

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM AÇO API 5L X80 PELAS TÉCNICAS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E RUÍDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN

Maria Cindra Fonseca, mariacindra@id.uff.br¹

Bruna Machado, machadobruna@id.uff.br¹

Victor Tadashi Carnaúba, vtadashi@id.uff.br¹

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

Resumo: Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) têm grande importância na fabricação de tubos de grandes diâmetros para transporte de óleo e gás. Novas classes de aços ARBL vêm sendo desenvolvidos a fim de obter materiais de maior resistência e tenacidade, que garantam longa vida em serviço das tubulações. As tensões residuais estão presentes em componentes mecânicos, estruturas e tubulações, pois sua geração é inerente a todos os processos de fabricação. O conhecimento do estado de tensões residuais é importante para garantir a segurança de estruturas e componentes, principalmente daqueles que trabalham em condições extremas, para evitar que resultem na ruptura inesperada e prematura do componente, se forem trativas, e, portanto, deletérias. Entretanto, as tensões de compressão são benéficas, pois aumentam a vida em fadiga e a resistência à corrosão sob tensão. Por este fato, oferecer alternativas de técnicas que facilitem a qualificação e a quantificação das tensões residuais é tarefa de grande importância. Existem várias técnicas disponíveis para medição das tensões residuais, dentre elas destacam-se a difração de raios-X, o método do furo cego, ultrassom, ruído magnético Barkhausen (RMB), entre outros. Assim sendo, o presente trabalho tem por objetivo estudar as tensões residuais em amostras de aço API 5L X80 por duas técnicas não destrutivas. A primeira, por difração de raios-X é bem estabelecida e considerada como a técnica de validação, já a segunda, por ruído magnético Barkhausen, ainda encontra-se em desenvolvimento para análise de tensões residuais. Os resultados mostraram coerência entre as duas técnicas, verificando que os valores de ruído magnético Barkhausen coincidiram com o estado de tensões residuais medidas por difração de raios-X. O espectro de frequência conferiu melhor visualização do sinal magnético produzido e as curvas de envoltórias permitiram caracterizar o comportamento do sinal nas amostras com diferentes níveis de tensão, conforme suas naturezas.

Palavras-chave: tensões residuais, aço API-5LX80, difração de raios-X, ruído magnético Barkhausen

1. INTRODUÇÃO

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. A determinação da magnitude e distribuição das tensões é importante para assegurar o desempenho mecânico do material e garantir credibilidade na análise da integridade estrutural do componente (Coules *et al.*, 2018).

Nas últimas décadas, diferentes métodos foram desenvolvidos para medir tensões residuais em diferentes tipos de materiais e componentes. Algumas técnicas, tais como furo cego e método de remoção de camadas são chamadas de destrutivas, enquanto entre as não destrutivas se destacam a difração de raios-X, difração de nêutrons, ultrassom e magnética (Gautam *et al.*, 2020).

A técnica por difração de raios-X é 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 residuais 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).

Outra técnica não destrutiva de análise de tensões residuais e ainda não completamente estabelecida é por RMB (ruído magnético Barkhausen), que vem ganhando destaque e se baseia no efeito que a presença de tensões mecânicas e/ou descontinuidades microestruturais exerce no movimento das paredes dos domínios magnéticos em materiais ferromagnéticos (Aranas *et al.*, 2018), durante o processo de magnetização, sem causar danos à integridade do material, demonstrando grande potencial na aplicação em campo (He *et al.*, 2018). O efeito recíproco (efeito Vilari) faz com que

uma tensão de tração aplicada ao material, que tende a alongá-lo, facilite a sua magnetização na direção de aplicação da tensão, enquanto que uma tensão de compressão tenderá a dificultá-la (Xu *et al.*, 2018), conforme apresentado na Fig.1.

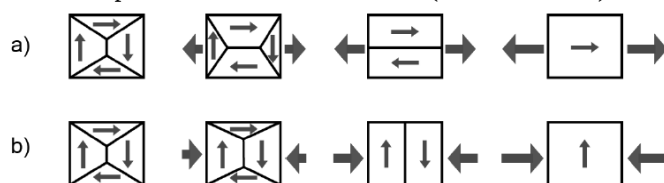


Figura 1. Alinhamento dos domínios magnéticos devido à (a) tração e (b) compressão (PAL'A & USAK, 2015).

