ESTUDO DO USO DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA PARA DIFERENCIAR AÇOS SUBMETIDOS A DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

Edgard Silva [1] (edgard@ifpb.edu.br), Filipe Abreu [1] (abreu.fillipe@academico.ifpb.edu.br), Alisson Santos [1] (santos.alisson@academico.ifpb.edu.br), Léia Carreiro [1] (leia.carreiro@academico.ifpb.edu.br), João Silva [1] (silvajbo@ifpb.edu.br).

[1] Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

RESUMO: *Ensaios eletromagnéticos têm sido empregados para a análise de alterações microestruturais em aços. Esses ensaios exploram a sensibilidade das propriedades magnéticas, como a permeabilidade magnética. No presente trabalho, foi investigada a aplicação da permeabilidade magnética na região de reversibilidade do movimento dos domínios magnéticos como parâmetro sensível para distinguir diferentes condições microestruturais dos aços SAE 1040 e SAE 4340. Esses aços apresentam composições químicas e características metalúrgicas distintas, sendo o SAE 4340 amplamente utilizado em aplicações críticas, como trens de pouso de aeronaves, devido à sua maior capacidade de endurecimento. As amostras foram analisadas nas condições como recebida e submetidas a diferentes temperaturas de tratamento térmico. As medições eletromagnéticas foram correlacionadas com ensaios de dureza e análises microestruturais por microscopia óptica, buscando estabelecer relações diretas entre as propriedades magnéticas, a dureza e as transformações microestruturais ocorridas. Os resultados obtidos demonstraram que a técnica é capaz de detectar variações significativas nas características magnéticas dos materiais, permitindo distinguir com eficácia os diferentes tratamentos térmicos aplicados, bem como indicar mudanças na dureza.*

PALAVRAS-CHAVE: *PERMEABILIDADE MAGNÉTICA, AÇOS, ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.*

STUDY OF THE USE OF MAGNETIC PERMEABILITY TO DIFFERENTIATE STEELS SUBJECTED TO DIFFERENT HEAT TREATMENTS

ABSTRACT: *Electromagnetic tests have been used to analyze microstructural changes in steels. These tests explore the sensitivity of magnetic properties, such as magnetic permeability. In the present work, the application of magnetic permeability in the region of reversibility of the movement of magnetic domains was investigated as a sensitive parameter to distinguish different microstructural conditions of SAE 1040 and SAE 4340 steels. These steels have different chemical compositions and metallurgical characteristics, with SAE 4340 being widely used in critical applications, such as aircraft landing gear, due to its greater hardening capacity. The samples were analyzed as received and subjected to different heat treatment temperatures. The electromagnetic measurements were correlated with hardness tests and microstructural analysis by optical microscopy, in an attempt to establish direct relationships between the magnetic properties, hardness and microstructural transformations. The results obtained showed that the technique is capable of detecting significant variations in the magnetic characteristics of the materials, making it possible to effectively distinguish the different heat treatments applied, as well as indicating changes in hardness.*

KEYWORDS: *MAGNETIC PERMEABILITY, STEELS, NON-DESTRUCTIVE TESTING.*

1. INTRODUÇÃO

Mudanças microestruturais em materiais ferromagnéticos levam a variação de permeabilidade magnética e tornam ensaios eletromagnéticos não destrutivos como de suscetibilidade magnética, correntes parasitas, baseados no ruído magnético de Barkhausen e os de permeabilidade na região de reversibilidade do movimento dos domínios magnéticos promissores para acompanhamento de estruturas em serviços (Ghanei *et al*. 2014; Tavares *et al*. 2019).

Imposições de ciclos térmicos com em processos de soldagem em estruturas impõe mudanças microestruturais na região próxima a solda que é denominada de zona termicamente afetada. Ensaio não destrutivos como de ultrassom e correntes parasitas são empregados para certificar a qualidade da solda e evitar rompimentos de estruturas em serviço e prevenir danos humanos e econômicos (Ghanei *et al*. 2014; Tschiptschin, 2020).

