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, - CEP:12516-410, Guaratinguetá/SP

²UNESP/RC-Campus de Rio Claro, Instituto de Geociências e Ciências Exatas/IGCE, Av. 24-A, 1515, CEP:13506-900, Rio Claro/SP

*Correspondência: pereira@feg.unesp.br

RESUMO

O avanço tecnológico na obtenção de fontes de energia tem sido motivado principalmente pelas recentes descobertas de reservas de petróleo e gás natural. Nas linhas dutoviárias, *onshore* ou *offshore*, instaladas para condução ou prospecção desses insumos, a presença de uma trinca pode ter consequências drásticas, não só econômicas e ambientais, mas à vida de pessoas que trabalham ou moram próximas às instalações. Tais trincas podem originar-se por fadiga, decorrentes do transporte dos tubos ou, nas instalações *offshore* em operação, devido às correntes marítimas potencializadas pelo ambiente corrosivo e pelas altas pressões da coluna de água. Este trabalho tem por objetivo conhecer o comportamento em fadiga de espécimes retirados de um tubo de aço classe API 5L X80 soldado pelo processo HF/ERW, empregado em dutos submarinos para transporte de óleo e gás.

Palavras-chave: Petróleo e Gás, Aço ARBL, Dutos submarinos, Tubo soldado.

INTRODUÇÃO

Um estudo divulgado pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) estima que os países em desenvolvimento devam responder por 68% do aumento na demanda por petróleo até 2020. Neste cenário, as descobertas do Pré-sal podem colocar o Brasil entre os principais produtores mundiais de petróleo e gás natural⁽¹⁾. Conforme a Agência Nacional do Petróleo, Gás e

Biocombustíveis (ANP) sobre o Pré-sal, o volume total estimado só dos campos de Libra e Franco pode chegar a 13 bilhões de barris⁽¹⁾. As avaliações preliminares do governo para o Pré-sal brasileiro indicam de 50 a 70 bilhões de barris de óleo em camadas situadas entre cinco mil e sete mil metros abaixo do nível do mar⁽¹⁾. Em razão desta significativa expansão do setor, observa-se um crescimento de novas instalações de linhas dutoviárias de gás e petróleo no País. As grandes companhias exploradoras, assim como os fabricantes de tubos para linhas dutoviárias, têm como desafio a busca incessante pelo aumento dos níveis de segurança e confiabilidade operacional no transporte dos produtos de fontes cada vez mais remotas (*onshore* e *offshore*) para os grandes centros urbanos⁽²⁾. Em adição, de acordo com Hippert Júnior⁽³⁾, o crescimento da malha dutoviária no País também é estimulado pelo envelhecimento e pela necessidade de renovação das atuais linhas instaladas. Atualmente, aproximadamente 90% do petróleo produzido no Brasil são oriundos de campos *offshore*, ou seja, plataformas exploratórias no litoral brasileiro situadas na camada Pré-sal. As reservas de petróleo que se encontram nessa região são definidas como sendo de média e alta qualidade de acordo com seu grau API (*American Petroleum Institute*)⁽⁴⁾. Tudo isso acarreta um maior desafio tecnológico para obtenção de equipamentos submarinos que possibilitem a extração de petróleo e gás em grandes profundidades e o transporte desses produtos para tratamento em terra. Tal transporte implica o assentamento de dutos submarinos em leitos acidentados, gerando o aparecimento de vãos livres e conseqüente perda de contato do duto com o solo, situação propícia para o surgimento das vibrações induzidas por vórtices (VIV)⁽⁵⁾. A grande maioria dos problemas de vibrações induzidas por desprendimento de vórtices observados em ambiente marinho ocorre em *risers* e em dutos submarinos em vãos livres, devido a depressões ou elevações do solo, região onde a corrente marítima é considerável. O desprendimento de vórtices resulta no surgimento de uma força oscilatória que age no anteparo (cilindro) transversalmente ao fluxo. Tais dutos submarinos devem ser bem projetados para que as vibrações induzidas por vórtices não se aproximem das vibrações naturais da tubulação evitando assim entrar em ressonância, ocasionando eventuais falhas por fadiga. De acordo com a norma DNV OS F101⁽⁶⁾, os limites necessários para manter a integridade do duto são estabelecidos por dois critérios, o critério *screening* (triagem) e o critério de fadiga. O primeiro é utilizado na determinação do vão máximo admissível, ou vão livre admissível, que um duto pode