Os aços microligados, de alta resistência e baixa liga (ARBL), possuem pequenas quantidades de elementos de liga em sua composição para garantir alta resistência combinada com elevada tenacidade. São amplamente utilizados para fabricação de tubos de grandes diâmetros usados no transporte de petróleo, gás e derivados. Estes aços são classificados pela norma internacional API 5L (*American Petroleum Institute*) para padronizar os requisitos técnicos exigidos de modo a minimizar falhas prematuras (Tang *et al.*, 2018).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram estudadas cinco amostras (A1, A2, A3, A4 e A5) retiradas de um tubo de aço da classe API 5L X80. A composição química e as propriedades mecânicas do aço são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Composição química do aço API X80 (% em peso).

C	Si	Mn	P	S	Mo	Nb	Ni
0,08	0,26	1,75	0,011	0,005	0,27	0,070	0,22

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço API X80 (Fabricante).

Tensão limite de escoamento (MPa)	Tensão limite de resistência (MPa)
555	625-700

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 superfícies usinadas. A seguir, foi realizado o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) na amostra A3. Já nas amostras A4 e A5, foi feito o tratamento de *shot peening* com esferas de vidro, a uma pressão de trabalho de 800 MPa, em duas amostras (A1 e A4), 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 Xtress3000 (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.

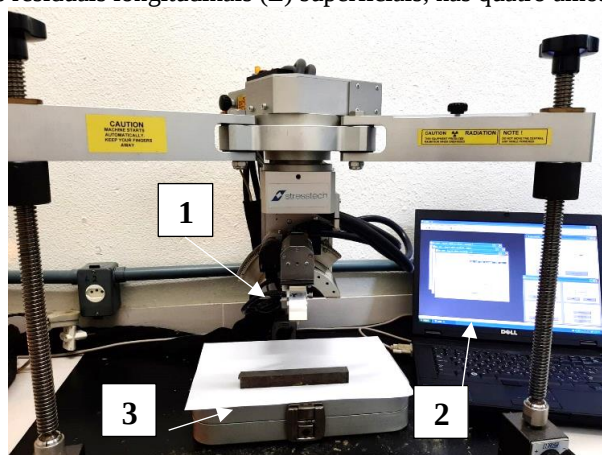


Figura 2. Analisador de tensões Xtress3000: (1) Goniômetro, (2) software, (3) amostra analisada.

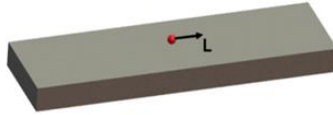


Figura 3. Local e direção de medição das tensões residuais nas amostras.

Para realização do ensaio de ruído magnético de Barkhausen foi utilizado o equipamento *BarkTech*, desenvolvido pelo Laboratório de Dinâmica e Instrumentação - LADIN da USP, com frequências de excitação de 10 Hz e 50 Hz. O controle total do sistema foi realizado pelo *software BarkView*. A Figura 4 representa a medição no sentido longitudinal de uma das amostras.

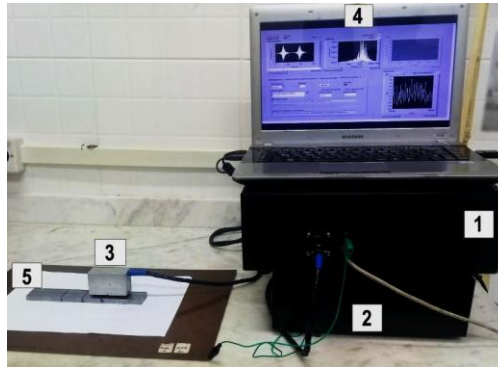


Figura 4: Montagem do sistema de análise por RMB: (1) Condicionador de sinais; (2) Fonte; (3) Sonda; (4) Software; (5) Amostra analisada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise por difração de raios-X

Os resultados das tensões residuais medidas pelo método de difração de raios-X estão apresentados na Tabela 3, bem como os parâmetros de usinagem empregados na obtenção destes valores de tensão. A Figura 4 permite melhor visualizar, graficamente, a distribuição das tensões residuais.

