

e que naturalmente acompanham o processo de aplicação de torque ao corpo de prova. Assim, em cada amostra foram aplicados esforços de torção por meio de pesos que variam de 0 a 10kg, a um passo de 2kg. Desta maneira foram aplicados 11 níveis de tensão sendo 5 negativas, 5 positivas e 1 em estado livre de esforços. Para o monitoramento das tensões aplicadas foi utilizada a técnica de extensometria resistiva. Os extensômetros informam a deformação gerada na amostra, o que permite definir a tensão aplicada por meio da Lei de Hooke para deformações elásticas.

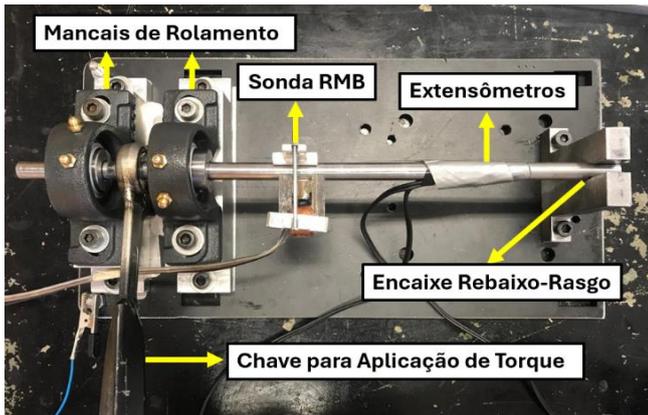


Figura 2 - montagem experimental do ensaio de torção

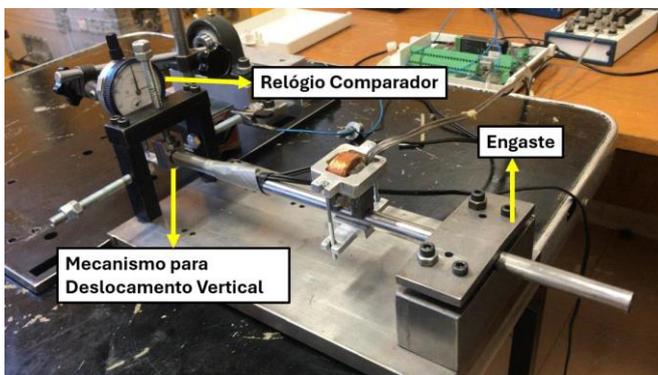


Figura 3 - montagem experimental do ensaio de flexão

A figura 3 mostra a montagem experimental utilizada nos ensaios de flexão. A bancada funciona como um sistema de viga engastada, fixando a amostra num extremo e aplicando deslocamentos verticais no extremo oposto. O controle das tensões aplicadas foi realizado com a medição da deflexão máxima, utilizando um relógio comparador, no extremo de aplicação da carga. Com esse valor e utilizando a equação (1) foi possível determinar o nível de tensão na região de medição da sonda de RMB.

$$\sigma = \frac{3Er v_{max}}{L^2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (1)$$

Na equação (1), v_{max} é o deslocamento vertical na extremidade livre, $r = 6\text{mm}$ é o raio da amostra, $L = 270\text{mm}$ a distância desde a posição

engastada até a posição de aplicação da força, e x a distância entre o ponto de engaste e a posição da sonda de RMB.

Nas amostras de aço AISI-4140 e AISI-4340 foram aplicados esforços de flexão proporcionais a deflexões máximas entre -10mm e $+10\text{mm}$, com passo de $0,5\text{mm}$. Já para a amostra de aço AISI-1045 foi necessária uma menor amplitude de tensões aplicadas devido a seu limite de escoamento mais baixo, sendo assim sua deflexão variou de -8mm a $+8\text{mm}$. Para todos os cálculos foi assumido o módulo de elasticidade do aço como $E = 200\text{GPa}$.

Medição do Sinal RMB:

A figura 4 mostra de maneira esquemática o sistema de medição do RMB. O equipamento foi desenvolvido nos laboratórios da Universidade de Campinas.

