

ENSAIO ELETROMAGNÉTICO PARA ACOMPANHAMENTO DA FORMAÇÃO DE FASE FRAGILIZANTE EM UM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX *

Edgard de Macedo Silva¹

Neilor Cesar dos Santos²

Francisco Eduardo Mendes da Silva³

Amanda Medeiros Rodrigues⁴

José Hernado Bezerra Barreto⁵

João Pereira Leite⁶

Josinaldo Pereira Leite⁷

Resumo

Ensaio eletromagnéticos vêm sendo empregados para acompanhamento de fases que venham a mudar a permeabilidade do material. Aços inoxidáveis duplex quando submetidos a temperaturas entre 300 e 550 °C sofrem fragilização devido a formação de uma fase paramagnética finamente dispersa no interior da matriz ferrítica. O presente trabalho desenvolve um ensaio eletromagnético na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos, que se caracteriza pelo comportamento linear entre a intensidade de campo magnético aplicado e densidade de fluxo magnético. Um estudo inicial é realizado sobre a influência da espessura do material na interação entre campo e material, sendo feitas simulações pelo Método dos Elementos Finitos para a análise da densidade de fluxo magnético. Depois, diferentes quantidades de intensidades de campos magnéticos são aplicadas em amostras de ensaios Charpy com diferentes quantidades de fases fragilizantes. Os resultados mostram que para a intensidade de campo magnético estudado as medidas de fluxo magnético independem da espessura para medidas acima de 6mm. O ensaio foi capaz de acompanhar a fragilização na temperatura de 475 °C, onde a densidade de fluxo magnético teve o mesmo comportamento da energia absorvida por impacto.

Palavras-chave: ensaio eletromagnético; fragilização; aço inoxidável duplex.

ELECTROMAGNETIC TEST FOR FOLLOW-UP OF FRAGILIZING PHASE FORMATION IN STAINLESS STEEL DUPLEX

Abstract

Electromagnetic tests have been used to monitor phases that change the permeability of the material. Duplex stainless steels when subjected to temperatures between 300 and 550 °C undergo embrittlement due to the formation of a paramagnetic phase formed finely dispersed within the ferritic matrix. The present work develops an electromagnetic test in the region of reversibility of the movement of the walls of the magnetic domains, which is characterized by the linear behavior between the applied magnetic field intensity and the magnetic flux density. An initial study is carried out on the influence of material thickness on the interaction between field and material. Finite element method simulations are used to analyze the magnetic flux density. Then, some magnetic field intensities are applied in samples of Charpy samples with different amounts of embrittlement phases. The results show that for the magnetic field studied, the magnetic flux measurements are independent of the thickness for measurements above 6 mm. The experiment was able to follow the embrittlement at the temperature of 475 °C, where the magnetic flux density had the same behavior of the energy absorbed by impact.

Keywords: Electromagnetic testing; embrittlement; duplex stainless steel.

- ¹ *Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Professor da Unidade Acadêmica III, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*
- ² *Doutor em Engenharia Mecânica, Professor da Unidade Acadêmica III, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*
- ³ *Aluno de Mestrado de Engenharia Elétrica do IFPB, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*
- ⁴ *Aluno de Graduação em Engenharia Elétrica do IFPB, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*
- ⁵ *Mestre em Engenharia Elétrica do IFPB, Professor do Instituto Federal do Ceará, Cedro, Ceará, Brasil.*
- ⁶ *Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*
- ⁷ *Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Ensaio eletromagnético vêm sendo utilizados para o acompanhamento de fases que possam interferir nas propriedades mecânicas de estruturas em serviços. A formação de novas fases em materiais ferromagnéticos provoca a mudança na permeabilidade magnética do mesmo e assim podem ser determinadas por esses. Ensaio como o de correntes parasitas e o ruído de Barkhausen são empregados com esse objetivo(1–4) . O ruído magnético de Barkhausen é gerado da tentativa das paredes dos domínios se desprenderem dos pontos de ancoragem. Estes podem ser contornos de grãos, segunda fase, precipitados e discordâncias, por exemplo. Os campos empregados fazem parte da região de irreversibilidade da curva de magnetização dos materiais (5–8).

Ensaio eletromagnético também vêm sendo desenvolvidos na região de reversibilidade da curva demagnetização dos materiais. Esses vêm sendo empregados para acompanhamento da formação de fases paramagnéticas em aços inoxidáveis. Estas mudam o ferromagnetismo do material e assim a permeabilidade. As fases sigma e α' são paramagnéticas e responsáveis pela fragilização dessa classe de material (9,10).

