



**Filipe Fragoso de Abreu**

**Estudo da Influência de Tratamentos Térmicos em Aços de  
Diferentes Capacidades de Endurecimento Através de  
Ensaio Eletromagnético**

**João Pessoa - PB  
Abril de 2025**



**Filipe Fragoso de Abreu**

## **Estudo da Influência de Tratamentos Térmicos em Aços de Diferentes Capacidades de Endurecimento Através de Ensaios Eletromagnéticos**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Edgard de Macedo Silva, Dr.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *Campus* João Pessoa

A162e Abreu, Filipe Fragoso de.

Estudo da influência de tratamentos térmicos em aços de diferentes capacidades de endurecimento através de ensaios eletromagnéticos / Filipe Fragoso de Abreu. - 2025.

85 f. : il.

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2025.

Orientação : Prof<sup>o</sup>. Dr. Edgard de Macedo Silva.

1. Permeabilidade magnética. 2. Ruído magnético. 3. Análise de harmônicos. I. Título

CDU 620.179(043)



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**

**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU***

**MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FILIPE FRAGOSO DE ABREU**

**20231630005**

**“ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS DE DIFERENTES  
CAPACIDADES DE ENDURECIMENTO ATRAVÉS DE ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS”**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB - Campus João Pessoa.

**Aprovado em 24 de abril de 2024.**

**Membros da Banca Examinadora:**

**Dr. Edgard de Macedo Silva**

**IFPB (Orientador)**

**Dr. Alfredo Gomes Neto IFPB**

**(Examinador Interno)**

**Dr. João Pereira Leite UFPB**

**(Examinador Externo)**

**Dr Jeferson Costa e Silva IFPB**

**(Examinador Interno)**

Documento assinado eletronicamente por:

- Edgard de Macedo Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/05/2025 11:55:32.
- Jefferson Costa e Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/05/2025 12:05:40.
- Alfredo Gomes Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/05/2025 14:51:19.
- 

— João Pereira Leite, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 30/05/2025

16:20:17.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 08/04/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar->

Código 697548

Código de



## **AGRADECIMENTOS**

Os meus agradecimentos são para toda a minha família, em especial a meus pais, agricultores que mesmo sem muitas condições financeiras me deram total apoio para buscar esse sonho. Além deles, estendo à minha irmã, avós e tios pelo apoio durante essa fase importantíssima de minha vida. Estendo também a todo o PPGEE e GSCMat do IFPB, em especial ao meu orientador o professor Edgard de Macedo Silva por ser além de um grandioso profissional, uma fonte de inspiração para mim, que sempre sonhei em ser professor. Por fim, agradeço ao IFPB por me acolher desde os meus 15 anos, quando comecei o ensino médio integrado ao curso de técnico em eletromecânica, e por, desde então, ser minha segunda casa me proporcionando crescimento social e profissional.

"O próprio Senhor irá à sua frente e estará com você; ele nunca o deixará, nunca o abandonará. Não tenha medo! Não se desanime".

Deuteronômio 31:8

## RESUMO

Os ensaios não destrutivos (END) são amplamente empregados para inspecionar materiais metálicos que sofrem alterações ou degradações em suas características, destacando-se o Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), a permeabilidade magnética e a análise do primeiro harmônico. No presente trabalho, foi realizado um estudo sobre a influência de tratamentos térmicos em aços SAE 1040 e SAE 4340, que possuem diferentes capacidades de endurecimento, por meio desses ensaios eletromagnéticos. Para cada tipo de aço, foram utilizadas amostras nas seguintes condições: como recebida, recozida a 850 °C resfriada ao forno, recozida a 1000 °C resfriada ao forno e temperada a 1000 °C resfriado em água. Para o ensaio de análise da permeabilidade magnética, foi aplicado um sinal eletromagnético contínuo de 5 V em todas as amostras. Para os ensaios de análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico, foi aplicado um sinal senoidal de 2 V e 5 Hz. A avaliação foi realizada com base nas propriedades magnéticas, comparando os resultados com medições de dureza Vickers e análise microestrutural via microscopia óptica. Os dados obtidos evidenciaram a formação de diferentes microestruturas em função dos tratamentos aplicados, demonstrando que os ensaios foram eficazes na diferenciação dos tratamentos térmicos de acordo com as variações microestruturais. No ensaio de permeabilidade magnética, observou-se que o tamanho de grão influenciou diretamente na passagem do fluxo magnético, sendo coletados os maiores valores de permeabilidade magnética nas amostras recozidas em relação às demais. Na comparação entre os aços, o SAE 1040 apresentou maior permeabilidade devido à presença de grãos maiores em sua microestrutura. Em relação ao ruído magnético, o comportamento foi influenciado pelo tamanho de grão, pela morfologia da microestrutura e pela presença de precipitados. As amostras recozidas exibiram menores valores de ruído, atribuídos à menor quantidade de contornos de grão. Para o ensaio de análise do primeiro harmônico, os dados evidenciaram que o ensaio diferenciou completamente os dois aços em três amostras e foi influenciado pelo tamanho de grão, morfologia e quantidade de contornos de grão. Os resultados indicam que os ensaios estudados podem ser utilizados para monitorar variações nas microestruturas e nas mudanças de temperabilidade em aços SAE 1040 e SAE 4340.

Palavras chaves: Permeabilidade. Ruído magnético. Análise de harmônicos.

## **ABSTRACT**

*Non-destructive testing (NDT) is widely used to inspect metallic materials that have suffered alterations or degradations in their characteristics, including Barkhausen Magnetic Noise (MBN), magnetic permeability and first harmonic analysis. In this study, the influence of heat treatments on SAE 1040 and SAE 4340 steels, which have different hardening capacities, was examined using these electromagnetic tests. For each type of steel, samples were made in the following conditions: as received, annealed at 850 °C, annealed at 1000 °C and tempered at 1000 °C. For each type of steel, samples were used in the following conditions: as received, annealed at 850 °C cooled in the furnace, annealed at 1000 °C cooled in the furnace and tempered at 1000 °C cooled in water. For the magnetic permeability analysis test, a continuous electromagnetic signal of 5 V was applied to all the samples. For the magnetic noise analysis and first harmonic analysis tests, a 2 V, 5 Hz sinusoidal signal was applied. The evaluation was based on the magnetic properties, comparing the results with Vickers hardness measurements and microstructural analysis via optical microscopy. The data obtained showed the formation of different microstructures depending on the treatments applied, demonstrating that the tests were effective in differentiating the heat treatments according to the microstructural variations. In the magnetic permeability test, it was observed that the grain size directly influenced the passage of the magnetic flux, with the highest magnetic permeability values being collected in the annealed samples compared to the others. When comparing the steels, SAE 1040 showed greater permeability due to the presence of larger grains in its microstructure. In relation to magnetic noise, the behavior was influenced by grain size, microstructure morphology and the presence of precipitates. The annealed samples showed lower noise values, attributed to the smaller number of grain boundaries. For the first harmonic analysis test, the data showed that the test completely differentiated the two steels into three samples and was influenced by grain size, morphology and the number of grain contours. The results indicate that the tests studied can be used to monitor variations in microstructures and changes in hardenability in SAE 1040 and SAE 4340 steels.*

*Key words: Permeability. Magnetic noise. Harmonics analysis.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Experimento realizado por Barkhausen.....	22
Figura 2 -	Estágios de magnetização de material ferromagnético. ....	23
Figura 3 -	Estágios de magnetização de material ferromagnético com detalhes da formação do RMB. ....	24
Figura 4 -	Amostra de sinal estocástico (a) estacionário e (b) não- estacionário. ....	25
Figura 5 -	Sistema clássico de aquisição do RMB.....	28
Figura 6 -	Sistema de medição com bobina receptora envolvente. ....	29
Figura 7 -	Modelo de medição, com bobina receptora envolvente simples (1) e com bobina receptora envolvente dupla (2). ....	30
Figura 8 -	Esquema com duas bobinas de superfície. ....	31
Figura 9 -	Triângulo retângulo formado na região de reversibilidade dos domínios magnéticos pela curva de histerese de cada material..	33
Figura 10 -	Configuração experimental usada para o ensaio de permeabilidade magnética: (1) fonte de alimentação; (2) bobina emissora; (3) bancada; (4) sensor de efeito Hall; (5) amostra analisada; (6) Dispositivo de aquisição de dados; (7) bateria; (8) computador.....	34
Figura 11 -	Esquemático da interação entre sinal senoidal aplicado em material ferromagnético. ....	35
Figura 12 -	Configuração experimental usada para o ensaio de análise do primeiro harmônico da onda principal: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra analisada, (5) sensor de efeito Hall, (6) gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição de dados e (8) computador.....	36
Figura 13 -	Diagrama de fases ferro-carbono. ....	38
Figura 14 -	Amostras confeccionadas.....	47
Figura 15 -	Esquemático do comportamento dos ciclos térmicos para os diferentes tratamentos térmicos.....	48

Figura 16 - Circuito esquemático da bancada de medição de permeabilidade magnética.....	50
Figura 17 - Bancada de medição de permeabilidade magnética do GSCMat.	50
Figura 18 - Lado interno da bancada de medição de permeabilidade magnética. ....	51
Figura 19 - Circuito esquemático da bancada de medição do RMB. ....	52
Figura 20 - Bancada para medir ruído magnético e o primeiro harmônico da onda emissora pertencente ao GSCMat.....	53
Figura 21 - Lado interno da bancada de medição do ruído magnético e primeiro harmônico. ....	53
Figura 22 - Etapas de execução dos ensaios eletromagnéticos. ....	55
Figura 23 - Material aço SAE 1040 como recebido.....	57
Figura 24 - Material aço SAE 1040 recozido em temperatura de 850 °C. ....	57
Figura 25 - Material aço SAE 1040 recozido em temperatura de 1000 °C. ...	58
Figura 26 - Material aço SAE 1040 após têmpera em 1000 °C. ....	58
Figura 27 - Material aço SAE 4340 como recebido.....	59
Figura 28 - Material aço SAE 4340 recozido em temperatura de 850 °C. ....	59
Figura 29 - Material aço SAE 4340 recozido em temperatura de 1000 °C. ...	60
Figura 30 - Material aço SAE 4340 após têmpera em 1000 °C. ....	60
Figura 31 - Tamanho médio dos grãos de ferrita conforme mudança na temperatura do recozimento para o aço SAE 1040 e aço SAE 4340.	61
Figura 32 - Variações das medidas de permeabilidade magnética e dureza para as amostras do aço SAE 1040 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4). ....	63
Figura 33 - Variações das medidas de permeabilidade magnética e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4). ....	63
Figura 34 - Variações das medidas de permeabilidade magnética em função das diferentes amostras para os aços SAE 1040 e SAE 4340 nas	

	condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).....	65
Figura 35 -	Variações das medidas de ruído magnético e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 1040 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4). .....	66
Figura 36 -	Variações das medidas de ruído magnético e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4). .....	67
Figura 37 –	Variação da porcentagem de perlita conforme mudança na temperatura do recozimento para o aço SAE 1040 e aço SAE 4340. ....	68
Figura 38 -	Variações das medidas de ruído magnético em função dos diferentes tratamentos para os aços SAE 1040 e SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).....	70
Figura 39 -	Variações das medidas do primeiro harmônico e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 1040 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).....	71
Figura 40 -	Variações das medidas da média do primeiro harmônico e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4). .....	72
Figura 41 -	Variações das medidas da média do primeiro harmônico, em função das diferentes amostras para os aços SAE 1040 e SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4). .....	73

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tratamentos térmicos empregados aos aços SAE 1040 e SAE 4340.....48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>C</b>	Carbono
<b>TW</b>	Transformada Wevelets
<b>SAE</b>	Sociedade de Engenheiros Automotivos
<b>Mn</b>	Manganês
<b>AISI</b>	Instituto Americano de Ferro e Aço
<b>STFT</b>	Transformada de Fourier de Curto Tempo
<b>TF</b>	Transformada de Fourier
<b>RMS</b>	Raiz do Valor Quadrático Médio
<b>RMB</b>	Ruído Magnético de Barkhausen
<b>HRC</b>	Dureza Rockwell C
<b>IFPB</b>	Instituto Federal da Paraíba
<b>DAQ</b>	Dispositivo de Aquisição de Dados
<b>USB</b>	Barramento Serial Universal
<b>END</b>	Ensaio Não Destrutivo
<b>FFT</b>	Transformada Rápida de Fourier
<b>GSCMat</b>	Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais do IFPB
<b>CGS</b>	Centímetro–Grama–Segundo
<b>Mpa</b>	Megapascal
<b>Oe</b>	Oersted
<b>Hz</b>	Hertz
<b>Mm</b>	Milímetro
<b>V</b>	Volt
<b>Vm</b>	Valor médio do sinal
<b>N</b>	Número de pontos do sinal
<b>AID</b>	Aço Inoxidável Duplex
<b>HV</b>	Dureza Vickers
<b>Uem</b>	Unidade eletromagnética
<b>H/m</b>	Henrys por metro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta t$	Intervalo de tempo
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$\mu m$	Micrometro
$\alpha$	Ferrita
$\gamma$	Austenita
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS .....	20
2.2	RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN.....	21
2.3	CARACTERIZAÇÃO DO SINAL.....	24
2.4	ANÁLISE DO SINAL.....	25
<b>2.4.1</b>	<b>Valor RMS do RMB .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Energia do RMB.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Análise no domínio da frequência .....</b>	<b>26</b>
2.5	CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO DO RMB EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS .....	27
2.6	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA.....	31
2.7	CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS.....	33
2.8	ANÁLISE HARMÔNICA.....	34
2.9	CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO DO PRIMEIRO HARMÔNICO EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS .....	36
2.10	AÇOS.....	37
2.11	TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS.....	40
2.12	ESTADO DA ARTE .....	42
<b>2.12.1</b>	<b>Estudos utilizando o RMB .....</b>	<b>42</b>
<b>2.12.2</b>	<b>Estudos utilizando a permeabilidade magnética.....</b>	<b>43</b>
<b>2.12.3</b>	<b>Estudos utilizando os harmônicos .....</b>	<b>45</b>

