



## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO RECOZIMENTO DE AÇOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN**

SANTOS, A. A., santos.alisson@academico.ifpb.edu.br

ABREU, F. F., abreu.filipe@academico.ifpb.edu.br

SILVA, E. M., edgard@ifpb.edu.br

CARREIRO, L. S., leia.carreiro@academico.ifpb.edu.br

EUROPEU, P. F. S., europeu.pedro@academico.ifpb.edu.br

CORREIA, S. É. N., suzete@ifpb.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, João Pessoa - PB, 58025-435, Brasil.

### **RESUMO**

Os aços podem apresentar mudanças microestruturais quando submetidos a ciclos térmicos. Para garantir sua integridade, inspeções podem ser realizadas por ensaios não destrutivos como ultrassom, correntes parasitas ou pela análise de ruído magnético de Barkhausen (RMB). Durante a magnetização do material, o movimento das paredes dos domínios magnéticos gera RMB. Sua intensidade varia conforme a quantidade de pontos de ancoragens como contornos de grãos, descontinuidades, fases precipitadas. No presente trabalho, foram realizados ensaios baseados em RMB pela aplicação de ondas senoidais de 5 Hz, para caracterizar amostras de aços SAE 1040 e SAE 4340, submetidos aos tratamentos térmicos de recozimento a 850 °C e recozimento a 1000 °C. Os resultados foram correlacionados com medidas de dureza, permeabilidade magnética e microestruturas obtidas por microscopia óptica. Os ensaios eletromagnéticos se mostraram capazes de diferenciar os tratamentos térmicos a cada temperatura, além de serem validados satisfatoriamente através dos demais testes.

Palavras-chave: ruído Barkhausen, ensaio não destrutivo, recozimento.

## INTRODUÇÃO

Nos processos de produção industrial, diversos fatores podem contribuir para o surgimento de defeitos em peças. Portanto, caracterizar o tipo e a localização das irregularidades no material é essencial para o controle de qualidade. Embora as avarias presentes em uma peça ou equipamento possam ocorrer de várias formas, o que as torna notoriamente difíceis de detectar (1), existem muitos métodos disponíveis na literatura para a inspeção de equipamentos e materiais. Entre esses, os ensaios não destrutivos (END) são processos utilizados para examinar um objeto com o intuito de avaliar suas propriedades e detectar aspectos como tensões, impurezas, falhas ou descontinuidades em materiais ou estruturas. Uma característica essencial para a aplicação dessa técnica é a capacidade de preservar os traços originais do componente analisado (2). Embora não exista um método universal para END, cada técnica tem suas limitações e aplicabilidades para casos específicos. A eficácia dos testes depende do tipo de elemento a ser analisado, da estrutura a ser inspecionada, da sensibilidade do método, bem como do tipo e da localização dos defeitos. Devido à complexidade geométrica das estruturas, ambientes insalubres, acessos restritos ou confinados, além de estruturas localizadas sob outras camadas de material, muitos métodos tornam-se inviáveis. Exemplos dessas técnicas incluem o teste ultrassônico, a técnica de correntes parasitas e a análise do ruído de Barkhausen (3) (4) (1).

Entre as técnicas de END, os ensaios baseados no Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) destacam-se por analisar o ruído magnético gerado durante o movimento irreversível dos domínios magnéticos na faixa central da curva de histerese. O nome desta técnica homenageia Heinrich Barkhausen, um físico alemão que descobriu e realizou os primeiros estudos sobre o fenômeno no início do século XX (5). O RMB é um fenômeno observado em materiais ferromagnéticos durante o ciclo de magnetização. Quando os domínios magnéticos tentam superar pontos de ancoragem, como contornos de grãos, partículas de constituintes formados e tensões devidas a deformações, eles interagem com a microestrutura, gerando o ruído característico. Esses ensaios demonstram ser capazes de diferenciar variações microestruturais em aços 1040 e 4340 (6) (7) (8) (9) (10).