No presente trabalho é feito um estudo da espessura nas medidas da interação entre intensidade de campo magnético e material, na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos. Medidas foram realizadas em um material ferromagnético e simuladas pelo Método dos Elementos Finitos para um melhor entendimento do comportamento da densidade de fluxo magnético resultante da interação deste com o material estudado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é dividido em duas partes: a primeira consiste no estudo da influência da espessura das amostras na interação entre campo magnético aplicado e material. Na segunda é feita a aplicação de ensaio de impacto para acompanhamento da fragilização de um aço inoxidável duplex SAF 2205.

Amostras de um aço inoxidável duplex SAF 2205 com 24 mm de diâmetro e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm foram retiradas por eletroerosão a fio de uma chapa de dimensões de 8x500x500 mm. Estas foram submetidas a intensidades de campo magnético externo variando de 0 a 275A/m (ampere/metro). As medidas foram realizadas no centro das amostras conforme a Figura 1, tal como deslocadas 6 mm, em relação ao centro à esquerda e à direita.

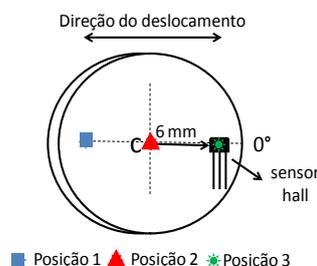


Figura. 1. Posição de aplicação do campo externo nas amostras de aço inoxidável duplex.

O equipamento de teste utilizado é apresentado na Figura 2. A aplicação do campo externo foi realizada a partir de um solenoide. A densidade de fluxo magnético foi determinada através de um sensor de efeito Hall modelo SS495A.

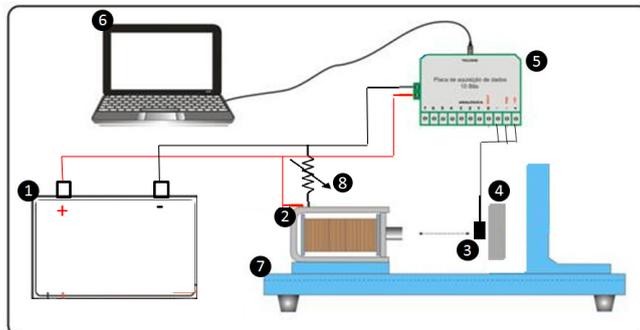


Figura 2. Equipamento experimental de teste: (1) Sistema de alimentação; (2) solenoide; (3) sensor Hall; (4) amostra; (5) placa de aquisição de dados; (6) computador; (7) bancada; (8) potenciômetro.

A interação entre campo magnético aplicado e material foi simulada a partir dos resultados experimentais. Uma intensidade de campo magnético externo de 133 A/m foi aplicada nas amostras de 2, 4, 6 e 8 mm e utilizada para calibração da simulação. A Figura 3 mostra o modelo de bancada desenvolvido com a descrição de cada uma das regiões e a localização dos componentes considerados na simulação. Esta foi realizada com o programa APDL ANSYS, com malha de tamanho 2 de elemento quadrado e com o objetivo de analisar a densidade de fluxo magnético no interior do material.

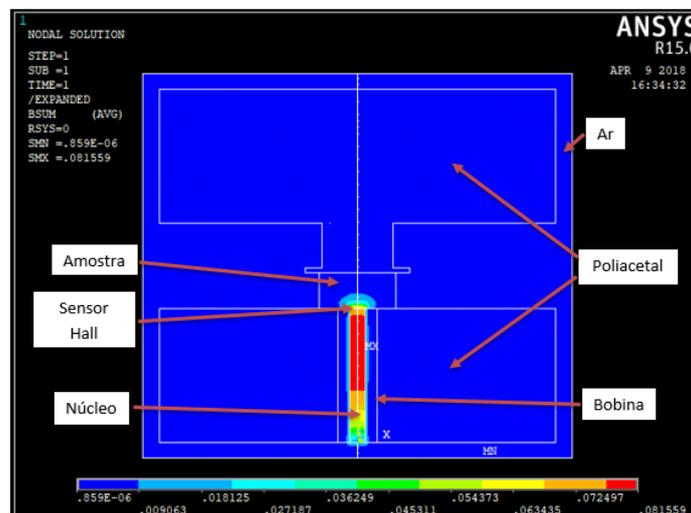


Figura 3. Bancada simulada apresentando o posicionamento da amostra, sensor Hall e campo magnético aplicado.

