Processamento de sinais de ruído da interação entre campo magnético e material para acompanhamento da fragilização em um aço

Edgard M. Silva, Mickael M. R. Silva, Eloy M. Silva, Bruno R. Araújo, Louise G. Lima, José A. C. Filho, José H. B. Barreto

***Resumo*— Este artigo analisa, através de processamento de sinais, a interação entre densidade de fluxo magnético e um material submetido a diferentes condições de tratamento. O objetivo é estudar o ruído gerado dessa interação e correlacioná-lo com o grau de fragilização do material. Um aço inoxidável duplex SAF 2205 é utilizado. Os sinais são analisados através de FFT e correlacionados com valores de energia absorvida por impacto. Os resultados mostram que as distribuições de frequências dos sinais de FFT acompanham a formação da fase que fragiliza o material e que os valores médios das amplitudes de frequências servem como parâmetro de monitoramento.**

Palavras-Chave*— *Processamento de sinais, Densidade de fluxo magnético, Fragilização.

***Abstract*— This article analyzes, through signal processing, the interaction between magnetic flux density and a material submitted to different treatment conditions. The objective is to study the generated noise of this interaction and correlate it with the degree of embrittlement of the material. A duplex stainless steel SAF 2205 is used. Signals are analyzed through FFT and correlated with values of absorbed energy by impact test. The results show that the frequency distributions of the FFT signals accompany the formation of the phase that embrittle the material and that the average values of the frequency amplitudes serve as a monitoring parameter.**

Keywords*— *Signal processing, Magnetic flux density, Embrittlement.

I. INTRODUÇÃO

Transformações microestruturais em matérias devido à formação de novas fases levam a mudança da permeabilidade do meio. A interação entre campo magnético e material vem sendo estudada para acompanhamento da formação dessas fases. Várias técnicas vêm sendo utilizadas, como correntes parasitas, estudo de permeabilidade, bem como análise de ruído de Barkhausen [1]–[7].

Aços inoxidáveis duplex, quando submetidos a aquecimentos na faixa de temperatura de 300 a 550ºC, sofrem fragilização devido a formação de partículas uniformemente distribuídas no interior do material [8]–[10].

A formação de ruídos durante a interação entre campo e material vem sendo objeto de vários estudos. Estudos baseados em FFT, *wavelet* e dimensão fractal de sinais vêm sendo aplicados para acompanhamentos da formação de novas fases dentro do material quando estes são submetidos a variações de ciclos térmicos [7], [11]–[13].

No presente trabalho, uma onda de forma triangular é aplicada na bobina de excitação e imposta para percorrer um material. Uma segunda bobina (bobina leitora) com núcleo de aço SAE 1006 é posicionada na face oposta do material, de modo a poder medir o campo induzido nela. O material a ser estudado possui, nas condições de estudo, a formação de partículas manométricas finamente dispersas no seu interior. A presença dessas partículas interage com o movimento das paredes dos domínios magnéticos e geram um ruído que é processado para obter informação da microestrutura do material.

II. METODOLOGIA

Um sistema de medição experimental capaz de monitorar de modo não-destrutivo a influência da formação de fases fragilizantes nas propriedades magnéticas dos aços deve ser capaz de realizar duas ações: provocar a magnetização do material e monitorar o comportamento magnético do material inspecionado.

Neste trabalho, visando realizar simultaneamente as duas ações citadas acima, foi desenvolvido um sensor magnético que consiste de uma amostra de material ferromagnético colocada entre duas bobinas idênticas. Essas bobinas foram construídas com 6000 espiras de fios de cobre esmaltado nº 38 enroladas sobre um núcleo do aço SAE 1006. Uma das bobinas foi denominada de bobina de excitação e é responsável pela magnetização do material, enquanto que a outra foi chamada de bobina leitora e foi útil no acompanhamento do comportamento magnético do material da amostra.

A bobina de excitação foi magnetizada através da aplicação de uma tensão alternada triangular em seus terminais, enquanto que o campo magnético variável produzido no material da amostra induzirá uma tensão na bobina leitora, a partir da qual podem ser obtidas informações sobre as características magnéticas do material e sua relação com a formação de fases fragilizantes na microestrutura do mesmo.

Para a magnetização da bobina de excitação e a captura da tensão induzida na bobina leitora foram utilizados nesse processo os seguintes equipamentos: gerador de sinais, sensor magnético e osciloscópio digital.