O SAE 1040 é composto por 40 centésimos de porcentagem de Carbono, isto é, 0,40%. É um aço de médio carbono sem liga, apresenta uma resistência média, pode ser facilmente usinado sob condição de laminado a quente. É um tipo popular

de aço por sua variedade de aplicações como em construções, refinarias químicas, indústrias e em uma variedade de componentes automotivos, dentre eles, eixos, virabrequins, engrenagens, parafusos, acoplamentos e buchas. Geralmente é usado após tratamento de normalização e possui resistência à tração por volta de 590 Mpa (11) (12) (2).

Já o aço SAE 4340 também possui em sua composição 0,40% de Carbono e pertence a família 43, isto é, possui em sua constituição os elementos de liga Níquel (1,8%), Cromo (0,80%) e Molibdênio (0,25%) (13) (14) (15). Dentre suas propriedades destacam-se a boa soldabilidade, mudanças em propriedades mecânicas através de processos de tratamento térmico, deformabilidade, facilidade de fabricação, baixo custo, boa tenacidade e resistência mecânica. Essa variedade torna o SAE 4340 utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, inclusive componentes mais espessos, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. Além disso, é amplamente utilizado em ambientes de alta tensão possuindo aplicações diversas como engrenagens de automóveis e componentes de motores (13) (16) (17) (18).

No presente trabalho, a influência da temperatura no recozimento dos aços SAE 1040 e SAE 4340 é estudada, através da aplicação de ensaios não destrutivos baseados no ruído magnético de Barkhausen, em correlação com ensaios metalográficos e de dureza.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido nos laboratórios do Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais (GSCMat). Os materiais investigados foram os aços SAE 1040 e SAE 4340, por possuírem o mesmo teor de carbono e temperabilidades diferentes. São vergalhões laminados com 25 mm de diâmetro. Foram usinados pequenos rasgos no sentido longitudinal, para marcar pontos de referência e manter as amostras na mesma posição durante os ensaios. Em seguida, os materiais foram cortados à serra com fluido de corte para evitar sobreaquecimento. Para cada aço, foram obtidas três amostras idênticas de 5 mm de comprimento. As amostras foram classificadas e identificadas conforme a passagem por tratamento térmico (Tabela I).

Tabela I. Tratamentos térmicos estudados.

Número da amostra		Tratamento térmico
1040-1	4340-1	Condição de como recebida
1040-2	4340-2	Austenitização a 850 °C, resfriada ao forno
1040-3	4340-3	Austenitização a 1000 °C, resfriada ao forno

Após os tratamentos térmicos, todas as amostras passaram por ensaios metalográficos, na qual foram lixadas com lixas de grãos 100, 220, 320, 400 e 600 e polidas com alumina de 0,3 e 0,05 micrômetros. Em seguida, ataque químico com reagente de nital 2 % e análise por microscopia óptica por uso de um microscópio Nikon com sistema de aquisição de imagem acoplado.