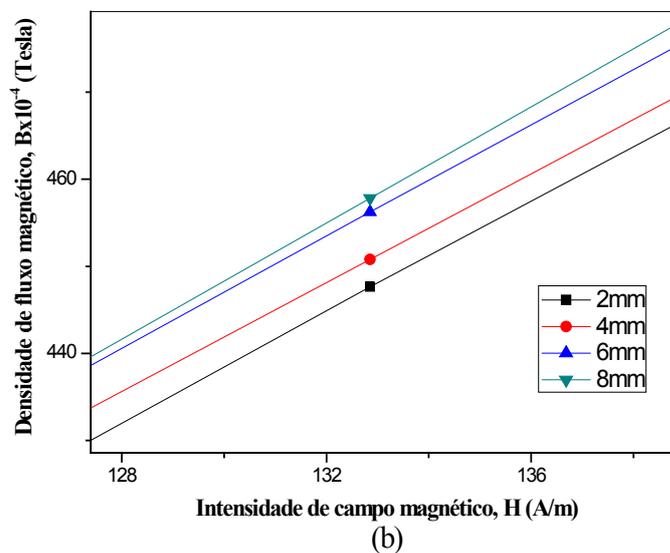
Na segunda etapa foram realizados ensaios de impacto com o objetivo de avaliar a energia absorvida do material como recebido e nas condições de envelhecimento operadas. As amostras foram envelhecidas na temperatura de 475 °C pelos tempos de 1h, 4 h, 8 h, 12 h, 40 h e 100h. As amostras foram confeccionadas para ensaio Charpy, com entalhe em “V” segundo a norma NBR 6157/1980 da ABNT, de tamanho reduzido, nas dimensões de 55 x 10 x 5mm e ensaiadas em um ambiente climatizado à temperatura de 25°C. Foram usinadas por fresagem e retífica 33

corpos de prova (CP), sendo 3 (três) para cada tempo de envelhecimento. Estas amostras foram submetidas a aplicação de intensidades de campo magnético externo de 44,3 A/m, 88,6 A/m, 132,8 A/m, 177,1 A/m e 221,4 A/m. O objetivo foi elaborar curvas que relacionem o campo magnético induzido a cada uma das condições de envelhecimento, de forma que se possa acompanhar a fragilização do aço SAF 2205 envelhecido, comparando-se essas curvas às dos ensaios de impacto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo do efeito da espessura foi realizado com a finalidade de se determinar o comportamento das curvas de magnetização para cada uma das espessuras na região de operação do equipamento e analisar como a espessura influenciou nas respostas de B (campo magnético induzido). Os valores de H (intensidade de campo magnético aplicado) foram variados entre 0 A/m e 275 A/m em virtude da limitação do solenoide e os valores de B puderam ser medidos até 768,75 Gauss em virtude da saturação do sensor Hall.

O comportamento das curvas B x H para as amostras estudadas do aço inoxidável duplex SAF 2205 em função da espessura pode ser vista na Figura 4(a). No eixo das abscissas são apresentados os valores de H. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de B. Uma ampliação da região central das curvas de magnetização também foi realizada como pode ser visto na Figura 4(b).



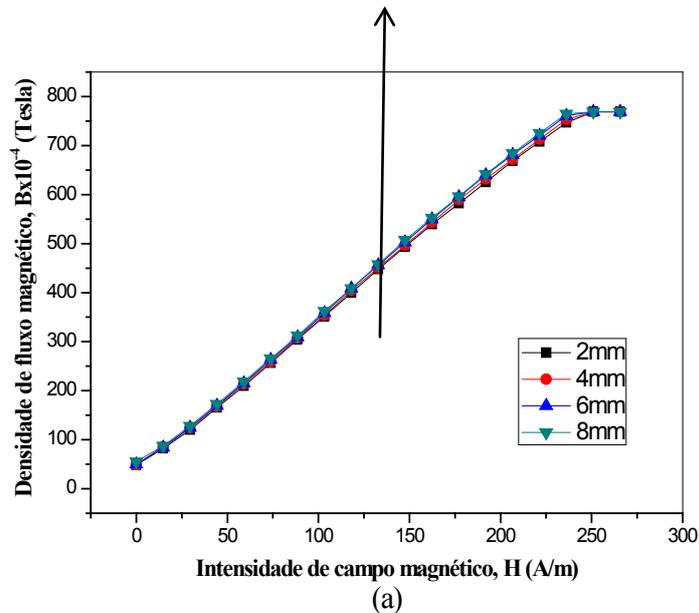


Figura 4. Curva de magnetização do aço inoxidável duplex SAF 2205: (a) apresenta a variação da densidade de fluxo magnético com a intensidade do campo magnético aplicado em função da espessura do material; (b) apresenta uma ampliação da região central da curva de magnetização.