O gerador de sinais será utilizado para fornecer ondas de excitação triangulares ao sistema de medição. O osciloscópio

fará a captura do sinal da tensão induzida na bobina leitora. Na Figura 1 tem-se a disposição das amostras entre as bobinas.

Cinco sinais foram adquiridos por um intervalo de 2 s para cada condição de tratamento. Uma corrente que gerasse uma intensidade de campo magnético de 550 A/m foi utilizada.

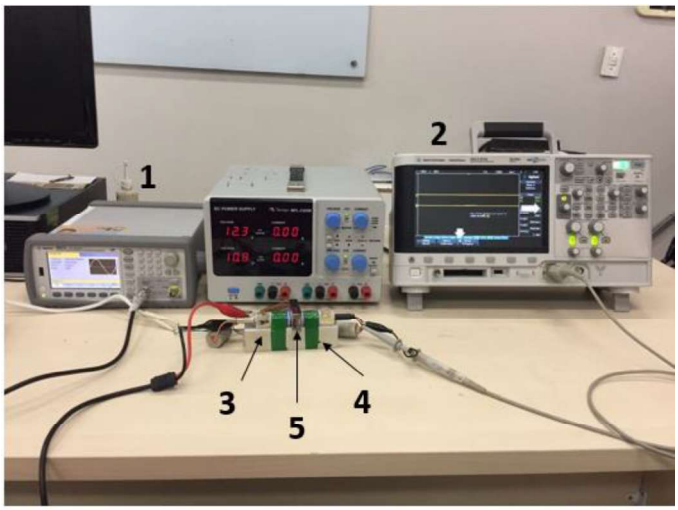

Fig. 1. Esquemático das medições. Gerador de onda (1), osciloscópio (2), bobina de excitação (3), bobina leitora (4), amostra de aço (5).

O ensaio Charpy [14] foi feito com o objetivo de avaliar a capacidade de absorver energia por impacto do aço como recebido e nas condições de envelhecimento operadas. As amostras foram obtidas de acordo com a Norma NBR 6157/1980 da ABNT nas dimensões 55x10x2,5mm. Foram usinados 3 corpos de prova (CP) para cada tempo de envelhecimento (0h, 12h, 24h, 50h, 100h), totalizando 15, todos submetidos a uma temperatura de tratamento de 475ºC. Os ensaios foram realizados em uma Máquina Universal para Ensaios de Materiais, tipo PW 30/15K, da marca AMSLER.

A microestrutura da amostra recebida foi analisada por microscopia ótica utilizando um microscópio ótico do tipo Zeiss. As amostras foram preparadas, polidas e submetidas ao ataque por reagentes com Glicerina, ácido clorídrico e ácido nítrico na proporção de 3:2:1.

Durante o tratamento térmico as amostras experimentaram variação no comportamento do endurecimento mecânico. Esta variação foi determinada através de medidas de dureza do tipo ROCKWELL-C (cone de diamante de 120º e carga de 150kgf), para todas as condições de tratamento térmico, de acordo com a Norma NBRNM146-1 da ABNT, utilizando um Durômetro da Mitutoyo, referência 963-10Z.

Todas as medições realizadas foram obtidas com um intervalo de confiança de 95%.

Amostras do aço inoxidável duplex (AID) SAF 2205 foram tratadas com o objetivo de obter diferentes quantidades de fases fragilizantes. Essas amostras foram submetidas previamente a tratamentos térmicos na temperatura de 475 °C com tempos de envelhecimento de 0, 12, 24, 50 e 100 horas. A espessura das amostras usadas foi de 8 mm.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A micrografia do aço inoxidável duplex como recebido é apresentada na Figura 2, onde se observa a presença das fases austenita e ferrita e o alongamento dos grãos devido à laminação.

As transformações que ocorrem em função da temperatura e tempo de envelhecimento para os aços inoxidáveis duplex indicam duas regiões distintas, uma para temperatura acima de 600ºC, correspondente à formação das fases Cr_2N, χ,σ, e outra para temperaturas mais baixas, onde se destaca a fragilização à 475ºC [3], [8]–[10]. A fase formada durante o tratamento na temperatura de 475ºC é finamente dispersa no interior da fase ferrita e tem tamanho manométrico, ou seja, para os tempos de tratamento empregado ela pode ser somente observada somente por Microscopia eletrônica [9], [10]. Contudo, o seu efeito fragilizante é sentido nas medidas de energia absorvida por impacto, que indicam o nível em que o material passou a ser frágil [1], [10].