<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>47</b>
3.1	MATERIAL UTILIZADO .....	47
3.2	ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS APLICADOS NA REGIÃO DE REVERSIBILIDADE .....	49
3.2.1	<b>Ensaio de permeabilidade magnética.....</b>	<b>49</b>
3.2.2	<b>Ensaio da análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico .....</b>	<b>52</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
4.1	ANÁLISE DAS MICROESTRUTURAS OBTIDAS PELOS TRATAMENTOS TÉRMICOS APLICADOS .....	56
4.2	ANÁLISE DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DOS DIFERENTES TRATAMENTOS EM AMBOS OS AÇOS .....	62
4.3	ANÁLISE DO ENSAIO DO RUÍDO MAGNÉTICO DOS DIFERENTES TRATAMENTOS EM AMBOS OS AÇOS .....	65
4.4	ANÁLISE DO ENSAIO DO PRIMEIRO HARMÔNICO DOS DIFERENTES TRATAMENTOS EM AMBOS OS AÇOS .....	70
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>6.</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>76</b>
<b>7.</b>	<b>TRABALHOS PUBLICADOS .....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos (END), ou técnicas não destrutivas, se referem aos processos utilizados para examinar um objeto com o intuito de avaliar suas propriedades e detectar diversos aspectos preservando os traços originários do componente analisado, ou seja, suas características e utilidades originais não são comprometidas (EI RAYES *et al.*, 2015; YOSHANDI; HAMDANI; ANNISA, 2021). Dentre as variações de técnicas, algumas são utilizadas para acompanhamento da formação de microestruturas indesejadas em materiais, assim como para inspeção de materiais que sofrem alteração ou degradação de suas características com a variação térmica ao serem utilizados em ambientes com temperaturas elevadas ou em processos de soldagem. O ensaio por ultrassom, a técnica de correntes parasitas, o ensaio baseado na análise do ruído magnético de Barkhausen (RMB), o ensaio de permeabilidade magnética e a técnica de análise do primeiro harmônico são exemplos de ENDs (SILVA, 2020; SILVA *et al.*, 2024; GRIJALBA; PADOVESE, 2018; SILVA *et al.*, 2016A).

Dentre as técnicas de END citadas, o ensaio baseado na análise do RMB surge a partir das interações entre um campo magnético aplicado e um material ferromagnético na região de irreversibilidade dos domínios magnéticos. Recebe essa denominação em homenagem ao pesquisador Heinrich Barkhausen que descobriu e estudou esse fenômeno por volta de 1919, quando realizava experimentos para magnetização de um material ferromagnético (MELO, 2019). Este ruído deve-se aos saltos abruptos causados pelo desprendimento das paredes dos domínios ao passarem por pontos de ancoragem como contornos de grãos, discordâncias, heterogeneidades ou outras imperfeições. Durante esse processo, são geradas pequenas variações da tensão induzida que são coletadas e compõem o que é conhecido como RMB (QIAN, 2022; CARVALHO, 2018).

Devido à ausência de uma configuração de medição padronizada, principalmente pelas características e variedades dos materiais, frequências magnetizantes e formas de onda, o RMB tradicionalmente é medido com uma estrutura formada por um eletroímã, uma bobina emissora e uma receptora (ORTEGA-LABRA *et al.*, 2022). No entanto, uma variação da estrutura clássica que

tem como base o uso do sensor de efeito Hall possui aplicações, com resultados satisfatórios. O método, descrito por Lins (2020), mostra que o campo magnético gerado pela bobina emissora passa pelo interior da amostra e é coletado por um sensor de campo magnético (sensor de efeito Hall) que fica posicionado do lado oposto da peça. Desse modo, o campo magnético que é aplicado e sofre a interação com a microestrutura da amostra é coletado pelo sensor.

O ensaio de permeabilidade magnética baseia-se no princípio de que a facilidade com que um fluxo magnético atravessa um material, ou seja, sua resistência à indução magnética, pode ser utilizado para identificar diferentes microestruturas em materiais magnéticos. A relação entre a densidade de fluxo magnético ( $B$ ) e a intensidade de campo magnético aplicado ( $H$ ) permite avaliar a permeabilidade magnética, sendo crucial conhecer o valor específico de permeabilidade de cada material para entender suas propriedades (NASCIMENTO JUNIOR, 2011; LEITE, 2014; LIMA, 2021; SILVA *et al.*, 2016A).

Já o ensaio para análise do primeiro harmônico baseia-se nas variações em baixas frequências no campo magnético, ao interagir com a microestrutura de materiais ferromagnéticos, que resultam em uma distorção do campo magnético devido à não linearidade da permeabilidade magnética e à histerese magnética. Isso faz com que a tensão induzida se torne assimétrica, transformando ondas aplicadas em formas distorcidas que contêm componentes em frequências harmônicas. A análise desses harmônicos é utilizada em várias aplicações, como a investigação de falhas em resina epóxi, avaliação não destrutiva de aço envelhecido, medição do estado de materiais em metais e monitoramento da microestrutura de aços inoxidáveis (RYU *et al.*, 2001; SILVA *et al.*, 2018; SPIRLI & YILMAZ, 2018; MATLACK *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2024).

Aços SAE 1040 e 4340 são amplamente utilizados na indústria. Eles se diferem pela quantidade de elementos de liga. Enquanto que o aço SAE 1040 é considerado um aço comum onde as propriedades são provenientes do Fe e C, o aço SAE 4340 tem adição dos elementos de liga Cr, Ni e Mo que conferem a este a capacidade de endurecer em profundidade, a qual é denominada de temperabilidade e possibilitam a este material aplicações como trens de pouso de aeronaves, onde há a necessidade de garantir dureza ao longo de grandes espessuras (CALCAGNOTTO *et al.*, 2011; ÇALIK, 2009; BAKHSHI; MIRAK, 2022; PARK *et al.*, 2023).

Ensaio eletromagnético baseado no ruído magnético de Barkhausen apresentam-se como capazes de diferenciar variações microestruturais nos aços SAE 1040 e SAE 4340 (GÜR; CAM, 2007; DENG *et al.*, 2018; FAGAN *et al.*, 2023; STUPAKOV *et al.*, 2020). Ensaio eletromagnético realizado na região de reversibilidade têm sido utilizados para análise da permeabilidade magnética nesta região. Estes têm sido empregados para análise de anisotropia magnética em aços SAE 1040 e transformações microestruturais em aços inoxidáveis (El RAYES *et al.*, 2015; GÜR; TUNCER, 2004; GÜR; CAM, 2007).

No presente trabalho medidas de permeabilidade na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos, análise através do ruído magnético e análise do primeiro harmônico são empregados para o estudo de diferenciação de aços SAE 1040 e SAE 4340, submetidos a diferentes tratamentos térmicos, em que o efeito da temperatura e da velocidade de resfriamento são analisadas. Assim, serão avaliados os comportamentos dos três ensaios empregados e como estes variam com as mudanças microestruturais dos aços utilizados, de modo, a poder analisar possíveis diferenças de comportamento.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

1. Estudar a influência de tratamentos térmicos em aços SAE 1040 e SAE 4340, que possuem diferentes capacidades de endurecimento, através dos ensaios eletromagnéticos de medidas de permeabilidade magnética, análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudar o efeito da temperatura de tratamento em aços SAE 1040 e SAE 4340, por medidas de permeabilidade, análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico.
2. Estudar o efeito da velocidade de resfriamento em aços SAE 1040 e SAE 4340, por medidas de permeabilidade, análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico.

3. Correlacionar os resultados com medidas de dureza e variação na microestrutura para as diferentes temperaturas de tratamento e as diferentes velocidades de resfriamento.
4. Analisar as vantagens e desvantagens de cada ensaio eletromagnético aplicado.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em sete capítulos detalhados a seguir, com o intuito de proporcionar uma compreensão clara e estruturada do estudo realizado. O Capítulo 1 trata de uma introdução sobre os principais aspectos e objetivos almejados na pesquisa em torno dos ensaios eletromagnéticos, além de uma breve descrição da metodologia utilizada e um resumo da estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 traz uma fundamentação teórica acerca de ensaios de análise do ruído magnético de Barkhausen, permeabilidade magnética e análise do primeiro harmônico, as formas de medi-los, os conceitos e dados relacionados aos aços SAE 4340 e SAE 1040, além de revisão da literatura existente sobre os temas, abordando as principais teorias e estudos prévios que fundamentam a pesquisa.

No Capítulo 3 detalham-se métodos e materiais de pesquisa utilizados, incluindo a descrição da bancada de experimentos, os procedimentos de coleta de dados, as técnicas de análise e métodos aplicados com base nos objetivos do estudo.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos e as análises dos dados coletados durante a pesquisa, utilizando gráficos e outras ferramentas para facilitar a compreensão.

O Capítulo 5 realiza uma síntese dos principais achados da pesquisa, destacando suas contribuições para o estudo dos ensaios eletromagnéticos nos aços SAE 1040 e SAE 4340 com diferentes tratamentos térmicos e níveis de dureza, discutindo as implicações práticas dos resultados.

O capítulo 6 apresenta um apanhado das recomendações para pesquisas futuras com base na presente pesquisa.

O capítulo 7 aborda os trabalhos publicados em congressos durante a execução da pesquisa.

Ao final da dissertação, apresenta-se uma lista das referências bibliográficas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo aborda o referencial teórico utilizado para compor a base de conhecimentos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa. Serão expostos os métodos não destrutivos baseados na análise do RMB, na análise da permeabilidade magnética na região de reversibilidade do movimento dos domínios magnéticos, e de análise do primeiro harmônico. Em seguida serão abordados os tópicos sobre caracterização do sinal, análise do sinal e configurações de medição. Por fim será apresentada uma revisão sobre aços, tratamentos térmicos, temperabilidade e o estado da arte para a pesquisa.

### 2.1 MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

Nos processos de produção industrial há diversos fatores que podem contribuir para o surgimento de defeitos em peças, principalmente quando não há um rígido controle e precisão nas etapas de fabricação. Logo, determinar o tipo e localização das irregularidades no material torna-se uma tarefa essencial para o controle de qualidade, levando a possibilidade de se estabelecer quais fatores que podem gerar danos. No entanto, esta não é uma tarefa fácil, uma vez que as avarias presentes em uma peça ou equipamento são notoriamente difíceis de detectar (WILCZEK; DŁUGOSZ; HEBDA, 2015).

A análise de um material pode ser realizada de diversas formas, dependendo da aplicação e qual objetivo final se almeja alcançar. Entre os vários métodos disponíveis na literatura, os ensaios não destrutivos ou técnicas não destrutivas são termos utilizados para designar o meio utilizado para examinar um objeto, materiais ou estruturas, com o intuito de avaliar suas propriedades e detectar aspectos, como: tensões, impurezas, falhas ou descontinuidades que podem ser vazios, inclusões e trincas. Uma característica essencial para a aplicação destas técnicas é a capacidade de preservar os traços originais do componente analisado, pois esse método não interfere na integridade original do material. Em outras palavras, suas características e funcionalidades originais não são comprometidas (El RAYES *et al.*, 2015).

