

# Análise do ruído magnético de Barkhausen por meio da transformada wavelet discreta para detecção de microestrutura fragilizante em um aço

Edgard Silva, Suzete Correia, Ibernnon Barros, Ramon Almeida, Adeilton de Carvalho, Louise Gomes

**Resumo**— Ensaios eletromagnéticos não destrutivos vêm sendo desenvolvidos para acompanhamento de formação de microestruturas deletérias em materiais ferromagnéticos. No presente trabalho, o ruído magnético de Barkhausen resultante da interação entre ondas emissoras de 5 Hz e um aço inoxidável duplex é estudado através da transformada wavelet discreta. Os resultados foram comparados com medidas de energia absorvida por impacto e microscopia óptica. As medidas de RMS dos sinais com duas famílias wavelet mostraram ser eficazes na detecção da formação de precipitados nanométricos no interior do material, que levam à fragilização do material em estudo.

**Palavras-Chave**— Wavelet, Ruído magnético de Barkhausen, Fragilização.

**Abstract**— Non-destructive electromagnetic tests have been developed to monitor the formation of harmful microstructures in ferromagnetic materials. In the present work, the magnetic Barkhausen noise resulting from the interaction between 5 Hz emitting waves and a duplex stainless steel is studied through the discrete wavelet transform. The results were compared with measurements of absorbed energy by impact and optical microscopy. The RMS measurements of the signals with two family wavelets show to be effective in detecting the formation of nanometric precipitates inside the material, which lead to the embrittlement of the material under study.

**Keywords**— Wavelet, Magnetic Barkhausen noise, embrittlement.

## I. INTRODUÇÃO

Ensaios não destrutivos vêm sendo utilizados para acompanhamento de formação de microestruturas que venham provocar a fragilização dos materiais devido a imposição de ciclos térmicos, como em processo de soldagem. Entre esses têm-se o ultrassom, correntes parasitas, de permeabilidade magnética, ensaios eletromagnéticos baseados na análise do ruído magnético de Barkhausen e permeabilidade na região de reversibilidade do movimento dos domínios magnéticos [1, 3, 4, 7, 8, 9].

Ensaios não destrutivos baseados na análise do ruído de Barkhausen vêm sendo utilizados para acompanhamento de fases e análise de anisotropia magnética de materiais [3]. Porém, o método baseado nesse ruído ainda não foi padronizado devido à variedade de dispositivos utilizados, frequências e tensões magnetizantes, bem como características da bobina receptora, como forma e frequência de reposta, que resultam em diferenças no sinal do ruído recebido [6].

As interações entre um campo magnético gerado por uma onda e um material na região de irreversibilidade dos domínios magnéticos geram um ruído denominado de Barkhausen. Este

ruído deve-se aos saltos abruptos causados pelo desprendimento das paredes dos domínios ao passarem por pontos de ancoragem como contornos de grãos, discordâncias, heterogeneidades ou outras imperfeições. Esta superação das paredes de domínio sobre esses pontos produz saltos discretos na indução magnética, gerando pulsos magnéticos conhecidos como ruído magnético de Barkhausen [5, 6].

A decomposição de sinais através da transformada wavelet discreta, permite a análise multirresolução em que, é possível obter informações dos sinais em diferentes faixas de frequências. Uma vez que o ruído magnético de Barkhausen RMB é um sinal não-estacionário que possui características de alta frequência, a transformada wavelet torna-se útil na sua análise. Trabalhos, na literatura, empregam as wavelets para analisar se o componente de alta frequência pode ser capaz de gerar informações características mais eficazes e refinadas do ruído magnético de Barkhausen (RMB), através de diferentes níveis de decomposição [4 - 6].

Wang et al. [4] estudaram a aplicação da transformada wavelet discreta da família Daubechies, com níveis de decomposição variando de um a seis, para avaliar a possibilidade de detectar o efeito tensões mecânicas compressivas em um aço estrutural do tipo A3, através da análise do ruído magnético de Barkhausen. Após a aplicação da wavelet, o valor de RMS (raiz quadrada da média quadrática) foi determinado de cada sinal. Notou-se que a aplicação da família Daubechies era capaz de detectar o efeito dessas tensões no material, com resultados variando entre os níveis de um a quatro, e para os níveis cinco e seis [4].