ter para que não comprometa sua estrutura com o surgimento das VIV's. Caso o vão máximo admissível seja superior ao recomendado, deve-se realizar a análise de fadiga. Sendo este não atendido, devem-se realizar intervenções a fim de se alterar a configuração inicial do projeto. Para Balena⁽⁷⁾, o colapso da estrutura do riser resulta em consequências desastrosas, tanto sob o ponto de vista econômico, devido à paralisação e reparo das operações de produção, quanto sob o ponto de vista ambiental, pois o vazamento de óleo pode causar um desastre ecológico de grandes proporções, caso atinja regiões com grande atividade biológica.

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) empregados em sistemas dutoviários possuem alta resistência mecânica, boa tenacidade e boa soldabilidade, características obtidas devido ao baixo teor de carbono e aos processos termodinâmicos de fabricação. Porém, não basta que os dutos de gás e petróleo suportem grandes pressões, eles devem também ser resistentes à corrosão externa e (ambiente marítimo) e interna (provenientes das altas concentrações de impurezas como o CO₂ e H₂S), bem como à corrosão sob tensão⁽⁸⁾. A corrosão, a fragilização por hidrogênio e as tensões residuais oriundas do processo de fabricação dos tubos são apontadas como os principais fatores causadores de falhas nas tubulações⁽⁹⁾. As altas pressões da coluna de água podem gerar um estado de tensões bastante severo sobre um defeito como trinca potencialmente presente no material do tubo. A extensão deste defeito em paredes de espessura mais reduzida pode levar à falha da estrutura. Segundo Godoy⁽¹⁰⁾, trincas de fadiga em tubos também são geradas durante o seu transporte, do local de fabricação até o local de instalação. De acordo com Bruno⁽¹¹⁾, a fadiga devido ao trânsito ocorre através de tensões cíclicas induzidas por forças gravitacionais e inerciais. A força peso de um tubo impõe uma tensão regular de uma dada magnitude. Com a força agindo com amplitude vertical, o tubo é flexionado de maneira a ser solicitado alternadamente por tração e compressão, nas superfícies interna e externa⁽¹¹⁾. Neste cenário, tubos soldados pelo processo com resistência elétrica de alta frequência (*High-Frequency/Electric Resistance Welding-HF/ERW*) - têm desempenhado um papel mais ativo no setor de petróleo e gás para aplicações em águas profundas, em altas e extremamente baixas temperaturas, em condições de alta pressão e em ambientes altamente corrosivos, substituindo gradualmente tubos fabricados por outros processos e com menor custo operacional e de produção⁽¹²⁾. Os tubos HF/ERW apresentam excelente circularidade, espessura de parede uniforme (excentricidade), tolerâncias

dimensionais controladas e nenhuma ovalização, características particularmente importantes à resistência ao colapso plástico e à garantia da integridade estrutural da instalação para aplicações no Pré-sal. Na soldagem a resistência elétrica de alta frequência, uma corrente de alta frequência na ordem de 300 a 1000 kHz é aplicada na área de soldagem, e uma força de compressão é adicionada à região aquecida pela resistência. O processo HF/ERW é classificado como soldagem a indução elétrica de alta frequência ou resistência elétrica de alta frequência, dependendo do método empregado na aplicação da corrente de alta frequência ao elemento de trabalho ⁽¹²⁾.

