

Detecção de Constituinte Prejudicial em um Aço pela Aplicação da Decomposição Empírica de Modos

Emilly Duarte, Edgard Silva, Suzete Correia, Suelen Alencar e João Silva

Resumo— A análise do Ruído Magnético de Barkhausen tem sido realizada para acompanhamento de constituintes prejudiciais às propriedades de materiais ferromagnéticos. No presente trabalho a Decomposição Empírica de Modos é aplicada para a detecção do constituinte prejudicial sigma em um aço inoxidável. Ondas eletromagnéticas com frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz foram aplicadas em amostras sem e com 4% de fase sigma para a análise do ruído presente nas microestruturas. Os resultados mostram que a primeira função de modo intrínseco é eficaz na obtenção da informação do ruído do ensaio eletromagnético.

Palavras-Chave— *Decomposição Empírica de Modos, Ruído Magnético de Barkhausen, Ensaio Eletromagnético.*

Abstract— Barkhausen Magnetic Noise analysis has been carried out to monitor constituents harmful to the properties of ferromagnetic materials. Empirical mode decomposition has been applied to decompose complex signals into simpler components. In the present work this is applied to detect the harmful constituent sigma in a stainless steel. Samples both without and with 4% Sigma were used. Waves with frequencies of 5 Hz, 10 Hz, and 20 Hz were applied, and the noise analysis was compared with the microstructures. The results indicate that the first intrinsic mode function is effective in extracting information from the electromagnetic test noise.

Keywords— *Empirical Mode Decomposition, Barkhausen Magnetic Noise, Electromagnetic Test.*

I. INTRODUÇÃO

O Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é gerado pela interação entre o movimento das paredes dos domínios magnéticos e pontos de ancoragens da microestrutura do material, como contornos de grãos, presença de impurezas, precipitados, presença de novos constituintes, entre outros. O desprendimento dos domínios magnéticos ao tentarem passar por essas descontinuidades da estrutura causam o ruído. A análise do RMB é usada em ensaios eletromagnéticos não destrutivos para obter informações do material, como estado de tensões, presença de tratamentos térmicos, variação de dureza, formação de constituintes prejudiciais e presença de trincas, por exemplo [1-8].

A imposição de ciclos térmicos nos materiais, como em processos de soldagem, leva a alterações microestruturais que mudam a sua permeabilidade magnética, o que torna atrativo a aplicação de ensaios eletromagnéticos. Tais ensaios são aplicados para detecção de tensões mecânicas residuais, formação de novos constituintes, presença de tratamentos térmicos e evolução de trincas em materiais [5-7].

O aço inoxidável duplex possui boas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão e é aplicado no setor de petróleo e gás, metal mecânico em linhas de produção industriais e tubulações. Contudo, quando submetidos a temperaturas acima de 550 °C, suas propriedades são comprometidas devido à formação de um constituinte paramagnético denominado sigma. Esse constituinte possui dureza em torno de 1000 HV e um alto teor de cromo, o que empobrece o material e compromete sua resistência mecânica e à corrosão [1-2].

O RMB traz a informação sobre a condição do material e sua obtenção pode ser feita mediante a aplicação de uma onda eletromagnética, por uma bobina emissora. A detecção do sinal resultante da interação da onda eletromagnética com o material é realizada através de uma bobina receptora. Tradicionalmente, para a análise do RMB é empregado o valor da Raiz Média Quadrática (RMS), considerando o ruído como função do tempo. Entretanto, essa abordagem considera a influência da variação das amplitudes da onda principal, de modo que a análise não leva em conta apenas o ruído. Para sanar esse problema, outras técnicas têm sido empregadas para a análise do RMB, como as Transformadas de Fourier e Wavelets [1-4].