Aços SAE 1040 e SAE 4340 são amplamente utilizados na indústria. Eles se diferem pela quantidade de elementos de liga, enquanto que o SAE 1040 é considerado um aço comum onde as propriedades são provenientes do Ferro e Carbono, o SAE 4340 tem adição dos elementos de liga Cr, Ni e Mo que conferem a este a capacidade de endurecer em profundidade que é denominada de temperabilidade e levam a este material a aplicações como trens de poso de aeronave, onde há a necessidade de garantir dureza ao longo de grandes espessuras (Calcagnotto, 2011; Çalik, 2009; Bakhshi S. e Mirak A., 2022; Park *et al*. 2023).

Ensaios de ultrassom onde a variação da velocidade do som e atenuação sônica tem sido empregado para caracterização das variações macroestruturais provenientes da imposição de tratamentos térmicos nos aços SAE 1040 e SAE 4340 tem mostrado ser capaz de diferenciar estes aços na condição como fornecida e tratadas ao serem aquecidos em diferentes temperatura e variação de velocidades de resfriamento (El Rayes *et al*. 2014; Gür C. H. e Cam I., 2007).

Ensaios eletromagnéticos baseados no ruído magnético de Barkhausen baseiam na análise do ruído magnético gerado na região de irreversibilidade do movimento dos domínios magnéticos. Os domínios ao tentarem vencer pontos de ancoragem com contornos de grãos, partículas de constituintes formados, tensões devido a deformações, por exemplo, geram ruído ao interagirem com a microestrutura. Estes ensaios mostram ser capazes de diferenciar variações microestruturais nos aços SAE 1040 e SAE 4340 (Gür C. H. e Cam I., 2007; Deng *et al*. 2018; Fagan *et al*. 2023; Stupakov *et al.* 2023).

Ensaios eletromagnéticos realizados na região de reversibilidade tem sido utilizado para análise da permeabilidade magnética nesta região. Estes são empregados para acompanhar transformações em aços inoxidáveis, aços carbono comuns e anisotropia magnética (El Rayes *et al*. 2014; Gür, C.H. e Tuncer, B.O., 2004; Gür C. H. e Cam I., 2007).

No presente trabalho medidas de permeabilidade na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos foi empregado para diferenciar os aços SAE 1040 e SAE 4340 como recebidos, bem como o efeito da temperatura de tratamento, de modo, estudar a capacidade de aplicação do ensaio apresentado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais (GSCMat). Os aços estudados são do tipo SAE 1040 e SAE 4340, obtidos na forma de vergalhões laminados com 25 mm de diâmetro. Através de usinagem, foram feitos rasgos no sentido do comprimento das peças, para garantir pontos de referência durante os ensaios. As amostras foram cortadas à serra com fluido de corte, para evitar sobreaquecimento. Para cada aço, foram obtidas quatro unidades idênticas com 5 mm de comprimento.

Uma das amostras de cada aço foi analisada como recebida do processo de fabricação. As demais passaram por tratamentos térmicos de recozimento e têmpera, de acordo com a Tabela 1.

TABELA 1. Tratamentos térmicos estudados.

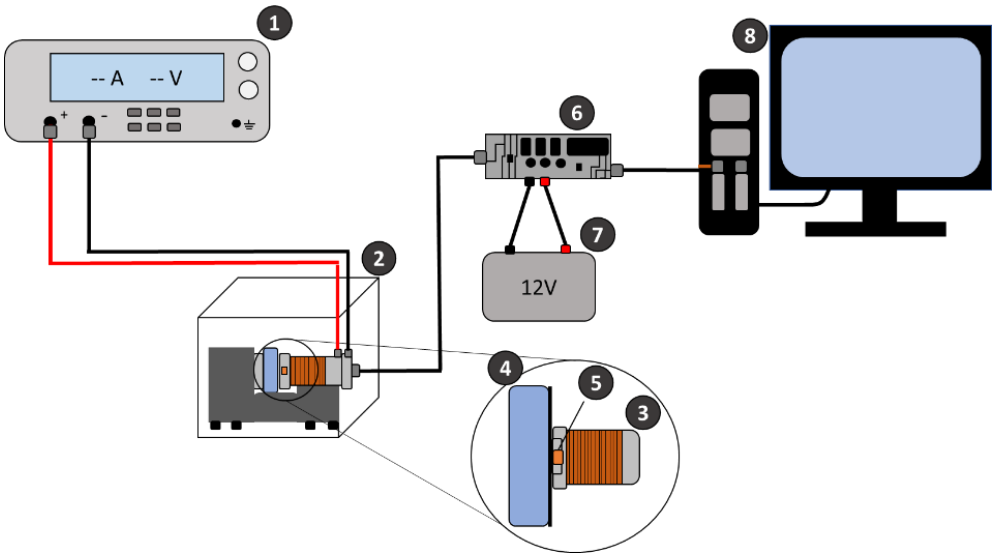
Amostra		Tratamento térmico
1040-1	4340-1	Condição de como recebida
1040-2	4340-2	Austenitização a 850 ºC, resfriada ao forno
1040-3	4340-3	Austenitização a 1000 ºC, resfriada ao forno

