

ESTUDO COMPARATIVO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM AÇO API X65 PELAS TÉCNICAS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E ULTRASSOM

Bruna Machado, bruna.smachadoc@gmail.com¹

Ramon Fonseca Ferreira, ramonffrj@gmail.com³

João Marcos Alcoforado Rebello, jmarcos@metalmat.ufrj.br²

Maurício Saldanha Motta, mauricio.motta@cefet-rj.br³

Maria Cindra Fonseca, mcindra@vm.uff.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC/ UFF - Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, S/302, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói -RJ

² Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - PEMM/COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ

³ Departamento de Engenharia Mecânica - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ

Resumo: O aço API 5L X65 é utilizado na construção de dutos para transporte de petróleo e gás. O surgimento de tensões residuais é intrínseco a todos os processos de fabricação e sob ação externa, as tensões residuais e aplicadas podem somar-se linearmente mesmo no regime elástico, e causar a ruptura inesperada e prematura do componente. Assim sendo, o conhecimento da natureza, magnitude e direções de atuação dessas tensões é de grande importância para garantir a segurança de estruturas e componentes, principalmente daqueles que trabalham em condições extremas. Assim sendo, oferecer alternativas de técnicas que facilitem a qualificação e a quantificação destas tensões é tarefa de grande importância. O presente trabalho tem como objetivo um estudo comparativo das tensões residuais por duas técnicas: difração de raios-X pelo método do $\sin^2\psi$, e ultrassônica TOFD, a fim de contribuir para o estabelecimento da técnica ultrassônica. Foram estudadas amostras de aço API X65, com condições de acabamento superficial semelhantes e com diferentes campos de tensões residuais superficiais induzidos por usinagem e com tratamento mecânico de shot peening em duas delas. Os resultados mostraram que o TOFD produziu tempos de voo de onda coerentes com a natureza das tensões residuais que foram medidas por difração de raios-X. O espectro de frequência conferiu melhor visualização do sinal ultrassônico produzido.

Palavras-chave: tensões residuais, difração de raios-X, ultrassom, TOFD, aço API 5L X65

1. INTRODUÇÃO

Os aços ARBL (*Alta Resistência e Baixa Liga*) fabricados conforme a norma API 5L são aços microligados, que possuem pequenas quantidades de elementos de liga em sua composição. São empregados na fabricação de tubos de grandes diâmetros, para transporte de petróleo, gás e derivados.

As tensões residuais são tensões autoequilibradas em condições de temperatura uniforme e na ausência de carregamentos externos. Elas estão presentes em praticamente todas as peças rígidas, metálicas ou não e são o produto da história metalúrgica e mecânica de cada ponto da peça ou da peça como um todo, durante o processo de fabricação (CINDRA FONSECA, 2007).

Quando qualquer material sofre deformação plástica ou elástica heterogênea de um modo permanente, tensões residuais surgem. Assim sendo, a análise das tensões residuais presentes nos componentes mecânicos bem como a compreensão do comportamento das propriedades mecânicas dos materiais quando sujeitos aos campos de tensões residuais originados nos processos de manufatura, aos quais estruturas e componentes estiveram sujeitos, é de grande importância para diversas áreas e aplicações industriais (PEDROSA *et al.*, 2011).

Através do conhecimento da natureza, trativa ou compressiva, e da magnitude das tensões residuais presentes em um componente ou estrutura, é possível prever as prováveis consequências destes campos de tensão, pois em alguns casos, falhas prematuras podem resultar da combinação de tensões residuais tratativas com tensões de serviço, mesmo no regime elástico. Dessa forma, tensões residuais tratativas são conhecidas como deletérias, pois podem resultar na diminuição da vida em fadiga e aumentar a propensão à corrosão sob tensão de componentes, estruturas e tubulações. Por outro lado, tensões compressivas têm efeitos benéficos, inibindo a nucleação e a propagação de trincas (KNOTT *et al.*, 2018; FUHR *et al.*, 2018).