A curva de magnetização do aço inoxidável duplex SAF2205 pode ser dividida em três regiões, só apresentando um comportamento linear em sua primeira região, onde os valores de B são pequenos, da ordem de centenas de Gauss. Essa região corresponde à região de reversibilidade da movimentação das paredes dos domínios (9,10). Na região estudada, onde H foi variado entre 0 A/m e 275 A/m, conforme resultados apresentados na Figura 4(a), a curva característica de B em função de H foi linear para todas as espessuras de amostras utilizadas (2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm), de onde se pode concluir estar operando na região de reversibilidade de sua curva de magnetização.

Ainda da observação da Figura 4(a) vê-se que para valores de H acima de 250 A/m ocorreu a estabilização no valor de B em torno de 770 Gauss. Nessa região B ainda varia linearmente com o aumento no valor de H, mas essa variação não conseguiu ser captada pelo equipamento, em virtude de uma restrição do sensor utilizado, que satura para valores de B dessa ordem. Para o sensor utilizado o valor de saturação especificado em seu *datasheet* é de 670 Gauss(9), aproximadamente 100 Gauss a menos do que o que fora alcançado pelo sensor comercial utilizado.

Também foi possível observar analisando-se a região ampliada no centro das curvas B x H apresentada na Figura 4(b), especificamente no ponto correspondente ao valor de H de 133 A/m, que os valores de B variaram com a espessura, aumentado com ela, porém em taxas cada vez menores, até que a partir da espessura de 6 mm o acréscimo do valor de B com o aumento da espessura já foi insignificante.

Com os resultados obtidos foi possível verificar que a espessura não influenciou no formato das curvas, pois suas inclinações, dadas pelas tangentes das retas, não variaram e estas correspondem à permeabilidade magnética do material. Nessa região de operação as densidades de fluxo magnético não foram suficientemente altas para que fosse atingida a região de irreversibilidade da movimentação das paredes de domínios magnéticos. Por outro lado, as espessuras influenciaram nos valores de B para um mesmo valor de H aplicado. A estabilização de B com a espessura se encontra em consonância com o que tem sido observado na literatura(9,10). Uma configuração similar à adotada nessa pesquisa tem sido

proposta pelos fabricantes de sensores Hall. Essa configuração consiste em se colocar após o sensor um concentrador de fluxo magnético, geralmente de aço carbono, como forma de concentrar o campo magnético aplicado, reduzindo as dimensões e o consumo elétrico dos equipamentos eletroeletrônicos que utilizam essa tecnologia(9,10).

Técnicas de ensaios não destrutivos podem ser utilizadas na detecção de anomalias e no acompanhamento de sua progressão em equipamentos e componentes estruturais, predizendo e evitando quebras ou falhas catastróficas que possam levar desde a perda de horas produtivas a danos de valor imensurável, como mortes e catástrofes ambientais, principalmente em indústrias do ramo naval, de petróleo e gás, energia nuclear e aeronáutica, cuja ocorrência de falhas geralmente é onerosa e dramática. Nesses casos, essas técnicas podem ser viabilizadas a partir do desenvolvimento de sensores de monitoramento contínuo de propriedades críticas, o que possibilita um acompanhamento integral e progressivo de sua condição, o que está em consonância com os objetivos dos sistemas de gestão da manutenção atuais, especificamente atrelados ao pilar da manutenção preditiva(9,11,12).

O presente trabalho buscou o desenvolvimento de um ensaio não destrutivo baseado na interação entre intensidade de campo magnético aplicado e material. A simulação pelo Método dos Elementos Finitos forneceu informações da interação entre a densidade de fluxo magnético e material, de modo a se ter um melhor entendimento desse comportamento. A Figura 5 apresenta uma simulação de como a densidade de fluxo magnético é influenciada pela espessura do material (9,10). O efeito da permeabilidade do meio externo é maior à medida que se reduz a espessura. No caso contrário haverá uma medida a partir da qual o efeito do meio externo passa a ser desprezível para a intensidade de campo magnético aplicado. Nota-se também da Figura 5 que com o distanciamento do centro da amostra para a extremidade, ocorre uma redução nos valores de campo magnético induzido. Isso se deve à aproximação da borda do material e como nessa região o meio é menos permeável, esse reduz os valores medidos.