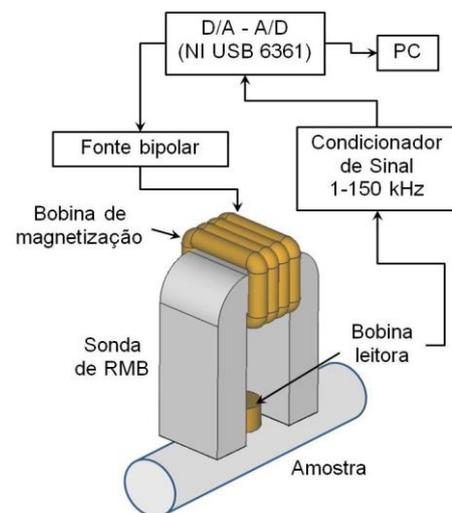


Figura 4 - Esquema do sistema de medição do RMB

No processo de geração e medição do sinal de Barkhausen utilizou-se um programa desenvolvido no software LabVIEW onde foram fornecidos os parâmetros de frequência (10 Hz) e amplitude (1 V) para a produção de um sinal senoidal de referência através de um conversor digital-analógico (CDA) presente numa placa de aquisição de dados (USB-6361). Este sinal foi amplificado por meio de um amplificador bipolar de corrente (até 0,11 A) e utilizado para alimentar a bobina de excitação da Sonda de RMB que induz um fluxo magnético variável nas amostras.

Os pulsos magnéticos de Barkhausen produzidos foram captados através da bobina leitora da sonda posicionada sobre a amostra. Estes pulsos foram tratados por um condicionador de sinais que é responsável pela devida filtragem (1-150 kHz) e amplificação (30db) do sinal. Posteriormente, o sinal condicionado foi adquirido

por um conversor analógico-digital (CAD), utilizando uma taxa de aquisição de 600 kHz, presente na mesma placa de aquisição. Por fim, os sinais gravados no PC foram tratados para a obtenção de gráficos por meio de programas desenvolvidos no *software MatLab*. Foi analisado o parâmetro RMS do sinal de RMB.

Em todos os ensaios a sonda de RMB foi posicionada aplicando o campo magnético na direção axial da amostra e no mesmo ponto do respectivo material durante os ensaios de torção e de flexão, pois a microestrutura pode variar de um ponto para outro o que pode gerar pequenas variações nos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Para a obtenção de resultados que apresentassem maior clareza na análise do presente projeto, os valores calculados do parâmetro RMS dos sinais de RMB foram normalizados com relação ao valor medido em condição de tensão de 0 MPa. Dessa forma, a figura 5 e figura 6 apresentam um aumento ou redução percentual, do parâmetro RMS do RMB, em relação ao estado de tensão nula, facilitando assim a comparação entre o comportamento do sinal RMB nas diferentes condições de medida.

A figura 5 mostra o comportamento do parâmetro RMS do RMB normalizado em função da tensão aplicada por esforços de flexão nos três materiais estudados. No ensaio de flexão a direção do campo magnético aplicado corresponde com a direção das tensões normais aplicadas. Se observa que nos três materiais o parâmetro RMS do RMB aumenta com tensões de tração e diminui com tensões de compressão. Esse comportamento tem sido evidenciado em diferentes trabalhos científicos [[10],[13]], e é fundamentado pelo fenômeno de magnetoestricção [14] presente na maioria dos materiais ferromagnéticos. Tensões de tração tendem a alinhar as paredes de domínios magnéticos de 180° na direção da tensão aplicada. Quanto maior a tensão, maior é a quantidade de paredes alinhadas e o material sofre pequenos aumentos de deformação devido a esse fenômeno (adicionais aos gerados pela força externa aplicada). Assim, quando o campo magnético aplicado pela sonda de RMB é orientado na direção da tensão, como é o caso dos ensaios de flexão feitos neste trabalho, gera uma maior movimentação de paredes de domínio de 180°, e,

portanto, também gera um maior nível de sinal de RMB. O caso contrário acontece quando são aplicadas tensões de compressão, e por conseguinte o sinal de RMB diminui.

Adicionalmente também é observado que na amostra de aço AISI-4340, os sinais de RMB apresentam uma maior sensibilidade no monitoramento das tensões geradas (aumento de 40% para 150 MPa em tração), em comparação com os demais materiais. A sensibilidade do RMB no aço AISI-4140 e no aço AISI-1045 foi similar, aproximadamente um aumento de 15% para um nível de tensão de 150 MPa em tração. Para as tensões de compressão e para os três aços, a sensibilidade do RMB foi relativamente menor.