Embora a Transformada de Fourier de Tempo Curto (*Short Time Fourier Transform* - STFT) permita realizar esse tipo de análise, ela fornece uma abordagem limitada devido ao seu janelamento fixo. A Transformada Wavelet é uma alternativa para superar essa limitação da transformada de Fourier, pois apresenta características que a fazem se moldar às frequências do sinal, proporcionando uma janela de tamanho variável. No entanto, seus filtros pré-definidos, mediante sua função base, denominada wavelet mãe, pode ocasionar uma longa busca para encontrar a família wavelet ideal para análise do sinal [9].

A Decomposição Empírica de Modos (EMD, do inglês *Empirical Mode Decomposition*) é uma etapa da análise da Transformada de Hilbert-Huang (THH), e se destaca das técnicas de Fourier e Wavelet por ser um método de análise tempo-frequência adaptativo, aplicável a processos não-lineares e não-estacionários, em que suas funções de base derivam do próprio sinal [9].

No presente trabalho, um ensaio eletromagnético é utilizado para detecção da presença do constituinte prejudicial sigma, em aço inoxidável duplex, através da análise do RMB. Diferentes ondas emissoras são impostas ao material, com e sem a presença de sigma, e as ondas resultantes da interação têm seu ruído analisado através da EMD.

A organização do trabalho está disposta da seguinte forma: na Seção II é apresentada a Metodologia do trabalho, onde é abordado a transformada de Hilbert-Huang e sua aplicação no RMB; na Seção III são mostrados os resultados e discussões. As conclusões do trabalho podem ser vistas na Seção IV.

Emilly Duarte, Unidade Acadêmica 3, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, e-mail: emilly.josy@academico.ifpb.edu.br; Edgard Silva, Unidade Acadêmica 3, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, e-mail: edgard@ifpb.edu.br; Suzete Correia, Unidade Acadêmica 3, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, e-mail: suzete@ifpb.edu.br; Suelen Alencar, Unidade Acadêmica 3, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, e-mail: suelen.carvalho@academico.ifpb.edu.br; João Silva, Unidade Acadêmica 3, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, e-mail: silvajbo@ifpb.edu.br.

II. METODOLOGIA

A metodologia proposta nesta pesquisa para detecção de microestruturas prejudiciais de fase sigma em materiais ferromagnéticos se baseia na análise do RMB a partir da Decomposição Empírica de Modos. A primeira seção tratará da obtenção da base de dados. Em seguida, será abordado o processamento dos sinais mediante a EMD, os quais são decompostos em funções de modo intrínseco (IMF, do inglês *Intrinsic Mode Functions*). Posteriormente, cada IMF é submetida à Transformada de Fourier e ao cálculo da Raiz Média Quadrática (RMS).

A base de dados utilizada foi elaborada e disponibilizada pelo laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais (GSCMat) do IFPB. Para captura do RMB foram realizados ensaios eletromagnéticos não destrutivos (END), capazes de detectar fases prejudiciais em materiais ferromagnéticos, através de um método comparativo, onde se realiza o teste em uma região da peça afetada e comparam-se seus resultados com os obtidos em outra região não afetada. Nesse experimento, Carvalho Filho [10] utilizou um sensor de Efeito Hall para detectar as variações microestruturais do aço inoxidável AID SAF 2205, em duas amostras de formatos circulares, com diâmetro de 24 mm e espessura de 8 mm.

Embora o ensaio tenha sido realizado com amostras de formatos específicos, é importante salientar que o teste pode ser aplicado em peças de diferentes configurações, visto que o sensor de Efeito Hall opera com base na permeabilidade magnética do material, a qual não é afetada pela geometria da peça [2].

A bancada experimental desenvolvida para ensaios eletromagnéticos, é composta por dois módulos principais. O primeiro, é o módulo de emissão dos sinais, que inclui um gerador de funções e uma bobina emissora, posicionada no centro de uma das faces do corpo de prova, com a finalidade de gerar uma densidade de fluxo magnético no material. O segundo, é o módulo de aquisição dos sinais, que consiste em um sensor de Efeito Hall, posicionado no centro da outra face do corpo de prova, com o objetivo de capturar os sinais resultantes do ensaio, provenientes da interação entre a onda emissora e o material. Esse módulo também é composto por uma placa de aquisições e um computador.