Fonte: Autoria própria (2025).

Após os tratamentos térmicos, as amostras passaram pela etapa de metalografia, na qual foram lixadas com lixas de grãos 100, 220, 320, 400 e 600 e polidas com alumina de 0,3 µm e 0,05 µm, seguida por ataque químico com reagente de nital 2%. Cada amostra foi analisada por microscopia óptica.

O equipamento experimental para ensaios de permeabilidade magnética (Figura. 1) é composto por uma fonte de tensão contínua (1), gaiola de Faraday (2), uma bobina emissora (3), a amostra estudada (4), sensor de efeito Hall (5), placa eletrônica de aquisição de dados (6), bateria de 12 V (7) e computador (8). Os cabos são blindados para reduzir as interferências do ambiente. A placa de aquisição é operada diretamente por um programa de computador, realizando 1000 medições por segundo.

FIGURA 1. Configuração detalhada a bancada de experimento.



Fonte: Autoria própria (2025).

Cada amostra é posicionada junto a bobina e o sensor, para ser magnetizada. A fonte de tensão contínua envia um sinal de 5 V para a bobina emissora, que o transforma em um campo magnético contínuo que flui pelo interior da amostra. A densidade de fluxo que percorre o material é medida pelo sensor de efeito Hall, que fica localizado em paralelo com a bobina emissora, e enviado ao computador via conexão USB. Cinquenta medidas foram realizadas na estrutura em vazio, como também em cada amostra.

Em seguida, os dados foram processados de modo a se obter os valores da permeabilidade, vale salientar que a permeabilidade magnética é uma propriedade específica de cada material e foi determinada pela relação da Equação 1, a seguir:

$$\mu = B/H \qquad (1)$$

onde μ é a permeabilidade do material, B é densidade de fluxo magnético (T) e H é o campo magnético aplicado (A/m).

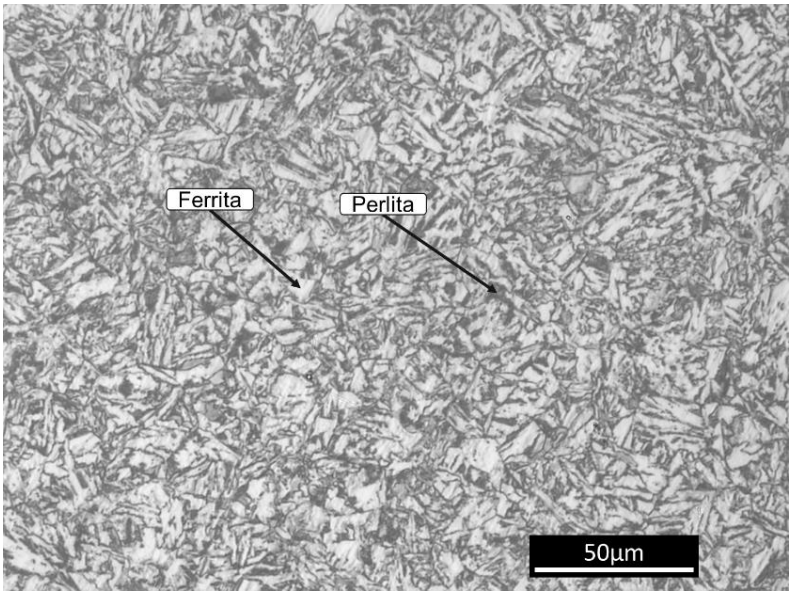
O valor de H é obtido, aproximadamente, com a medição em vazio, ou seja, sem a presença de material. B é medido a partir dos valores coletados com a presença das amostras. O cálculo é realizado para as cinquenta medidas e calculado a média aritmética com intervalo de confiança. As medidas foram realizadas no sistema CGS.