Com a simulação pôde-se entender como as linhas de campo magnético se distribuem pelo material, conforme apresentado na Figura 5. Da análise da Figura 5(a), para a amostra de 2mm, vê-se que as linhas de campo se distribuem por toda a amostra, evitando o meio externo, que é menos permeável. Já se observando as Figuras 5(b), (c) e (d), em sequência, vê-se que com o aumento da espessura as linhas de campo começam a se concentrar cada vez mais próximas da região central e penetrar cada vez mais o material, até que para espessuras acima de 6 mm, sua distribuição praticamente não mais varia. Dessa forma pode-se notar que a densidade de fluxo magnético passa a percorrer o material sem a interferência do meio externo para espessuras a partir de 6mm.

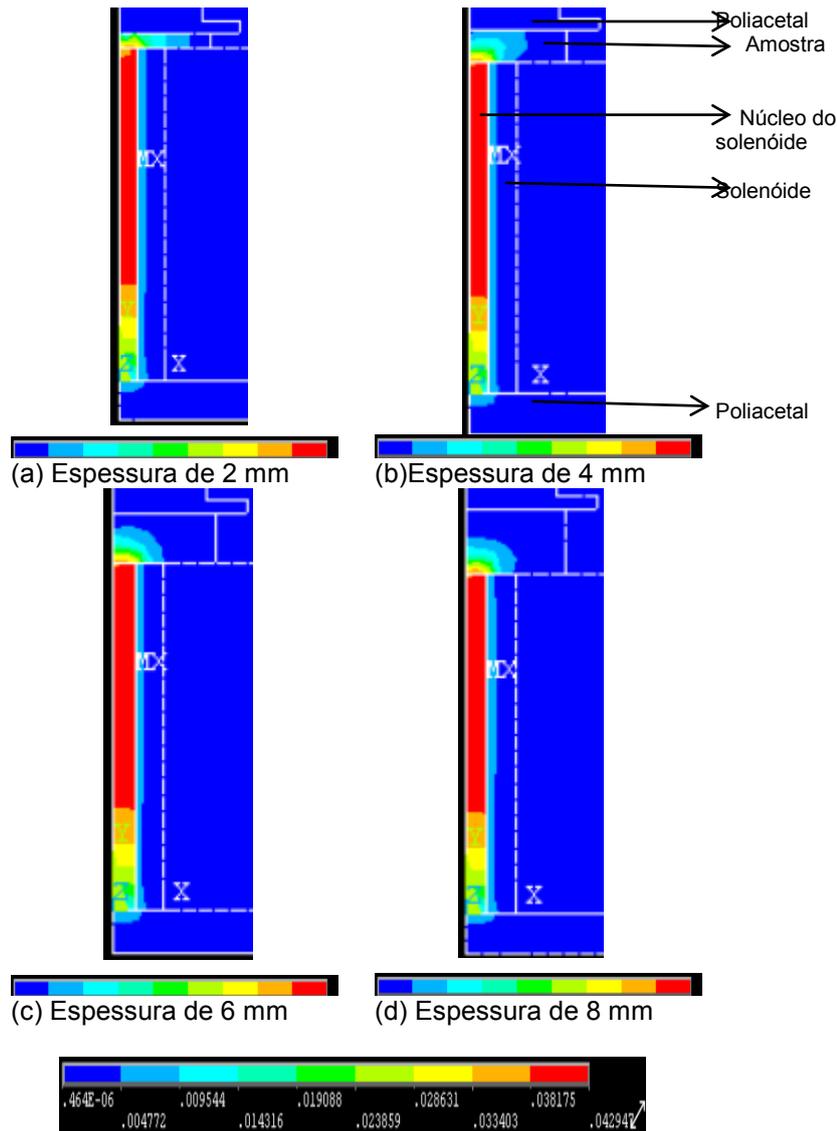


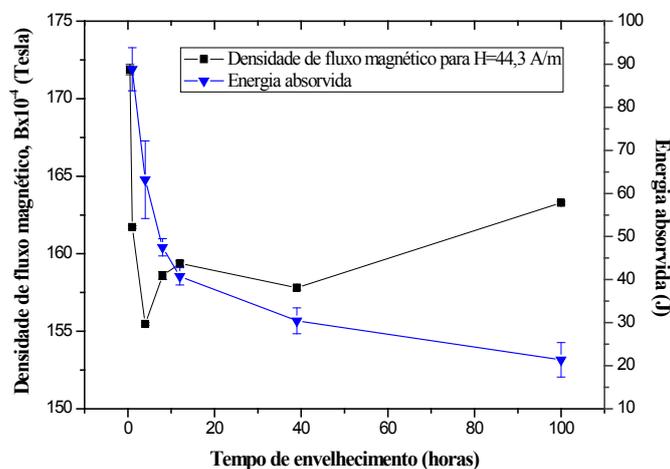
Figura 5. Simulação pelo Método dos Elementos Finitos da interação entre densidade de fluxo magnético e material para uma intensidade de campo magnético aplicado de 133 A/m.

Sabe-se, de acordo com a Lei de Faraday, que o valor de B é proporcional à quantidade de linhas de indução que atravessam o material e que seu valor é máximo quando elas o cruzam perpendicularmente. Dessa maneira, pode-se concluir que com o aumento da espessura houve uma maior penetração das linhas de campo magnético no material, tornando-as cada vez mais concentradas e perpendiculares ao elemento Hall do sensor. Ao se utilizar espessuras acima de 6 mm maioria das linhas de campo já estavam concentradas e orientadas o bastante para não influenciarem mais, significativamente, os valores de B .

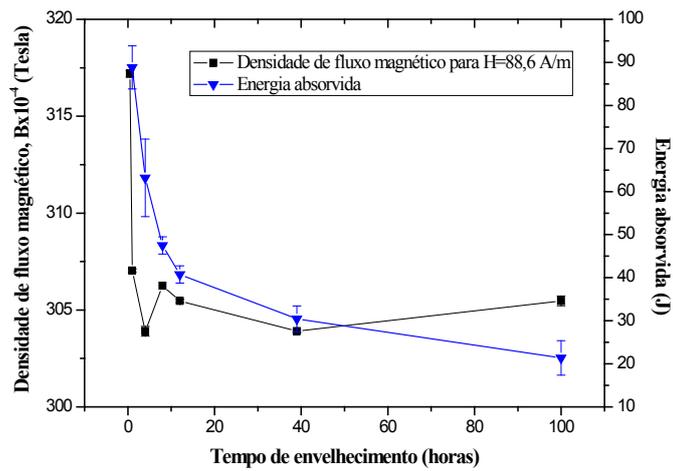