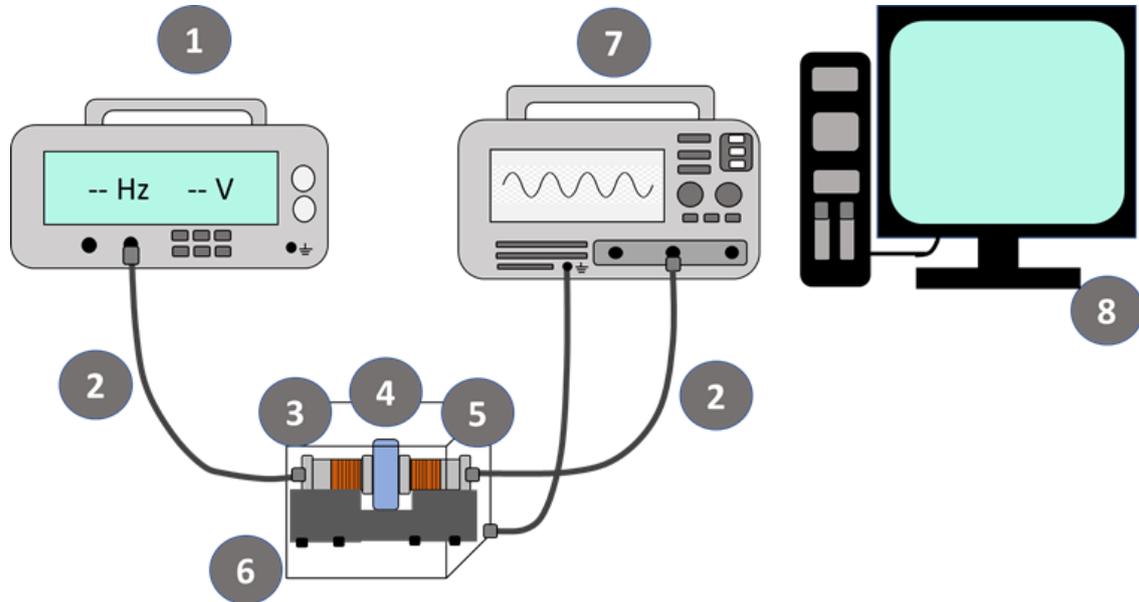
A bancada utilizada para realização do experimento consiste nos equipamentos dispostos na (Fig. 1) onde é composta por um gerador de formas de onda (1), cabos blindados (2), bobina emissora (3), a amostra analisada (4), bobina receptora (5), gaiola de Faraday (6), osciloscópio (7) e computador (8). As bobinas utilizadas são idênticas e possuem 19,5 mm de comprimento, 6.000 voltas em cobre esmaltado e alma em aço AISI 1020. Os cabos blindados e a gaiola de Faraday, empregados na bancada, possuem intuito de reduzir interferências eletromagnéticas externas.

O desenvolvimento do experimento ocorre da seguinte forma: uma amostra é colocada no espaço entre as bobinas a serem magnetizadas. O gerador de forma de onda envia uma onda senoidal com 1 V de amplitude e 5 Hz de frequência à bobina emissora, que a transforma em um campo magnético alternado. O sinal passa pela amostra, interagindo com seus domínios magnéticos e chega à bobina receptora, quando então é restabelecido como um sinal elétrico alternado. O sinal ruidoso resultante é enviado e exibido em um osciloscópio. Para cada amostra foram feitas 100 medições do sinal, com tempo de aquisição de 1 segundo, 10 mil pontos.

As medições são salvas através de conexão USB e analisadas em um programa de computador específico que permite manipular as medidas. Os dados foram transpostos para o domínio da frequência através da transformada de Fourier e em seguida é aplicado um Filtro passa-alta 1000 Hz para retirar os primeiros harmônicos da onda principal e possíveis interferências presentes nas baixas frequências. A raiz quadrada média dos resultados é calculada após a aplicação dos filtros e usada como parâmetro de análise do ruído magnético de Barkhausen. Foi

utilizado 1 corpo de prova para cada condição de tratamento e também para a condição inicial.

Figura 1. Equipamento experimental para ensaios eletromagnéticos.



Ensaio de dureza Rockwell C foram conduzidos em todas as amostras, para gerar um parâmetro confiável que, junto às micrografias, valida os resultados do ensaio eletromagnético por correlação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As micrografias dos ensaios metalográficos são apresentadas nas Figuras 2 e 3. As amostras analisadas como recebidas do processo de fabricação apresentam grãos pequenos e desuniformes (Fig. 2A e 3A). Os tratamentos térmicos provocam o crescimento dos grãos e a formação de colônias de perlita na matriz, sendo mais efetivos no tratamento a 1000 °C (Fig. 2C e 3C) em relação ao tratamento em 850 °C (Fig. 2B e 3B).

Figura 2 - Micrografia óptica das amostras do aço SAE 1040.