Neste trabalho um aço inoxidável duplex SAF 2205 é utilizado para o estudo por apresentar, após tratamento térmico, a formação de precipitados finos no interior dos grãos que levam à fragilização do mesmo. O objetivo do corrente trabalho é analisar a capacidade de diferenciação das condições com e sem precipitado, através da análise do ruído magnético de Barkhausen por meio da transformada wavelet discreta, com aplicação da família wavelet Daubechies de ordem 3 e de ordem 6.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foi um aço SAF 2205 recebido na forma de barra, de onde foram retiradas amostras com dimensões 30x20x8 mm. Este material na condição como recebido é formado por 50% de uma microestrutura ferromagnética conhecida por ferrita e 50% de uma paramagnética denominada austenita. Duas amostras foram analisadas, uma na condição original e outra submetida a uma temperatura de 475 °C por 100

horas. Nesta condição tem-se a formação de precipitados, finamente dispersos, no interior da matriz ferrita que leva à fragilização do material. A austenita neste material não sofre transformações [2].

Ondas triangulares com frequência de 5 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V foram aplicadas às amostras, através de uma bobina emissora posicionada a uma das superfícies do material. Na superfície oposta foi colocada uma bobina receptora, que captou a onda resultante da interação da onda triangular emitida com a peça. Para cada emissão, cinco sinais foram adquiridos, com taxa de amostragem de 10.000 pontos por segundo e tempo de aquisição de 2 s, para a condição com e sem precipitados.

A Figura 1 mostra a configuração experimental utilizada.

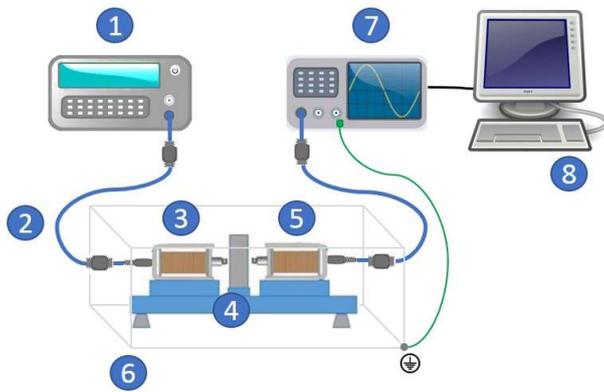


Fig. 1. Bancada experimental: gerador de sinais (1); cabos blindados (2); bobina emissora (3); amostra (4); bobina receptora (5); gaiola de Faraday (6); osciloscópio (7) e computador (8).

As amostras como recebidas foram lixadas, polidas e atacadas com reagente KOH para revelação das microestruturas. Além das amostras com e sem precipitados obtidas para análise do ruído de Barkhausen, mais cinco amostras, de cada condição foram usinadas por eletro erosão para ensaio de impacto Charpy com dimensões 55x10x10 mm.

Os cinco sinais adquiridos na bobina receptora, para cada amplitude de onda emissora, foram submetidos a transformada wavelet discreta, através do software OriginPro (OriginLab Corp.). Utilizou-se duas famílias de wavelet, db3 e db6, cada uma delas com um nível de resolução. Por duas vezes distintas houve a aplicação da transformada wavelet discreta, definida como (1). Primeiramente em decomposição com a família db3, com um nível de resolução e em seguida decomposição com a família db6.

$$TWD_{\psi}f(m, n) = \sum_k f(k)\psi^*_{m, n}(k) \quad (1)$$

Sendo:

$$\psi^*_{m, n}(k) = \frac{1}{\sqrt{r_0^m}} \psi^* \left( \frac{k - ns_0 r_0^m}{r_0^m} \right) \quad (2)$$

$$r = r_0^m;$$

$$s = ns_0 r_0^m.$$

Os termos  $r$  e  $s$  correspondem ao parâmetro de escala e ao parâmetro de translação, respectivamente.

Na análise multirresolução, o sinal é decomposto em diferentes níveis de resolução, implementado através de filtros passa-baixas (h) e passa-altas (g). Depois de decompostos, uma vez que os dados são divididos pela metade e os coeficientes de wavelet em todas as escalas são acoplados ao coeficiente restante da escala máxima, tornam-se iguais ao comprimento da sequência original.

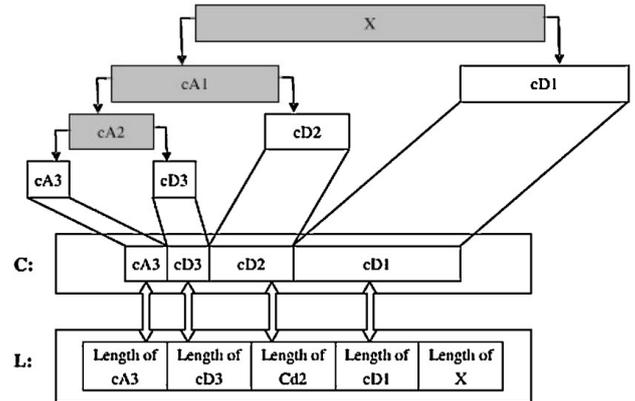


Fig. 2. Estrutura típica de decomposição em três níveis [4].