Existem várias técnicas disponíveis para medição das tensões residuais, dentre elas destacam-se a difração de raios-X, o método do furo cego, ultrassom, difração de nêutrons, entre outras. Entretanto, com relação ao método por ultrassom, apesar de existirem muitos estudos que abordam a aplicação da técnica, ela ainda não está bem estabelecida devido ao grande número de fatores que influenciam no tempo de percurso das ondas ultrassônicas (QIMENG ZHU *et al*, 2017).

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo das tensões residuais em amostras de aço API 5L-X65, por difração de raios-X e usando a técnica ultrassônica TOFD (*Time of Flight Diffraction*). O primeiro método usado - a tensometria por difração de raios-X, é uma técnica bem estabelecida e eficaz na determinação das tensões, residuais e aplicadas, em materiais cristalinos. Ela permite qualificar e quantificar em magnitude e direção as tensões superficiais existentes em dado ponto do material. Os seus princípios básicos foram desenvolvidos há mais de cinquenta anos e são baseados em duas teorias: a teoria da difração de raios-X em materiais cristalinos e a teoria da elasticidade do material sólido, oriunda da mecânica dos sólidos (ROSSINI *et al*, 2012; CINDRA FONSECA *et al*, 2017). O segundo método é baseado no cálculo do tempo de percurso das ondas ultrassônicas e no efeito acusto-elástico, segundo o qual a velocidade de propagação da onda elástica nos sólidos é dependente das tensões mecânicas presentes no material. (ROSSINI *et al*, 2012; MAYWORM *et al*, 2016).

Um transdutor-receptor detecta quando há descontinuidades no material, os seguintes sinais: onda lateral, ondas difratadas e eco de fundo (Fig. 1). A onda lateral é o primeiro sinal a chegar ao receptor depois da emissão do impulso acústico, propagando-se abaixo da superfície da peça em ensaio. Por apresentar a vantagem de ser gerada e detectada na mesma superfície e possuir baixa atenuação (GANG *et al*, 2017), o presente estudo avalia o seu comportamento no domínio do tempo e no domínio da frequência.

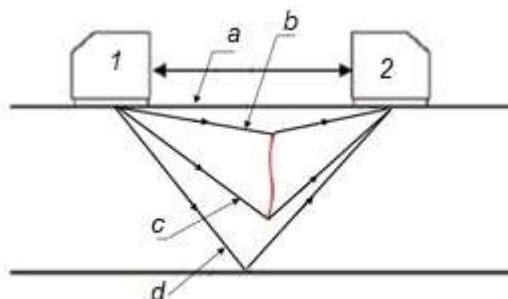


Figura 1: Desenho esquemático do ensaio TOFD: (a) Onda lateral; (b) Difração superior; (c) Difração inferior e (d) Eco de fundo (MOURA *et al*, 2005).

As variações no conteúdo em frequência de um pulso ultrassônico podem ser avaliadas pela análise espectral dos ecos. A análise espectral ultrassônica oferece um método rápido e eficiente de coletar os dados de atenuação provenientes de um material, em uma ampla faixa de frequências. Tendo em vista as dificuldades de visualização dos sinais ultrassônicos utilizando a medida do tempo de percurso da onda, por causa dos ruídos e sobreposição dos sinais, para tratamento do sinal é necessário que o sistema de detecção possa separar partes específicas do ecograma para serem analisadas. Este processo é conhecido como janelamento ou *gating*, permitindo delimitar a porção do sinal ultrassônico considerada importante para a avaliação e, por meio de um processo de amostragem, os dados relativos ao tempo e à amplitude daquele sinal são coletados para processamento matemático (MENEZES, 2006; ANTON, 2014). A transformação dos sinais ultrassônicos do domínio do tempo para o domínio da frequência é feito empregando-se a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT).