A bobina utilizada possui dimensões de 19,5 mm de comprimento e é composta por 6000 espiras de fios de cobre esmaltado de calibre nº 38. Ela envolve um núcleo de aço AISI 4140. O sensor selecionado é o modelo SS495A da Allegro Microsystems, um sensor de Efeito Hall linear, o qual possui sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss e opera com uma faixa de tensão de alimentação entre 0 e 10 V. No experimento, ele foi alimentado com uma tensão contínua de 5 V. A configuração da bancada experimental pode ser observada na Figura 1.

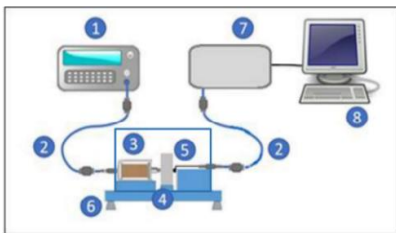


Fig. 1. Configuração experimental: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador [11].

Durante o ensaio, uma amostra permaneceu como recebida, sem tratamento térmico, e a outra foi envelhecida em um forno de resistência a uma temperatura de 850 °C durante um tempo de 15 minutos, e posteriormente resfriada em água. Essas amostras foram preparadas por etapas de lixamento, polimento e ataque químico com reagente KOH 10% e analisadas por microscopia óptica.

Na sequência, as amostras foram postas na bancada de teste, uma por vez, e submetidas às ondas senoidais com frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz, e amplitude de 2 V. Esses parâmetros foram escolhidos, tomando como base os resultados obtidos por Lins [11], que concluiu que a melhor região de frequência para a análise do RMB ocorre com as frequências de 5 Hz; 10 Hz e 15Hz, assim como, a melhor região de amplitude de medida é na faixa de 1 V a 2 V.

Para cada sinal foi captada sua resposta da interação com o material, a uma aquisição de 1000 pontos a cada 1 ms. Primeiro, foram capturados os sinais para a condição sem envelhecimento térmico, variando-se as frequências, de modo a coletar 50 sinais para cada frequência, quantidade essa suficiente para garantir a confiabilidade do teste. Posteriormente, repetiu-se o procedimento para a condição com envelhecimento térmico, totalizando 300 sinais.

A partir dos sinais obtidos, realizou-se a etapa de processamento desses por meio da Transformada de Hilbert-Huang, a qual é composta por duas etapas fundamentais: a decomposição empírica de modos do sinal original em funções de modo intrínseco e a análise do espectro resultante da Transformada de Hilbert, que calcula a frequência instantânea de cada IMF [9].

A Transformada de Hilbert ($y(t)$) de um sinal $x(t)$ é definida como:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau, \quad (1)$$

em que P representa o valor principal de *Cauchy*.

Após a obtenção de $y(t)$, o sinal analítico pode ser estabelecido como:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)}, \text{ em que } i = \sqrt{-1}, \quad (2)$$

$$a(t) = [x(t)^2 + y(t)^2]^{\frac{1}{2}} \text{ e } \theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right), \quad (3)$$

sendo $a(t)$ a amplitude e $\theta(t)$ a fase instantânea. Isto posto, a frequência instantânea $f(t)$ é escrita da seguinte forma:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}. \quad (4)$$

A EMD é um método intuitivo, direto e adaptativo, que tem como objetivo identificar empiricamente todos os modos de oscilação presentes em um sinal, utilizando suas propriedades locais. O sinal é decomposto em componentes com base nessas particularidades locais, e posteriormente é aplicado a Transformada de Hilbert-Huang para extrair informações relevantes sobre a dinâmica do sinal [12].

