



CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO BAIXA LIGA E ALTA RESISTÊNCIA POR MEIO DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS

Francisco C. N. da Silva^{1*}, Humberto N. Farneze², Maurício S. Motta³ e Jorge C. F. Jorge²

1 – Coordenação de Logística, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro (CEFET UnED -Itaguaí), Rodovia Mário Covas, lote J2, quadra J - Distrito Industrial de Itaguaí – Itaguaí/RJ - CEP: 23812-101 e Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do CEFET/RJ – Email: francisco.silva@cefet-rj.br.

2 - Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro (CEFET-RJ), Rio de Janeiro, RJ.

3 -Coordenação de Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro (CEFET-RJ), Rio de Janeiro, RJ.

RESUMO

O papel da indústria de Petróleo e Gás no cenário que demanda geração de energia tem sido amplamente discutido, visto que estas reservas são ambientes em condições adversas, exigindo o desenvolvimento e a inovação de materiais que combinem a composição química e processamentos mecânicos e térmicos com excelentes associações de alta resistência e plasticidade. Tal fato provoca uma busca exaustiva para solução dos projetos de engenharia pela caracterização do comportamento mecânico de materiais. Neste sentido, este trabalho buscou inferir os resultados obtidos em medidas não destrutivas com os ensaios mecânicos (tração e dureza) e metalográficos, buscando verificar a caracterização do comportamento mecânico de material utilizado na indústria de Petróleo e Gás em aplicações críticas em equipamentos subaquáticos e componentes mecânicos. O material de base utilizado neste estudo foi o aço de baixa liga e alta resistência modificado (SAE 8630M2), produzido pelo processo termomecânico (forjamento triaxial), onde foram avaliadas três amostras submetidas a diferentes condições de tratamentos térmicos, por meio da técnica ultrassônica de imersão no modo pulso-eco para a medição do tempo de percurso (Time of Flight - ToF) das ondas longitudinais e as transversais geradas pela conversão de modo, utilizadas para a determinação das constantes elásticas da matriz de rigidez e dos coeficientes de Poisson e de atenuação. As avaliações indicaram o aumento do coeficiente de Poisson com o decréscimo das velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal; apresentando um bom resultado no coeficiente de atenuação, quando usado em microestruturas submetidas a diferentes tratamentos térmicos com as mesmas características microestruturais e diferentes estados de tensões internas.

Palavras-chave: Aço baixa liga e alta resistência; Comportamento Mecânico; Medidas Ultrassônicas.

INTRODUÇÃO

A caracterização do comportamento mecânico de materiais homogêneos e isotrópicos tem sido uma busca exaustiva para solução dos projetos de engenharia. O conhecimento da matriz de rigidez elástica é fundamental para a solução destes problemas seja através de soluções de modelos analíticos clássicos, experimentais ou métodos de elementos finitos ^(1,2). A velocidade e o coeficiente de atenuação são descritos quantitativamente em termos de propagação de ondas elásticas e a densidade do meio. Para materiais linearmente elásticos, homogêneos e isotrópicos, a velocidade é simplesmente relacionada às constantes elásticas e a densidade do meio. A atenuação, que é a soma das perdas por absorção e espalhamento, pode estar relacionada a diferentes parâmetros estruturais como tamanho de grão e tratamento térmico. As interações elásticas e inelásticas entre as ondas ultrassônicas e a microestrutura do material influenciam quantitativamente a velocidade e a atenuação das ondas ultrassônicas ^(3,4). Entre as técnicas convencionais mais usadas para obtenção das propriedades elásticas dos materiais estão os ensaios mecânicos. No entanto, estes apresentam desvantagens, por serem destrutivos por sua natureza e envolvem custos elevados na usinagem de corpos de prova e na realização de ensaios. A utilização de técnicas não destrutivas, como ultrassom, permite determinar as constantes de rigidez elásticas do material por meio da medição do tempo de percurso (TOF – Time of Flight) das ondas ultrassônicas que interagem com a microestrutura do material ^(5,6,7). O material elástico e isotrópico é descrito por apenas duas constantes elásticas independentes, λ e μ , denominadas constantes de Lamé, módulo de elasticidade longitudinal (E) e coeficiente de Poisson (ν). O principal objetivo deste estudo é correlacionar os resultados experimentais obtidos em medidas não destrutivas (coeficientes de Poisson e atenuação) com os ensaios mecânicos (tração, dureza e micro dureza) e os aspectos microestruturais (microscopia óptica) para validação da caracterização do comportamento mecânico do material usando medidas ultrassônicas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material de base utilizado neste estudo foi o aço de baixa liga e alta resistência modificado (SAE 8630M2) normalizado, temperado em óleo e revenido a 600 °C, produzido pelo processo termomecânico (forjamento triaxial) ⁽⁸⁾. A Tabela 1 apresenta a composição química do material de estudo obtida por análise química de espectrometria ótica ⁽⁹⁾.