A técnica TOFD é utilizada para dimensionar descontinuidades com precisão, entretanto sua utilização no monitoramento de tensões residuais ainda é pouco estudada. Este estudo comparativo pretende contribuir para a melhor compreensão da técnica para quantificar e qualificar o estado de tensões residuais em aços usados em tubulações de grandes diâmetros, possibilitando o emprego desta técnica para a avaliação destas tubulações em campo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram estudadas quatro amostras (A, B, C e D) retiradas de um tubo de aço da classe API 5L X65, fabricado por laminação a quente, conforme a Norma API 5L (2000). A composição química e as propriedades mecânicas do aço são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Composição química do aço API X65 (% em peso).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al
0,128	0,247	1,35	0,011	0,0035	0,022	0,016	0,0024	0,003	0,0029	0,033

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço API X65.

Tensão limite de escoamento (MPa)	Tensão limite de resistência (MPa)	Alongamento mínimo (%)
476	575	18

Todas as amostras foram preparadas por usinagem, usando os processos de fresamento e retificação, com parâmetros de corte selecionados, de modo a resultar em diferentes níveis de tensões residuais nas amostras. A seguir, foi realizado o tratamento de *shot peening* com esferas de vidro, a uma pressão de trabalho de 800 MPa, em duas amostras (A e D), com o intuito de induzir tensões residuais compressivas de elevada magnitude nas superfícies tratadas.

As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X com um analisador de tensões Stressrad, fabricado pela Radicon (Fig. 2). Foi usado o método do $\sin^2\psi$, com radiação $\text{CrK}\alpha$ ($\lambda = 2,29092 \text{ \AA}$), difratando o plano (211) da ferrita. A Figura 3 mostra os pontos de medições das tensões residuais longitudinais (L) superficiais, nas quatro amostras.

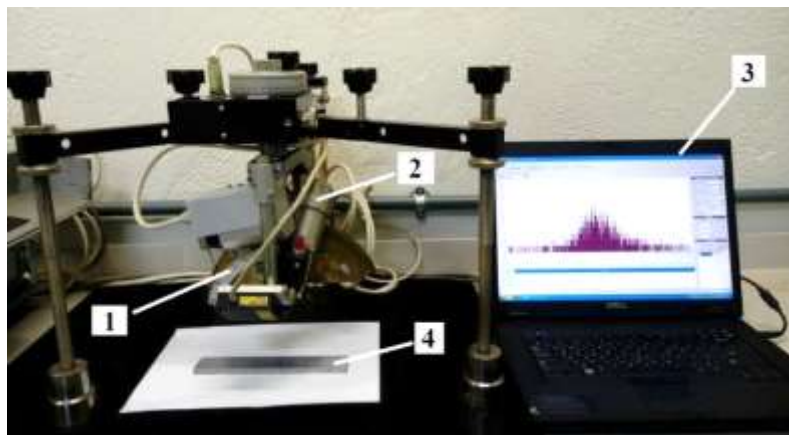


Figura 2. Analisador de tensões Stressrad: (1) Goniômetro; (2) Tubo de raios-X; (3) Software; (4) Amostra analisada.



Figura 3. Locais e direção da medição das tensões residuais nas amostras.

A medição das tensões residuais por ultrassom foi feita utilizando o equipamento OmniScan MX2 UT2, fabricado pela Olympus. Dentre as técnicas ultrassônicas disponíveis, a técnica do tempo de percurso da onda difratada – TOFD foi escolhida, pois representa uma possibilidade para medição de tensões residuais, pela incidência de feixe inclinado em relação à superfície de inspeção (REBELLO *et al.*, 2002). A montagem do experimento está apresentada na Figura 4.



Figura 4: Sistema de medição por TOFD: (1) Transdutores de 10 MHz; (2) Sapata (3) Equipamento Omniscan MX2 (4) Amostra analisada.