Desse modo, a EMD permite decompor sinais complexos em componentes mais simples, cada um representando uma oscilação específica, onde cada IMF apresenta características na amplitude, tempo e frequência. Sendo assim, espera-se que a decomposição dos sinais coletados possa separar em IMFs distintas a frequência fundamental do sinal estudado e o conteúdo do ruído característico do RMB.

Para a concepção da IMF, faz-se necessário satisfazer duas condições:

- O número de extremos e o número de cruzamentos por zero devem ser iguais ou diferir apenas por uma unidade, para um dado conjunto de dados;
- A média local em qualquer ponto da envoltória definida pelos pontos de máximos e de mínimos locais deve ser zero.

Uma IMF pode ser obtida por meio do procedimento descrito a seguir, chamado de peneiramento (ou, em inglês, *sifting*) [13].

Inicialmente identificam-se todos os pontos de máximos e mínimos locais do sinal. Posteriormente, realiza-se uma interpolação cúbica conectando todos os pontos de máximos locais, obtendo-se uma envoltória superior. Para formar a envoltória inferior, repete-se o procedimento de interpolação, mas dessa vez para os pontos de mínimos locais.

Após a interpolação, obtém-se a média $m_1(t)$ entre os envelopes superior e inferior:

$$m_1(t) = \frac{E_{sup}(t) + E_{inf}(t)}{2}. \quad (5)$$

A primeira componente, $h_1(t)$, é obtida mediante a diferença entre o sinal a ser decomposto $x(t)$ e a média $m_1(t)$, conforme apresentado:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t). \quad (6)$$

A Figura 2 apresenta o procedimento de decomposição empírica de modos aplicada a um sinal aleatório. De modo que as envoltórias superior e inferior, obtidas a partir da interpolação dos máximos e mínimos, estão destacadas na cor magenta. A linha azul corresponde à média resultante das duas envoltórias. O sinal analisado está na cor verde.

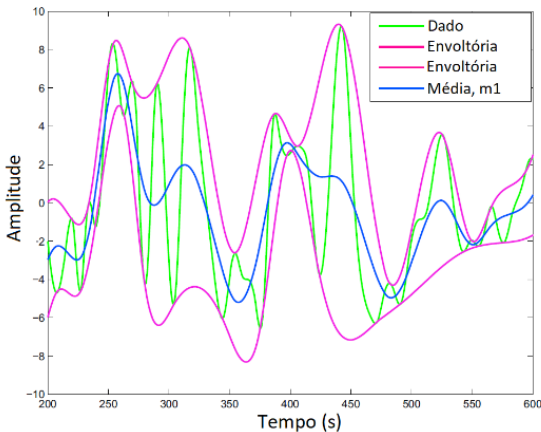


Fig. 2. Decomposição de modo empírico aplicada a um sinal [13].

De acordo com Huang et al. [9], para $h_1(t)$ ser considerado uma IMF o sinal não pode apresentar nenhum máximo local abaixo de zero ou um mínimo local acima de zero. Caso contrário, o processo de peneiramento deve ser repetido até que o componente satisfaça os critérios necessários para ser considerado uma IMF, como segue:

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t), \quad (7)$$

em que h_1 é considerado uma IMF primitiva e m_{11} é a média dos envelopes inferior e superior de h_1 . De forma geral, tem-se:

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t). \quad (8)$$

Se o critério de parada for alcançado, obtém-se a primeira IMF:

$$c_1(t) = h_{1k}(t). \quad (9)$$

Sendo assim, c_1 pode ser retirada do sinal original:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (10)$$

Caso o resíduo r_1 ainda possua informações do sinal em análise, considera-se esse resíduo um novo dado e o processo de peneiramento é iniciado novamente, n vezes, até que r_n se torne uma função monótona, com um único máximo e mínimo, de forma que nenhuma IMF possa ser obtida do sinal residual [14-16].