Dentre as diversas metodologias de ENDs, não existe um método universal, pois cada técnica apresenta limitações e aplicabilidades específicas. Alguns métodos proporcionam melhores resultados para determinadas aplicações em comparação

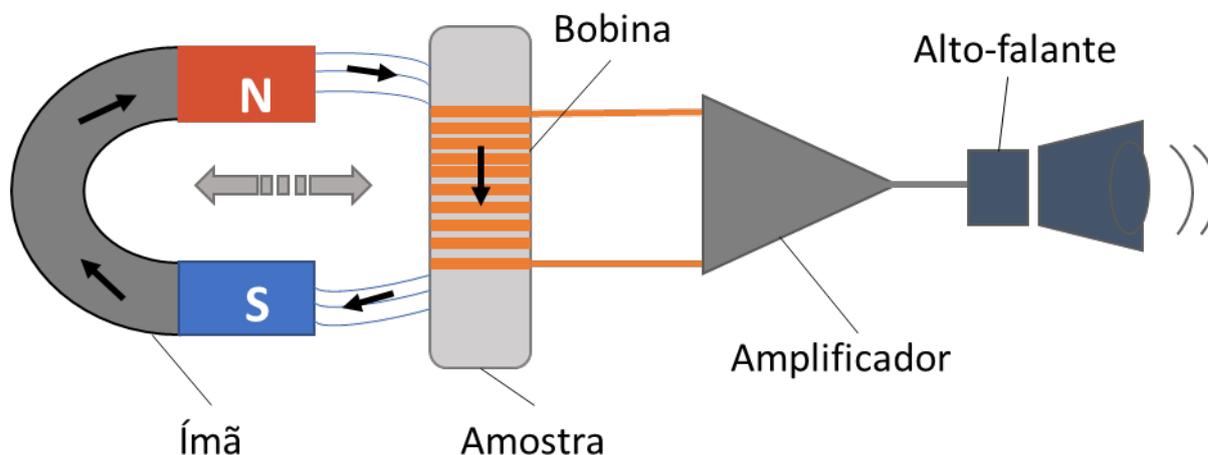
com outros. Os ensaios não destrutivos são amplamente utilizados na indústria e envolvem diferentes processos para extrair características e dados sobre o material analisado. A eficácia dos testes depende de fatores como o tipo de elemento a ser avaliado, a estrutura inspecionada, a sensibilidade do método empregado, além do tipo e da localização dos defeitos. Além disso, a aplicação de determinados métodos pode se tornar inviável devido à complexidade geométrica da estrutura, à presença de ambientes insalubres, ao acesso restrito ou confinado, bem como à localização da estrutura sob outras camadas de material. Alguns exemplos dessas técnicas são o teste ultrassônico, a técnica de correntes parasitas, a análise do ruído de Barkhausen, ensaio de permeabilidade magnética e análise do primeiro harmônico (GRIJALBA; PADOVESE, 2018; SILVA *et al.*, 2016A; JASIŪNIENĖ *et al.*, 2022; WILCZEK; DŁUGOSZ; HEBDA, 2015; SILVA *et al.*, 2024).

## 2.2 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

O RMB é um fenômeno produzido pelos materiais ferromagnéticos durante o ciclo de magnetização e que remete a informações sobre as propriedades da microestrutura. Recebeu esse nome em homenagem a Heinrich Barkhausen, um físico alemão responsável pelo seu descobrimento e primeiros estudos no início do século XX (TAVARES *et al.*, 2019).

O experimento realizado por Barkhausen se deu a partir da utilização de um ímã, uma amostra ferromagnética, uma bobina, um amplificador de sinal e um alto falante, conforme Figura 1. Durante a movimentação do ímã foi constatado que a amostra magnetizada gerava pulsos de tensão elétrica na bobina enrolada. Esses pulsos eram amplificados e se tornavam audíveis por meio da utilização do alto falante (NETO, 2021).

Figura 1 - Experimento realizado por Barkhausen.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

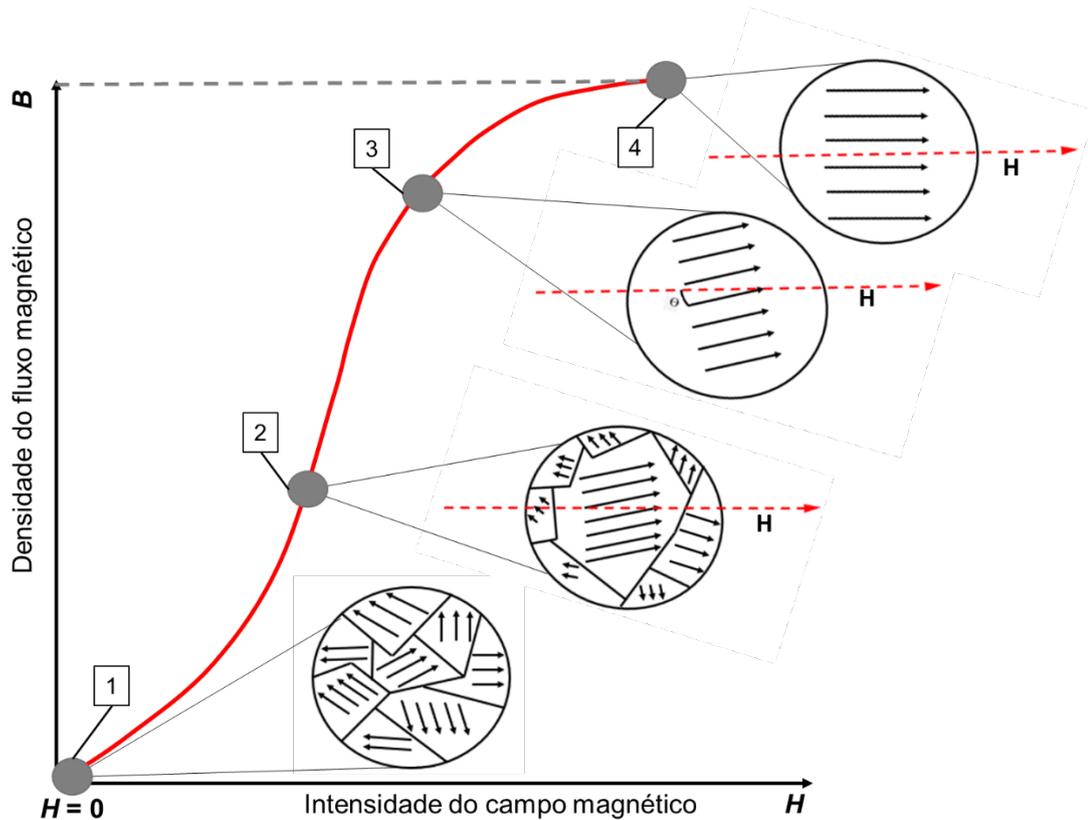
A formação do RMB está relacionada com um fenômeno complexo, gerado a partir da movimentação dos domínios magnéticos dentro do material, por consequência dos movimentos irreversíveis, irregulares e descontínuos das paredes de domínios magnéticos na faixa de irreversibilidade magnética da curva de histerese (NETO, 2021).

A microestrutura dos materiais ferromagnéticos é formada por regiões denominadas de domínios magnéticos e são interligadas por meio de fronteiras conhecidas como paredes de domínio (QIU *et al.*, 2021). Cada domínio magnético apresenta uma dada direção de orientação de seus dipolos magnéticos que se apresentam uniformemente alinhados e produzem um momento magnético resultante significativo. Porém, devido à variação de orientação entre cada domínio magnético, o material ferromagnético, por completo, não produz campo magnético resultante quando o material se encontra ausente do efeito de um campo magnético externo (DIWAKAR *et al.*, 2022).

Quando o material não está sob a ação de um campo magnético externo, os domínios magnéticos se distinguem entre si e variam a direção de alinhamento segundo a direção dos eixos de fácil magnetização (QIU *et al.*, 2021). No entanto, quando ocorre a aplicação de uma intensidade de campo magnético externo, surge a ocorrência de variações internas da organização dos domínios magnéticos de forma rápida e instável por natureza (DIWAKAR *et al.*, 2022). Todo esse processo, chamado de ciclo de magnetização, pode ser visualizado conforme ilustração da Figura 2. O

estágio (1) representa o estágio onde o material não sofre alteração das paredes de domínio por ação de forças magnéticas externas.

Figura 2 - Estágios de magnetização de material ferromagnético.



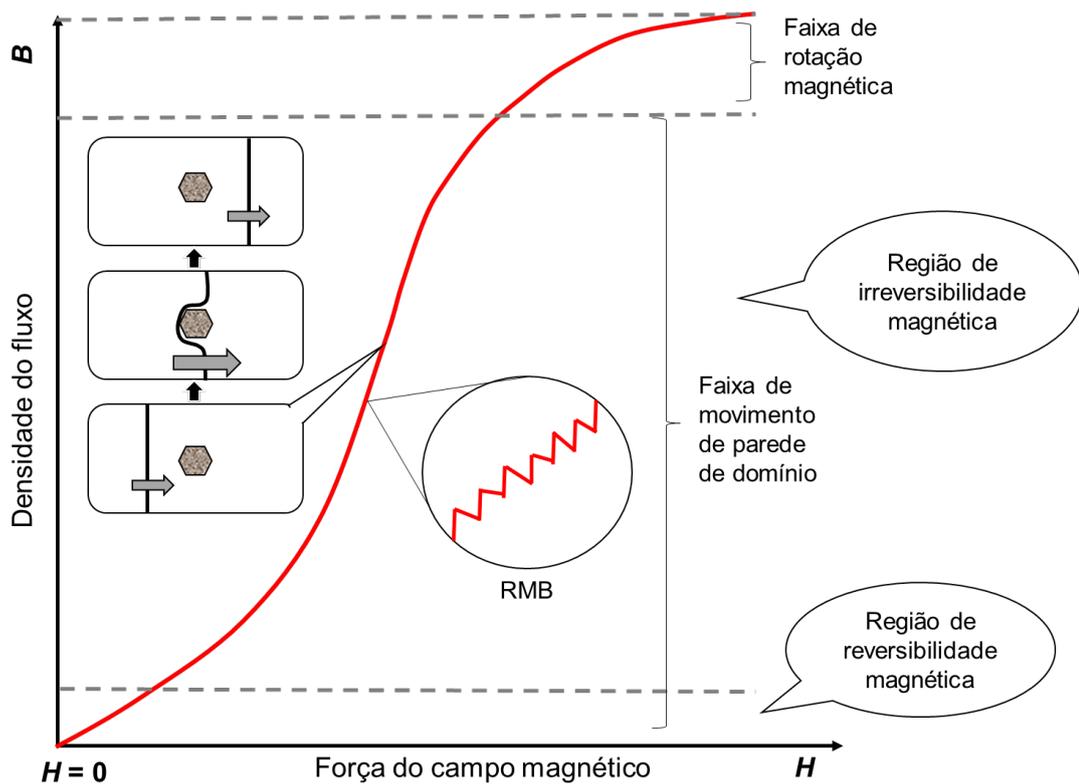
Fonte: Adaptado de CALLISTER; RETHWISCH (2012).

A partir do instante em que se aumenta a intensidade do campo  $H$ , há uma movimentação dos domínios magnéticos no material, em que os domínios que estão direcionados ao eixo de fácil magnetização mais próximo do sentido do campo externo crescem e, simultaneamente, os que estão em sentido oposto, diminuem de forma proporcional (2). Com a manutenção do aumento do campo magnético  $H$ , a variação ocorre até que todos estejam alinhados em uma só direção (3). Por fim, ocorre a rotação dos domínios e alinhamento com o campo  $H$ , ocorrendo a saturação, ou seja, mesmo com a manutenção e até aumento de intensidade do campo magnético externo não há mudanças no posicionamento dos domínios magnéticos (4) (FAGAN *et al.*, 2023).

Durante o processo, as paredes de domínio se deparam com obstáculos resultantes de diversos fatores dentro da estrutura interna do material, como a

densidade de discordâncias, precipitação de carbonetos, tamanho de grão, presença de óxidos e/ou constituintes não ferromagnéticos, entre outros. Esses fatores tendem a dificultar a livre movimentação das paredes de domínio, exigindo assim uma maior quantidade de energia para superá-los. Quando isso acontece, o resultado é um grande número de pequenos picos de tensão que surgem como resultado de mudanças repentinas na magnetização do material, também chamados de impulsos magnéticos (DIWAKAR *et al.*, 2022; NESLUŠAN *et al.*, 2019). Com a utilização de uma bobina receptora próxima ao material, é possível coletar esses impulsos magnéticos que constituem o sinal denominado de RMB (ASTUDILLO *et al.*, 2022). A Figura 3 ilustra as duas regiões que compõem a curva de magnetização: reversibilidade magnética e irreversibilidade magnética.

Figura 3 - Estágios de magnetização de material ferromagnético com detalhes da formação do RMB.