A partir da breve justificativa apresentada, este trabalho visa realizar um estudo sobre o comportamento em fadiga de um tubo de aço API 5L X80 soldado pelo processo HF/ERW, empregado em sistemas dutoviários de condução e transporte de óleo e gás.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesse estudo é um tubo de aço API 5L X80 com Ø 68,8mm (2.71 in) x 7,14mm (9/32 in) de espessura de parede, cuja composição química especificada pela norma API está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química especificada do aço API-5L-X80 (% em massa).

%	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Si	Al
API	0,04	1,86	0,018	0,006	0,02	0,02	0,33	0,03	0,006	0,017	0,075	0,19	0,032

Análise microestrutural e fractográfica

As amostras do aço API 5L X80 foram extraídas do tubo e preparadas para análise microestrutural. As amostras foram embutidas a quente, lixadas com papéis de granulometria #220, 320, 400, 600, 1000, 1200 e 1500. Em seguida elas foram polidas com alumina 2 µm e atacadas com reagente Nital 2% por 30 segundos. As imagens foram capturadas por meio de um microscópio óptico de marca NIKON, modelo EPIHOT 200 e uma câmera do tipo SPOT Insight QE, utilizando os programas AXION VISION. A análise fractográfica da amostra fraturada foi feita em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca ZEISS, modelo EVO/LS15.

Medição de rugosidade

Todos os corpos de prova de fadiga foram submetidos a medições de rugosidade por meio de um rugosímetro MITUTOYO-SURFTEST 301, com *cut-off* de 0,8mm e percurso de amostragem de 4,0 mm. As medições foram realizadas no sentido longitudinal e transversal, obtendo-se os valores de Ra, Rt e Ry.

Microdureza Vickers (HV)

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados em um microdurômetro MICROMET 2004 da BÜEHLER, com carga de 300g.

Ensaio de tração

Do tubo de aço API X80 foram usinados corpos-de-prova de tração, extraídos somente na direção paralela à direção de laminação (longitudinal) em razão de seu diâmetro. Os ensaios foram realizados em conformidade com a norma ASTM E 8M, na temperatura ambiente e por meio de uma máquina eletromecânica INSTRON modelo 8801, com capacidade de 100 kN. A velocidade de avanço utilizada foi de 1,0 mm/min e utilizou-se um extensômetro axial com comprimento de referência de 25 mm para medir a deformação.

Ensaio de fadiga axial

Os corpos de prova para o ensaio de fadiga axial foram confeccionados conforme a norma ASTM E466. Os ensaios foram realizados com razão de carga $R=0,1$ até a fratura ou 10^6 ciclos, frequência de 20 Hz, amplitude constante e na temperatura ambiente. Os ensaios de fadiga axial foram realizados em uma unidade servo-hidráulica de ensaios mecânicos modelo INSTRON 8800 de 100 kN de capacidade. As dimensões do corpo de prova de fadiga estão apresentadas na Figura 1.

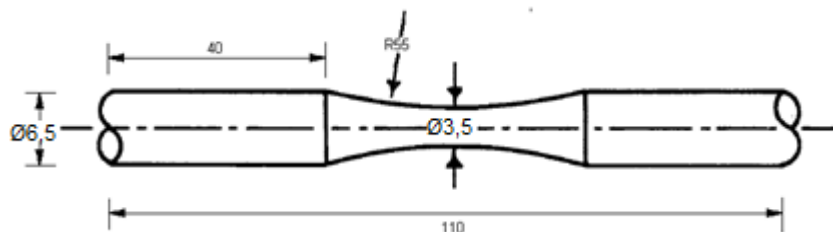


Figura 1 - Dimensões dos corpos de prova cilíndricos de fadiga [mm].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise da composição química do tubo de aço API 5L X80, realizada conforme a norma ASTM E1806.

Tabela 2: Composição química do tubo de aço API 5L X80 (% em massa).