Assim sendo, para os sinais em análise, aplicou-se a EMD em cada um deles, com a finalidade de obter as IMFs. Como o algoritmo do método da EMD, que pode ser observado na Figura 3, garante que qualquer sinal $x(t)$ possa ser decomposto em um número finito de n iterações gerando suas IMFs, formando uma base de expansão adaptável obtida a partir do próprio sinal, nesta primeira etapa optou-se por não fixar a quantidade de IMFs a serem decompostas, e observar qual era o número máximo que cada sinal poderia ser decomposto. A Figura 3 exhibe o algoritmo EMD.

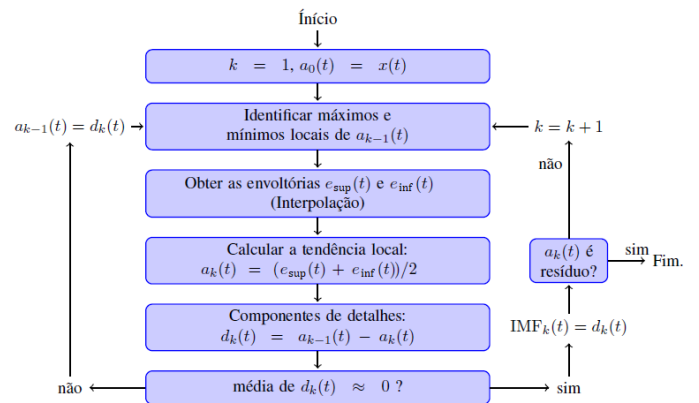


Fig. 3. Fluxograma do algoritmo do método EMD [17].

O sinal $x(t)$ pode ser reconstruído como a soma de n IMFs e um resíduo r_n , como pode ser observado na Equação 11 [14].

$$x(t) = \sum_{k=1}^n c_k(t) + r_n(t). \quad (11)$$

Para analisar as propriedades das componentes de frequência de cada IMF, foi calculado a FFT para cada uma delas.

O algoritmo foi parametrizado para que a decomposição ocorresse até a terceira IMF, visto que é suficiente para observar o ruído do sinal. O parâmetro utilizado para mensurar o RMB foi o RMS com um intervalo de confiança de 95%, calculado em cada IMF, conforme a Equação 12.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad (12)$$

em que, N é o número do elemento na sequência de medição e x_i corresponde as amplitudes do RMB.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4(a) apresenta o material em seu estado inicial, o qual é caracterizado pela presença de uma matriz ferromagnética, designada como ferrita, intercalada por ilhas de um constituinte paramagnético, denominado austenita. Quando esse material é submetido a tratamentos térmicos acima de 550°C, ocorre a decomposição da ferrita, resultando na formação de constituintes da fase sigma, que se manifestam como precipitados paramagnéticos, conforme evidenciado na Figura 4(b). Essa transformação culmina na redução da permeabilidade do material. Contudo, é importante salientar que uma concentração de apenas 4% desse constituinte é capaz de comprometer significativamente a tenacidade e a resistência à corrosão do material. Tal concentração pode ser alcançada ao expor o material a uma temperatura de 850°C por um período de 15 minutos [1-4].

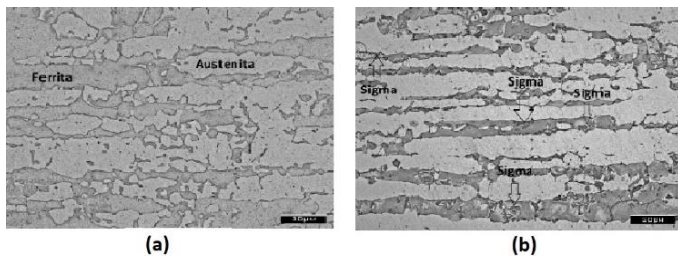


Fig. 4. Ataque químico KOH 10 %: (a) material como recebido, (b) material tratado a 850 °C por 15 min.