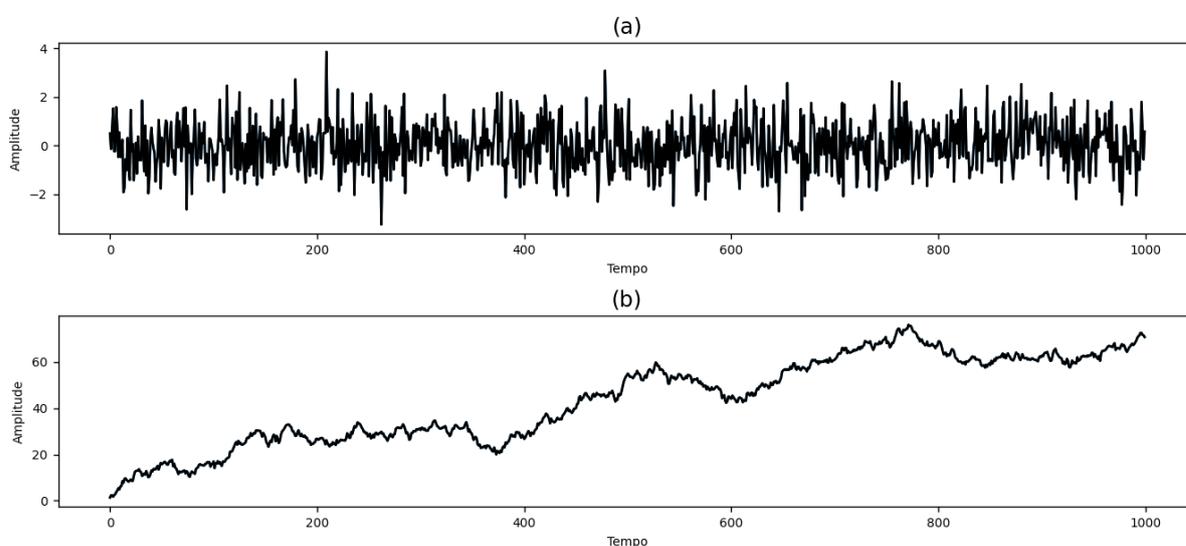
Fonte: Adaptado de YAMAZAKI *et al.* (2019).

### 2.3 CARACTERIZAÇÃO DO SINAL

O RMB formado a partir da resposta em tensão dos pulsos magnéticos que atravessam o material, possui características de um ruído devido sua natureza com a

presença de variáveis ou influências aleatórias, logo pode ser chamado de estocástico, conforme Figura 4 (MACIUSOWICZ; PSUJ, 2019; TADIĆ, 2016). Além disso, o sinal apresenta comportamento não estacionário, isto é, os parâmetros estatísticos sofrem variações ao longo do tempo, conforme Figura 4b (MACIUSOWICZ; PSUJ, 2021). Devido sua natureza, os sinais estocásticos e não estacionários não possuem um determinismo, o que dificulta sua análise. No entanto, podem ser tratados por meio de cálculos estatísticos (GRIJALBA, 2010).

Figura 4 - Amostra de sinal estocástico (a) estacionário e (b) não-estacionário.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

## 2.4 ANÁLISE DO SINAL

O RMB pode ser analisado através de diferentes parâmetros, calculados a partir do próprio sinal bruto. Com o avanço do processamento computacional de dados, diversos métodos foram desenvolvidos para análise e representação do sinal (MACIUSOWICZ; PSUJ, 2021). Alguns dos principais meios de análise são destacados a seguir.

### 2.4.1 Valor RMS do RMB

O sinal RMB, caracterizado por ser variante no tempo, possui o valor de *Root Mean Square* (RMS) equivalente ao desvio padrão, ou seja, o valor da flutuação em torno do valor médio é condizente com o desvio padrão devido à natureza do sinal

(NETO, 2021). Assim, devido às características do seu comportamento mais estável em relação ao sinal bruto, o valor RMS é um dos principais parâmetros utilizados pela literatura para análise do ruído magnético de Barkhausen (GURRUCHAGA *et al.*, 2010; KLEBER; VINCENT, 2004). O valor RMS do RMB é calculado conforme Equação 1:

$$RMS(RMB) = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_i - V_m)^2}{n}}, \quad (1)$$

em que  $RMS(RMB)$  é o valor da RMS do RMB na grandeza de tensão elétrica (Volts),  $V_i$  é a tensão elétrica medida em um determinado instante,  $V_m$  é o valor médio do sinal e  $n$  é o número de pontos do sinal.

#### 2.4.2 Energia do RMB

A energia do RMB, parâmetro descrito recentemente por Ducharne *et al.* (2018) e Gupta *et al.* (2020), está relacionada à energia cinética da parede de domínio que varia de acordo com a aplicação de campo magnético externo. Essa variação ao longo do tempo induz uma tensão resultante que é proporcional à taxa de variação da magnetização (FAGAN *et al.*, 2021). O valor da Energia do RMB é calculado conforme Equação 2:

$$RMB(energia) = \sum_{i=1}^n V_i^2 \Delta t, \quad (2)$$

em que  $V_i$  é o valor da tensão medida em um determinado instante,  $n$  é o número de pontos do sinal e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as amostras.

#### 2.4.3 Análise no domínio da frequência

Existem muitas transformações que permitem a visualização de diferentes meios de representação do RMB. Quando a análise é realizada no domínio da frequência, tem-se um gráfico comumente chamado de espectro de frequências, que traz consigo a formação do sinal através dos componentes de frequência (NETO, 2021). Algumas transformadas utilizadas para a análise do RMB em frequência são:

a Transformada de Fourier (TF), a Transformada *Wevelets* (TW) e a Decomposição Empírica de Modos (EMD - do inglês *Empirical Mode Decomposition*)

A Transformada de Fourier possibilita a decomposição do sinal em componentes de frequência para segmentos de tempo discretos subsequentes, que são trechos do sinal também chamados de janelas ou frames. Por meio da TF, surge a *Shot Time Fourier Transform* (STFT) que aprimora a técnica por meio da solução do problema da perda da informação do tempo, possibilitando uma análise tempo-frequência (MACIUSOWICZ; PSUJ, 2021).

A Transformada *Wevelets* permite a decomposição de sinais onde é possível a análise multirresolução, ou seja, possibilita a leitura de informações em diferentes faixas de frequências também designado de níveis de decomposição. Conforme natureza do RMB a TW torna-se útil na sua análise, principalmente quando há altas frequências (SILVA *et al.*, 2020).

A EMD é um método de análise de sinais que tem como objetivo identificar empiricamente todos os modos de oscilação presentes em um sinal, utilizando as propriedades locais desse sinal. O sinal é decomposto em componentes chamadas de funções de modo intrínseco ou IMFs, cada uma representando uma oscilação distinta. Utilizando as propriedades locais do sinal, essa decomposição permite extrair informações sobre sua dinâmica por meio da Transformada de Hilbert-Huang. Cada IMF apresenta características específicas de amplitude, tempo e frequência. (MARTINS *et al.*, 2018; DUARTE, 2024).

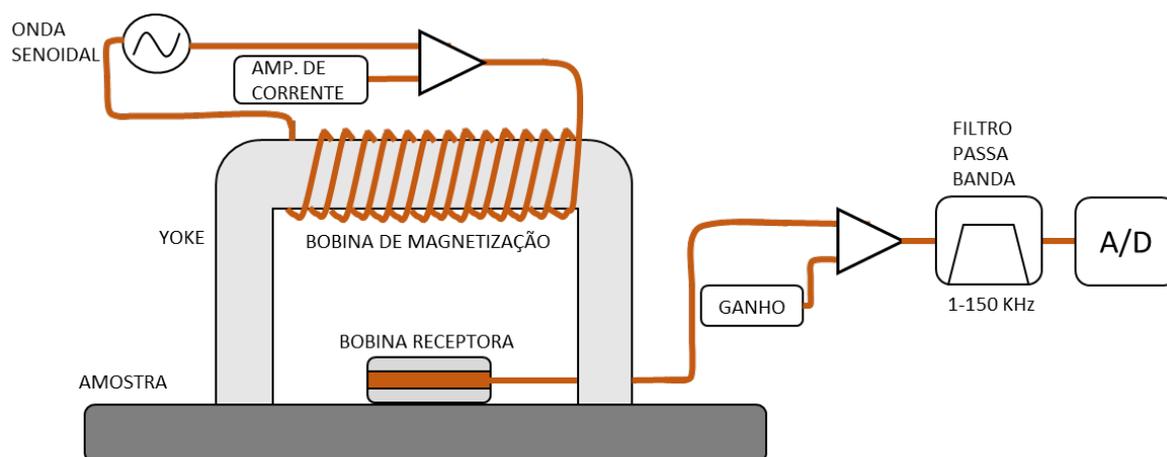
## 2.5 CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO DO RMB EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

Para realizar a medição do RMB, diferentes meios são utilizados com intuito de possibilitar a coleta dos dados conforme a necessidade da aplicação. Dentre os principais tipos podem ser destacadas: a configuração em que a bobina receptora fica em contato com a mesma superfície da amostra onde localiza-se a bobina emissora (medição clássica); configuração com duas bobinas em superfícies opostas e a configuração em que a bobina receptora envolve a amostra.

A configuração de medição clássica consiste essencialmente em um eletroímã e uma bobina receptora (CALDAS-MORGAN; PADOVESE, 2012). Conforme ilustrado

na Figura 5, seu funcionamento ocorre da seguinte maneira: uma onda senoidal é gerada por um gerador de sinais e serve como sinal de excitação. Em seguida, o sinal recebe um ganho por meio de um amplificador. Ao percorrer a bobina de magnetização, enrolada em um núcleo de material ferromagnético em forma de U (geralmente chamado de yoke), ele é convertido em um campo magnético alternado externo que magnetiza a amostra sob análise. Uma bobina instalada na superfície da amostra realiza a coleta do RMB. O sinal coletado, inicialmente com baixa intensidade, é amplificado e posteriormente processado por um filtro passa-banda, que elimina ruídos indesejáveis para a aplicação. Por fim, o sinal é convertido em formato digital, permitindo a extração de suas características com base nas diferenças entre as frequências de excitação e de resposta magnética (LIN *et al.*, 2023).

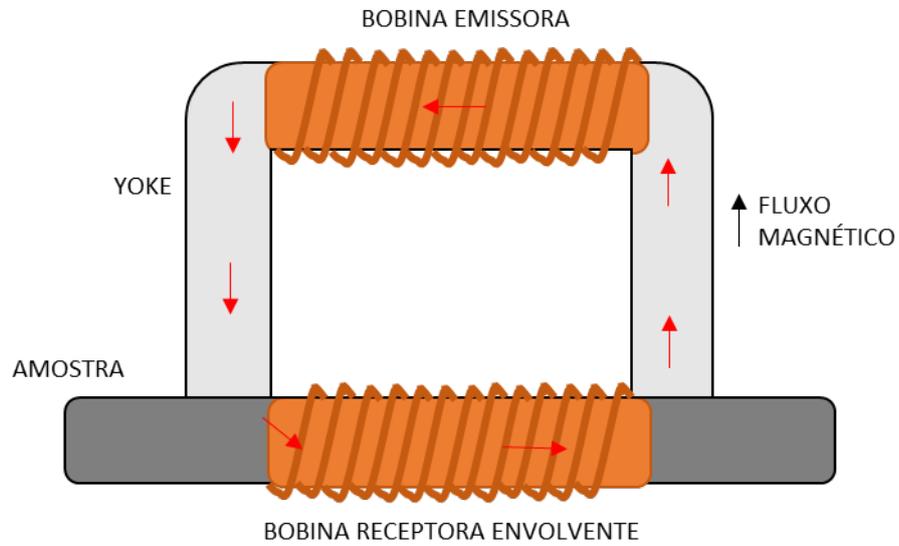
Figura 5 - Sistema clássico de aquisição do RMB.



Fonte: Adaptado de CALDAS-MORGAN; PADOVESE (2012).

O modelo de medição com bobina receptora envolvente funciona da seguinte forma: a bobina emissora recebe o sinal proveniente de um gerador de sinais e gera um campo magnético externo, que é direcionado para a amostra pelo yoke. Ao entrar em contato com a amostra, o campo a percorre e excita a bobina receptora que está enrolada na amostra, a qual está conectada a uma estrutura coletora do sinal para posterior tratamento, conforme Figura 6.

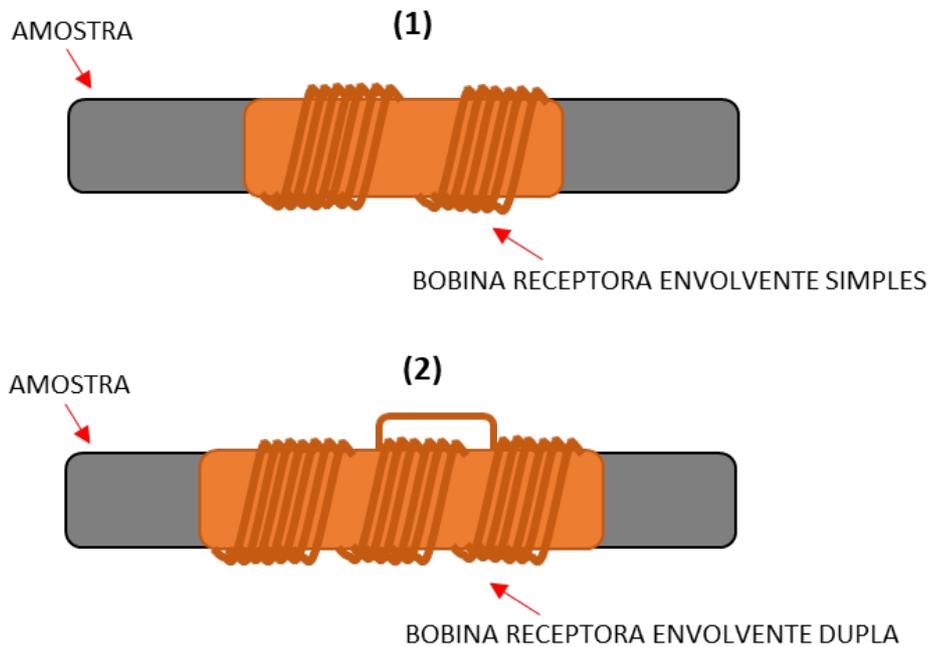
Figura 6 - Sistema de medição com bobina receptora envolvente.