%	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Si	Al
API	0,04	1,86	0,018	0,006	0,02	0,02	0,33	0,03	0,006	0,017	0,075	0,19	0,032
OBTIDO	0,04	1,37	0,013	0,004	0,05	0,04	0,05	0,10	0,061	0,008	-----	0,31	0,028

Constata-se que alguns elementos químicos ficaram acima da composição requerida pela norma API 5L (destaques em vermelho), bem como não se constatou a presença de Nb no material do estudo.

Microscopia Óptica (MO)

A Figura 2 apresenta a microestrutura obtida na direção de laminação do tubo de aço API 5L X80, tipicamente constituída de ferrita poligonal (PF), ferrita acicular (AF) e perlita (P). A Figura 2a refere-se a uma região do material-base afastada da região da solda, enquanto a Figura 2b refere-se à região próxima à junta soldada. Nitidamente se observa a diferença no tamanho dos grãos de ambas as microestruturas. Certamente o processo HF/ERW de união em estado sólido elevou a temperatura do material-base à região de refinamento de grão, correspondente à linha A3 do diagrama de equilíbrio Fe-C.

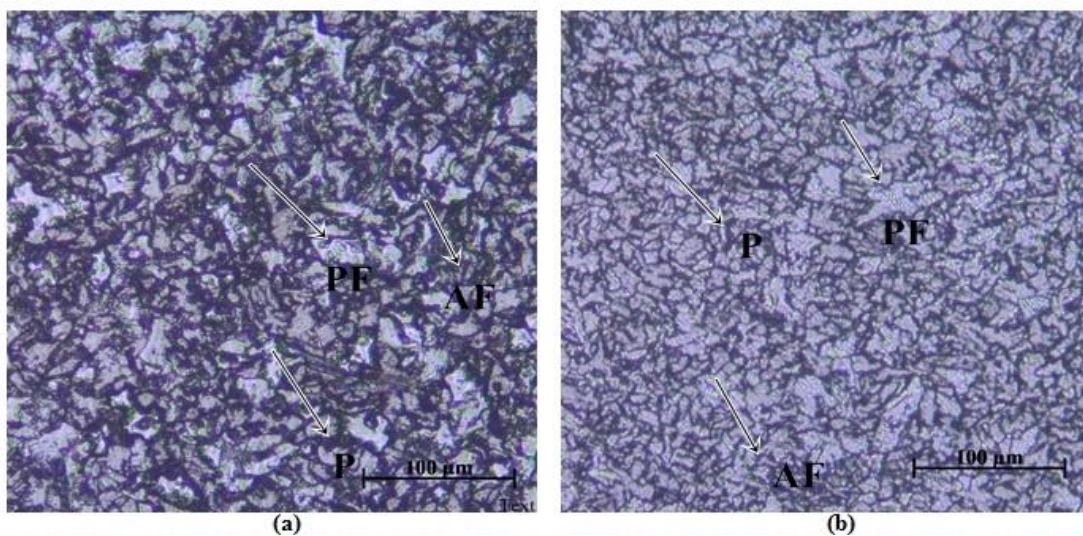


Figura 2 - Micrografia do aço API 5L X80 a) CDP 1 aumentado em 100x; b) CDP 2 aumentado em 100x. Ataque: Nital 2%.

Medições de microdureza (HV)

As medições foram realizadas em três regiões da junta soldada do tubo de aço API 5L X80: material-base (MB), zona afetada pelo calor (ZAC) e linha da solda (LS). Os resultados foram como segue: MB=354 ± 29 HV; ZAC=364 ± 20HV; LS=379 ± 21HV. Consta-se que a dureza aumenta com a proximidade da linha de solda. Os valores das incertezas de medição (desvios-padrão) permaneceram próximas e inferiores a 10%. Tais resultados caracterizam a homogeneidade microestrutural da junta soldada pelo processo de resistência elétrica de alta frequência (HF/ERW).