Ensaios de dureza Rockwell C foram realizados em todas as amostras, gerando um parâmetro confiável para correlação com os resultados do ensaio eletromagnético.

3. RESULTADOS

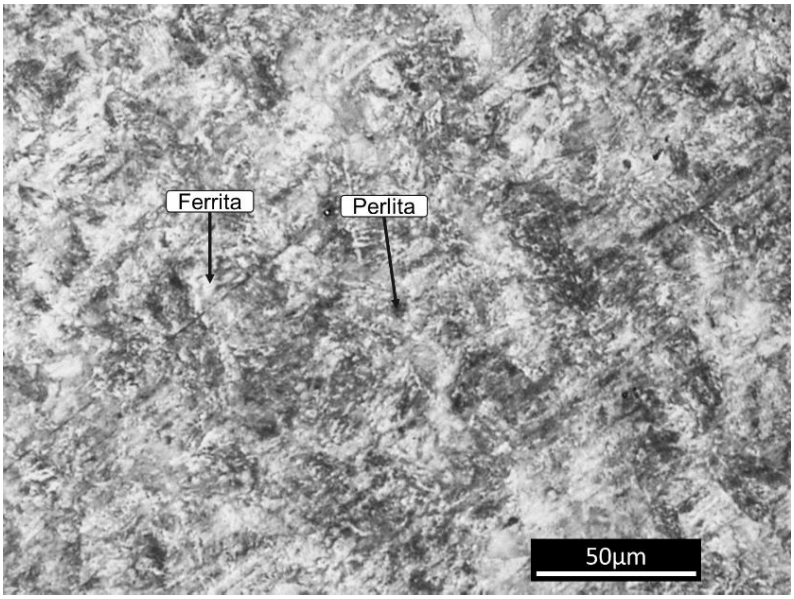
As Figuras 2 e 3 mostram as microestruturas obtidas por microscopia óptica dos aços SAE 1040 e aço SAE 4340 na condição como recebida. A Figura 2 mostra a presença de uma microestrutura composta por grãos finos de ferrita (região clara) e perlita (região escura). A amostra do aço SAE 4340, apresentada na Figura 3, exibe comportamento semelhante. No entanto, sua microestrutura é mais refinada, ou seja, apresenta grãos menores de forma geral.

FIGURA 2. Aço SAE 1040 como recebido.



Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 3. Aço SAE 4340 como recebido.

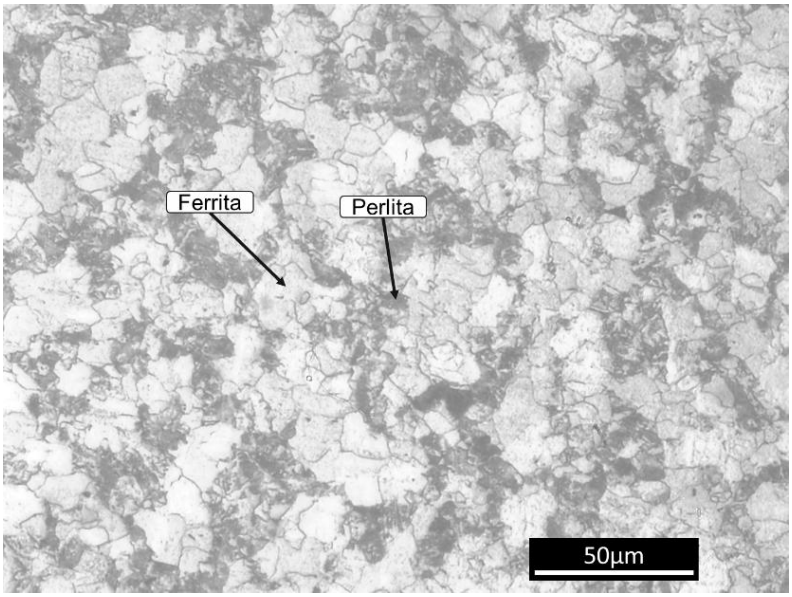


Fonte: Autoria própria (2025).