As curvas de campo magnético induzido (B), para seis diferentes campos magnéticos externos aplicados, e de variação de energia absorvida por impacto em função do tempo de envelhecimento, ambas para as amostras tratadas termicamente a 475°C , são mostradas nas Figuras 6 (a), (b), (c), (d) e (e). No eixo das abscissas são apresentados os valores do tempo de envelhecimento. No eixo das ordenadas a esquerda são apresentados os valores de campo magnéticos induzidos e a direita são apresentados os valores obtidos de energia absorvida por impacto.

Analisando-se as curvas da Figura 6 nota-se que as curvas (a), (b), (c) e (d), onde os campos magnéticos aplicados são inferiores a 221,4 A/m, não seguem a curva de energia absorvida por impacto tomada como referência, principalmente para os tempos de envelhecimento em que os precipitados ainda estão em formação. Isso ocorre porque a densidade de linhas de campo magnético é insuficiente para detectar os precipitados que ainda estão se formando, que ainda são pequenos e difíceis de serem detectados por baixas intensidades de campo magnético externo. No entanto, ao se fazer a análise da curva com campo magnético externo aplicado de 221,4 A/m, representada na Figura 6 (e), observa-se que o seu comportamento foi o que melhor seguiu o da curva de energia absorvida por impacto, no sentido de melhor acompanhar a fragilização do material estudado decorrente das alterações microestruturais ocorridas ao longo de todo o processo de envelhecimento térmico. Isto mostra que este campo externo produziu uma densidade de linhas de campo magnético que foi capaz de detectar com maior precisão, em relação aos outros campos externos aplicados, tanto os precipitados já consolidados como aqueles que ainda estavam se formando, dependendo do tempo de envelhecimento. Portanto, em virtude disso, o campo magnético externo escolhido como o adequado entre os estudados, para ser aplicado no ensaio magnético visando realizar o acompanhamento da formação de fases fragilizantes no aço estudado, foi o de 221,4 A/m.