Foi utilizado um par de transdutores (Panametrics NDT, de 10 MHz) e calculada a distância entre eles. A separação dos transdutores, também chamada de PCS (*Probe Center Separation*), foi ajustada de acordo com a espessura de parede da amostra, dada pela Eq. (1). Foi usado o PCS de 32,24 mm, usando sapatas Olympus ST1-70-IHC, de 70°, resultando em adequada calibração da onda para aquisição dos sinais.

$$PCS = 2.k.T.tg(\alpha) \quad (1)$$

A metodologia empregada neste trabalho consistiu em submeter às amostras a varreduras ultrassônicas (através de transdutores de banda larga) de modo a se obter por meio da análise espectral ultrassônica o comportamento (amplitude x frequência) do pulso sônico proveniente das mesmas. O janelamento da onda lateral, que é o primeiro sinal obtido pela A-Scan (Fig. 5) do equipamento, permite o tratamento do sinal através da FFT, dada pela Eq. (2), o que possibilita fazer a análise de sistemas invariantes no tempo trabalhando estes sinais no domínio da frequência, sendo para isso usado o *software* Tomoview, da OLYMPUS.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$



Figura 5. A-Scan típico do sinal para o pós processamento da onda lateral (pelo Tomoview).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

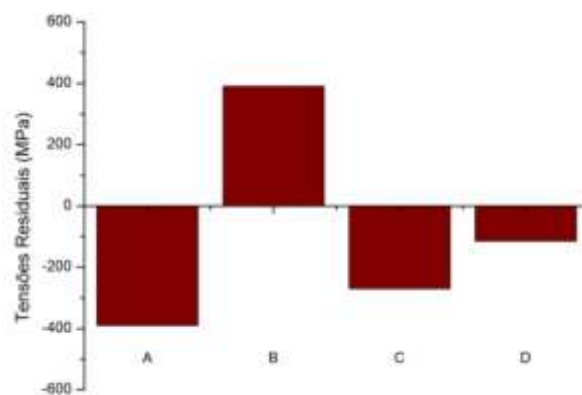
3.1. Análise por difração de raios-X

As tensões residuais foram analisadas em três pontos, na direção longitudinal (L), no centro de cada amostra, por difração de raios-X. Os resultados das tensões em cada amostra estão apresentados na Tab. 3 e as médias de cada grupo de amostras são mostradas na Fig. 6.

Analisando a Tab. 3 e a Fig. 6, é possível perceber que, conforme desejado, a preparação das amostras resultou em diferentes níveis e naturezas de tensões residuais (trativas e compressivas). As amostras A, C e D apresentam tensões residuais compressivas, de diferentes magnitudes. Já a amostra B apresenta tensões residuais trativas, da ordem de 390 MPa. As amostras A e D, jateadas, apresentaram tensões residuais de elevada compressão (390 MPa) e baixa compressão (115 MPa), respectivamente.

Tabela 3. Tensões residuais medidas por difração de raios-X.

Amostra	Tensão Residual (MPa)	Média (MPa)
A1	-380 $\pm$ 10	-390
A2	-380 $\pm$ 8	
A3	-400 $\pm$ 11	
B1	440 $\pm$ 25	390
B2	450 $\pm$ 19	
B3	340 $\pm$ 23	
C1	-280 $\pm$ 11	-270
C2	-270 $\pm$ 4	
C3	-240 $\pm$ 15	
D1	-80 $\pm$ 1	-115
D2	-150 $\pm$ 8	
D3	-110 $\pm$ 3	

**Figura 6: Tensões residuais medidas por difração de raios-X.**

3.2. Análise por TOFD – domínio do tempo

A representação do domínio do tempo mostra a amplitude do sinal no instante de tempo de voo da onda de cada ponto das amostras. A Tab. 4 apresenta os resultados da medição, por TOFD, dos valores dos tempos de percurso das ondas. O TOF (U(r)) é o tempo de voo da onda partindo do início da onda lateral, e o TOF (U(m)) é o tempo de voo da onda no fim do sinal estudado.

Tabela 4. Tempos de percurso das ondas nas amostras.