As variações microestruturais entre os aços SAE 1040 e SAE 4340 se devem a diferença de composição química entre os dois. Enquanto o aço SAE 1040 se caracteriza por ter suas propriedades provenientes do Ferro e Carbono somente, o que o define como um aço carbono comum, o aço SAE 4340 possui em sua composição, a adição de elementos de liga, que no caso são o Cromo, Níquel e Molibdênio, o que leva esse ser considerado um aço liga (Çalik, 2009; Park *et al*. 2023).

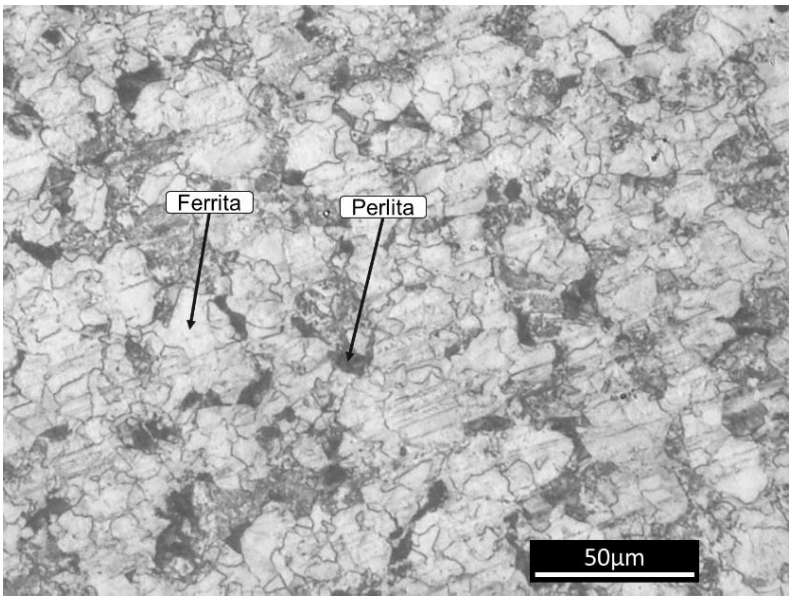
O aumento das quantidades de elementos de liga nos aços SAE 4340 levam a retardar o tempo de transformação, visto que uma maior quantidade de elementos necessita de um maior tempo de consumo durante o tratamento térmico e assim retarda o tempo inicial de formação de ferrita e perlita e com isso reduz o tempo de permanência em altas temperaturas, para uma mesma taxa de resfriamento (Bakhshi S. e Mirak A., 2022). Assim há um tempo menor para crescimento de grão e a formação de microestruturas mais finas conforme Figura 5, em comparação com a Figura 4. Microestruturas mais finas possuem maior quantidade de contornos de grão e tronam o material com maior dureza.

FIGURA 4. Aço SAE 1040 tratado na temperatura de 850 °C.



Fonte: Autoria própria (2025).

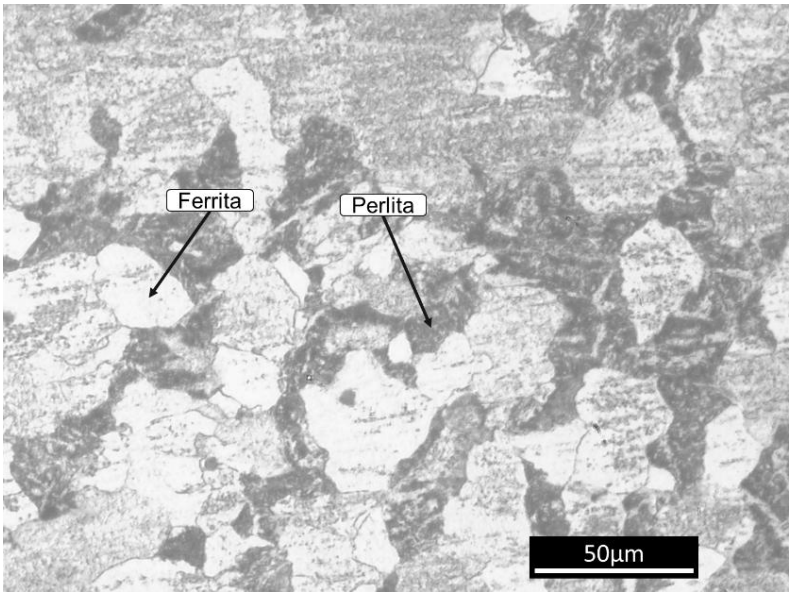
FIGURA 5. Aço SAE 4340 tratado na temperatura de 850 °C.