Tabela 1: Composição química do aço SAE 8630M2 (% em peso). (Fe) balanço.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
% Peso	0,3152	0,8998	0,2412	0,0248	0,0069	0,8880	0,3826	0,7982	0,0229

Foram retirados de uma mesma seção transversal e usinados quinze corpos de prova para o ensaio de tração (ASTM A 370-2021), cinco blocos de dimensões 150 x 50 x 20 mm com suas superfícies retificadas para os ensaios de dureza (HRc) e microdureza (HV_{0,5}), em conformidade com a norma ASTM E384-17, e medidas ultrassônicas (coeficiente de atenuação e dos tempos de propagação das ondas longitudinal e transversal) e análise metalográfica por microscopia ótica (MO). As amostras foram divididas em cinco conjuntos contendo três corpos de prova para o ensaio de tração e um bloco para medidas ultrassônicas e análise metalográfica, assim classificados: amostras “TR6” conjunto como recebido do fabricante (normalizado, temperado e revenido a 600 °C), dois conjuntos foram levados a temperatura de austenitização

de 900 °C por uma hora, seguido de têmpera em óleo sendo um conjunto revenido a 200 °C, amostras “TR2”, e outro a 400 °C, amostras “TR4”. Os outros dois conjuntos também levados a temperatura de austenitização de 900 °C por uma hora, sendo um conjunto temperado em óleo, amostras “T”, e o outro recozido, amostras “R”, no próprio forno.

As amostras foram submetidas as mesmas condições de perpendicularidade do feixe sônico em relação a superfícies de ensaio. O transdutor foi posicionado de modo a se obter uma máxima amplitude dos sinais. Numa mesma varredura foram adquiridos sinais em cinco pontos com espaçamento de 1,0 mm. O coeficiente de Poisson foi determinado pela técnica pulso eco com o método de imersão usando transdutor de feixe focalizado de incidência perpendicular à interface água/aço onde ocorreu uma onda longitudinal refletida e duas ondas refratadas uma longitudinal e outra transversal gerada pelo fenômeno da conversão de modo devido a incidência de uma onda em uma interface entre materiais de diferentes impedâncias ^(2,7,10,11,12,13). A razão das velocidades de propagação das ondas é o coeficiente de Poisson (σ) ⁽¹⁴⁾ foi determinada conforme Equações A e B.

$$R_{lt} = \frac{V_l}{V_t} = \frac{2(\text{espessura}/TOF_t)}{2(\text{espessura}/TOF_l)} = \frac{TOF_l}{TOF_t} \quad (A)$$

$$R_{lt} = \frac{V_l}{V_t} = \frac{TOF_l}{TOF_t} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-\sigma}} \quad (B)$$

onde

R_{lt} = razão entre as velocidades de onda longitudinal e transversal

TOF_l = tempo de propagação da onda longitudinal

TOF_t = tempo de propagação da onda transversal

σ = coeficiente de Poisson

V_l = velocidade longitudinal

V_t = velocidade da onda de cisalhamento

O coeficiente de atenuação, α , foi determinado conforme a Equação C ^(4,15,16,17,18).

$$\alpha \text{ (dB/mm)} = \frac{20 \log \frac{r_2}{r_1}}{2t} \quad (C)$$

onde,

r_1 = amplitude do sinal do primeiro eco de fundo

r_2 = amplitude do sinal do segundo eco de fundo

t = espessura do material de ensaio

RESULTADOS E DISCUSSÃO

(1 linha simples)

Analisando a Tabela 2 e os aspectos microestruturais mostrados nas Figuras 1, 2 e 3 é possível observar que as velocidades de propagação das ondas transversal e longitudinal apresentam um aumento com o decréscimo do coeficiente de Poisson ^(2,17,19), podendo também verificar que sem o alívio de tensões internas, amostra (T) o material fica endurecido e frágil dificultando a propagação da frente sônica nas microestruturas aumentando o tempo de propagação da frente sônica, conseqüentemente, o aumento da dureza implica em um decréscimo das velocidades ^(2,17,19). Na tabela 2 observa-se no coeficiente de atenuação quando correlacionado com a dureza das amostras normalizada, temperada e revenida a 600 °C (TR6) e a temperada (T), sendo que

as duas amostras têm natureza martensítica e uma delas foi submetido ao alívio de tensões internas, é possível inferir propriedades mecânicas e microestruturais a partir de parâmetros ultrassônicos ⁽¹⁹⁾.

Tabela 2: Correlação das medidas ultrassônicas com ensaios mecânicos.