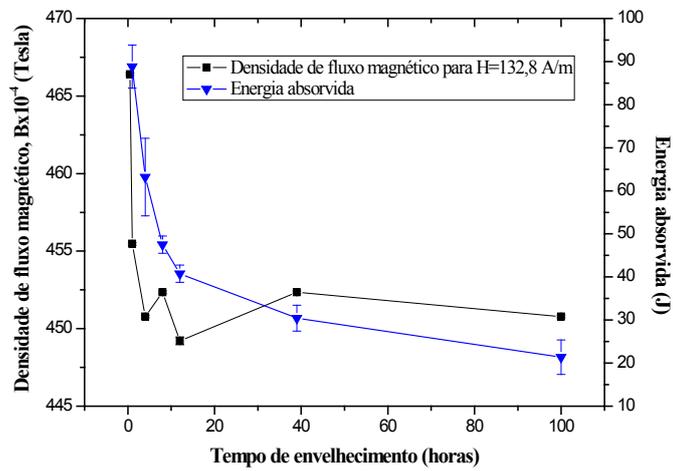
Cabe ainda destacar que a fragilização devido à formação da fase α' , que tem dimensões nanométricas, é difícil de analisar por meio de técnicas comuns de ensaios destrutivos, como a microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, e não destrutivos como as técnicas de ultrassom e correntes parasitas, devido às nanoestruturas formadas serem pequenas e finas (9-12).



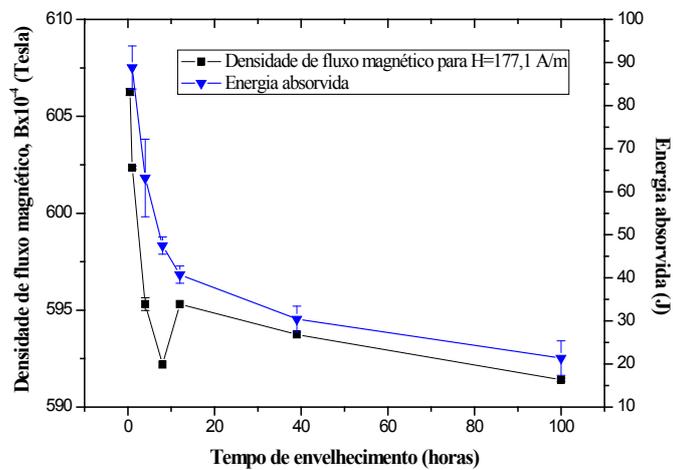
(a)



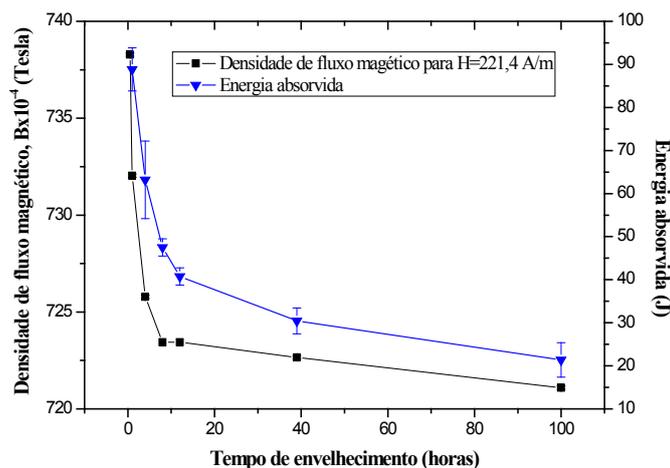
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6. Campo magnético induzido e energia Absorvida por impacto em função do tempo de envelhecimento para amostras com diferentes intensidades de campo magnético aplicado. a) 44,3 A/m. b) 88,6 A/m. c) 132,8 A/m. d) 177,1 A/m. e) 221,4 A/m.

Na curva de energia absorvida da Figura 6 (e), percebe-se duas regiões de fragilização do material bem evidentes, tal que a primeira região ocorre em um período de envelhecimento até 8 horas seguido de um patamar acima deste tempo (10). Essa redução dos valores da energia absorvida por impacto do material, observada na temperatura estudada, ocorre em razão da formação dos precipitados da fase α' , com dimensões nanométricas, que dificultam a movimentação das discordâncias na microestrutura do material, fragilizando-o (9-11).