As regiões em cinza escuro na Figura 4(b), são denominadas de ferrita, e são nelas que ocorre a formação do constituinte sigma, que é prejudicial ao material. A formação do constituinte paramagnético sigma altera a permeabilidade do material, e a aplicação de ensaios eletromagnéticos passam a ser atrativos para o acompanhamento desse constituinte prejudicial.

A interação entre uma onda eletromagnética e o material faz com que o movimento das paredes dos domínios magnéticos interaja com pontos de ancoragem, como contornos de grãos e precipitados, gerando o ruído magnético de Barkhausen, que traz a informação da mudança microestrutural do material e serve para inspeções preventivas de estruturas, bem como a análise de procedimentos de soldagem, se foram realizados corretamente, e assim evitar rompimentos de tubulações e riscos de desastres ecológicos [1-5].

As análises do Ruído Magnético de Barkhausen para as amostras com e sem formação de fase sigma foram realizadas por Decomposição Empírica de Modos. As Figuras 5 e 6 ilustram a decomposição dos sinais coletados das amostras com e sem tratamento térmico, respectivamente, ambas submetidas a uma frequência de 5 Hz e amplitude de 2 V

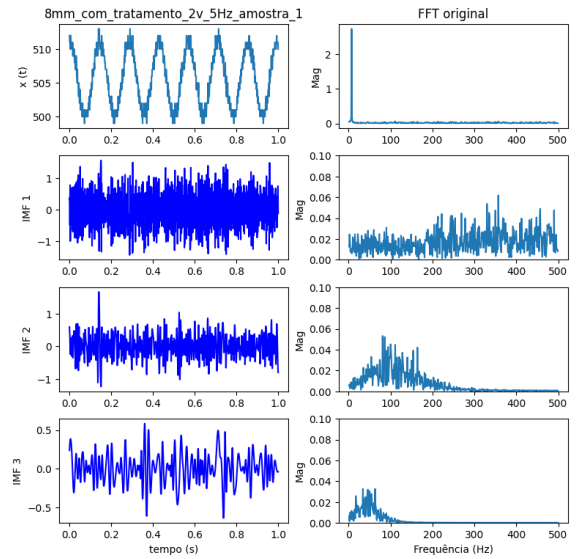


Fig. 5. Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 5 Hz e amplitude de 2 V.

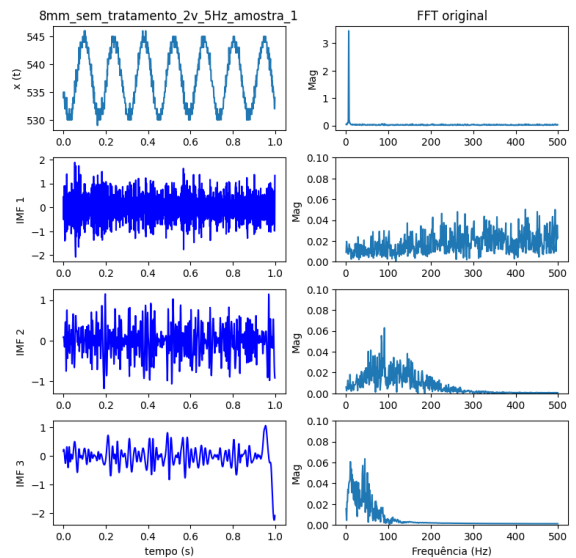


Fig. 6. Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 5 Hz e amplitude de 2 V.

Analisando a decomposição dos sinais coletados juntamente com seus espectros de Fourier, para cada IMF, percebeu-se que apenas a primeira IMF já apresentava as informações necessárias à análise do RMB. As transformadas de Fourier para as segundas IMFs mostram a influência das baixas frequências, indicando a presença dos harmônicos da onda principal sendo predominantes. Assim, as primeiras IMFs foram escolhidas para análise do ruído magnético de Barkhausen, através do ensaio eletromagnético não destrutivo aplicado. Deste modo, ondas senoidais de frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz foram aplicadas para a detecção de sigma.