Ensaio de tração

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados em corpos de prova retirados do tubo de aço API 5L X80.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de tração.

	L.E. (0,2) (MPa)	L.R. (MPa)	Along. (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Razão (LE/LR)
Média	494,5	585	19,7	179,3	0,84
Desvio-Padrão	±3,5	±12	±1,1	7,7	

Constata-se na Tabela 3 que os valores médios de resistência mecânica para o aço API X80 estão abaixo do valor mínimo estabelecido pela norma API 5L (2008), $555 \leq \sigma_e \leq 705 \text{ MPa}$ e $625 \leq \sigma_t \leq 825 \text{ MPa}$. Segundo McClintock⁽¹³⁾ o processo de conformação do tubo pode propiciar efeitos que geram escoamento descontínuo e perda no limite de escoamento do aço por efeito Bauschinger. Logo, o tubo tende a ter um limite de escoamento inferior ao da chapa original.

Ensaio de fadiga

A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga, representados pela curva de Wöhler, dos corpos de prova retirados do tubo de aços API X80.

A Figura 3 apresenta claramente a tendência da resistência à fadiga do material em questão, cujo patamar estimar-se ocorrer em torno de 325-350 MPa. Por outro lado, na região correspondente à fadiga de baixo ciclo/alta tensão, observa-se que o aço API X80 resistiu cerca de 50 mil ciclos na tensão de 550 MPa, próximo ao limite de resistência à tração. Se naquele ensaio, de tração, que

marcas de usinagem agem como concentradores de tensão indesejáveis. Com isso rugosidades consideradas grosseiras atuam como concentradores de tensões na superfície do material facilitando movimentação dos planos de escorregamento dos retículos cristalinos e a formação de intrusões e extrusões, que são os micromecanismos responsáveis pela fase inicial da nucleação da trinca de fadiga. As amostras que apresentam Ra, Ry e Rt alto possuem microscopicamente muitas saliências e reentrâncias, gerando microdeformações, que facilitam a formação de bandas de deslizamento. De fato, a diferença entre os valores obtidos em número de ciclos até a ruptura para um mesmo nível de tensão está relacionada com a qualidade do acabamento superficial dos corpos de prova pós usinagem. O corpo de prova 8, devidamente polido, superou a marca de um milhão de ciclos sem sofrer ruptura; já o corpo de prova 9, sem nenhum tipo de acabamento superficial, sofreu ruptura após a marca de quarenta e sete mil ciclos, conforme destacado anteriormente. Portanto, o cdp 9 apresentou uma vida em fadiga vinte vezes menor na comparação com os cdp 8, no mesmo nível de tensão, o que se deveu ao aumento da rugosidade superficial daquele, conforme Tabela 4. No ítem “Valores gerais de rugosidade”, da Tabela 4, também está inserida a rugosidade do cdp 9, o que colaborou com o aumento do desvio-padrão.

Tabela 4- Valores de rugosidade

Valores gerais de rugosidade. <i>CUT-OFF</i> : 0.8mm x 5			
Rugosidade	Ra (μm)	Rt (μm)	Ry (μm)
Média	3,9	24,3	20,4
Desvio-padrão	$\pm 1,1$	$\pm 7,1$	$\pm 7,8$
CDP-9, <i>CUT-OFF</i> : 0.8mm x 5			
Rugosidade	Ra (μm)	Rt (μm)	Ry (μm)
Média	5,49	32,6	28,5
Desvio-padrão	$\pm 0,99$	$\pm 6,6$	$\pm 3,4$

Análise fractográfica (MEV)