Fonte: Adaptado de KAHROBAEE; HEJAZI (2017).

Ainda nesse modelo de medição há a possibilidade de duas formas de montagem da bobina receptora envolvente, em que a primeira é denominada de enrolamento simples e a segunda recebe o nome de enrolamento duplo, que se caracteriza em série e oposição, com a finalidade de cancelar o componente de frequência de magnetização, conforme Figura 7, a seguir.

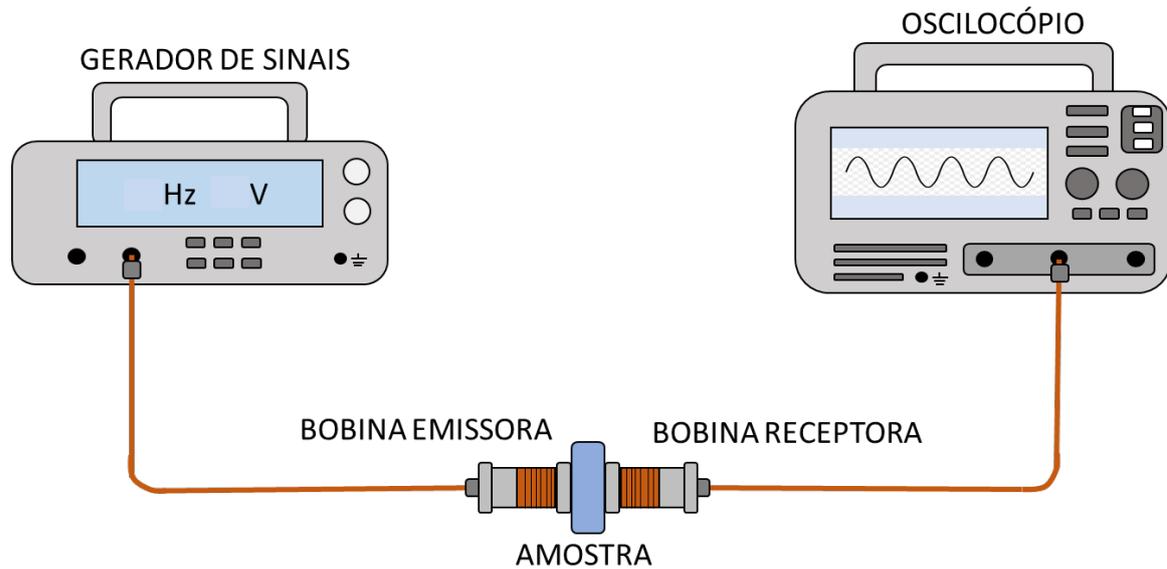
Figura 7 - Modelo de medição, com bobina receptora envolvente simples (1) e com bobina receptora envolvente dupla (2).



Fonte: Adaptado de MOSES; PATEL; WILLIAMS (2006).

Já a configuração composta por duas bobinas em superfícies opostas opera da seguinte forma: o gerador de sinais emite uma onda senoidal para a bobina emissora, posicionada em uma das superfícies da amostra. Ao passar pela bobina, gera-se um fluxo magnético que interage com o material, sendo então captado pela bobina receptora que está em contato com a superfície oposta da amostra, de acordo com a Figura 8. Logo, o sinal coletado é encaminhado para o osciloscópio para posterior tratamento.

Figura 8 - Esquema com duas bobinas de superfície.



Fonte: Adaptado SILVA *et al.*, (2020).

Até o momento, o ruído magnético tratado na presente pesquisa tem como base os fundamentos detalhados pelo físico e pesquisador Heinrich Barkhausen a partir de seus estudos em 1919. No entanto, Barkhausen determinou que o ruído magnético descrito ocorre somente em um trecho específico da curva de histerese denominada de região de irreversibilidade do movimento das paredes de domínios magnéticos. Na presente pesquisa os estudos realizados ocorreram na região de reversibilidade magnética, dessa forma, optou-se por relacionar ao ruído aqui estudado apenas como ruído magnético, conforme descrito no trabalho de Silva *et al.* (2024), e, apesar de apresentar características semelhantes, não pode ser tratado como ruído magnético de Barkhausen devido à divergência conceitual.

## 2.6 PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A permeabilidade magnética, representada pela letra grega  $\mu$ , refere-se à facilidade com que um fluxo magnético pode passar através de um material. Ela mede a capacidade de um material em oferecer maior ou menor resistência à indução magnética. Os materiais ferromagnéticos possuem valores de  $\mu_r$  (permeabilidade magnética relativa) maiores que 1, indicando que eles facilitam a passagem do fluxo magnético. Por outro lado, os materiais diamagnéticos e paramagnéticos apresentam

valores de  $\mu_r$  iguais ou menores que 1, o que significa que eles oferecem maior resistência ao fluxo magnético (NASCIMENTO JUNIOR, 2011; LEITE, 2014).

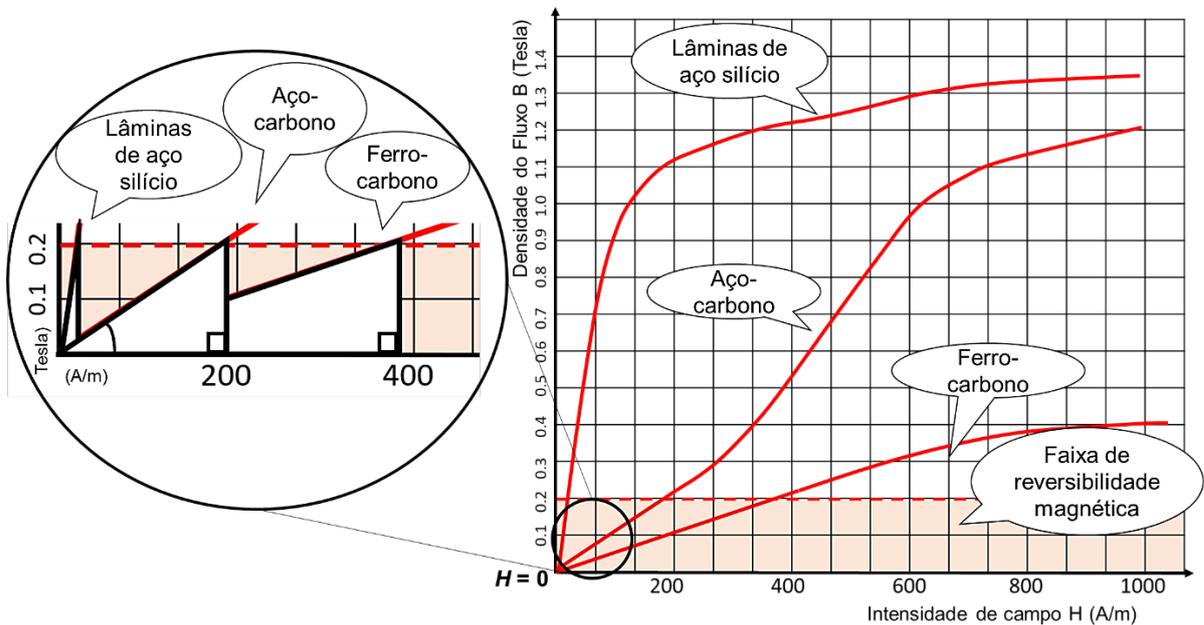
Essa relação pode ser determinada a partir da Equação (3), onde os resultados podem ser utilizados para avaliação da permeabilidade magnética a partir da detecção de diferentes microestruturas de materiais por meio da densidade de fluxo magnético B em função da intensidade de campo magnético aplicado H.

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 = \frac{B}{H}, \quad (3)$$

onde  $\mu$  é a permeabilidade do material (H/m),  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa do material (adimensional),  $\mu_0$  é a permeabilidade do vácuo (H/m), B é densidade de fluxo magnético (T) e H é a intensidade de campo magnético aplicado (A/m).

A curva de magnetização possui três regiões distintas de movimentação das paredes dos domínios magnéticos. Na região de reversibilidade dos domínios magnéticos o comportamento entre a intensidade de campo magnético (H) e a densidade de fluxo magnético (B) pode ser considerado uma função linear, formando um triângulo retângulo com o eixo H, conforme Figura 9. Contudo, quando extinto o campo magnético externo os domínios magnéticos retornam as suas posições iniciais sem deixar campo remanescente (SERNA-GIRARDO, 2007; OLIVEIRA, 2016).

Figura 9 - Triângulo retângulo formado na região de reversibilidade dos domínios magnéticos pela curva de histerese de cada material.



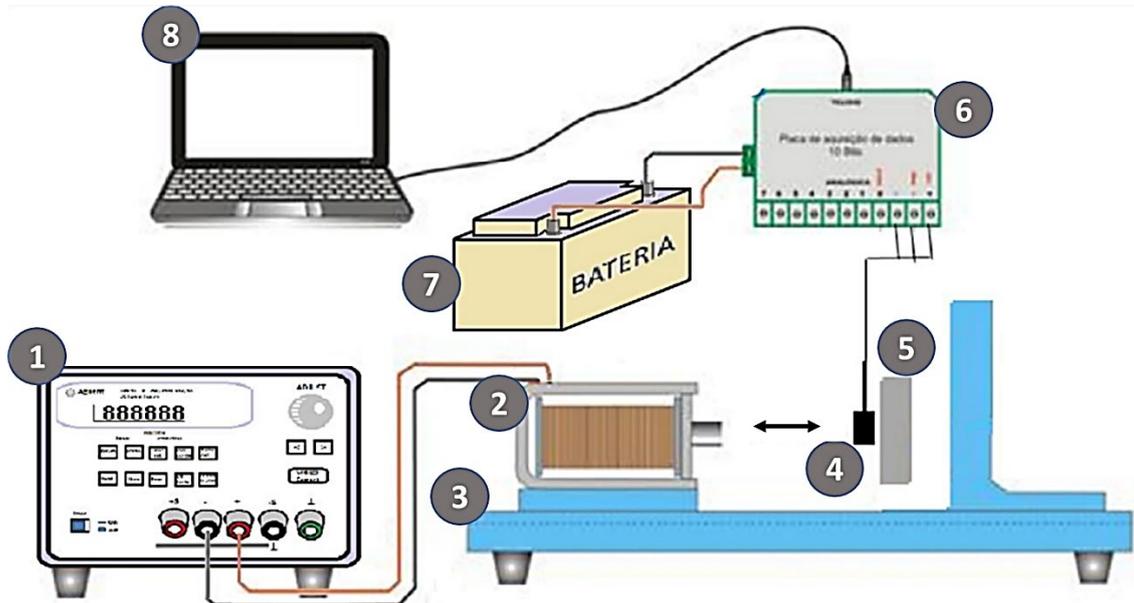
Fonte: Adaptado FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS (2006).

É fundamental ressaltar que cada material possui um valor específico de permeabilidade, cujo conhecimento desse valor se torna essencial para compreender as interações desse parâmetro com outras propriedades (LIMA, 2021).

## 2.7 CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

Para realizar o ensaio de medição da permeabilidade magnética, diferentes métodos podem ser utilizados, desde que preservem os princípios físicos fundamentais do experimento, permitindo a coleta de dados conforme a necessidade da aplicação. A configuração destacada, conforme Figura 10, foi baseada nos modelos utilizados por França Neto (2011) e Fialho (2015), além disso, Silva (2016b) e Silva (2016c) utilizaram modelos seguindo os mesmos princípios.

Figura 10 - Configuração experimental usada para o ensaio de permeabilidade magnética: (1) fonte de alimentação; (2) bobina emissora; (3) bancada; (4) sensor de efeito Hall; (5) amostra analisada; (6) Dispositivo de aquisição de dados; (7) bateria; (8) computador.



Fonte: Adaptado de FRANÇA NETO (2011).

Basicamente, o funcionamento da bancada ocorre da seguinte maneira: a bobina emissora (2) é alimentada por uma fonte de tensão contínua (1), gerando um fluxo magnético. Esse fluxo interage com a amostra analisada (5) e com o sensor de efeito Hall (4), ambos posicionados na bancada (3). A interação entre o fluxo magnético e o sensor de efeito Hall provoca um diferencial de potencial elétrico nos terminais do sensor, que é proporcional à intensidade do campo magnético. Essa tensão é então captada por um dispositivo de aquisição de dados (6), que é alimentado por uma bateria de 12 V contínuos. O dispositivo converte o sinal de analógico para digital e o envia para o computador (8), onde será processado posteriormente.