O gráfico da Figura 7 exhibe a média dos 50 valores de RMS obtidos em cada uma das 3 condições de variação de frequência e de configuração de amostra (com ou sem sigma), disposto em função da frequência da onda emissora com amplitude de 2 V. Verifica-se que o RMB contido no primeiro nível de decomposição da EMD, IMF 1, foi suficiente para caracterizar as condições com e sem formação de fase fragilizante sigma.

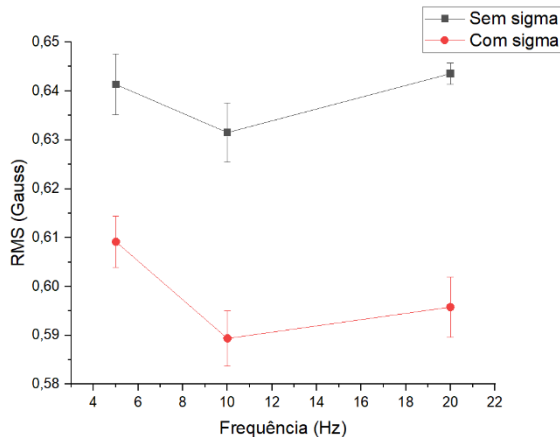


Fig. 7. Variação do RMS em função da frequência da onda emissora com amplitude de 2 V, para as condições com e sem formação de fase sigma.

Ademais, percebe-se que a condição com fase fragilizante apresenta valores RMS inferiores aos das amostras como recebido, sem formação de precipitados. Isso indica que a amplitude da onda aplicada não foi suficiente para que as paredes dos domínios magnéticos conseguissem vencer as barreiras impostas pelos pontos de ancoragem do material com fase sigma, resultando em um baixo RMB. Além disso, o paramagnetismo do constituinte sigma tem sua contribuição.

A aplicação da decomposição empírica de modos mostrou ser eficaz para detecção do constituinte sigma em um aço inoxidável duplex. Separando na primeira decomposição o ruído magnético de Barkhausen necessário para extrair a informação dos 4 % da fase prejudicial, apontando assim para uma metodologia capaz de monitoramento de estruturas no setor de petróleo e gás tanto de inspeção preventiva como para inspeção de estruturas sujeitas a processo de soldagem.

O presente estudo demonstrou que os resultados obtidos estão em consonância com os encontrados por Lins [11], que empregou as mesmas configurações de ensaio e de amostras, porém diferenciou-se ao analisar os sinais adquiridos, submetendo-os à FFT e aplicando cortes de frequências. Além disso, Lins [11] utilizou o RMS como indicador para detectar a presença da fase sigma, observando que os valores de RMS, nas amostras que continham a fase sigma, eram menores quando comparados ao material sem tratamento térmico. Essa redução do RMS ocorreu, provavelmente, devido aos movimentos das paredes dos domínios magnéticos serem bloqueados pela presença da fase sigma. No entanto, ao contrastar os valores RMS derivados da EMD com os obtidos via FFT, notou-se que a EMD provou ser mais eficaz, por apresentar uma maior diferença entre os valores RMS resultantes das situações com e sem a formação da fase prejudicial sigma.

IV CONCLUSÕES

A análise do Ruído Magnético de Barkhausen pela análise empírica de modos mostrou ser capaz de detectar a presença da

quantidade de precipitado do constituinte sigma em aço inoxidável duplex. A decomposição com a primeira IMF foi suficiente para separar o ruído a ser analisado.

Os valores de RMS, para a condição com a presença do constituinte sigma, mostraram-se inferiores para as frequências estudadas. Isso indica que a presença dos precipitados dificulta o movimento das paredes dos domínios magnéticos, reduzindo, conseqüentemente, o ruído gerado.