Amostras (SAE 8630)	Coefficiente de Poisson (σ)	Coefficiente de Atenuação (dB/mm)	Dureza (HV0,5)	Tensão Esc. (MPa)	Tensão Máx. (MPa)	Vel. onda transversal (m/s)
Temperado e revenido a 600 °C	0,285 ± 0,001	0,116 ± 0,005	275 ± 6	732 ± 2	882 ± 13	3236 ± 4
Temperado e revenido a 400 °C	0,286 ± 0,001	0,084 ± 0,007	488 ± 3	1360 ± 9	1550 ± 10	3199 ± 8
Temperado e revenido a 200 °C	0,289 ± 0,001	0,079 ± 0,003	417 ± 5	1470 ± 8	1760 ± 9	3209 ± 4
Temperado	0,292 ± 0,001	0,063 ± 0,004	479 ± 3	1755 ± 10	1817 ± 10	3168 ± 5
Recozido	0,288 ± 0,001	0,030 ± 0,010	399 ± 8	696 ± 15	788 ± 5	3209 ± 9

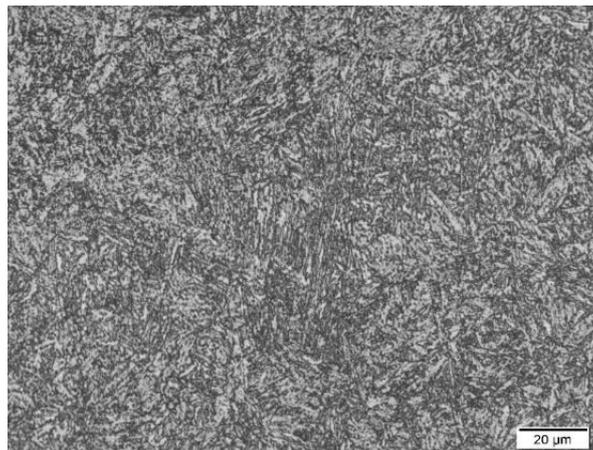


Figura 1: Imagem obtida por microscopia ótica da amostra como recebida (TR6). Microestrutura composta por martensita revenida a 600 °C. Ataque com Nital 2%. Aumento 1000x.

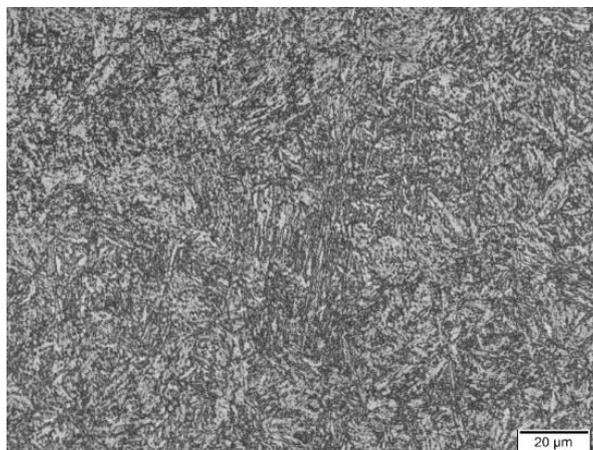


Figura 2: Imagem obtida por microscopia ótica da amostra temperada (T). Microestrutura composta por martensita. Ataque com Nital 2%. Aumento 1000x.

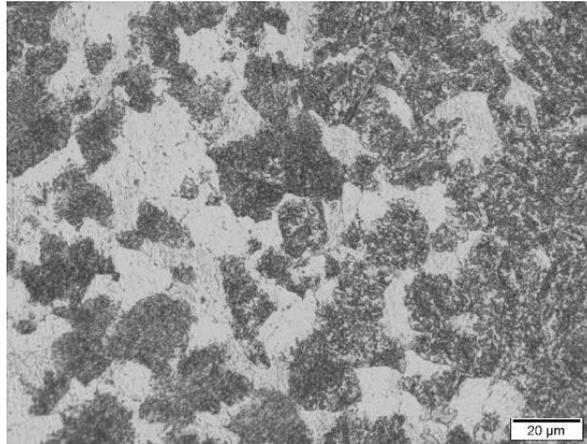


Figura 3: Imagem obtida por microscopia ótica da amostra recozida (R). Microestrutura composta por ferrita e perlita. Ataque com Nital 2%. Aumento 1000x.