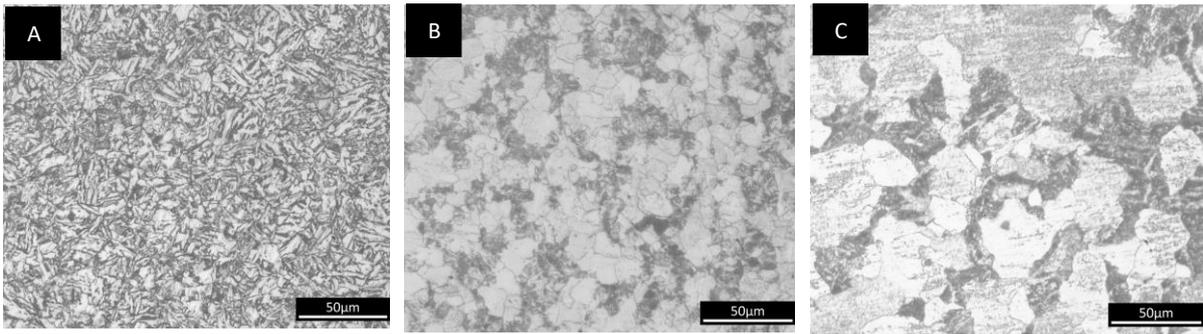
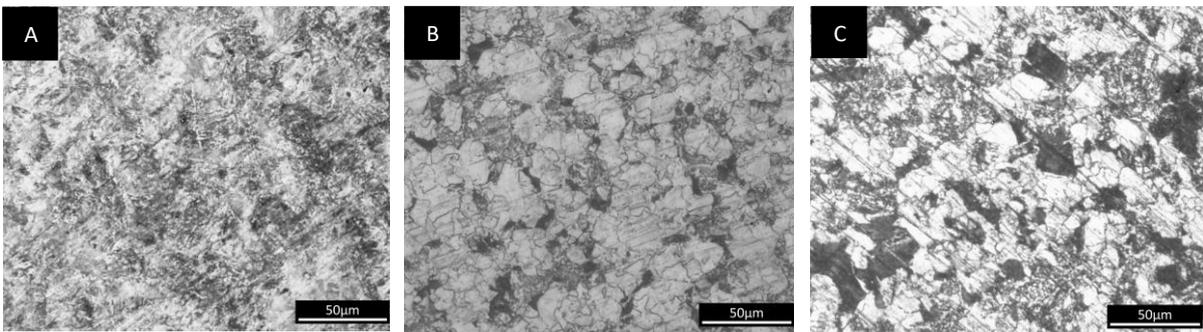
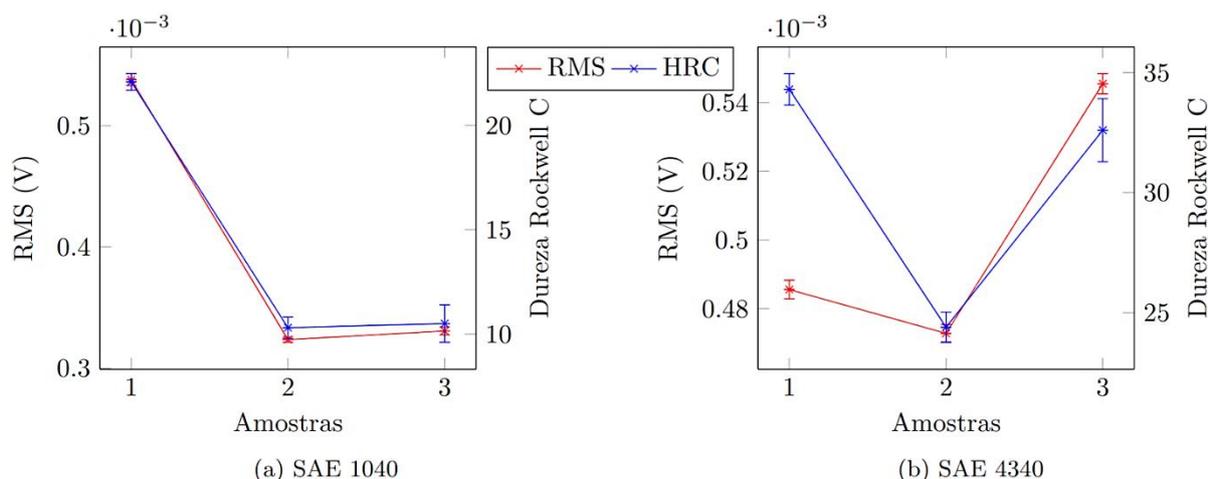


Figura 3 - Micrografia óptica das amostras do aço SAE 4340.