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

Amostra	Profundidade de corte (a_p) (mm)	Velocidade da mesa (V_w) (m/min)	Tensões Residuais (L) (MPa)
A1	0,05	16	-353 ± 6
A2			-422 ± 10
A3			10 ± 5
A4	0,05	10	272 ± 4
A5	0,10		244 ± 5

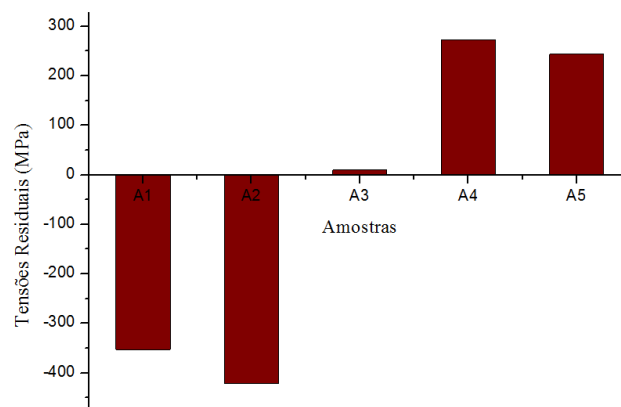


Figura 5: difração de raios-X.

Analisando a Tabela 3 e Figura 4 é possível perceber que, conforme desejado, a preparação das amostras resultou em diferentes níveis e naturezas de tensões residuais (trativas e compressivas). As amostras A1 e A2, que sofreram tratamento mecânico de *shot peening*, apresentaram tensões residuais compressivas de elevada magnitude (-353 MPa e -422 MPa, respectivamente). A amostra A3, que foi submetida ao TTAT, pode ser considerada como isenta de tensões residuais (10 MPa). As amostras A4 e A5 resultaram em tensões residuais de tração (da ordem de 270 MPa e 240, respectivamente).

3.2. Análise por RMB

Na Tabela 4 podem ser visualizados os resultados para cada frequência de excitação usada nas análises por RMB. Após o processamento dos dados, em código próprio, foi também realizado a extração dos gráficos do RMS, para cada frequência de excitação, no domínio do tempo (Fig. 6).

Tabela 4. Medições por ruído magnético Barkhausen.

Ruído magnético Barkhausen (mV)		
Amostras	Frequência de excitação 10 Hz	Frequência de excitação 50 Hz
A1	410	894
A2	438	889
A3	516	1045
A4	674	1117
A5	624	1087

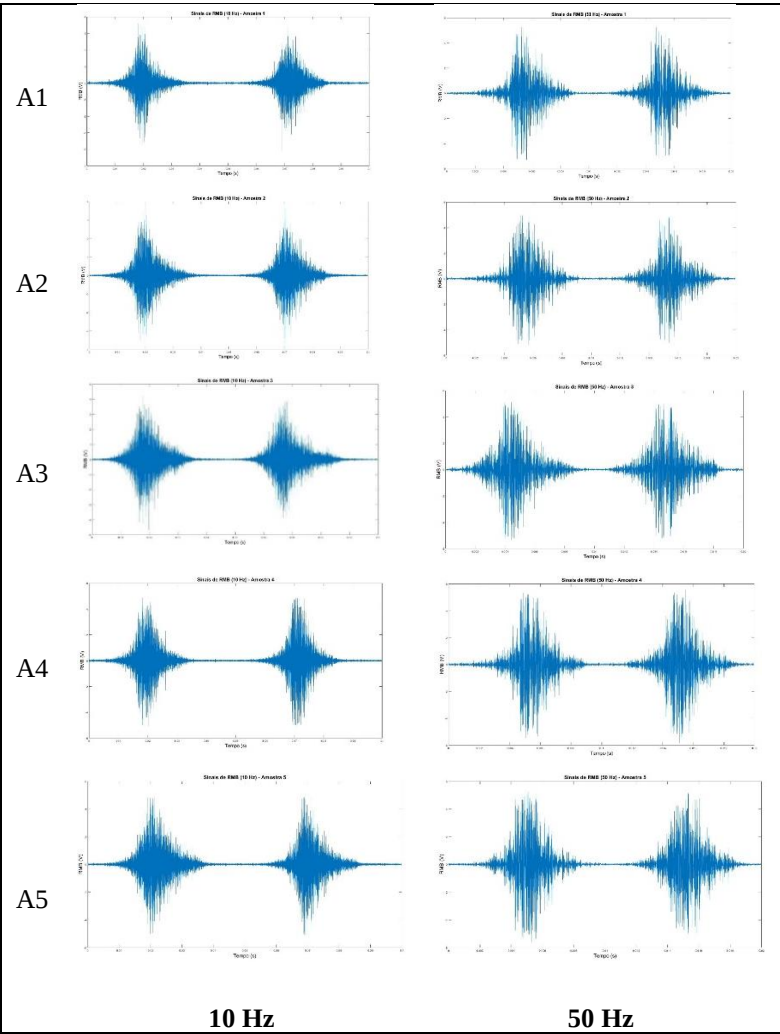


Figura 6. Tensões residuais por difração de raios-X.

