

Metodologia de um ensaio não destrutivo, baseado em medidas de tensão Hall, para determinação de descontinuidades em aços ao carbono



Rayssa Sousa de Andrade Toscano Lins^[1], Edgard de Macedo Silva^[2]

[1]rayssasatlins@gmail.com. [2]edgardmsilva@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB Câmpus João Pessoa

RESUMO

Os ensaios não destrutivos são usados para avaliar a presença de descontinuidades que possam afetar a integridade de materiais em serviço. Esse é o motivo principal pelo qual eles são usados em manutenção para detectar defeitos. No presente trabalho, é estudada a potencialidade do uso da interação entre densidades de linhas de campo magnético e material para detecção de descontinuidades. Foram utilizadas para ensaio duas amostras de um aço SAE 1020 laminado, com dimensões de 30x40x12 mm – uma amostra sem furo e outra com um furo passante de 2 mm no centro da face de 30x40 mm. Essas amostras foram submetidas a campos externos de até 18,6 Oe. Um sensor de efeito Hall do tipo SS495A foi utilizado para medições das densidades das linhas de campo resultantes da interação entre o campo e o material. Os resultados mostram que a mudança de permeabilidade de um material em função da presença de uma descontinuidade pode ser detectada através das variações de medidas de densidade de linhas de campo. Um defeito padrão de 2 mm, utilizado em ensaios de ultrassom, foi detectado com a metodologia apresentada. A condição de detecção da descontinuidade para os diferentes aços ao carbono comum foi determinada a partir da aplicação do campo externo ideal encontrado.

Palavras-chave: Tensão Hall. Permeabilidade magnética. Ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

The nondestructive tests are used to assess the presence of discontinuities that may affect the integrity of materials in service. This is the main reason why they are used in maintenance for detect defects. In this work it is studied the potentiality of the use of the interaction between density of magnetic field lines and material for the detection of discontinuities. Two samples of a SAE 1020 steel laminate having dimensions of 30x40x12 mm were used for testing – a sample without hole and other with one of 2 mm in the face center 30x40 mm. These samples were subjected to external fields up to 18.6 Oe. A SS495A Hall effect sensor was used for measurements of the density of field lines resulting from the interaction between the field and the material. The results show that the change in permeability of a material in function of the presence of a discontinuity can be detected through the variations of density measurements of field lines. A standard 2 mm defect, used in ultrasonic testing, was detected with the methodology presented. The discontinuity detection condition for the different steels to common carbon was determined from the application of the ideal outfield found.

Keywords: Hall effect sensor. Magnetic permeability. Nondestructive tests.

1 Introdução

Os ensaios não destrutivos são utilizados para avaliar a presença de descontinuidades que possam afetar a integridade dos materiais em serviço. Esse é o motivo principal pelo qual eles são usados em manutenção para detectar defeitos. Várias técnicas não destrutivas são utilizadas para esse fim, como ultrassom, correntes parasitas, radiografia industrial, infravermelho, exames termográficos, entre outras. O ensaio por ultrassom consiste em um método não destrutivo utilizado na detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos (NORMANDO *et al.*, 2010). Ele detecta descontinuidades internas em materiais por meio da emissão de ondas acústicas, que são refletidas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material.

A técnica de correntes parasitas – também conhecida por correntes de Foucault – tem como princípio básico a indução magnética. Além de ser aplicado na detecção de descontinuidades, esse ensaio possibilita a determinação de algumas características dos materiais estudados, tais como espessura de camadas, condutibilidade elétrica e permeabilidade magnética (PRAXEDES, 2012).

O ensaio por partículas magnéticas baseia-se no princípio de que as linhas de campo magnético em um material ferromagnético são distorcidas por uma interrupção na continuidade do material, que pode ser provocada por variações dimensionais abruptas e pela presença de descontinuidades estruturais como trincas e porosidades (CARNEVAL *et al.*, 2007). As linhas magnéticas do fluxo induzido no material desviam-se de sua trajetória ao encontrar uma descontinuidade superficial ou subsuperficial no material, sendo desviadas para fora da superfície e criando um campo de fuga, altamente atrativo às partículas magnéticas. Esse método é tipicamente aplicado em materiais de aço ferrítico fundidos, forjados, extrudados, soldas, peças que sofreram tratamento térmico (porcas e parafusos), peças que sofreram retífica (trincas por retífica), entre outras aplicações em materiais ferrosos (CARNEVAL *et al.*, 2007).