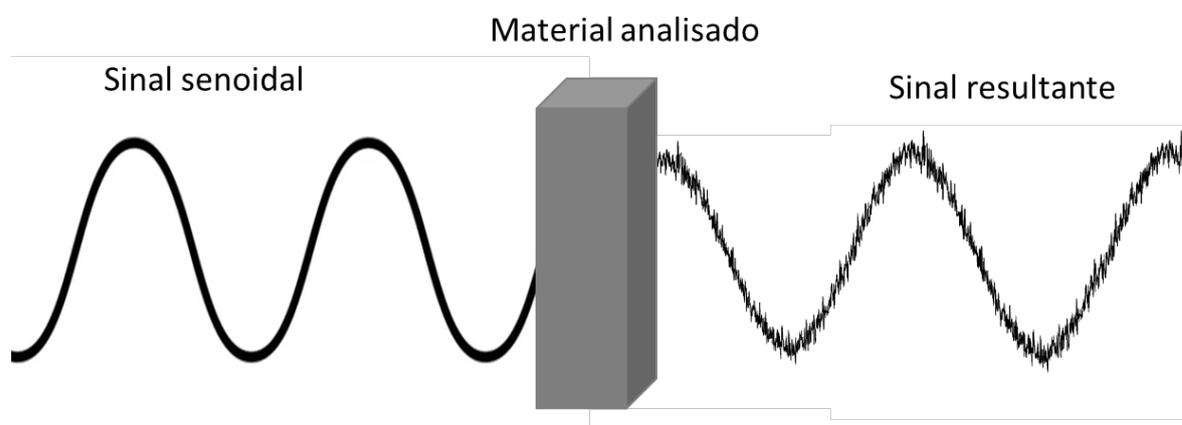
## 2.8 ANÁLISE HARMÔNICA

A interação entre densidade de fluxo magnético e materiais ferromagnéticos na região de irreversibilidade do movimento dos domínios magnéticos levam a geração do Ruído Magnético de Barkhausen que tradicionalmente é coletado na faixa de 1 KHz a 100 KHz (STUPAKOV *et al.*, 2020). Contudo, estudos evidenciam que em

frequências na região dos harmônicos da onda principal, há sensibilidade quanto a microestrutura dos materiais e assim também tem sido utilizado como parâmetro para técnicas que estudam transformações microestruturais em materiais (RYU *et al.*, 2001; TAVARES *et al.*, 2019; SAMPAIO, 2023).

As variações dos harmônicos da onda aplicada estão associadas ao comportamento do campo magnético ao interagir com a microestrutura do material, pois ao se aplicar um campo magnético a um material ferromagnético, o campo magnético resultante apresenta uma forma distorcida. Essa distorção ocorre devido à não linearidade da permeabilidade magnética do material e à histerese magnética. Como resultado, a tensão induzida torna-se assimétrica, transformando, por exemplo, uma onda senoidal aplicada em uma onda resultante senoidal com distorções, conforme Figura 11. Essa forma de onda distorcida da indução magnética contém componentes nas frequências harmônicas do campo magnético aplicado (RYU *et al.*, 2001; SILVA *et al.*, 2018).

Figura 11 – Esquemático da interação entre sinal senoidal aplicado e material ferromagnético.



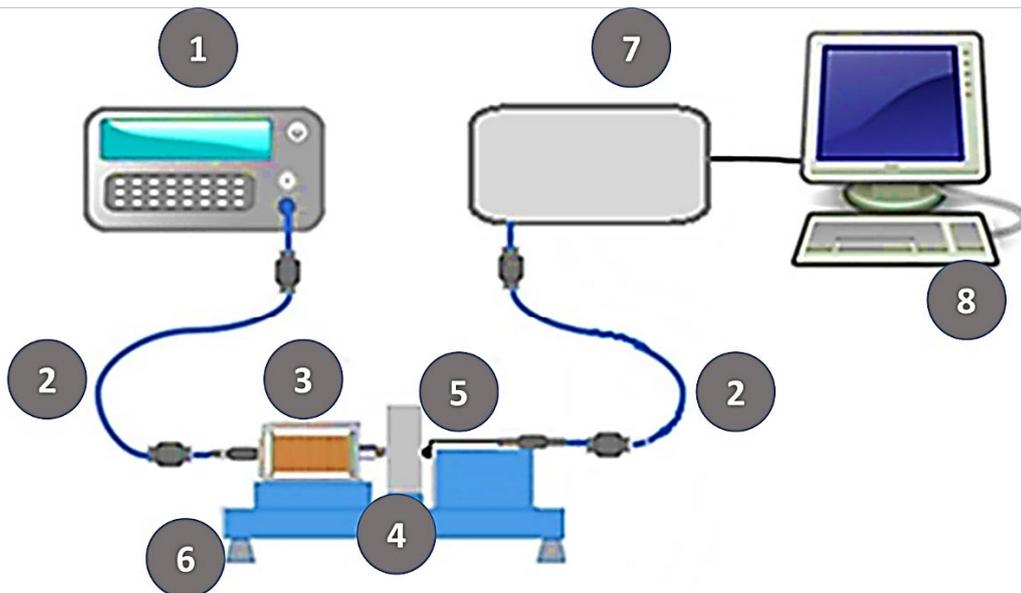
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Com base em tais conceitos, a análise dos harmônicos tem sido realizada para investigação de características de falha de rastreamento em resina epóxi (SPİRLİ; YILMAZ, 2018), avaliação não destrutiva de aço envelhecido (RYU *et al.*, 2001), medição para determinação do estado de materiais em metais (MATLACK *et al.*, 2015) e monitoramento de microestrutura paramagnética em aços inoxidáveis (SILVA *et al.*, 2018).

## 2.9 CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO DO PRIMEIRO HARMÔNICO EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

Para desenvolver o ensaio de medição do primeiro harmônico, o processo segue os mesmos princípios descritos para a obtenção do ruído magnético, com exceção da etapa de tratamento dos dados. Na obtenção do ruído magnético, o sinal é transformado para o domínio da frequência, em seguida, aplicado um filtro passa-altas para eliminar as baixas frequências, onde estão localizados os maiores picos das frequências harmônicas. Já para a medição do primeiro harmônico, utiliza-se um filtro passa-baixas ou passa-faixa, com o objetivo de isolar o trecho correspondente ao pico do harmônico principal da onda magnetizante. A configuração destacada na Figura 12 foi utilizada por Silva *et al.* (2018), Silva *et al.* (2021) e Sampaio (2023).

Figura 12 - Configuração experimental usada para o ensaio de análise do primeiro harmônico da onda principal: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra analisada, (5) sensor de efeito Hall, (6) gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição de dados e (8) computador.



Fonte: Adaptado de SILVA *et al.* (2018).

A bancada funciona da seguinte maneira: uma fonte de tensão alternada (1) alimenta, por meio de cabos blindados (2), a bobina emissora (3) gerando um fluxo magnético alternado que interage com a amostra analisada (4) e com o sensor de efeito Hall (5), ambos posicionados na bancada (3). A interação entre o fluxo magnético e o sensor de efeito Hall provoca um diferencial de potencial elétrico nos terminais do sensor, que é proporcional à intensidade do campo magnético. Essa

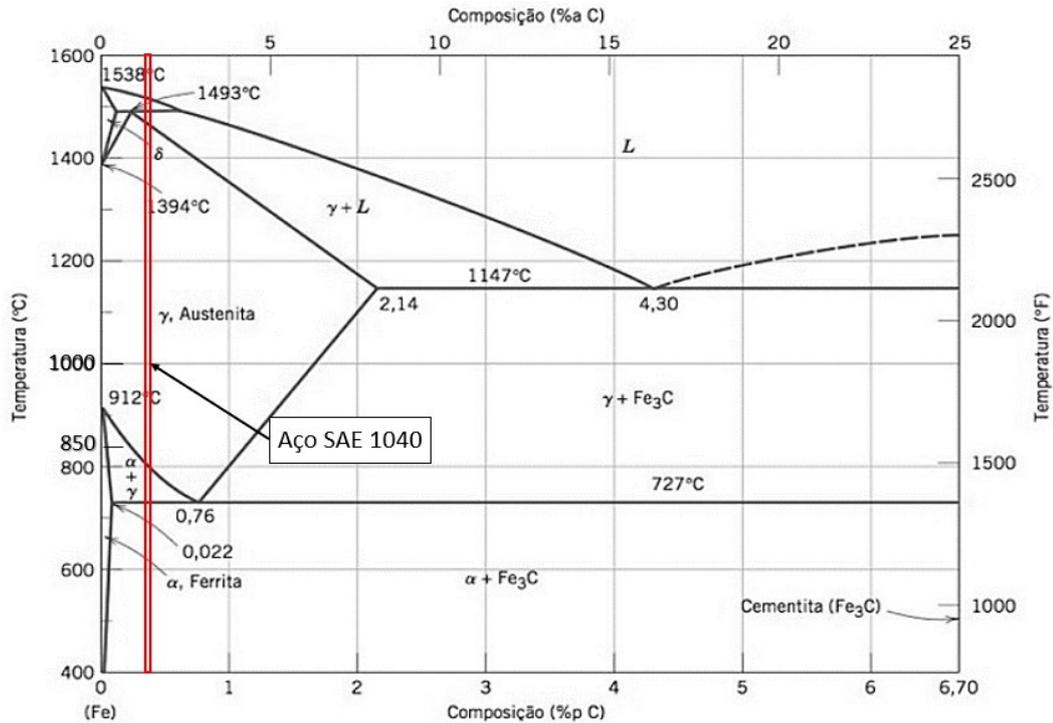
tensão é então captada por um dispositivo de aquisição de dados (7), que converte o sinal de analógico para digital e o envia para o computador (8).

## 2.10 AÇOS

Os aços carbono comuns são constituídos pelos elementos Fe e C e teoricamente devem conter apenas tais elementos, com a concentração de C entre 0,008% até aproximadamente 2,14% (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). No entanto, geralmente na forma comercial os aços não apresentam essa constituição de dois elementos e em geral possuem em sua composição outros aditivos secundários que podem ser impurezas, que são controladas conforme normas estabelecidas, ou elementos de liga adicionados propositalmente durante os processos de fabricação que o tornam chamados de aços liga (CHIAVERINI, 1996). Para entender como essas variações de composição afetam as propriedades e microestruturas dos aços, é fundamental analisar o diagrama ferro-carbono que mapeia as transformações de fase do aço em função da temperatura e da concentração de C.

No presente trabalho, são utilizados os aços SAE 1040 e SAE 4340, ambos com a mesma porcentagem de carbono. No entanto, o aço SAE 4340 se diferencia por conter elementos de liga em sua composição. O aço SAE 1040 está localizado na região demarcada do gráfico da Figura 13, devido à sua composição de carbono de aproximadamente 0,4%.

Figura 13 - Diagrama de fases ferro-carbono.



Fonte: Adaptado de CALLISTER; RETHWISCH (2012).

Para descrever os processos de resfriamento do aço SAE 1040, é feita uma análise do resfriamento de aços hipo-eutetóides, que possuem porcentagem de carbono entre 0,008% e 0,76%. As transformações de fase no aço SAE 1040, durante o tratamento de recozimento a 1000°C, ocorrem aproximadamente da seguinte forma: ao ser aquecido a essa temperatura, o aço fica completamente na fase austenítica ( $\gamma$ ), cuja rede cristalina é cúbica de face centrada (CFC). Conforme a temperatura diminui, ocorre a formação de ferrita pro-eutetóide nas bordas dos grãos de austenita ( $\alpha + \gamma$ ). Ao atingir a temperatura eutetóide ( $\sim 727^\circ\text{C}$ ), o restante da austenita se transforma em perlita, tornando o material composto por ferrita ( $\alpha$ ) e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). A microestrutura final é composta por ferrita e perlita grosseira. Para o tratamento de recozimento a 850°C, a diferença em relação ao recozimento a 1000°C vai além da temperatura, pois 850°C está próxima da temperatura crítica para o aço SAE 1040. Isso significa que a austenitização não ocorre completamente, permanecendo alguma ferrita antes do resfriamento. Como resultado, os grãos de austenita são menores, levando a uma microestrutura mais refinada após o resfriamento. A formação de ferrita pro-eutetóide ocorre de maneira mais distribuída em comparação ao recozimento a 1000°C. Além disso, a perlita resultante será mais fina, com lamelas mais próximas

do que no recozimento a 1000°C, tornando a microestrutura final diferente daquela obtida no recozimento a 1000°C. Para o tratamento de têmpera, o resfriamento brusco da austenita, de 1000°C até a temperatura ambiente, impede a difusão do carbono, resultando na formação de martensita, uma fase dura e frágil (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A classificação SAE, utilizada para os aços aqui estudados, segue o formato ABXX, onde os dois primeiros dígitos estão relacionados aos elementos de liga existentes no aço e seus teores e os dois últimos dígitos identificam os centésimos da porcentagem do teor de carbono presente no material. Logo, para o aço SAE 1040, o número 10 corresponde a um aço comum onde os elementos Fe e C ditam as suas propriedades e o número 40 corresponde a 0,4 % do elemento C. Já para o aço SAE 4340 o número 43 significa que é um aço ligado com três elementos Cr, Ni e Mo. Os dois últimos dígitos correspondem a 0,4 % do elemento C, ou seja, os aços SAE 1040 e SAE 4340 tem o mesmo teor do elemento C.