A Figura 4 exibe graficamente os resultados do ensaio eletromagnético após o tratamento das medidas, junto a respectiva medida de dureza Rockwell C de cada amostra. As amostras 2 e 3, que passaram por recozimento a 850 e 1000 °C respectivamente, apresentaram menor dureza e ruído magnético em relação a amostra 1 (como recebida). No aço SAE 1040, as tendências das duas grandezas são semelhantes, facilitando a correlação. A média da amostra 2 foi de 323  $\mu\text{V}$  em relação a 330  $\mu\text{V}$  amostra 3. As medidas não entraram em sobreposição, revelando uma diferença que não se manifestou nos ensaios de dureza. No aço SAE 4340, a redução e posterior aumento de dureza foi mais expressivo do que o comportamento do ruído.

Figura 4. Medidas de RMS junto a dureza Rockwell C dos materiais estudados.



Em geral, os dados resultantes das medições de ruído e dureza são congruentes. As microestruturas das amostras 1 (Figuras 2A e 3A) de grãos menores conferem-lhes menor capacidade de deslizamento de planos, reduzindo a dureza, assim como mais pontos de ancoragens para as paredes dos domínios magnéticos, aumentando o ruído de Barkhausen gerado. As amostras 3 (Figuras 2C e 3C) obtiveram maior concentração de fase perlítica, aumentando os níveis de dureza e ruído. Os valores de dureza se sobrepõem na amostra 1040-3, mas o ensaio eletromagnético revelou um pequeno aumento do ruído. Os aumentos de dureza e ruído da amostra 4340-3 em relação à 4340-2 foram mais expressivos.

Isoladamente, a perlita contribui para o aumento do sinal de ruído. Em relação a martensita, por exemplo, perlita grossa e perlita fina requerem menores níveis de magnetização para apresentarem uma maior amplitude do sinal (19), favorecendo os aumentos dos sinais nas amostras 1040-3 e 4340-3 recozidas a 1000 °C.

## CONCLUSÃO

Os tratamentos térmicos de recozimento sob as temperaturas de 850 e 1000 C apresentam diferenças expressivas. Através da correlação com os ensaios metalográficos e de dureza, o ensaio eletromagnético aplicado se mostra eficaz para análise dos aços estudados sob estas condições.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFPB (Instituto Federal da Paraíba) pelo fornecimento das instalações, equipamentos utilizados e pelo apoio financeiro, ao órgão brasileiro de fomento à pesquisa CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro sob o número 136100/2022-8 e ao GSCMat (Grupo de Pesquisa em Simulação de Comportamento de Materiais).

## REFERÊNCIAS

- (1) WILCZEK, A.; DŁUGOSZ, P.; HEBDA, M. Porosity Characterization of Aluminium Castings by Using Particular Non-destructive Techniques. *JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION*, v. 34, 2015. doi.org/10.1007/s10921-015-0302-z.
- (2) EL RAYES, M. M.; EL-DANAF, E. A.; ALMAJID, A. A. Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE-1040 and 4340 steels. *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY*, Saudi Arabia, v. 216, p. 188-198, 2015. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.005.
- (3) GRIJALBA, F. A. F.; PADOVESE, L. Non-destructive scanning for applied stress by the continuous magnetic barkhausen noise method. *JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS*, Brazil, v. 446, p. 231-238, 2018. doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.09.036.
- (4) JASIŪNIENĖ, E.; YILMAZ, B.; SMAGULOVA, D.; AHMAD, G. B.; CICĖNAS, V.; ŽUKAUSKAS, E.; MAŽEIKA, L. Non-Destructive Evaluation of the Quality of Adhesive Joints Using Ultrasound, X-ray, and Feature-Based Data Fusion. *APPLIED SCIENCES*, v. 12, n. 24, 2022. doi.org/10.3390/app122412930.
- (5) TAVARES, S. S. M.; NORIS, L.F.; PARDAL, J.M.; 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. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.034.
- (6) FAGAN, P., ZHANG, S., SEBALD, G., UCHIMOTO, T. AND DUCHARNE, B. Barkhausen noise hysteresis cycle: Theoretical and experimental understanding.

JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, v. 578, p. 170810.  
2023. doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170810.

(7) 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, pp. 276-282, 2018.  
doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.041.

(8) GÜR, C.H.; 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.  
doi.org/10.1007/s11740-021-01034-6.

(9) STUPAKOV, A.; PEREVERTOV, A.; NESLUŠAN, M.. Reading depth of the magnetic barkhausen noise. i. one-phase semi-hard ribbons. JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, v. 513, p. 167086. 2020.  
doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167086.

(10) NETO, I. P. B. Análise do ruído magnético de barkhausen por meio da transformada wavelet discreta para detecção de microestrutura fragilizante em aço. 2021. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

(11) 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. doi.org/10.5897/IJPS.9000188.

(12) PANGESTU, M. A.; ROSIDAH, D. A. A. Austenitizing temperature and quenching media effects on hardness and microstructure in hardening of AISI 1040 steel. JOURNAL OF MECHANICAL AND ELECTRICAL TECHNOLOGY, v. 3, n. 2, 2024. doi.org/10.33379/metrotech.v3i2.4178.

(13) LIMA, A. F. P. Detecção de tratamentos térmicos e anisotropia magnética em um aço SAE 4340 através de medidas de permeabilidade magnética. 2021. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

(14) BARTON, D. J.; BHATTIPROLU, S.; THOMPSON, G. B.; BREWER, L. N. Laser assisted cold spray of AISI 4340 steel. SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY, v. 400, p. 126218, 2020. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126218.

(15) SOUZA, M. F.; SERRÃO, L.F.; PARDAL, J. M.; TAVARES, S. S. M.; FONSECA, M. C. Tempering influence on residual stresses and mechanical properties of AISI

4340 steel, JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, v. 120, p. 1123-1134, 2022. doi.org/10.1007/s00170-022-08880-3.

(16) BAKHSHI, S.; 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 steel. MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: A, v. 831, p. 142247, 2022.

doi.org/10.1016/j.msea.2021.142247.

(17) PARK, J.; JEON, J.; SEO, N.; KANG, S.; SON, S.B.; LEE S.J.; J.G. JUNG. 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. doi.org/10.1016/j.msea.2022.144433.

(18) GOMES, J.; GAIVOTA, N.; MARTINS, R. F.; SILVA, P. P. Failure analysis of crankshafts used in maritime V12 diesel engines. ENGINEERING FAILURE ANALYSIS, v. 92, p. 466-479, 2018. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.06.020.

(19) SILVA, G. R. Caracterização magnética de aço com a superfície endurecida. 2010, 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, 2010.

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON STEELS ANNEALING THROUGH MAGNETIC BARKHAUSEN NOISE ANALYSIS**

### **ABSTRACT**

Steels can show microstructural changes when subjected to thermal cycles. To ensure their integrity, inspections can be carried out using non-destructive tests such as ultrasound, eddy currents or magnetic Barkhausen noise (MBN) analysis. During the magnetization of the material, the movement of the walls of the magnetic domains generates MBN. Its intensity varies according to the number of anchor points such as grain boundaries, discontinuities and precipitated phases. In this study, MBN-based tests were carried out using 5 Hz sinusoidal waves to characterize samples of SAE 1040 and SAE 4340 steels, subjected to annealing at 850 °C and annealing at 1000 °C. The results were correlated with hardness measurements and microstructures obtained by optical microscopy. The electromagnetic tests proved capable of differentiating the heat treatments at each temperature, as well as being satisfactorily validated by the other tests.

Keywords: Barkhausen noise, nondestructive test, annealing.