Baseando-se nos resultados das análises de energia absorvida por impacto e campo magnético induzido, para a temperatura 475°C, pode-se concluir que os valores de campo magnéticos induzidos foram diretamente proporcionais às variações da energia absorvida por impacto, demonstrando serem sensíveis à precipitação da fase α' e, por conseguinte, à fragilização do material estudado. A formação de precipitados finos dificulta a movimentação das paredes dos domínios magnéticos e reduz assim as medidas do campo magnético.

4CONCLUSÃO

No presente trabalho foi apresentado um ensaio eletromagnético para acompanhar a formação de microestruturas fragilizantes, em um aço inoxidável duplex, devido à variação da permeabilidade do material, chegando-se às seguintes conclusões:

Amostras com espessuras a partir de 6mm apresentam respostas que independem da espessura para a intensidade de campo magnético estudado. A simulação da densidade de fluxo magnético pelo Método dos Elementos Finitos foi capaz de representar a distribuição das linhas de campo magnético e assim como a interação entre fluxo magnético e material altera os resultados de campo magnético induzido, o que ajudou a explicar aos resultados experimentais.

Uma intensidade de campo magnético externo de 221,4 A/m foi capaz de acompanhar a formação da fase fragilizante no aço inoxidável duplex estudado. As variações das medidas de densidade de fluxo magnético tiveram o mesmo

comportamento das medidas de energia absorvida por impacto para esse valor de campo magnético externo de 221,4 A/m.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro do Instituto Federal da Paraíba e ao CNPq pelo fornecimento das bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. Zhu B, Johnson MJ, Lo CCH, Jiles DC. Multifunctional magnetic Barkhausen emission measurement system. *IEEE Trans Magn*. 2001;37(3):1095–9.
2. Ducharme B, Le MQ, Sebald G, Cottinet PJ, Guyomar D, Hebrard Y. Characterization and modeling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise. *J Magn Magn Mater*. 2017;432:231–8.
3. Normando PG, Moura EP, Souza J a., Tavares SSM, Padovese LR. Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel. *Mater Sci Eng A*. 2010;527(12):2886–91.
4. Ghanei S, Kashefi M, Mazinani M. Eddy current nondestructive evaluation of dual phase steel. *Mater Des* [Internet]. Elsevier Ltd; 2013;50:491–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.040>
5. Moses AJ, Patel H V., Williams PI. AC Barkhausen noise in electrical steels: Influence of sensing technique on interpretation of measurements. *J Electr Eng*. 2006;57(8 SUPPL):3–8.
6. Blažek D, Neslušan M, Mičica M, Pištora J. Extraction of Barkhausen noise from the measured raw signal in high-frequency regimes. *Measurement* [Internet]. 2016;94:456–63. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224116304833>
7. Miesowicz K, Staszewski WJ, Korbiel T. Analysis of Barkhausen noise using wavelet-based fractal signal processing for fatigue crack detection. *Int J Fatigue* [Internet]. Elsevier Ltd; 2016;83:109–16. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.002>
8. Ktena A, Hristoforou E, Gerhardt GJL, Missell FP, Landgraf FJG, Rodrigues DL, et al. Barkhausen noise as a microstructure characterization tool. *Phys B Condens Matter* [Internet]. Elsevier; 2014;435:109–12. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2013.09.027>
9. Silva E, Marinho L, Filho P, Leite J, Leite J, Fialho W, et al. Classification of Induced Magnetic Field Signals for the Microstructural Characterization of Sigma Phase in Duplex Stainless Steels. *Metals (Basel)* [Internet]. 2016;6(7):164. Available from: <http://www.mdpi.com/2075-4701/6/7/164>
10. de Macedo Silva E, Leite JP, de França Neto F a., Leite JP, Fialho WML, de Albuquerque VHC, et al. Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel. *J Test Eval* [Internet]. 2016;44(3):20130313. Available from: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?JTE20130313>
11. Tavares SSM, Pardal JM, Guerreiro JL, Gomes a. M, da Silva MR. Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803. *J Magn Magn Mater* [Internet]. Elsevier; 2010;322(17):L29–33. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.02.055>
12. de Macedo Silva E, de Albuquerque VHC, Leite JP, Varela ACG, Moura EP De, Tavares JMRS. Phase transformations evaluation on a UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing. *Mater Sci Eng A*. 2009;516(1–2):126–30.