Amostras	Tempo (μ s)			Média TOF (U(m-r))
	TOF (U(r))	TOF (U(m))	TOF (U(m-r))	
A1	2,130	2,435	0,305	0,305
A2	2,135	2,440	0,305	
A3	2,130	2,435	0,305	
B1	2,130	2,545	0,415	0,415
B2	2,130	2,545	0,415	
B3	2,130	2,540	0,415	
C1	2,125	2,435	0,310	0,313
C2	2,130	2,445	0,315	
C3	2,125	2,440	0,315	
D1	2,175	2,535	0,360	0,373
D2	2,180	2,545	0,365	
D3	2,165	2,560	0,395	

Por TOFD – domínio da frequência

A Tab.5 fornece as informações geradas pelo espectro de frequência da onda lateral, de cada amostra e a Fig. 7 mostra os 12 sinais de frequências gerados por esta onda.

Tabela 5. Dados do espectro de frequência.

Amostras	Frequência Central (MHz)	Frequência Central Média (MHz)
A1	8,50	8,76
A2	9,67	
A3	8,11	
B1	9,08	8,63
B2	9,28	
B3	7,52	
C1	7,42	6,77
C2	7,52	
C3	5,37	
D1	5,86	5,73
D2	6,35	
D3	4,98	

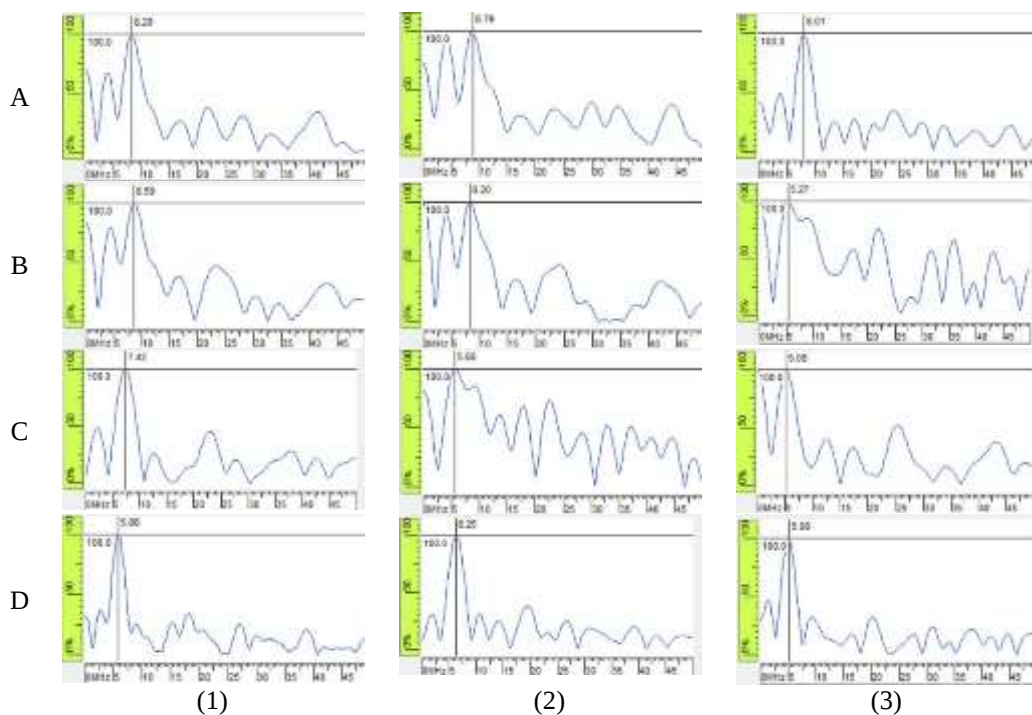


Figura 7. Transformadas de Fourier do sinal da onda lateral.

3.3. Comparação dos resultados: difração de raios-X vs Ultrassom TOFD

A fim de facilitar a discussão dos resultados obtidos pelas duas técnicas, a Tab. 6 apresenta os valores de tensão residual medidos por difração de raios-X (MPa) comparando-os com os tempos de percurso das ondas nas amostras (μs).