O uso de propriedades magnéticas também já é bastante difundido na ciência dos materiais, mas até recentemente tais propriedades vinham sendo utilizadas apenas em mecanismos de detecção de descontinuidades ou falhas (BI; JILES, 1998).

Sensores de efeito *Hall* são utilizados para a caracterização microestrutural de aços submetidos a diversos tratamentos térmicos. Em Cavalcante *et al.* (2008), amostras de aço carbono 1045 com diferentes tratamentos foram submetidas a um campo de 300 gauss, no qual foram medidos valores de tensão *Hall*. No referido trabalho, também foi mostrada a potencialidade da utilização de valores de tensão *Hall* associada a redes neurais artificiais para reconhecimento de microestruturas em um aço 1045 tratado termicamente. Sinais de tensão *Hall* serviram para treinar uma rede do tipo *backpropagation*, mostrando ser possível a identificação de microestrutura com a combinação das duas técnicas.

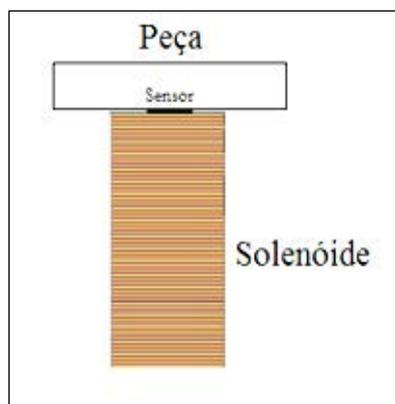
2 Materiais e Métodos

No presente trabalho, duas amostras de um aço SAE 1020 laminado com dimensões de 30x40x12 mm foram utilizadas para ensaio (Figura 1), sendo uma amostra sem furo e outra com um furo passante de 2 mm no centro da face de 30x40 mm. Essas amostras foram submetidas a campos externos de até 18,6 Oe. Um sensor de efeito *Hall* do tipo SS495A foi utilizado para medições das densidades de linhas de campo resultantes da interação entre campo e material. Cinquenta medidas foram realizadas em cada ponto e o intervalo de confiança adotado foi de 95%. As medidas foram realizadas na região central da amostra com furo – ou seja, sobre o furo – e na mesma região da amostra sem furo (amostra de controle).

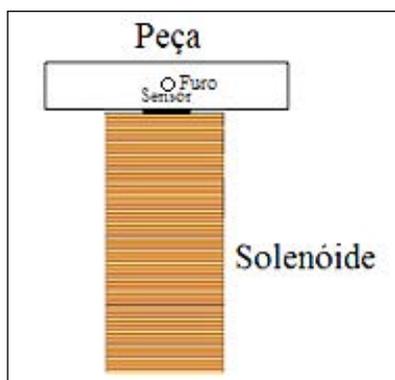
O campo ideal a ser utilizado foi determinado a partir do gráfico da diferença das medidas realizadas nas amostras com e sem furo, em função do campo aplicado. Este campo foi utilizado para determinação do campo de referência para a classe de aços ao carbono. As medidas foram realizadas nos aços SAE 1006, 1020 e 1080.

As microestruturas dos aços SAE 1006 e SAE 1080 foram atacadas com reagente Nital e observadas por microscopia ótica.

Figura 1 – Figura esquemática das amostras sem furo e com furo.



Amostra de controle, sem furo.



Amostra com furo.

3 Resultados e Discussão

O uso intensivo de materiais ferromagnéticos dentro das aplicações na engenharia faz com que a perda de fluxo magnético seja uma das principais técnicas amplamente utilizadas para determinar a presença de descontinuidades tanto na superfície quanto no interior desses materiais (ENOKIZONO *et al.*, 1999).

A perturbação do fluxo magnético próximo às descontinuidades permite o sensoriamento sem contato da componente vertical das fugas de campo magnético. Com base nisso, sensores *Hall* têm sido utilizados para detecção do tamanho e da posição de trincas em materiais. Esses sensores possibilitam também a detecção de falhas superficiais em materiais metálicos, principalmente sob excitação de corrente alternada (BI; JILES, 1998; KOSMAS *et al.*, 2005).

No presente trabalho, foi realizado um estudo para detecção de descontinuidades em um aço SAE

1020. Um defeito de 2 mm de diâmetro foi feito em um material laminado – esse tamanho corresponde ao tamanho de um defeito padrão utilizado em inspeção por ensaios de ultrassom.