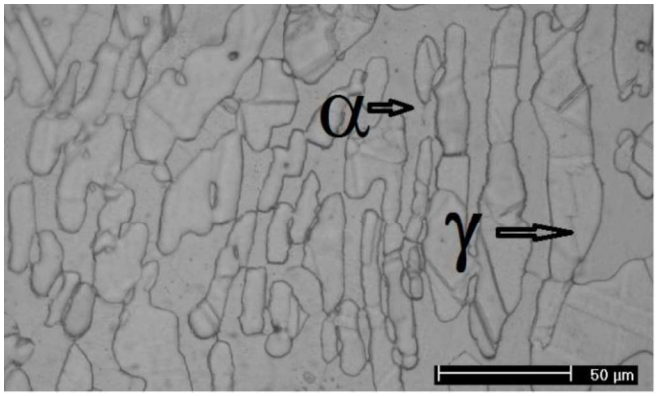

Fig. 2. Microscopia ótica da estrutura do AID como recebido, aumento 1000X, onde α é a fase ferrita e γ a austenita.

A Figura 3 mostra o gráfico tensão contra tempo obtido na bobina, para o material na condição inicial. Observa-se a presença de ruído proveniente da interação entre campo e material.

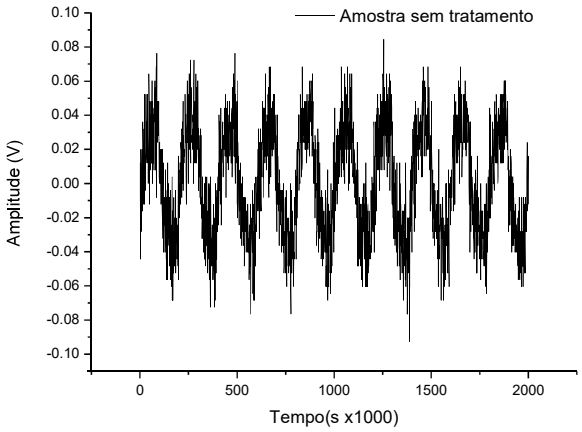

Fig. 3. Variação da tensão induzida na bobina leitora.

A Figura 4 mostra os espectros obtidos por FFT das amostras tratadas nas diferentes condições. Nota-se que com o aumento do tempo de tratamento, que produz uma quantidade maior de fases fragilizante, a distribuição de frequência muda com a formação das partículas no material.

A variação no espectro se deve à formação das partículas fragilizantes no interior do material. Na faixa de tratamento estudado, ocorre somente a formação de uma fase denominada de α`, que é formada a partir da decomposição da fase ferrita α

[1], [8], [10]. À medida que a fase é consolidada, ocorre a redução das amplitudes das frequências. Isto se deve ao bloqueio à movimentação das paredes dos domínios magnéticos imposto pela presença de α` que se espalha uniformemente dentro do material e completa a formação para tempos superiores a 24 horas.

Análise de ruído provenientes da interação entre campo e material vem sendo utilizados para acompanhar a formação de fases em matérias, sendo aplicada análise por FFT, *wavelet* e comportamento fractal de sinais, indicando como ferramentas para caracterização de mudanças microestruturais nos materiais. [7], [11]–[13].

A partir da análise da Figura 4, o valor médio de amplitude foi escolhido para ser utilizado como parâmetro para acompanhamento do surgimento da nova fase e correlação com os resultados de dureza e energia absorvida por impacto.