REFERÊNCIAS

- [1] S. S. M. Tavares, L. F. Noris, J. M. Pardo, e M. R. da Silva, "Temper embrittlement of supermartensitic stainless steel and non-destructive inspection by magnetic Barkhausen noise", *Engineering Failure Analysis*, v. 100, pp. 322–328, 2019.
- [2] E. M. Silva, A. M. R. Paula, J. P. Leite, L. S. S. Andrade, V. H. C. Albuquerque, e J. M. R. S. Tavares, "Detection of the Magnetic Easy Direction in Steels Using Induced Magnetic Fields", *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, v. 6, n. 12, p. 317, 2016.
- [3] Y. Deng, Z. Li, J. Chen, e X. Qi, "The effects of the structure characteristics on Magnetic Barkhausen noise in commercial steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 451, pp. 276–282, 2018.
- [4] R. Silva, C. L. Kugelmeier, G. S. Vacchi, C. B. Martins Junior, I. Dainezi, C. R. M. Afonso, A. A. Mendes Filho, e C. A. D. Rover, "A comprehensive study of the pitting corrosion mechanism of lean duplex stainless steel grade 2404 aged at 475 °C", *Corrosion Science*, v. 191, pp. 109–738, 2021.
- [5] X. Xu, S. Wessman, J. Odqvist, S. M. King, e P. Hedstrom, "Nanostructure, microstructure and mechanical properties of duplex stainless steels 25Cr-7 Ni and 22Cr-5Ni (wt.%) aged at 325 °C", *Materials Science & Engineering A*, v. 754, pp. 512–520, 2019.
- [6] S. S. M. Tavares et al., "Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 322, n. 17, pp. L29–L33, 2010.
- [7] F. Qiu, M. Jovicevic-Klug, G. Tian, G. Wu, e J. Mccord, "Correlation of magnetic field and stress-induced magnetic domain reorientation with Barkhausen Noise", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 523, 2021.
- [8] A. Stupakov, A. Pereverton, e M. Neslusan, "Reading depth of the magnetic Barkhausen noise. I. One-phase semi-hard ribbons", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 513, 2020.
- [9] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, e H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis." *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical AND Engineering Sciences*, v. 454, no. 1971, pp. 903–995, 1998.
- [10] J. A. de C. Filho, "Ensaio Eletromagnético Baseado no Ruído de Barkhausen para acompanhamento de Transformações Microestruturais", Dissertação de Mestrado. Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- [11] R. S. de A. T. Lins, "Ensaio Eletromagnético para Análise do Ruído de Barkhausen por Meio de um Sensor de Campo Magnético", Dissertação de Mestrado, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.
- [12] L. G. N. Martins et al., "Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang em dados de velocidade medidos em túnel de vento", *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM. Ciência e Natura*, v. 40, pp. 266 – 271, 2018.
- [13] F. L. Santos, P. C. M. A. Farias, E. F. de S. Filho, M. C. S. Albuquerque, I. C. Silva, e C. T. Farias, "Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang em um Sistema Inteligente de Classificação de Sinais de Ensaios Não Destrutivos por Ultrassom", *Anais do 14. Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional*, 2020.
- [14] F. R. Cesário, F. A. Moreira, W. A. Neves, and A. L. Neri Jr, "Análise Comparativa na Detecção de Falta: Transformada Wavelet e Transformada de Hilbert-Huang", *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, v. 2, 2020.
- [15] N. E. Huang, Z. Shen e S. R. Long. "A new view of nonlinear water waves: The hilbert spectrum", *Annu Rev Fluid Mech*, v. 31(1), pp. 417–457, 1999.
- [16] N. E. Huang, M. L. C. Wu, S. R. Long, S. S. Shen, W. Qu, P. Gloersen e K. L. Fan, "A confidence limit for the empirical mode decomposition and hilbert spectral analysis", *P Roy Soc Lond A Mat*, v. 459(2037), pp. 2317–2345, 2023.
- [17] V. J. D. Vieira, "Análise de Variações Acústicas Não Estacionárias e seu Efeito na Detecção de Múltiplas Emoções e Condições de Estresse", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.