O aço SAE 1040 é um aço carbono sem elementos de liga, com resistência média e amplamente utilizado na indústria. Pode ser facilmente usinado quando laminado a quente e, geralmente, passa por um tratamento de normalização antes do uso. Com um teor de carbono de aproximadamente 0,4% e resistência à tração em torno de 590 MPa, destaca-se por sua boa soldabilidade e facilidade de conformação, permitindo processos como trefilação, laminação e forjamento. Suas propriedades podem ser ajustadas conforme o tamanho do grão austenítico, composição química, homogeneidade da austenita e velocidade de esfriamento (MATOS *et al.*, 2020). É empregado em construções, refinarias químicas e indústrias, além de ser amplamente utilizado na fabricação de componentes automotivos, como eixos, engrenagens, parafusos, acoplamentos, juntas e buchas (ÇALIK, 2009; AAKARSH, 2023; PANGESTU, 2024).

O aço SAE 4340 é um aço liga que possui elevada temperabilidade e é constituído por elementos de liga, como o Cr, Mo e Ni, totalizando um percentual pouco abaixo de 5% de sua composição (BARTON *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2022). Possui teor de C em torno de 0,4%. Devido a propriedades como boa soldabilidade, mudanças em propriedades mecânicas através de processos de tratamento térmico, deformabilidade, facilidade de fabricação, baixo custo, boa tenacidade e resistência mecânica é amplamente utilizado em ambientes de elevada solicitação mecânica,

possuindo aplicações diversas como engrenagens de automóveis, componentes de motores, eixos e trens de pouso de aeronaves. Um dos principais destaques do aço SAE 4340 está relacionado com sua característica de alta temperabilidade, ou seja, apresentar homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal podendo ser utilizado em peças de grandes espessuras conforme a capacidade de endurecer em profundidade, ou seja, sua temperabilidade (LIMA, 2021; BAKHSHI, S.; MIRAK, A., 2022; PARK et al., 2023; GOMES et al., 2018).

A susceptibilidade ao endurecimento por resfriamento rápido ou temperabilidade, é uma propriedade presente em ligas ferrosas, que determina a profundidade e distribuição de dureza produzida pela formação de martensita após tratamento térmico de têmpera. Em outras palavras, a temperabilidade está associada a habilidade de cada material em alterar sua morfologia a partir da formação da martensita. Esse conceito permite diferenciar o tratamento térmico têmpera da propriedade chamada temperabilidade, no qual a têmpera refere-se ao objetivo de formar a martensita, cuja dureza depende exclusivamente do teor de carbono e a temperabilidade relaciona-se com a facilidade de formar a martensita (CASARIN, 1996; PEREIRA et al., 2020).

## 2.11 TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

Tratamento térmico dos aços é o processo realizado com o objetivo de alterar as propriedades ou conferir determinadas características que muitas vezes não são possíveis de alcançar após os processos de lingotamento e laminação. O tratamento térmico se dá a partir de um conjunto de procedimentos para aquecimento sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento (CHIAVERINI, 1996; ECHEVERRI, 2012). Esse processo tem como finalidade controlar ou acompanhar variações microestruturais dos aços, assim como a morfologia e o tamanho de grão (ANAZAWA, 2012).

Existem variados tratamentos térmicos, dentre os quais são exemplos a têmpera e o recozimento, que são aplicados para diferentes finalidades. Comumente se utiliza os tipos de resfriamento em água, em óleo, em ar, e em forno. A água produz o resfriamento mais severo, seguida pelo óleo, o ar, e por fim, o interior do forno (CALLISTER, 2002). A velocidade de resfriamento implica diretamente nos

constituintes e nas propriedades finais dos aços possibilitando obter desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza, até a martensita que é o constituinte mais duro resultante dos tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 1996).

Para realização da têmpera é feito um aquecimento no aço até a faixa de temperatura do campo austenítico onde os átomos de carbono vão se redistribuindo dentro da estrutura interna do material para formar a austenita. Após um determinado intervalo de tempo, ao ser realizado o resfriamento brusco, o material se torna temperado onde em seu interior é formado um microconstituente chamado de martensita, caracterizado por sua alta dureza e fragilidade, com reticulado tetragonal compacto (ECHEVERRI, 2012; PINEDO, 2021). O resfriamento se dá de uma forma abrupta com a finalidade de promover a máxima dureza por meio da formação da martensita e pode variar conforme capacidade de endurecimento intrínseca de cada material, ou seja, quanto maior a temperabilidade do aço mais lento será o resfriamento para obter martensita (LIMA, 2023).

Quando se trata do tratamento térmico de recozimento total, também denominado recozimento pleno, é realizado o aquecimento do aço em uma temperatura superior à da zona crítica (temperatura situada entre 727 °C e 910 °C) por um intervalo de tempo e em seguida a realização de um lento e progressivo resfriamento, realizado geralmente dentro do próprio forno desligando-se o mesmo e deixando que o aço resfrie ao mesmo tempo que ele (CHIAVERINI, 1996).

O objetivo é restituir ao material as propriedades modificadas por um tratamento do tipo mecânico ou térmico que possa ter sido utilizado anteriormente no próprio, o qual promove a eliminação de possíveis tensões internas e favorece a ductilidade ou tenacidade do material, o que implica na diminuição da sua dureza e facilita a usinabilidade. Além do mais, tal processo é importante para o crescimento da estrutura do grão e permite que haja alterações nas propriedades tanto elétrica quanto magnéticas no material (COLPAERT, 2008).

No contexto dos aços contendo teores de carbono inferiores a 0,8%, esse tratamento é realizado a uma temperatura cerca de 50 °C acima da zona crítica. Por sua vez, nos aços que possuem teores de carbono superiores a 0,8%, o procedimento é realizado a uma temperatura situada aproximadamente 50 °C acima do limite inferior da zona crítica (LIMA, 2023).

## 2.12 ESTADO DA ARTE

Alguns trabalhos realizados nos últimos anos servem como alicerce para a presente pesquisa, uma vez que os resultados, metodologias e técnicas empregadas pelos autores são utilizados para a discussão e análise dos resultados do presente trabalho.

### 2.12.1 Estudos utilizando o RMB

O trabalho de Neslušán *et al.* (2021), investigou a sensibilidade da técnica de análise do RMB na martensita induzida por deformação em aço inoxidável austenítico AISI 321. No estudo utilizou-se o hardware RollScan 350 para aquisição dos sinais RMB com frequência de magnetização de 125 Hz e onda senoidal. Após análises foi constatado que o RMB aumentou progressivamente com a deformação plástica, enquanto sua evolução foi impulsionada pela fração de martensita na matriz deformada. Os resultados obtidos demonstraram claramente a boa sensibilidade do RMB em relação ao grau de transformação martensítica em aço inoxidável austenítico. Além disso, esta técnica se mostrou sensível à direção da carga exercida.

O trabalho realizado por Diwakar *et al.* (2022) objetivou obter o sinal RMB do aço SAE 2062 e do aço ferramenta AISI D2. A variação no perfil do sinal do RMB foi avaliada e uma correlação entre as propriedades do material e as características do sinal foi obtida em variações da frequência de magnetização de 15 Hz para 45 Hz e intensidade do campo magnético de 600 Oe. Os resultados mostraram que as características do RMB estão associadas com o tamanho do grão e a dureza para ambos os aços e indicaram claramente que o aço ferramenta AISI D2 tem um tamanho de grão menor. Quando aplicado um campo magnético com 200 Oe, nenhuma resposta magnética foi observada no aço AISI D2, indicando a alta dureza e mais limites de grão deste aço que dificultaram as atividades da parede do domínio magnético em campos magnéticos de 200 Oe. Mas ao elevar a intensidade de campo magnético para 500 Oe, houve resposta magnética, evidenciando a necessidade de campo magnético mínimo para movimento das paredes do domínio na aplicação.

Li *et al.* (2023) utilizaram o RMB para avaliar as propriedades magnéticas dos aços mola 60Si2Mn descarbonetados com microestruturas de núcleo martensítico e perlítico. Amostras de aço para molas foram austenitizadas de forma a gerar

diferentes profundidades de descarbonetação. A bancada experimental utilizada foi baseada, em parte, no modelo clássico de medição do RMB, de maneira que é formada por um garfo Ferro-Silício (yoke) e bobinas de excitação com o diferencial de utilizar um sensor de efeito Hall. Foi utilizado um sinal senoidal com frequência de 50 Hz e amplitude de 1,5 V. Os resultados obtidos em ambas as microestruturas centrais das amostras, por meio do RMB, evidenciaram que as alterações microestruturais da camada de descarbonetação tiveram variações significativas nas propriedades magnéticas e induziram a alteração nos sinais RMB. Logo, essa técnica se mostrou eficaz para determinar a ocorrência da camada de descarbonetação e quantificar a sua profundidade.

Já Lin *et al.* (2023), estudaram a influência da camada de deformação plástica e da trinca em trilho ferroviário por meio do sinal RMB. O equipamento de detecção baseado no sinal RMB foi construído e utilizado, com base no modelo clássico de medição, para detectar e caracterizar a camada de deformação plástica e trincas do trilho. Foi utilizado um sinal senoidal de 7 V de amplitude e 16 Hz de frequência de magnetização. Os resultados experimentais provaram que o sinal do RMB diminuiu com o aumento da espessura da camada de deformação plástica e o comportamento de propagação da trinca causa lacunas de ar na superfície do trilho, tornando o fluxo magnético descontínuo e atenuando a intensidade do sinal RMB.

### **2.12.2 Estudos utilizando a permeabilidade magnética**

A pesquisa conduzida por Fialho (2015), buscou desenvolver uma técnica de acompanhamento da formação da fase  $\sigma$  (sigma) em aços inoxidáveis duplex (AID) com base em medidas de permeabilidade. A técnica empregada se baseou no estudo da interação entre microestrutura do aço inoxidável duplex e um campo magnético externo aplicado ao material. As medidas de campo magnético foram realizadas com a utilização de um sensor de efeito Hall. Os resultados evidenciaram que o surgimento da fase  $\sigma$  reduziu o valor da permeabilidade magnética do material, indicando que as propriedades magnéticas e que medidas de permeabilidade, bem como do campo magnético resultante, podem ser utilizadas para acompanhamento de formação dessa fase. O estudo comprovou que a técnica desenvolvida foi eficaz para monitoramento da fragilização do aço inoxidável duplex.

Silva *et al.* (2016a) utilizaram amostras de aço SAE 1045 laminado (formado por microestruturas de perlita e ferrita). O material foi submetido a campos magnéticos induzidos na região de reversibilidade dos domínios magnéticos para detecção da direção de fácil magnetização. Os campos magnéticos foram aplicados em amostras circulares com diferentes espessuras e ângulos variando de 0° a 360° com passos de 45°. Uma amostra quadrada com espessura fixa também foi testada. Os resultados mostraram que a abordagem não destrutiva proposta é promissora para avaliar a anisotropia magnética em aços independentemente da geometria da amostra.

Lima (2021), realizou estudo em torno de um ensaio eletromagnético baseado na aplicação de campo magnético na região de reversibilidade magnética para detecção do efeito de tratamentos térmicos em um aço SAE 4340. Quatro diferentes tratamentos térmicos foram analisados e comparados com a condição como recebida do material. Foi aplicado um campo magnético, com intensidade constante, no centro das amostras a fim de se analisar o valor da permeabilidade magnética para os tratamentos aplicados. Também foi analisada a influência dos tratamentos na anisotropia magnética do aço em estudo, a partir da aplicação de campo magnético constante, rotacionando as amostras com passos de 45° até 360°. Os resultados obtidos apontaram que o ensaio de permeabilidade magnética é capaz de diferenciar os tratamentos, sendo sensível à variação da quantidade do constituinte ferrita, que é ferromagnética, bem como a presença da estrutura martensita, mostrando poder ser correlacionado com medidas de dureza. Além disso, foi possível constatar a presença de uma direção de fácil magnetização, independente da microestrutura do tratamento térmico empregado.