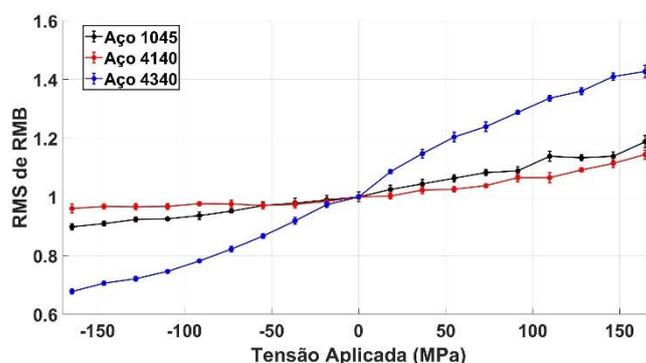


Figura 5 - Parâmetro RMS do RMB normalizado em função da tensão aplicada aos eixos por esforços de flexão

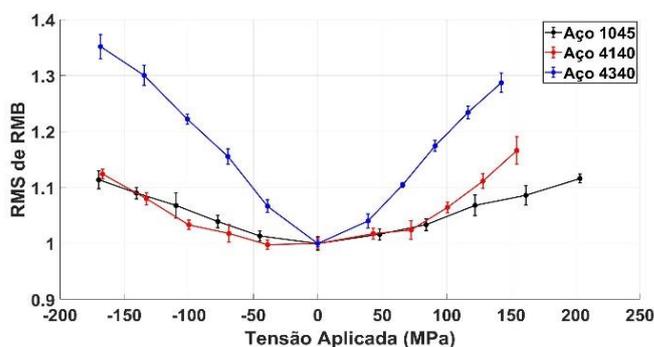


Figura 6 - Parâmetro RMS do RMB normalizado em função da tensão geradas por torção.

Nos ensaios de torção, a sonda de RMB também ficou posicionada de maneira que o campo aplicado ficou na direção axial. Como pode ser observado na figura 8 e figura 9, quando a amostra é submetida a torção, as tensões normais geradas no sentido axial teoricamente são nulas. Nesse caso são geradas simultaneamente tensões de tração e de compressão a 45° em relação à direção axial. Desta maneira, poderia se esperar que na direção axial o sinal de RMB não iria ter mudança alguma. No

entanto, os resultados mostraram outro comportamento, como é mostrado a seguir.

A figura 6 mostra o comportamento do parâmetro RMS do RMB normalizado em função de tensões geradas por torção. Pode ser observado que o parâmetro RMS do RMB aumenta com o aumento do torque aplicado. Esse comportamento ocorre independentemente do sentido do torque aplicado, bem seja positivo ou negativo. A sensibilidade do parâmetro RMS do RMB é aproximadamente igual nos dois sentidos de toque aplicado: no aço AISI-4340 houve um aumento de 30% para 150 MPa, e nos aços AISI-4140 e AISI-1045 houve um aumento aproximado de 10% para 150 MPa.

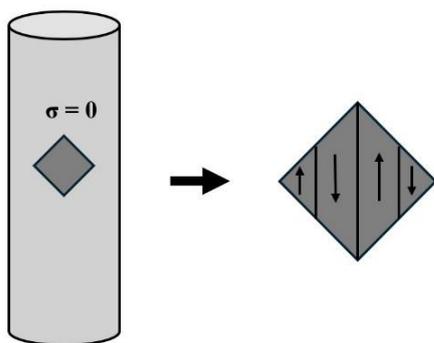


Figura 7 - infinitesimal de área da superfície do material livre de quaisquer esforços

Ao comparar os resultados do parâmetro RMS do RMB na medição de tensões geradas por flexão e por torção, observou-se que a sensibilidade da flexão foi maior e a ordem entre os materiais foi similar nos dois ensaios, apresentando maior sensibilidade no aço AISI-4340 e menores (e iguais) nos aços AISI-4140 e AISI-1045.

Ditos comportamentos também podem ser explicados baseados no fenômeno de magnetoestricção.