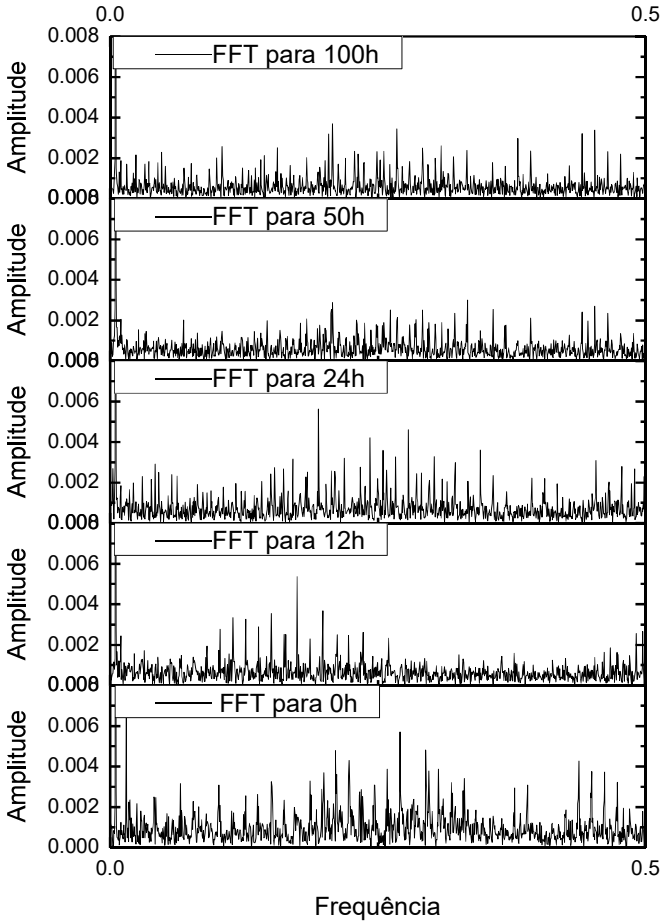

Fig. 4. Transformada rápida de Fourier (FFT) para os diferentes tempos de envelhecimento do material.

A Figura 5 mostra a variação das medidas de dureza e energia absorvida por impacto das amostras tratadas. Nota-se que para tempos de 24 horas de tratamento, o endurecimento do material devido à formação da fase α`, já é suficiente para reduzir a capacidade de absorver energia em torno de 40%, em relação a condição inicial. Os valores de energia absorvida tendem a um patamar, pois o material acima de 50 horas já se encontra na condição de fragilidade, ou seja, apesar dos resultados de dureza apresentarem ainda um aumento de endurecimento do material, a quantidade de fase α` já é suficiente para deixar o material na capacidade mínima de energia absorvida.

Na Figura 6 são mostradas as variações nos valores médios de medidas de amplitude dos sinais tirados dos espectros da FFT das amostras tratadas, em função da energia absorvida por impacto e tempo de tratamento. As curvas de amplitude e energia apresentaram um comportamento similar. Isto indica que o parâmetro escolhido serve para acompanhar a formação da fase fragilizante na temperatura de estudo. Estudos realizados através de medidas de permeabilidade magnética para esses aços têm mostrado que a formação da fase α`, além de bloquear o movimento das paredes dos domínios magnéticos, reduz a amplitude de tensão devido a fase ser paramagnética e se transformar a partir de uma ferromagnética que é a ferrita, reduzindo assim, o ferromagnetismo do material [1], [3], [8], [9]

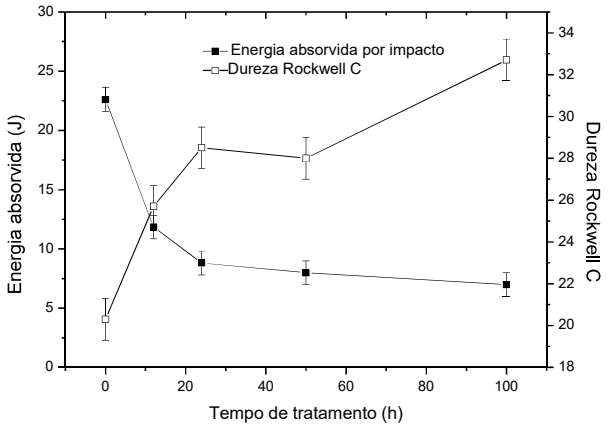

Fig. 5. Variação das medidas de dureza e energia absorvida por impacto, em função do tempo de tratamento.

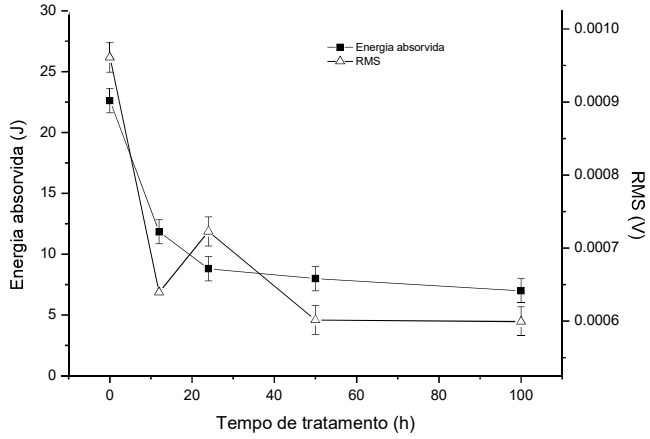

Fig. 6. Variação nas medidas de amplitudes dos sinais de FFT, em função da energia absorvida por impacto e o tempo de tratamento.