Analisando os resultados da Tab.4 é possível perceber que a amplitude do sinal RMB é um parâmetro que pode ser usado para qualificar a natureza das tensões residuais, pois é possível afirmar que as tensões residuais de tração favorecem o aumento dos sinais RMB, alinhando os domínios magnéticos no sentido da tensão, enquanto as tensões residuais compressivas geram níveis de RMB menores, alinhando os domínios magnéticos em direção perpendicular à tensão, o que está coerente com os resultados obtidos por Sorsa *et al.*, (2018).

De acordo com a Fig. 5, no domínio do tempo, é possível perceber que existe um efeito de espalhamento nos sinais muito maior para a faixa de frequência de 50Hz. Para cada amostra é avaliado que o pico do sinal de RMB se comporta diferentemente, demonstrando ser necessário fazer um processamento de sinais para compreender melhor esta diferenciação, de acordo com as tensões residuais.

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

Após compilar os valores médios por correlação, através de uma rotina própria no *software Origin*, foi feita a correlação dos resultados de RMB com os de difração de raios-X, para cada frequência de excitação (10 Hz e 50 Hz), conforme Fig. 7.

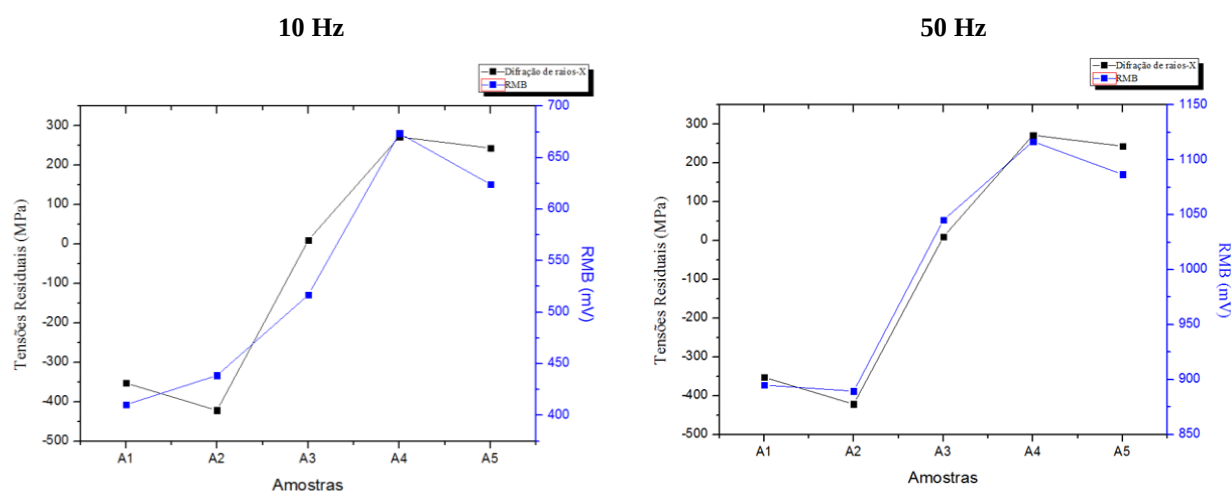


Figura 7. Correlação das tensões residuais por difração de raios-X vs. RMB.

É possível observar graficamente que os resultados de RMB para 50Hz apresentaram uma correlação maior com os resultados da tensão residual por difração de raios-X. Entretanto, em ambos os cenários foi possível notar o mesmo comportamento de crescimento do sinal de RMB para os casos de tensão residual trativa, indicando o potencial da técnica magnética (RMB) para medição de tensões residuais.

4. CONCLUSÕES

Para os resultados obtidos no presente trabalho, que teve como objetivo o estudo comparativo das tensões residuais em amostras de aço X80, por difração de raios-X e usando a técnica de ruído magnético Barkhausen (RMB), foi possível obter as seguintes conclusões:

1. A técnica de RMB apresentou boa correlação com os resultados de tensão residual por difração de raios-X. Tanto para a frequência de 10 Hz quanto para a frequência de 50 Hz o valor de RMB cresceu de acordo com a transição da tensão residual compressiva para trativa.
2. A partir da extração dos dados, foi possível realizar uma correlação do valor de RMB em mV para uma predição acurada de tensão residual em MPa para esse material. A curva quadrática foi a que deu maior precisão para essa correlação.
3. A técnica de RMB permite qualificar tensões residuais e apresenta grande potencial para aplicação no campo.
4. Existe sensibilidade dos sinais de RMB com relação à magnitude das tensões residuais, indicando a necessidade de análises para quantificação das tensões residuais.

5. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001. Os autores também gostariam de agradecer à agência de pesquisa CNPq, pelo apoio financeiro, que permitiu a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Aranas, C.; He, Y.; Podlesny, M. "Magnetic Barkhausen noise characterization of two pipeline steels with unknown history", *Materials Characterization*, vol. 146, pp. 243-257, 2018.
- Coules, H.E.; Horne, G.C.M.; Abburi Venkata, K.; Pirling, T. "The effects of residual stress on elastic-plastic fracture propagation and stability", *Materials and Design*, vol. 143, pp. 131-140, 2018.
- Gautam, N.; Kumar, A.; Mondy, R.P. "Evaluation methods for residual stress measurement in large components", *Materials Today: Proceedings*.
- He, Y.; Mehdi, M.; Hillinski, E.J.; Edrissy, A. "Through-process characterization of local anisotropy of Non-oriented electrical steel using magnetic Barkhausen noise", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 453, pp. 149-162, 2018.
- Pal'a, J., Ušák, E. "New parameters in adaptive testing of ferromagnetic materials utilizing magnetic Barkhausen noise". Slovak University of Technology in Bratislava, 2015.
- Rossini, N.S., Dassist, M., Benyousis, K.Y., Olabi, A.G. "Methods of measuring residual stresses in components". Mechanical and Management Engineering Department, Politecnico di Bari, 2012.
- Sorsa A., Santa-aho, S., Wartlaunen, J., Suominen L., Vippola M., Leiviska, K., "Effect of Shot Peening Parameters to Residual Stress Profiles and Barkhausen Noise", *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 37, 2018.
- Tang, J.; Zhang, Z.; Wang, Y.; Ju, P.; Tang, Y.; Zuo, Y. "Corrosion resistance mechanism of palladium film-plated stainless steel in boiling H₂SO₄ solution", *Corrosion Science*, vol. 135, pp. 222-232, 2018.
- Xu, C.; Liu, X.; Xue, F.; Li, Y.; Qian, W. "Comparison of magnetic properties of austenitic stainless steel after ion irradiation", *Nuclear Inst. And Methods in Physics Research B*, vol. 427, pp. 87-90, 2018.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY OF RESIDUAL STRESS IN API 5L X80 STEEL BY X-RAY DIFFRACTION AND MAGNETIC BARKHAUSEN NOISE TECHNIQUES

Maria Cindra Fonseca, mariacindra@id.uff.br¹

Bruna Machado, machadobruna@id.uff.br¹

Victor Tadashi Carnaúba, vtadashi@id.uff.br¹

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

Abstract. *High-strength, low-alloy steels (HRBL) are of great importance in the manufacture of large diameter pipes for transporting oil and gas. New grades of ARBL steels have been developed in order to obtain materials of greater strength and tenacity, which guarantee a long service life of the pipes. Residual stresses are present in mechanical components, structures and pipes, as their generation is inherent to all manufacturing processes. Knowledge of the state of residual stresses is important to guarantee the safety of structures and components, especially those that work in extreme conditions, to prevent them from resulting in unexpected and premature failure of the component, if they are trative, and therefore deleterious. However, compressive stresses are beneficial as they increase fatigue life and stress corrosion resistance. For this reason, offering alternative techniques that facilitate the qualification and quantification of residual stresses is a task of great importance. There are several techniques available for measuring residual stresses, among them are X-ray diffraction, the blind hole method, ultrasound, Barkhausen magnetic noise (RMB), among others. Therefore, the present work aims to study the residual stresses in API 5L X80 steel samples by two non-destructive techniques. The first, by X-ray diffraction, is well established and considered as the validation technique, while the second, by Barkhausen magnetic noise, is still under development for residual stress analysis. The results showed consistency between the two techniques, verifying that the values of Barkhausen magnetic noise coincided with the state of residual stresses measured by X-ray diffraction. The frequency spectrum provided a better visualization of the magnetic signal produced and the envelope curves allowed characterizing the behavior of the signal in samples with different stresses levels, according to their nature.*

Keywords: residual stresses, API 5LX80 steel, X-ray diffraction, magnetic Barkhausen noise