Fonte: Autoria própria (2025).

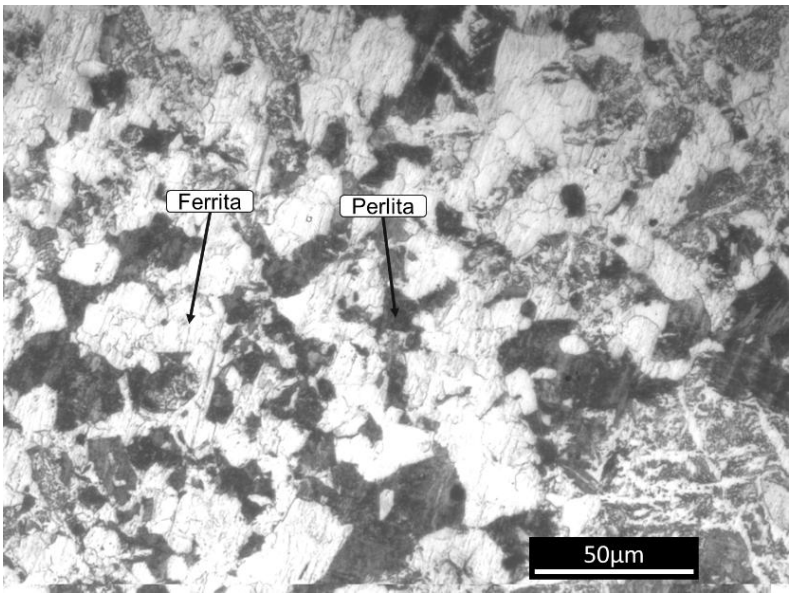
O mesmo comportamento é observado nas Figuras 6 e 7, apresentadas a seguir, referentes aos tratamentos de recozimento a 1000 °C. Nota-se um crescimento dos grãos em relação às amostras recozidas a 850 °C, mantendo-se, contudo, a diferença no tamanho dos grãos entre os dois aços.

FIGURA 6. Aço SAE 1040 tratado na temperatura de 1000 °C.



Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 7. Aço SAE 4340 tratado na temperatura de 1000 °C.

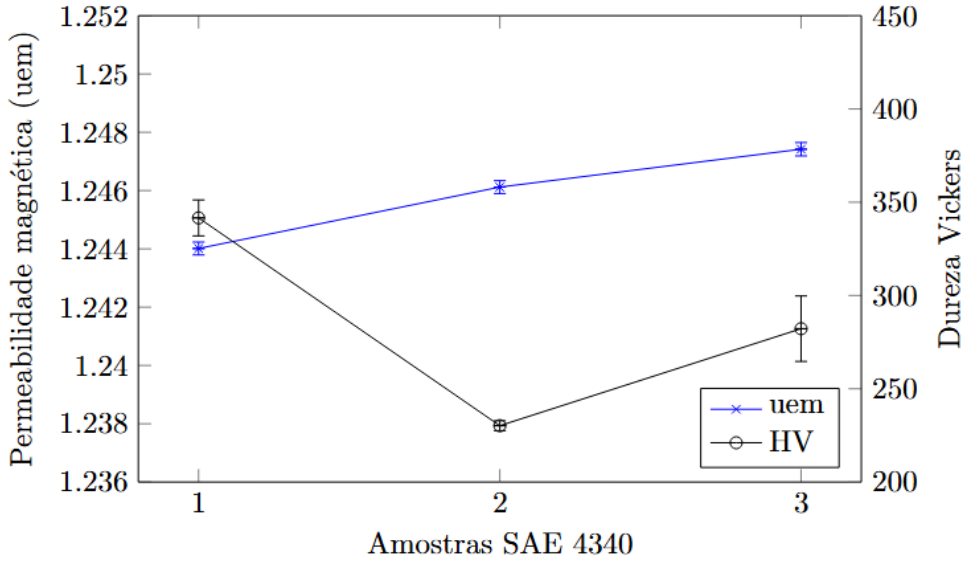


Fonte: Autoria própria (2025).