Este estudo mostrou que o processamento do ruído gerado da interação entre campo e material traz informações importantes sobre a microestrutura do material e que pode-se tirar desse parâmetro para acompanhar as transformações de fases que ocorrem no material. A característica da fase formada pode levar a comprometimento da energia absorvida pelo material e tornar o material frágil. O estudo apresentado

mostrou que a amplitude média dos picos da FFT servem para o acompanhamento da fase fragilizante do material estudado.

IV. CONCLUSÕES

O presente trabalho estudou o processamento do ruído gerado da interação entre campo magnético e material, de modo a obter parâmetro para acompanhamento de fase fragilizante em um aço inoxidável duplex, chegando às seguintes conclusões:

A formação da fase fragilizante provocou variações nos espectros da FFT, de modo que, a distribuição de amplitude e frequências mudou com o tempo de tratamento. Este efeito foi associado às partículas formadas serem finamente dispersas dentro do material e dificultarem a movimentação das paredes dos domínios magnéticos. O valor médio de amplitude das frequências da FFT mostrou ser um parâmetro capaz de acompanhar a fragilização do estudado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro dado pelo CNPq e o Instituto Federal da Paraíba.

Referências

[1] 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., vol. 44, no. 3, p. 20130313, 2016.

[2] A. Ktena, E. Hristoforou, G. J. L. Gerhardt, F. P. Missell, F. J. G. Landgraf, D. L. Rodrigues, and M. Alberteris-Campos, "Barkhausen noise as a microstructure characterization tool," Phys. B Condens. Matter, vol. 435, pp. 109–112, 2014.

[3] 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., vol. 401, no. 1–3, pp. 143–148, 2011.

[4] 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, vol. 527, no. 12, pp. 2886–2891, 2010.

[5] C. Camerini, R. Sacramento, M. C. Areiza, a. Rocha, R. Santos, J. M. Rebello, and G. Pereira, "Eddy current techniques for super duplex stainless steel characterization," J. Magn. Magn. Mater., vol. 388, pp. 96–100, 2015.

[6] S. Ghanei, M. Kashefi, and M. Mazinani, "Eddy current nondestructive evaluation of dual phase steel," Mater. Des., vol. 50, pp. 491–496, 2013.

[7] D. Blažek, M. Neslušan, M. Mičica, and J. Pištora, "Extraction of Barkhausen noise from the measured raw signal in high-frequency regimes," Measurement, vol. 94, pp. 456–463, 2016.

[8] S. S. M. Tavares, J. M. Pardal, J. L. Guerreiro, a. M. Gomes, and M. R. da Silva, "Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803," J. Magn. Magn. Mater., vol. 322, no. 17, pp. L29–L33, 2010.

[9] 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, vol. 516, no. 1–2, pp. 126–130, 2009.

[10] 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)., vol. 6, no. 7, p. 164, 2016.

[11] B. Zhu, M. J. Johnson, C. C. H. Lo, and D. C. Jiles, "Multifunctional magnetic Barkhausen emission measurement system," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 3, pp. 1095–1099, 2001.

[12] L. Batista, U. Rabe, I. Altpeter, S. Hirsekorn, and G. Dobmann, "On the mechanism of nondestructive evaluation of cementite content in steels using a combination of magnetic Barkhausen noise and magnetic force microscopy techniques," J. Magn. Magn. Mater., vol. 354, pp. 248–256, 2014.

[13] 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, vol. 83, pp. 109–116, 2016.

[14] W. D. Callister Jr, Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 5. Ed. LCT: Rio de Janeiro, 2002.

Edgard M. Silva¸ Bruno R. Araújo, Louise G. Lima, José A. C. Filho, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil, E-mails: edgard@ifpb.edu.br, braraujo.ee@gmail.com,louisegomes@gmail.com, adeiltoncarvalho87@yahoo.com.br. Eloy M. Silva, José H. B. Barreto, Instituto Federal do Ceará, Ceará, Brasil. eloy@ifce.edu.br, hernandobarreto@ifce.edu.br. Mickael M. R. Silva, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil. mickaelmrodrigues@gmail.com Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e IFPB.