A Figura 4 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova 9, escolhido em razão do baixo número de ciclos apresentado no ensaio de fadiga. Em linhas gerais, pode-se observar as regiões de nucleação e de propagação estável das trincas, a região de fratura rápida e as marcas de usinagem na superfície da amostra. As marcas de usinagem, responsáveis pelo aumento dos valores de rugosidade, agiram como sítios de nucleação de trincas em duas frentes, diminuindo a vida em fadiga do

corpo de prova. Schijve⁽¹⁴⁾ destaca que as várias frentes de nucleação de trincas ocorrem comumente na região de baixos ciclos de fadiga, a qual é governada pela deformação, como resultado dos altos níveis de tensões geradas. Nesta região, todos os defeitos superficiais apresentados pelo material atuam como potenciais sítios de nucleação de trincas. No corpo de prova em questão, as irregularidades superficiais do cdp 9 fez que surgisse mais de uma frente de nucleação e propagação de trincas, que rapidamente se propagaram, provocando a fratura em reduzido número de ciclos.

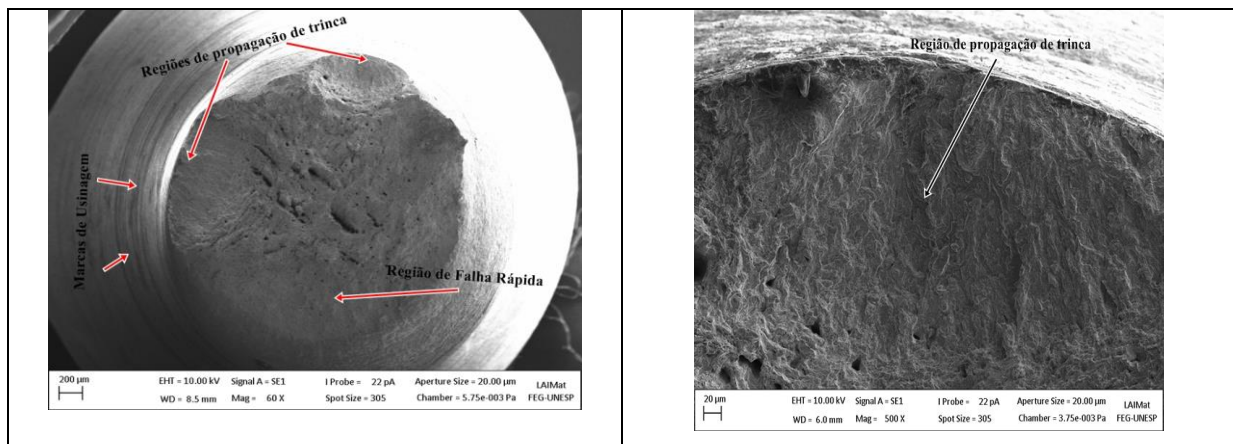


Figura 4: Superfície de fratura do corpo de prova 9 submetido à fadiga axial.

Constata-se ainda, na Figura 4, a presença de uma grande quantidade de poros, resultantes do desprendimento de inclusões.

CONCLUSÕES

O presente estudo vem apresentar informações preliminares sobre o comportamento em fadiga do aço em questão, propriedade que não é requerida pela norma API 5L, mas que tem ganhado grande importância no setor de petróleo e gás em razão dos esforços cíclicos provenientes das vibrações induzidas por vórtices que podem levar à falha e/ou fratura da instalação. Do que fora apresentado, algumas conclusões podem ser destacadas:

As informações colhidas da curva S-N obtidas através de ensaio de fadiga axial, revelam que os parâmetros de usinagem e a qualidade do acabamento superficial nos corpos de prova influenciam diretamente na vida em fadiga do tubo. As imagens da micrografia do aço API 5L X80 mostram microestrutura composta por ferrita acicular, ferrita poligonal e perlita, característicos do processo de laminação

controlada termicamente. A análise fractográfica exhibe a região de iniciação de trinca e as regiões de fratura frágil e dúctil e revelam que a trinca propagou-se de maneira rápida. As medições de rugosidade dos corpos de prova antes e após ensaio e as análises macrográficas comprovam que os riscos superficiais são os principais sítios de nucleação de trincas. Os ensaios de microdureza mostram a homogeneidade do material, comparando os valores obtidos nas regiões metal base, zona termicamente afetada e linha de solda, pois apresentam uma faixa de microdureza média com variação aceitável. A caracterização mecânica por ensaio de tração indica uma desconformidade com a norma API. O efeito Bauschinger, consequência do processo de conformação, pode ter ocasionado a diminuição do limite de escoamento do material.