No caso da flexão e gerando tensões de tração, as paredes de domínio são alinhadas na direção 0° em relação ao eixo da amostra. Por outro lado, quando são geradas tensões de compressão, as paredes de domínio são alinhadas na direção 90° em relação ao eixo da amostra. Assim, nesta condição, com a orientação da sonda do RMB no sentido axial à amostra, os sinais medidos apresentam uma sensibilidade relativamente maior.

A figura 7 mostra a configuração das paredes de domínio de um infinitesimal de área da superfície do material sem a aplicação de tensões. Acredita-se que os domínios podem estar alinhados com o eixo da amostra devido ao efeito de

fabricação da mesma. No processo de laminação das barras a microestrutura do material é orientada na direção axial, gerando anisotropia mecânica e alinhamento predominante dos domínios magnéticos nessa mesma direção.

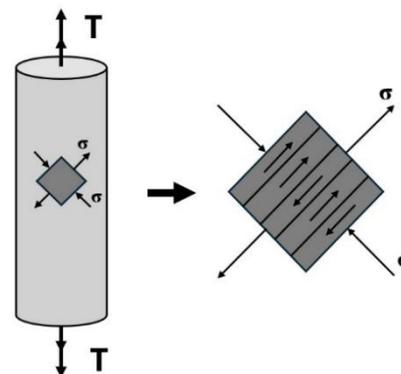


Figura 8 - Efeito de tensão por esforço de torção positiva nos domínios magnéticos de um infinitesimal de área da superfície do material

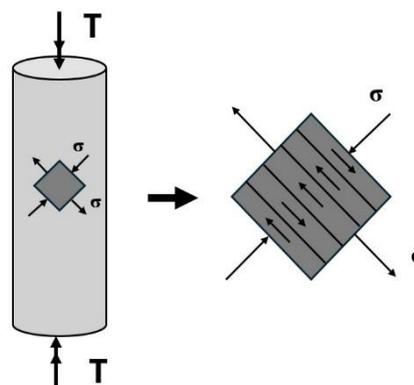


Figura 9 - Efeito de tensão por esforço de torção negativa nos domínios magnéticos de um infinitesimal de área da superfície do material

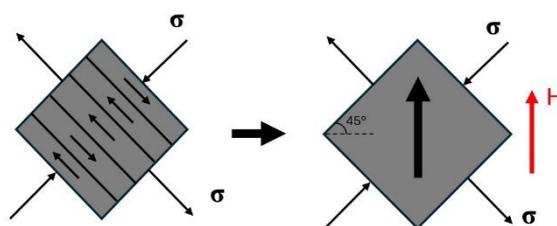


Figura 10 - processo de saturação magnética de um infinitesimal de área de um material sujeito a torção via um campo magnético externo

A figura 8 e figura 9 mostram de maneira esquemática o fenômeno de magnetoestricção (ou alinhamento de domínios) gerado na amostra quando submetida a tensões de torção. Nota-se que, ao se aplicar uma torção positiva à amostra (Figura 8) há um aumento no número de paredes de domínio (de 180°) orientadas a -45° em relação ao

eixo da mesma. Este fenômeno é devido à geração simultânea de tensões normais de tração a -45° e de compressão a 45° . A partir dessa condição e com a sonda do RMB orientada no sentido axial (aplicação de campo magnético variável de excitação no sentido axial), a estrutura magnética é teoricamente alterada (até a saturação magnética) segundo a representação esquemática mostrada na figura 10. Neste processo, quanto maior torque aplicado, haverá maior presença de paredes de domínio magnético (de 180°) orientadas a -45° em relação ao eixo da amostra e, portanto, o sinal de RMB será maior.

Este fenômeno independe da direção do torque aplicado, ver figura 9 para o caso de torque negativo. Neste caso o número de paredes de domínio é gerado a 45° . Isso explica o aumento percentual similar do parâmetro RMS do RMB na medição de tensões geradas por torques positivos ou negativos.