Tabela 6. Comparação dos resultados difração de raios-X vs Ultrassom TOFD.

Amostra	Tensão Residual Média (MPa)	Média TOF (U(m-r)) Tempo (μ s)	Frequência Central Média (MHz)
A	-390	0,305	8,76
B	390	0,415	8,63
C	-270	0,313	6,77
D	-115	0,373	5,73

Analisando os resultados da Tab. 5 é possível perceber que a diferença do tempo de percurso TOF(U(m-r)) é um parâmetro que pode ser usado para qualificar a natureza das tensões residuais através da técnica TOFD, pois pode-se afirmar que o tempo de percurso das ondas é menor em áreas sob compressão, o que está coerente com o encontrado no trabalho de ANDRINO *et al*, 2003.

Assim sendo, observa-se que na amostra A, contendo tensões residuais compressivas de maior magnitude, o TOF(U(m-r)) foi menor que na amostra B, contendo tensões residuais tratativas. E entre as amostras com tensões residuais compressiva, o menor TOF(U(m-r)) é apresentado pela amostra com maior magnitude de tensões residuais de compressão (amostra A). Assim sendo, é possível afirmar que os resultados obtidos pela técnica TOFD permitiram qualificar as tensões residuais e estão coerentes com os resultados verificados por difração de raios-X.

Com relação à quantificação das tensões, nota-se que existe uma diferença de TOF(U(m-r)) com relação às amostras com tensões residuais da mesma natureza, porém de magnitudes diferentes (A, C e D), possibilitando perceber o potencial da técnica ultrassônica para esta aplicação.

O espectro de frequência mostrou que existe uma sensibilidade dos sinais com relação às tensões residuais tratativas e compressivas. A maior frequência central é observada na amostra com tensões residuais compressivas de maior magnitude (amostra A). Portanto, nota-se a necessidade de aprimoramento dos estudos sobre este fenômeno.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho, onde amostras com diferentes níveis de tensões residuais foram analisadas e comparadas com o uso de duas técnicas, difração de raios-X e TOFD, permitem as seguintes conclusões:

1. O tempo de percurso das ondas em áreas contendo tensões residuais compressivas é menor do que naquelas com campos de tensões residuais tratativas.
2. A técnica ultrassônica TOFD permite qualificar tensões residuais e apresenta grande potencial para aplicação no campo.
3. Os sinais no espectro de frequência apresenta sensibilidade com relação à natureza das tensões residuais presentes nas amostras.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à Faperj pelo apoio financeiro que possibilitou a realização do presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Andrino, M.H. Avaliação de tensões em juntas soldadas utilizando o efeito acustoelástico. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, 2003.
- Anton, M. H. Análise Espectral de Ondas Ultrassônicas Longitudinais Aplicadas ao Estudo da Caracterização de aços IF tratados termicamente. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2014.
- Cindra Fonseca M.P., Santos Costa W., Santos Chaves F.R., Pardal J.M., Marques Junior A.S., “Estudo das Propriedades Mecânicas e Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Aço ARBL Bifásico Usado na Indústria Automobilística”. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco, Peru, 2007.
- Cindra Fonseca, M.P.; Souza, M.F.; Martins, M.C.; Tomaz, I.V.; Silveira, R.J.E., "Revisão teórica dos princípios da tensometria por difração de Raios-X", Anais do XX ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional e VIII ECTM – Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais, Nova Friburgo, RJ – Outubro de 2017.
- Gang, T, Cong, S., Zhang, W. W., Zhang, J. Y., “Analysis of Ultrasonic TOFD Imaging Testing for Ultra-thic-walled EBW Joint of Aluminum Alloy”, Procedia Engineering, Vol 207, pp. 1910-1915, 2017.
- Li, H.Y., Sun, H. L., Bowen, P., Knott, J. F.; “Effects of compressive residual stress on short fatigue crack growth in a nickel-based superalloy”, International Journal of Fatigue, Vol 108, pp.53-61, 2018.
- Jocken P. Fuhr, Mahmoud Basha, Manfred Wollmann, Lothar Wagner; “Coverage and Peening Angle Effects in Shot Peening on HCF Performance of Ti-6Al-4V”, Procedia Engineering, Vol 213, pp. 682-690, 2018.