AGRADECIMENTOS

Carolina C. Batista agradece à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado; Vinícius M. C. Gomes agradece à ANP/PRH48 pela concessão da bolsa de iniciação científica; Marcelino P. Nascimento agradece à FAPESP, processo 2008/56424-5, e ao CNPq pela concessão da bolsa de produtividade em pesquisa (310044/2014-6).

REFERÊNCIAS.

1. A PETROBRAS AUMENTA O FOLEGO DO SETOR: a capacidade de utilização do gás brasileiro deve superar o volume importado da Bolívia em 2013. Exame, São Paulo: Abril, 2011. 119 p.
2. SILVA, M. C. Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80. 2009. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica – Mecânica da Fratura) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
3. HIPPERT JR, E. Investigação Experimental do Comportamento Dúctil de Aços API-X70 e Aplicação de Curvas de Resistência $J-\Delta a$ para Previsão de Colapso em Dutos. 2004. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
4. AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Disponível em <www.anp.gov.br> Acesso em : 12 de out. 2013.
5. TSUKADA, R. I. Comportamento Dinâmico de *Riser* Rígido em Catenária Devido à Vibração Induzida por Vórtices em Águas Profundas. 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) - Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
6. DET NORSKE VERITAS, Submarine Pipelines Systems, Offshore Standard OS-F101, 2015.

7. BALENA, R. Estudo analítico-numérico das vibrações induzidas por vórtices em trecho vertical de riser rígido, sujeito à variação de tração, e sua influência na fadiga. 2010. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
8. NAZIR, M; KHAN, F; AMYOTTE, P. Fatigue reliability analysis of deep water rigid marine risers associated with Morison-type wave loading. Stochastic environmental research and risk assessment, St. John's, v. 22, p. 379-390, 2008.
9. SHIGA, C. et al. Development of large diameter high strength line pipes for low temperature service.
10. GODOY J, M; CAVALHEIRO, B, C; PEREIRA, M, S. Avaliação da Fissuração por Fadiga em Tubos durante Transporte Marítimo. Revista Soldagem & Inspeção, v. 10, p. 2-10, 2010.
11. BRUNO, T. V. How to prevent transit fatigue to tubular goods. The Oil and Gas Journal. 1998.
12. BARALLA, E.; TOMMASI, C. Integrated System for Process Control of High Frequency Electric Resistance Welded Steel Pipe. In: Rio Pipeline' 2003, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.
13. MCCLINTOCK, F. A.; ARGON, A. S. Mechanical behavior of materials. Ed. Addison-Wesley, 1966.
14. SCHIJVE, J. Fatigue of structures and materials. 2nd ed. New York: Springer Science, 2009. 621p.

FATIGUE STRENGTH OF AN API 5L X80 STEEL HF/ERW TUBE

ABSTRACT

The technological advancement in order to improve the methods of obtaining energy sources such as oil and natural gas is mainly motivated by the recent discovery of oil reserves. onshore or offshore installations, the presence of a crack can have drastic consequences, not only economic and environmental, but the lives of people working or living near the facilities. Such cracks may arise due to fatigue resulting from the transport of the pipes or in offshore installations in operation due to sea waves potentiated by the corrosive environment and the high pressure in deep-water. This study aims to understand the fatigue behavior of specimens taken from a steel pipe grade API 5L X80 welded by HF/ERW process, and used in subsea pipelines to transport oil and gas.

Key-words: Oil and Gas, HSLA steel, Pipelines, Linepipes, Welded tubes.