Por fim, o fato da sensibilidade do parâmetro RMS do RMB na medição de tensões geradas por torção ser menor do que o observado na medição de tensões por flexão, pode ser justificado pela diferença de direções de paredes de 180° geradas pelas tensões aplicadas. No caso das tensões de flexão, os domínios inicialmente estão alinhados com a campo magnético de excitação (orientação da sonda de RMB). Partindo dessa condição, no processo de magnetização cíclica, a movimentação de paredes de domínio é facilitada e maior. Gerando, portanto, maior sinal de RMB. Já no caso da torção, as paredes de domínio (de 180°) estão inicialmente alinhadas a 45° em relação ao campo magnético aplicado. Desta maneira, no processo de magnetização cíclica, a movimentação de paredes de domínio apresenta uma dificuldade maior, logo o sinal de RMB é menor.

CONCLUSÕES:

Os resultados obtidos, e para os três aços estudados, demonstram que a técnica do Ruido Magnético de Barkhausen pode ser utilizada com uma técnica não destrutiva para o monitoramento de tensões geradas por torção.

Independentemente do sentido do torque aplicado, o parâmetro *RMS do RMB* do sinal de RMB aumenta com a amplitude da tensão.

Posicionando a Sonda de RMB na direção axial de amostras tipo eixo, a sensibilidade da técnica no monitoramento de tensões geradas por

torção é menor que no monitoramento de tensões por flexão.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BARKHAUSEN, H., Zwei mit hilfe der neuen verstärker entdeckte erscheinungen. **Phys Z**, v. 20, p. 401, 1919
- [2] JILES, D. C., Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. **Czech J Phys**, v. 50, p. 893–988, 2000
- [3] SORSA, A., LEIVISKÄ, K., SANTA-AHO, S., LEPISTÖ, T., Quantitative prediction of residual stress and hardness in case-hardened steel based on the Barkhausen noise measurement. **NDT&E Int.**, v. 46(1), p. 100–106, 2012
- [4] SCHUSTER, S., DERTINGER, L., DAPPRICH, D., et al. Application of magnetic Barkhausen noise for residual stress analysis - consideration of the microstructure. **Mater. Test.**, v. 60(6), p. 545–552, 2018
- [5] FRANCO, FA, GONZÁLEZ MFR, CAMPOS MF, et al. Relation between magnetic Barkhausen noise and hardness for Jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels. **J Nondestruct Eval**, v. 32, p. 93–103, 2013
- [6] PEREZ-BENITEZ JA, CAPO-SANCHEZ J, ANGLADA-RIVERA J, et al. A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel. **NDT&E Int.**, v. 41, p. 53–58, 2008
- [7] STEFANITA, C.G., ATHERTON, D.L., CLAPHAM, L.: Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel. **Acta Mater**, v. 48, p. 3545–3551, 2000
- [8] PEREZ-BENITEZ, J. A., CAPO-SÁNCHEZ, J., ANGLADA-RIVERA, J., and PADOVESE, L., A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen Noise in plain steels. **J. Magn. Mater.**, v. 288, p. 433–442, 2005
- [9] JAGADISH, C., CLAPHAM, L., ATHERTON, D. L., Influence of uniaxial elastic stress on power spectrum and pulse height distribution of surface Barkhausen noise in pipeline steel. **IEEE Trans. Magn.**, v. 26 (3), p. 1160–1163, 2002
- [10] BLAOW, M., EVANS, J. T., SHAW, B., Effect of deformation in bending on magnetic Barkhausen noise in low alloy steel. **Mater. Sci. Eng.**, v. A386 (1–2), p. 74–80, 2004
- [11] VENGRINOVISH, V., VINTOV, D., PRUDNIKOV, A. et al. Magnetic Barkhausen effect in steel under biaxial strain/stress: Influence on stress measurement. **J Nondestruct Eval**, v. 38, p. 52, 2019
- [12] LINDGREN, M., and LEPSTO, T., Barkhausen Noise evaluation of fatigue in high strength steel. **Int. J. Mat. Product Technol.**, v. 26(1–2), p. 140–151, 2006.
- [13] BLAOW, M., EVANS, J. T., SHAW, B., Magnetic Barkhausen noise: the influence of microstructure and deformation in bending. **Acta Materialia**, v. 53, n. 2, p. 279–287, 2005
- [14] LEE, E. W. Magnetostriction and magnetomechanical effects. **Reports on Progress in Physics**, 1955