CONCLUSÕES

Após os estudos e com o objetivo de avaliar o potencial de utilização da correlação entre medidas ultrassônicas e propriedades mecânicas é possível concluir:

1. Os resultados revelam que os parâmetros ultrassônicos analisados são sensíveis às microestruturas obtidas no estudo.
2. A velocidade de propagação das ondas e o coeficiente de atenuação indicam uma possível capacidade de identificar alterações microestruturais.
3. A velocidade de propagação das ondas transversais é mais sensível indicando uma correlação direta com a dureza.
4. As constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinal e cisalhamento) calculadas a partir das medidas ultrassônicas apresentam resultados coerentes com os ensaios mecânicos realizados no estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao **CEFET-RJ** - Centro Federal de Educação Tecnológica “Celso Suckow da Fonseca” do Rio de Janeiro e **Fluke** Engenharia Ltda.

REFERÊNCIAS

(1 linha simples)

1. FIRMO, J., “A Relevância do Petróleo e Gás para o Brasil”. Revista do Instituto Brasileiro de petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), p. 4, Rio de Janeiro, RJ, 2018.
2. KUMAR, ANISH; Ultrasonic Velocity Ratio: An Effective Tool for In-Situ Materials Characterization; ACTA Acustica United with Acustica; vol. 104, p. 251-258, 2018.
3. LEVY, M.; BASS, HENRY E.; ETERN, RICHARD R. - Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids and Gases; vol. I; Academic Press, San Diego, USA, 2001.
4. GOEBBELS, K.; GESELLSCHAFT, F. Proceedings of the First International Symposium on Ultrasonic Materials Characterization held at the National Bureau of Standards, Gaithersburg Md., p. 37, June 7-9, 1978.
5. SEGERLIND, LARRY J.; Applied Finite Element Analysis, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, USA 1984.

6. KUMAR, A.; JAYAKUMAR, T.; RAJ, B.; RAY, K.; Correlation Between Ultrasonic Shear Wave Velocity and Poisson's Ratio for Isotropic Solid Materials; Journal of Materials Science; vol. 43, issue 1, p 316-323, 2008.
7. SEOYOUNG, O.; KIM, Y. H.; SHIN Y.; CHO J.; Poisson's Ratio Scanning Using Immersion Ultrasonic Testing; Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing; Vol. 28, No. 6, 2008.
8. AÇOFORJA Indústria de Forjados S.A., "Certificado de Qualidade de Análise Química e Ensaio Mecânicos", Brasil, 2006.
9. Relatório de Análises Químicas de espectrometria ótica, Centro Tecnológico de Fundação Marcelino Corradi – CETEF, Itaúna, MG, 2005.
10. JIN-HA PARK I; YOUNG H. KIM T.; SEUNG S. LEE and YOUNG GIL KIM; Material Characterization of Weld-Zone Using Poisson's Ratio Distribution; Journal of the Korean Society; vol. 29, No. 6, 2009.
11. KIM, Y. H.; LEE, J. K. and KIM H. C.; Transverse-Wave Modes in the Pulse-Echo Signal of a Normal-Beam Longitudinal-Wave Mode Transducer, Journal of the Korean Physical Society, vol. 42, pp. 111-117, 2003.
12. SHIN, V.; YOON Y. H. and KIM Y. H.; Measurement of Longitudinal and Transverse Wave Speed in Solid Materials Using Immersion Ultrasonic Testing, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 28, pp. 40-45, 2008.
13. VISWANATH A.; ANISH KUMAR; JAYAKUMAR T.; RAO B. P. C.: Ultrasonic characterization of microstructural changes in Ti-10V-4.5 Fe-1.5 Al β -titanium alloy. Metall Mater Trans A 46, 2015.
14. ENSMINGER, DALE and BOND, LEONARD J.; Ultrasonics: Fundamentals, Technologies and Applications; 3rd Edition; CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, New York, 2012.
15. VARY, Alex, "Correlations Among Ultrasonic Propagation Factors and Fracture Toughness Properties of Metallic Materials". Materials Evaluation, 1978.
16. ANISH. Kumar, JAYAKUMAR, T., RAJ, Baldev, Ray, K. K. "Characterization of Solutionizing Behavior in VT14 Titanium Alloy Using Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurements", Materials Science and Engineering A360, pp. 58- 64, 2003.
17. ANISH. Kumar, LAHA, K., SANKAARA, Rao, JAYAKUMAR, T., RAJ, Baldev, Ray, K. K. "Comprehensive Microstructural Characterization in Modified 9Cr-1Mo Ferritic Steel by Ultrasonic Measurements". Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 33, pp. 1617-1626, 2003.
18. CHEEKE, J. DAVID N.; Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves; 2nd Edition; CRC Press Taylor & Francis; Group 6000; Broken Sound Parkway; NW, Suite 300; Boca Raton, 2012.
19. TEHRANI, N. N.; ABBASI, Z.; OZEVIN, D.; and Indacochea, J. E.; Metallurgical Characterization of a Low Carbon Steel Microstructure Using Linear and Nonlinear Ultrasonics; Journal of Materials Engineering and Performance, 2019.