Os coeficientes de aproximação correspondem aos componentes de alta escala e baixa frequência e os de detalhe aos componentes de baixa escala e alta frequência, sendo obtidos através das equações (3) e (4), respectivamente:

$$a_j(n) = \sum_k h(k - 2n)a_{j-1}(k) \quad (3)$$

$$d_j(n) = \sum_k g(k - 2n)a_{j-1}(k) \quad (4)$$

Os valores RMS foram obtidos a partir de cada sinal, com e sem precipitado, de acordo com equação (5).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i d_j^2(n)}{N}} \quad (5)$$

Em que  $V_{RMS}$  é o valor RMS (raiz quadrada do valor quadrático médio) do sinal Barkhausen em Volts,  $d_j(n)$  são os coeficientes de detalhes e  $N$  é o número de medidas realizadas.

A Figura 3 mostra o fluxograma da aplicação da transformada wavelet discreta.

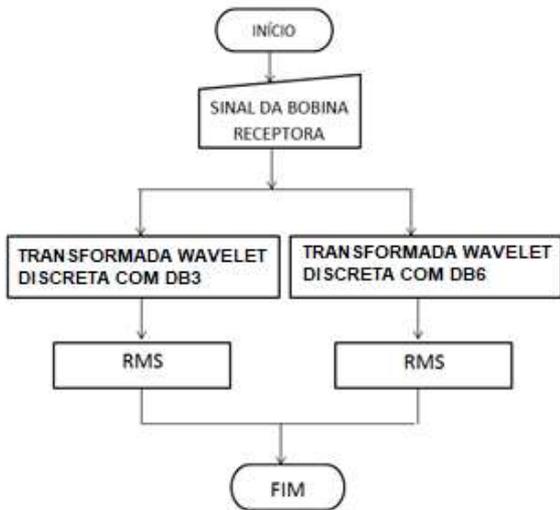


Fig. 3. Fluxograma da aplicação da transformada wavelet discreta.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 mostra a microestrutura do material como recebido. Nota-se nela uma microestrutura formada por ilhas de austenita paramagnética numa matriz de ferrita, que é ferromagnética. O material quando submetido a temperaturas acima de 300 °C e abaixo de 600 °C sofre a decomposição da ferrita, formando precipitados nanométricos no seu interior. Tais precipitados são responsáveis pela fragilização conhecida como à 475 °C, por ser esta a temperatura de maior cinética de formação. A presença destes precipitados só pode ser observada por microscopia de alta resolução, como a eletrônica de transmissão ou por métodos indiretos. Contudo, essas técnicas são destrutivas e de complexa preparação de amostras. Assim, ensaios não destrutivos como medidas de permeabilidade, variação de velocidade e atenuação sônicas vem sendo desenvolvidos [2], [10].

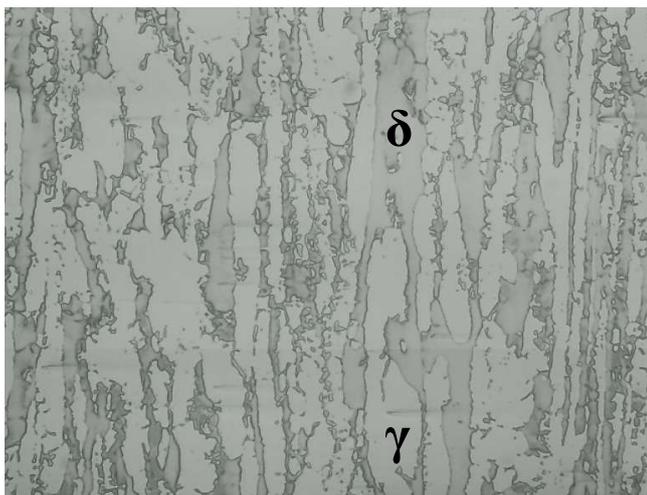


Fig. 4. Microestrutura do material como recebido atacadas com KOH. Aumento de 300 x. Ferrita ( $\delta$ ) e Austenita ( $\gamma$ ).