As Figuras 8 e 9 apresentam as variações das medidas de permeabilidade magnética e dureza em função das diferentes condições térmicas: material como recebido, tratado a 850 °C e tratado a 1000 °C, para os aços SAE 4340 e SAE 1040, respectivamente. Em relação às medidas de dureza, de modo geral, observam-se valores mais elevados para o aço SAE 4340 (Figura 8). Nota-se uma redução inicial na dureza após o tratamento de recozimento em 850 °C, em comparação com a condição como recebida, atribuída ao crescimento dos grãos. No entanto, há um aumento da dureza na amostra

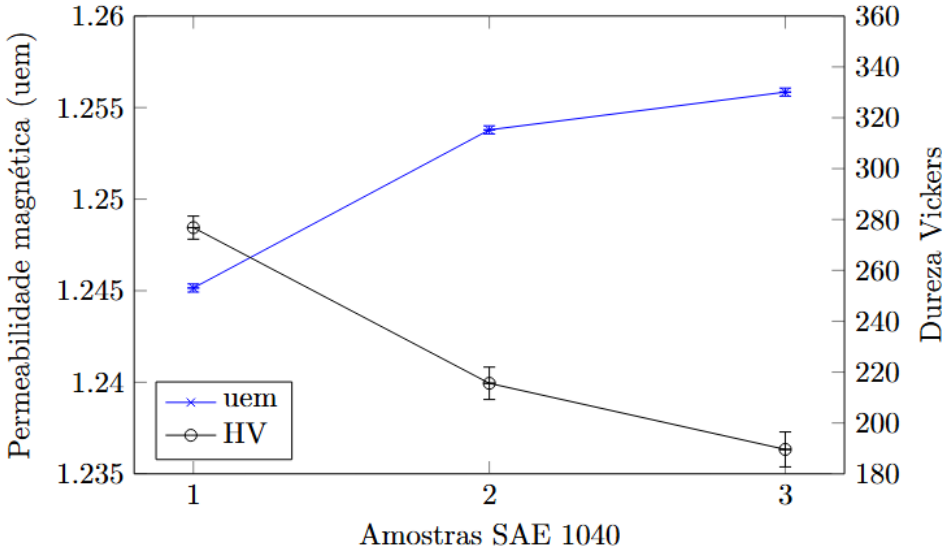
tratada a 1000 °C, o que pode ser explicado pela formação de precipitados de carbonetos que surgem em altas temperaturas devido a presença de elementos de liga no aço SAE 4340. Para o aço SAE 1040 (Figura 9), observa-se uma queda na dureza tanto após o tratamento a 850 °C quanto após o tratamento a 1000 °C. Como esse aço possui baixo teor de elementos de liga, o aumento da temperatura de recozimento promove principalmente o crescimento de grão, o que reduz a dureza ao facilitar o deslizamento dos planos atômicos.

FIGURA 8. Variações das medidas de permeabilidade magnética e dureza, em função das diferentes amostras para o aço 4340.



Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 9. Variações das medidas de permeabilidade magnética e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 1040.



Fonte: Autoria própria (2025).

Em relação às medidas de permeabilidade, ocorre um aumento em relação ao material inicial, em ambos os aços. O aumento do tamanho de grão leva a redução dos pontos de ancoragem, que no caso são as quantidades de contornos de grão. Isto facilita o movimento das paredes dos domínios magnéticos e aumento da permeabilidade do material (Tavares *et al*. 2019) (Çalik, 2009) (Bakhshi S. e Mirak A., 2022). O efeito do aumento de grão é mais sensível nas medidas de permeabilidade, pois o constituinte ferrita tem alta permeabilidade e o aumento do seu tamanho leva ao aumento da facilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos e crescimento da permeabilidade (Tavares *et al*. 2019) (Çalik, 2009). Logo, observa-se que, em ambos os aços, os valores de permeabilidade magnética tendem a aumentar com o incremento da temperatura de recozimento. No entanto, para o aço SAE 1040, esse crescimento é mais acentuado, especialmente nas amostras tratadas a 850 °C e, posteriormente, a 1000 °C. De modo geral, o aço SAE 1040 apresenta valores de permeabilidade magnética superiores aos do aço SAE 4340, comportamento que acompanha a evolução do tamanho de grão.