Uma descontinuidade é um defeito que possui permeabilidade magnética diferente da permeabilidade magnética do material. Uma aplicação de densidade de linhas de campo mostra resultados diferentes dependendo da presença ou ausência do defeito, pois a permeabilidade magnética do defeito é a do vácuo e a permeabilidade magnética do material é a do ferro. Logo, a densidade de fluxo magnético na região do furo da peça com furo será menor do que na mesma região da peça sem furo.

A Tabela 1 mostra os valores de H (Campo Magnético Externo) *versus* B (Densidade de Fluxo Magnético) para amostras com furo e sem furo. As medidas foram realizadas com um erro máximo de 0,33 gauss. Nessa tabela consta também o módulo da diferença entre os valores medidos de B para as amostras com furo e sem furo.

Tabela 1 – Valores de H (Campo Magnético Externo) *versus* B (Densidade de Fluxo Magnético) para amostras com e sem furo, bem como módulo da diferença.

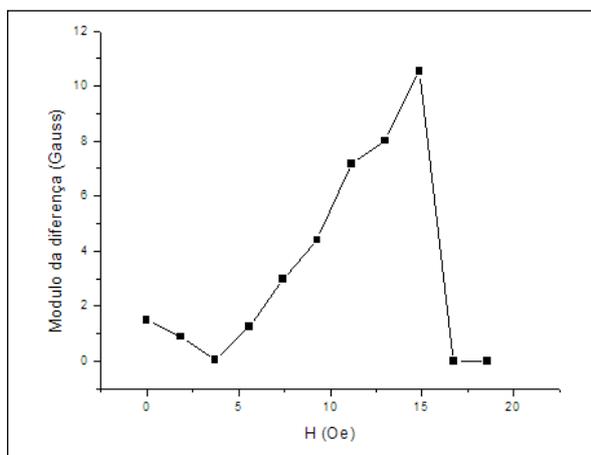
H (oersted)	B (gauss) com furo de 2 mm	B (gauss) sem furo	Módulo da diferença
0,0	34,53	33,06	1,47
1,9	105,88	105,00	0,88
3,7	189,47	189,50	0,03
5,6	278,50	279,75	1,25
7,4	371,03	374,00	2,97
9,3	462,69	467,09	4,40
11,2	551,72	558,88	7,16
13,0	639,31	647,31	8,00
14,9	722,31	732,84	10,53
16,7	768,75	768,75	0,00
18,6	768,75	768,75	0,00

A Figura 2 consiste no gráfico desse módulo em função dos diferentes valores de H (em oersted). Esse gráfico mostra que as curvas de magnetização das amostras com e sem furo se cruzam para valores de 3,7 Oe. A partir desse valor, a diferença cresce até 14,9 Oe e depois zera, devido à saturação do sensor. Esse campo (14,9 Oe) é considerado o campo ideal para medição, pois apresenta maior amplitude de

medida. O aumento do módulo da diferença deve-se à presença do defeito, que por ser uma descontinuidade com ar, altera a permeabilidade do meio.

O material sem defeito serviu como padrão de referência para análise das medidas. Os resultados mostram que os valores de densidade de linhas de campo sofrem o efeito da presença da descontinuidade. A permeabilidade na descontinuidade é a do ar, o que justifica a mudança nos valores de campo das amostras com defeitos.

Figura 2 – Módulo da diferença de medida das amostras com furo e sem furo, em função do campo externo aplicado (H).



Norhisam *et al.* (2011) estudaram a interação entre campo magnético e material para detecção de várias descontinuidades. Sensores de efeito *Hall* foram utilizados para determinação do campo resultante e construção de imagens. As formas estudadas foram um quadrado de lado 20 mm, um cilindro de raio 20 mm e um triângulo equilátero também de lado 20 mm, todos com espessura de 3 mm, colocados na superfície oposta do material a ser analisado. As medidas de campo permitiram identificar as formas das descontinuidades estudadas. O referido trabalho foi capaz de detectar descontinuidades numa ordem de grandeza menor.