A Figura 5 mostra a variação do valor RMS, com um intervalo de confiança de 95%, da onda resultante da interação

entre a aplicação de onda emissoras de 5 Hz e material. Além disso, na Figura 6 tem-se o gráfico da onda resultante da aplicação de uma onda emissoras de 5 Hz e 5 V. Nota-se da Figura 5 que a presença de precipitados reduz os valores de RMS do sinal. Este comportamento está relacionado com o bloqueio do movimento das paredes dos domínios magnéticos devido à presença dos precipitados no interior da fase ferrita, que reduzem o ruído magnético de Barkhausen. Comportamento similar tem sido observado em estudos desse material através de medidas de permeabilidade e suscetibilidade magnética [11, 12].

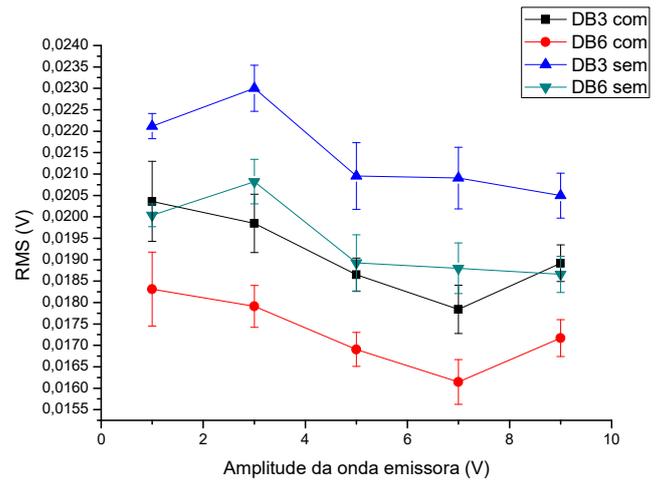


Fig. 5. Variação do RMS da onda detectada na bobina receptora, após a aplicação das transformadas wavelet da família db3 e db6, ambas com um nível de decomposição, para amostras com e sem precipitados.

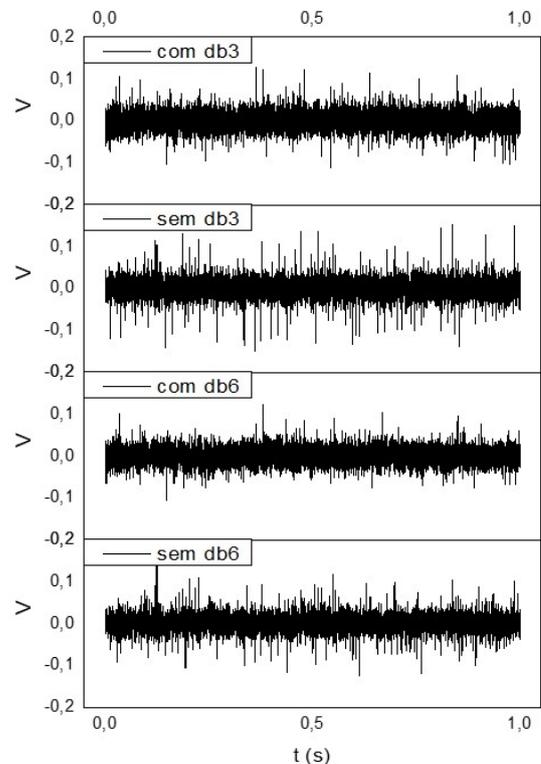


Fig. 6. Variação da tensão medida na bobina receptora em função do tempo, após a aplicação da transformada wavelet discreta da família db3 e db6, ambas com um nível de decomposição, para as condições com e sem precipitados e ondas emissoras de 5 Hz e 5 V.

A aplicação de transformada wavelet discreta com duas famílias e um nível de decomposição tiveram comportamentos semelhantes, sendo que o uso da família db6 leva a uma maior redução dos valores de RMS. Contudo, ambas as famílias são capazes de detectar a presença da nova microestrutura formada. A Figura 6 mostra a diferença entre os sinais após a aplicação da transformada wavelet discreta com a família db3 e db6. Nota-se um sinal mais limpo e menos ruidoso, sobretudo na amostra com tratamento térmico, evidenciando a redução do ruído com a maior família. Contudo, a variação do ruído no gráfico tensão contra tempo é sutil (Figura 6). Entretanto, fica claro ao observar os valores de RMS com seus respectivos intervalos de confiança na Figura 5.

Para melhor entendimento do efeito da formação dos precipitados na capacidade de absorver energia por impacto, que é uma medida de acompanhamento da fragilidade do material, amostras foram retiradas para realização de ensaio de impacto Charpy. A condição como recebido obteve  $88,83 \pm 6,13$  J, já a amostra tratada resultou em  $21,37 \pm 1,5$  J. Isso indica uma redução de 76% na capacidade de absorver energia. Esta diferença faz com que o material passe da condição de dúctil para frágil [11]. Os resultados de RMS obtidos mostram ser capazes de detectar esta mudança de condição.