- Mayworm, R. C., Félix, R. P. B. C., Alvarenga, A. V; “Aspectos Metrológicos da Técnica Tempo de Voo da Onda Difrata (ToFD) para Utilização em Ensaios Não Destrutivos (ENDs) por Ultrassom”, Soldagem & Inspeção, Vol 21, pp. 406-416, 2016.
- Menezes, C. W. S. Caracterização de dano por Hidrogênio Em Aços API 5CT L80 13Cr Por Meio De Ondas Ultra-Sônicas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- Moura, E.P., Siqueira, M.H.S., Da Silva, R.R. *et al.*, "Welding defect pattern recognition in TOFD signals - Part 1: Linear classifiers", *Insight*, v. 47, n. 12, December, 2005.
- Pedrosa, P.D., Rebello, J.M.A. & Cindra Fonseca, M.P, “Residual Stress State Behaviour under Fatigue Loading in Duplex Stainless Steel”, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 46, pp.298-303, 2011.
- Qimeng Zhu, Jia Chen, Guoqing Gou, Hui Chen, Peng Li; “Ameliorated longitudinal critically refracted—Attenuation velocity method for welding residual stress measurement”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 205, pp.267-275, 2017.
- Rebello, J. M. A.; Silva, I. C.; Silva, S. G. V.L.F., 2002, "Avaliação do erro entre a técnica do tempo de percurso da onda difratada - TOFD (*time-of-flight diffraction*) e as Técnicas convencionais na inspeção de cordões de aços”, VI Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador – BA, 2002.
- Rossini, N.S., Dassisti, M., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., Methods of measuring residual stresses in components, *Materials and Design*, 35, 572–588, 2012.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

COMPARATIVE STUDY OF RESIDUAL STRESSES IN API X65 STEEL BY X-RAY DIFFRACTION AND ULTRASONIC TECHNIQUE

Bruna Machado, bruna.smachadoc@gmail.com¹

Ramon Fonseca Ferreira, ramonffrj@gmail.com³

Maurício Saldanha Motta, mauricio.motta@cefet-rj.br³

João Marcos Alcoforado Rebello, jmrebello@metalmat.ufrj.br²

Maria Cindra Fonseca, mcindra@vm.uff.br¹

¹UFF - Universidade Federal Fluminense – Escola de Engenharia/PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, S/302, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói – RJ,

²PEMM/COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro - RJ,

³Departamento de Engenharia Mecânica – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ

Abstract: API 5L X65 steel is used in the construction of pipeline for oil and gas transportation. Residual stresses are intrinsic to all manufacturing processes and, under an external action, residual and applied stresses can be added linearly even in elastic regime, causing an unexpected and premature failure of the component. The study of nature, magnitude and directions of residual stresses is relevant to ensure the safety of structures and components, especially those working in extreme conditions. Therefore, alternative techniques, which provide an easier qualification and quantification of these residual stresses, are an object of great importance. The aim of the present work is to compare the residual stresses by X-ray diffraction using the $\sin^2\psi$ method and by ultrasound, using the TOFD technique, to contribute to the ultrasonic technique establishment. API X65 steel samples, fabricated using the same manufacturing process and shot peening treatment in two of them, with different residual stresses surface field were studied. The results show that TOFD is consistent with the residual stresses nature obtained by X-ray diffraction. The frequency spectrum provided better visibility of the ultrasonic signal.

Keywords: residual stresses, X-ray diffraction, ultrasonic, TOFD, steel API 5L 65