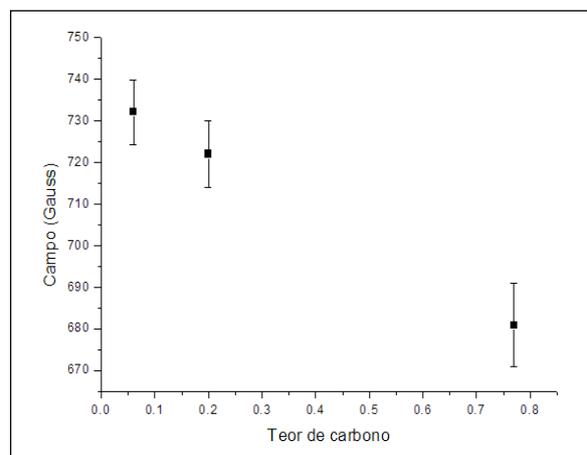
Segundo Bi e Jiles (1998), a presença de uma descontinuidade provoca uma distorção no caminho do fluxo magnético e uma variação na distribuição deste.

O estudo dessa interação entre campo e material tem mostrado que o campo é sensível a mudanças na permeabilidade do meio. Silva *et al.* (2014) mostram que a metodologia utilizada é sensível à presença de nanopartículas em materiais. Essa metodologia foi

aplicada para acompanhamento de partículas fragilizantes em um aço inoxidável duplex.

A microestrutura tem um efeito nos valores de campo induzido. Assim, de modo a estender os resultados para os diferentes aços ao carbono, o campo ideal encontrado de 14,9 Oe foi aplicado para aços SAE com diferentes teores de carbono. A Figura 3 mostra os valores de tensão *Hall* para esses aços. Os valores de campo caem com o aumento do teor de carbono.

Figura 3 – Variação do campo induzido em função do teor de carbono para aços SAE 1006, 1020 e 1080.



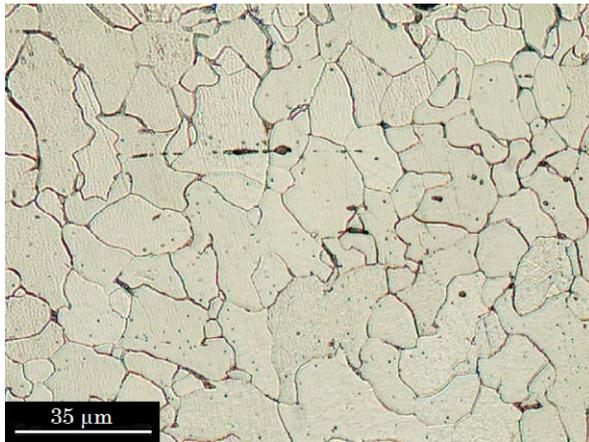
A Equação 1 mostra a relação entre campo e teor de carbono, podendo ser utilizada a fim de que a técnica seja aplicada para outros aços da mesma classe.

$$B = -72,0403 (\%C) + 736,40 \quad (1)$$

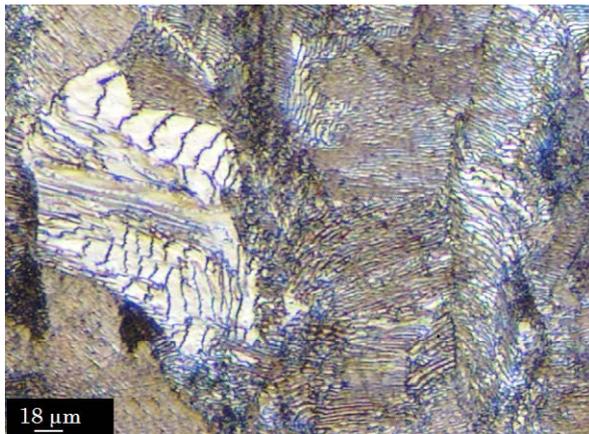
A variação nos valores de tensão *Hall* deve-se à diferença de permeabilidade magnética causada pelas diferentes microestruturas. Na Figura 4 pode-se ver um exemplo das diferenças microestruturais presentes nos materiais estudados.

A Figura 4 (a) mostra a microestrutura do aço SAE 1006, que é formado por estrutura predominante de ferrita. A Figura 4 (b) mostra a microestrutura do aço SAE 1080, que é formado por 100% de perlita, constituinte formado por ferrita e cementita. Os aços de composição intermediária possuem microestrutura composta de ferrita mais perlita, sendo os percentuais das fases proporcionais ao teor de carbono. O maior percentual da cementita dificulta o alinhamento dos domínios magnéticos e reduz os valores de campo induzido.