As medidas de permeabilidade magnética dos aços SAE 1040 e SAE 4340 evidenciam a capacidade da técnica em diferenciar aços com mesmo teor de carbono, mas com diferentes teores de elementos de liga. Isso aponta para uma metodologia experimental não destrutiva promissora na análise microestrutural de aços em serviço.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma configuração de bancada experimental para determinação da permeabilidade magnética de aços comerciais de diferentes capacidades de endurecimento, chegando às seguintes conclusões:

A metodologia é capaz de diferenciar os aços SAE 1040 e SAE 4340 em função das medidas de permeabilidade. O efeito dos tratamentos térmicos empregados foram diferenciados por essas medidas. As medidas de permeabilidade mostram serem sensíveis a variação microestrutural entre os dois aços estudados e para ambas as condições de tratamento mostrando serem sensíveis ao efeito do tamanho de grão. Isto aponta para uma metodologia não destrutiva para diferenciação de materiais.

REFERÊNCIAS

Ghanei, S.; Saheb Alam, A.; Kashefi, M.; Mazinani, M. Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by magnetic barkhausen noise technique. *Materials Science and Engineering: A*, v. 607, p. 253-260, 2014.

Tavares, S. S. M.; Noris, L. F.; Pardal J. M.; da Silva M.R. Temper embrittlement of supermartensitic stainless steel and non-destructive inspection by magnetic Barkhausen noise, *Engineering Failure Analysis*, v. 100, p. 322-328, 2019.

Tschiptschin, A. P. Tratamento Térmico de Aços. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - USP, 2020.

Calcagnotto, M.; Adachi, Y.; Ponge, D.; Raabe, D. Deformation and fracture mechanisms in fine-and ultrafine-grained ferrite/martensite dual- phase steels and the effect of aging. *Acta Materialia*, v. 59, n°. 2, p. 658-670, 2011.

Çalik, A. Effect of cooling rate on hardness and microstructure of aisi 1020, aisi 1040 and aisi 1060 steels. *International journal of Physical sciences*, v. 4, n°. 9, p. 514-518, 2009.

Bakhshi S. e Mirak A., The effect of low temperature transformation time on microstructural textural evolution, mechanical properties and fracture behavior of a low alloy, medium carbon, super strength aisi 4340, *Materials Science and Engineering: A*, v. 831, p. 142247, 2022.

Park, J.; Jeon, J.; Seo, N.; Kang, S.; Son, S. B.; Lee S. J.; e Jung, J. G. Microstructure and mechanical behavior of aisi 4340 steel fabricated via spark plasma sintering and post-heat treatment, *Materials Science and Engineering:* A, v. 862, p. 144433, 2023.

El Rayes, M.M.; El-Danaf, E. A.; Ehab, A. e Almajid, A. A. Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE-1040 and 4340 steels, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 216, p. 188-198, 2014.

Gür, C.H. e Tuncer, B.O. Investigating the microstructure-ultrasonic property relationships in steels. *16th WCNDT-World Conference on NDT*, 2004.

Gür, C.H. e Tuncer, B. O. Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement, *Materials Characterization*, v. 55, p. 160-166, 2005.

Gür C. H. e Cam I. Comparison of magnetic Barkhausen noise and ultrasonic velocity measurements for microstructure evaluation of SAE 1040 and SAE 4140 steels, *Materials Characterization*, v. 58, n°. 5, p. 447- 454, 2007.

Deng, Y.; Li, Z.; Chen J.; Qi, X. The effects of the structure characteristics on Magnetic Barkhausen noise in commercial steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 451, p. 276-282, 2018.

Fagan, P.; Zhang, S.; Sebald, G.; Uchimoto, T; Ducharne, B. Barkhausen cycle: noise Theoretical and experimental understanding, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 578, p. 170810. 2023.

Stupakov, A.; Perevertov, A; Neslušan, M. Reading depth of the noise. i. one-phase barkhausen magnetic semi-hard ribbons, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 513, p. 167086, 2020.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao GSCMat por providenciar os equipamentos usados nesta pesquisa e ao IFPB pelo espaço e apoio financeiro por meio da bolsa do mestrado.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.