#### IV. CONCLUSÕES

O presente trabalho fez uma análise do ruído magnético de Barkhausen, através da Transformada Wavelet Discreta para detecção de microestrutura fragilizante em um aço inoxidável duplex chegando às seguintes conclusões:

A aplicação de ondas emissoras de 5 Hz foram capazes de gerar ruídos magnéticos de Barkhausen em amostras com e sem a presença de precipitados nanométricos, sendo capaz de diferenciar as duas condições.

A aplicação de wavelets com as famílias db3 e db6, ambas com um nível de decomposição, mostram comportamentos semelhantes e os valores de RMS dos sinais foram eficazes na detecção das condições de energia absorvida por impacto gerada pela formação da microestrutura formada durante o tratamento.

A presença de precipitados nanométricos, na amostra tratada, reduziu os valores de RMS devido ao bloqueio dos movimentos das paredes dos domínios magnéticos que levam à redução do ruído magnético de Barkhausen.

Em trabalhos futuros serão aplicados níveis de decomposição de um a seis e outras famílias wavelets.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFPB pelo suporte financeiro e a CAPES e CNPq pelas bolsas concedidas para alunos envolvidos na pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- [1] E. Silva, A. Paula, J. Leite, J. Leite, L. Andrade, V. de Albuquerque, and J. Tavares, "Detection of the Magnetic Easy Direction in Steels Using Induced Magnetic Fields," *Metals (Basel)*, v. 6, no. 12, pp. 317, 2016.
- [2] E. Silva, L. Marinho, P. Filho, J. Leite, J. Leite, W. Fialho, V. de Albuquerque, and J. Tavares, "Classification of Induced Magnetic Field Signals for the Microstructural Characterization of Sigma Phase in Duplex Stainless Steels," *Metals (Basel)*, v. 6, no. 7, pp. 164, 2016.
- [3] E. M. Silva, W. M. L. Fialho, H. F. B. M. Silva, J. P. Leite, J. P. Leite, and A. V. G. Oliveira, "Sigma phase detection in duplex stainless steel by induced magnetic field," *J. Phys. Conf. Ser.*, v. 733, pp. 12070, 2016.
- [4] P. Wang, X. Ji, L. Zhu, G. Tian, and E. Yao, "Stratified analysis of the magnetic Barkhausen noise signal based on wavelet decomposition and back propagation neural network," *Sensors Actuators, A Phys.*, v. 201, pp. 421–427, 2013.
- [5] S. L. A. De Queiroz, "Wavelet transforms in a critical interface model for Barkhausen noise," *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, v. 77, no. 2, pp. 1–9, 2008.
- [6] T. Yamazaki, Y. Furuya, and W. Nakao, "Experimental evaluation of domain wall dynamics by Barkhausen noise analysis in Fe30Co70 magnetostrictive alloy wire," *J. Magn. Magn. Mater.*, v. 475, no. April 2018, pp. 240–248, 2019.
- [7] K. Miesowicz, W. J. Staszewski, and T. Korbiel, "Analysis of Barkhausen noise using wavelet-based fractal signal processing for fatigue crack detection," *Int. J. Fatigue*, v. 83, pp. 109–116, 2016.
- [8] E. de Macedo Silva, V. H. C. de Albuquerque, J. P. Leite, A. C. G. Varela, E. P. De Moura, and J. M. R. S. Tavares, "Phase transformations evaluation on a UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing," *Mater. Sci. Eng. A*, v. 516, no. 1–2, pp. 126–130, 2009.
- [9] P. G. Normando, E. P. Moura, J. a. Souza, S. S. M. Tavares, and L. R. Padovese, "Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel," *Mater. Sci. Eng. A*, v. 527, no. 12, pp. 2886–2891, 2010.
- [10] R. Magnabosco, "Kinetics of Sigma Phase Formation In a Duplex Stainless Steel 2. Experimental Procedure," *Mater. Res.*, v. 12, no. 3, pp. 321–327, 2009.
- [11] E. de Macedo Silva, J. P. Leite, F. a. de França Neto, J. P. Leite, W. M. L. Fialho, V. H. C. de Albuquerque, and J. M. R. S. Tavares, "Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel," *J. Test. Eval.*, v. 44, no. 3, pp. 20130313, 2016.
- [12] K. H. Lo and J. K. L. Lai, "Microstructural characterisation and change in a.c. magnetic susceptibility of duplex stainless steel during spinodal decomposition," *J. Nucl. Mater.*, v. 401, no. 1–3, pp. 143–148, 2011.