Figura 4 – Microestrutura dos aços. Ataque Nital.



Aço SAE 1006.



Aço SAE 1080.

Cavalcante *et al.* (2008) encontraram resultados semelhantes com amostras de um aço 1045 submetido a diferentes tratamentos térmicos. Medidas de tensão *Hall* foram capazes de identificar microestruturas geradas por esses tratamentos, e a técnica mostrou-se capaz de reduzir o tempo de identificação das mudanças microestruturais provenientes de tais tratamentos.

Os autores utilizaram, ainda, dados de valores de tensão *Hall* para treinamento de uma rede neural artificial, a fim de fazer identificação de microestruturas. As duas técnicas aliadas mostraram ser promissoras no reconhecimento de padrões.

Os resultados apresentados neste trabalho são decorrentes da aplicação de um campo externo, sem saturação das amostras, e conseqüentemente sem a medição de campo remanescente. Trabalhos com medições de saturação por magnetização e estudo de forças de indução residuais têm sido desenvolvidos

para caracterizar microestruturas (TAVARES *et al.*, 2010; NORMANDO *et al.*, 2010). O presente trabalho visa ao desenvolvimento de uma nova metodologia que seja capaz de realizar, em um menor tempo, essa caracterização a partir de dados obtidos por medida da tensão *Hall*, que é diretamente proporcional ao campo induzido nas amostras trabalhadas.

4 Considerações Finais

O presente trabalho buscou a detecção de uma descontinuidade, em um aço SAE 1020, através do estudo da interação entre densidade de linhas de campo e um material ferromagnético, chegando à conclusão de que a mudança de permeabilidade de um material, em função da presença de uma descontinuidade, pode ser detectada através das variações de medidas de densidade de linhas de campo; e que o defeito padrão de 2 mm, utilizado em ensaios de ultrassom, foi detectado com a metodologia apresentada.

Um campo ideal para detecção da descontinuidade estudada foi determinado e este, ao ser aplicado em diferentes aços ao carbono comum, mostrou ser capaz de estender os resultados para diferentes aços da mesma classe estudada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFPB e ao CNPq pelo suporte financeiro, bem como pelas bolsas de pesquisador (IFPB) e de iniciação científica (CNPq).

REFERÊNCIAS

BI, Y.; JILES, D. C. Dependence of magnetic properties on crack size in steels. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 34, n. 4, p. 2021–2224, July 1998.

CAVALCANTE, A. F. *et al.* Um estudo da aplicação de um sensor Hall e uma rede neural artificial para reconhecimento dos diferentes tipos de tratamento térmico pelo qual um aço SAE 1045 foi submetido. In: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 29., 2008, Maceió. **Anais do XXIX CILAMCE**. Maceió: UFAL, 2008.

CARNEVAL, R. O. *et al.* Definição de técnicas não-destrutivas para inspeção de parafusos e estojos quanto a presença de trincas. In: PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NON DESTRUCTIVE

TESTING, 4., 2007, Buenos Aires. **Proceedings...**
Buenos Aires: AAENDE, 2007. 1 CD-ROM.

ENOKIZONO, M. *et al.* Finite element analysis of a moving magnetic flux type sensor developed for nondestructive testing. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 35, n. 3, p. 1853-1856, May 1999.

KOSMAS, K. *et al.* Non-destructive evaluation of magnetic metallic materials using Hall sensors. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 161, n. 1-2, p. 359-362, Apr. 2005.

NORHISAM, M. *et al.* Magnetic imaging of ferromagnetic shape with Mobile Hall Sensor Array system. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL AND IMAGE PROCESSING APPLICATIONS, 2011, Kuala Lumpur. **Proceedings...** Kuala Lumpur: IEEE, 2011. p. 1-6.

NORMANDO, P. G. *et al.* Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 12, p. 2886-2891, May 2010.

PRAXEDES, T. O. **Sistema experimental para realização de ensaios não-destrutivos magnéticos e sua aplicação na avaliação da degradação microestrutural do aço A516 grau 60**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SILVA, E. M. *et al.* Evaluation of the magnetic permeability for the microstructural characterization of a duplex stainless steel. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 3, p. 213-313, 2014.

TAVARES, S. S. M. *et al.* Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 322, n. 17, p. L29-L33, Sep. 2010.