O trabalho desenvolvido por Oliveira (2016), teve como objetivo desenvolver um ensaio não destrutivo baseado no estudo da interação entre a intensidade de campo magnético aplicado e a microestrutura, que seja capaz de acompanhar a formação da fase fragilizante  $\sigma$  em aços inoxidáveis duplex. Amostras com diferentes quantidades de fase  $\sigma$  foram obtidas através do envelhecimento nas temperaturas de 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C e caracterizadas por microscopia ótica, ensaios de dureza, difração de Raios X e testes de impacto. O percentual volumétrico de fase  $\sigma$  foi determinado pelo método da grade, através das imagens obtidas por microscopia ótica, comprovando que este volume aumenta com o tempo de envelhecimento. As medidas de densidade de fluxo magnético foram

determinadas a partir de valores de tensão obtidas por um sensor de efeito Hall. Os resultados obtidos sinalizaram que a técnica foi capaz de acompanhar a formação da fase  $\sigma$ , bem como a fragilização do material, concluindo que maiores quantidades de fase  $\sigma$ , implicaram em reduções da permeabilidade magnética e da densidade de fluxo magnético resultante da interação.

### 2.12.3 Estudos utilizando os harmônicos

O trabalho desenvolvido por Silva *et al.* (2021), analisaram a amplitude dos harmônicos de ondas eletromagnéticas com o objetivo de monitorar fases de fragilização em aços inoxidáveis duplex SAF 2205. Para realizar o experimento, foi utilizada uma bancada composta por uma bobina emissora e um sensor de efeito Hall, com as amostras posicionadas entre eles. Ondas emisoras com frequências de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz foram utilizadas, com amplitudes variando de 0,25 V a 9 V. A análise do primeiro harmônico foi realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) seguida da aplicação de um filtro para eliminar frequências indesejadas. Os resultados demonstraram que os valores de amplitude dos harmônicos são eficazes na detecção da presença de precipitados e que sua presença reduz essas amplitudes, devido ao bloqueio do movimento das paredes dos domínios magnéticos.

A pesquisa de Sampaio (2023), investigou a capacidade de acompanhamento da fase sigma no aço inoxidável duplex SAF 2205 em amostras com diferentes espessuras, por meio ondas senoidais com frequências de 5 Hz a 50 Hz e amplitudes entre 0,25 V a 9 V. As amostras utilizadas no estudo foram nas condições de sem tratamento e tratada a 850 °C por tempos de 15 min, 60 min e 120 min. Os sinais eletromagnéticos aplicados no ensaio estudado são aplicadas por uma bobina e o sinal resultante da interação com o material captado por um sensor de efeito Hall na superfície oposta. Os resultados mostraram que as melhores amplitudes de medidas são obtidas entre 1 V e 2 V, e com frequências até 25 Hz para amostras com 8 mm de espessura. A análise do primeiro harmônico apresentou ser capaz de detectar a fase prejudicial, no entanto necessita-se de uma correção para comparação em amostras com diferentes espessuras.

Silva *et al.* (2024) realizaram um estudo para detecção da fase sigma deletéria no aço SAF 2205 com os ensaios eletromagnéticos da análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico das ondas de excitação. Ondas de excitação senoidais

de 5 Hz e 25 Hz com amplitudes variando de 0,25 V a 9 V foram aplicadas em amostras com diferentes quantidades da fase sigma. As ondas usadas nos ensaios foram aplicadas por uma bobina e o sinal resultante da interação com o material foi captado por um sensor de efeito Hall na superfície oposta. Os resultados evidenciaram que a melhor condição de teste consiste em aplicar ondas com amplitudes de 1 V a 2 V e utilizar a amplitude do primeiro harmônico. Assim, o teste revelou-se eficaz para detectar a formação da fase sigma deletéria e para acompanhar a capacidade de absorção de energia por impacto e, assim, a fragilização do material.

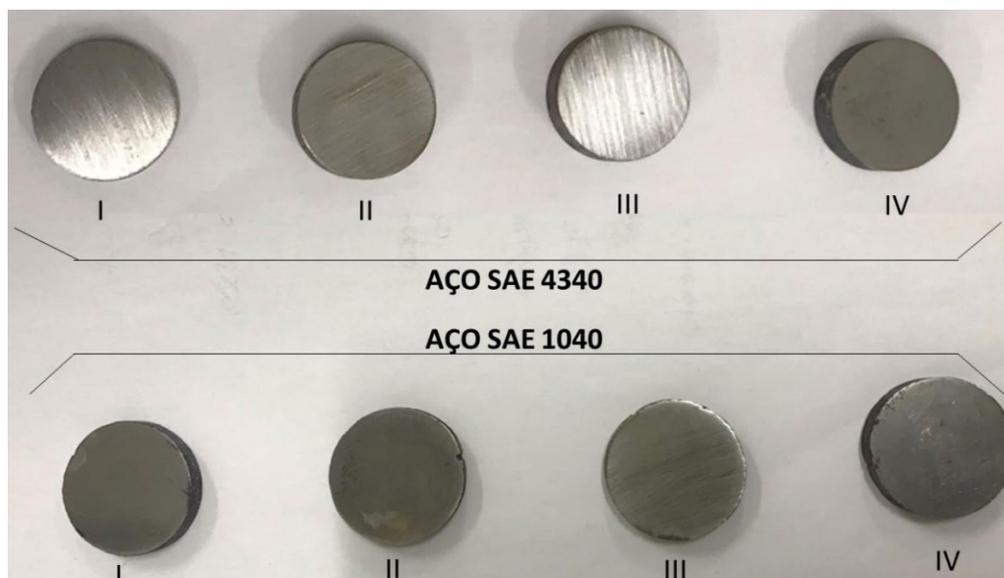
### 3. METODOLOGIA

O presente capítulo aborda os materiais e métodos utilizados para a análise, por meio dos ensaios de permeabilidade magnética, análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico para diferenciar tratamentos térmicos nos aços SAE 1040 e SAE 4340.

#### 3.1 MATERIAL UTILIZADO

O trabalho foi realizado no laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais (GSCMat). O processo de obtenção das amostras e tratamentos térmicos, bem como a coleta dos dados de cada ensaio foram realizados durante a presente pesquisa. 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 espessura, conforme Figura 14.

Figura 14 - Amostras confeccionadas.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

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

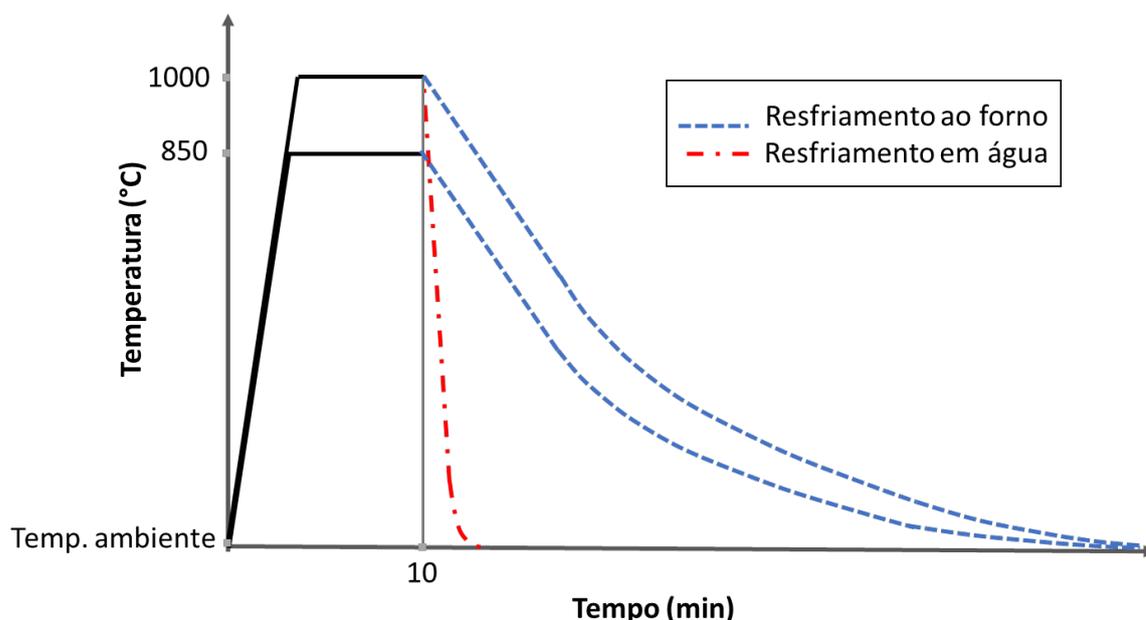
Tabela 1 – Tratamentos térmicos empregados aos aços SAE 1040 e SAE 4340.

Tipo do aço		Nº da amostra	Tratamento térmico
1040	4340	I	Condição como recebido (sem tratamento)
1040	4340	II	Austenitização a 850 °C, resfriada ao forno (Recozida a 850 °C)
1040	4340	III	Austenitização a 1000 °C, resfriada ao forno (Recozida a 1000 °C)
1040	4340	IV	Austenitização a 1000 °C, resfriada em água (Têmpera)

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Para cada milímetro de espessura do material, foram contabilizados dois minutos de aquecimento, totalizando dez minutos em cada nível de aquecimento. Para melhor compreensão dos tratamentos térmicos empregados, o gráfico apresentado na Figura 15 ilustra o comportamento dos ciclos térmicos à medida que o tempo decorre durante a aplicação dos tratamentos térmicos.

Figura 15 – Esquemático do comportamento dos ciclos térmicos para os diferentes tratamentos térmicos.



Fonte: Adaptado de LIMA (2021).

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  $\mu\text{m}$  e 0,05  $\mu\text{m}$ , seguida por ataque químico com reagente de nital 2%. Cada amostra foi analisada por microscopia óptica com o uso do Microscópio Óptico NIKON FX 35XD com câmera acoplada.

Ensaios de dureza Vickers foram realizados em todas as amostras, por meio de um durômetro digital fabricado pela Shimadzu, gerando um parâmetro confiável para correlação com os resultados dos ensaios eletromagnéticos. Cinco medidas para cada condição e determinação do intervalo de confiança de 95%.

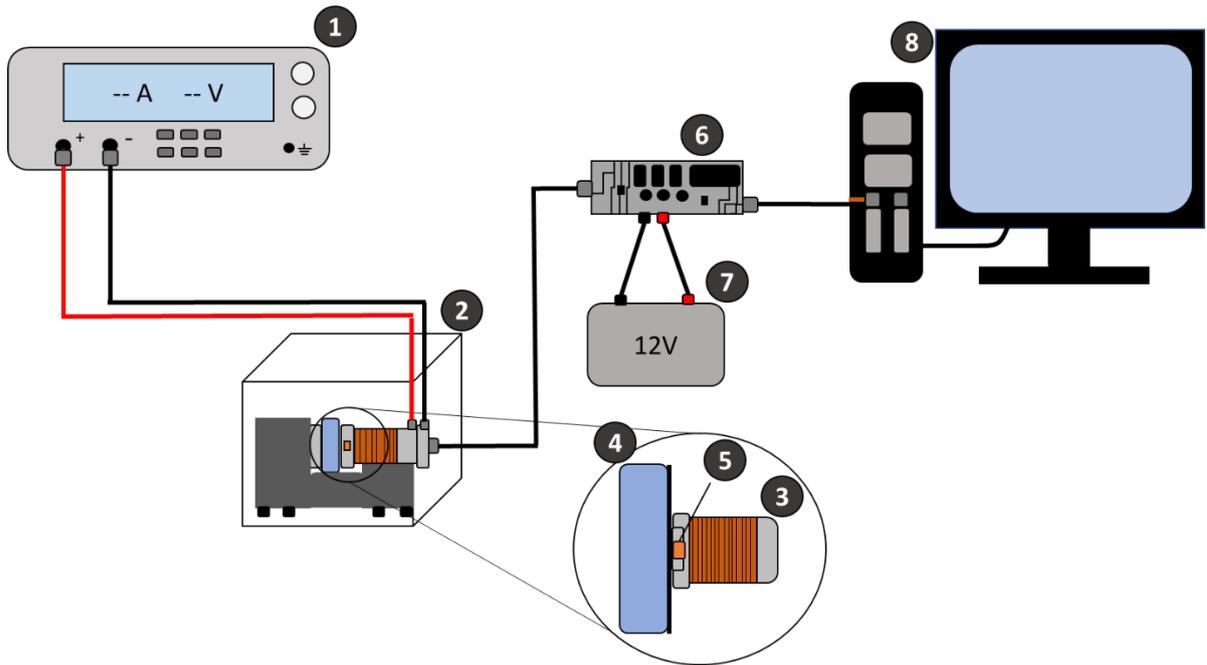
Para discussão e comparação com os resultados obtidos, foram realizadas medidas do tamanho de grão por meio do método dos interceptos além do levantamento do crescimento dos grãos de perlita, por meio de um software de análise de imagens do GSCMat, para as amostras II e III, tratadas a 850°C e 1000°C, respectivamente, em ambos os aços.

## 3.2 ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS APLICADOS NA REGIÃO DE REVERSIBILIDADE

### 3.2.1 Ensaio de permeabilidade magnética

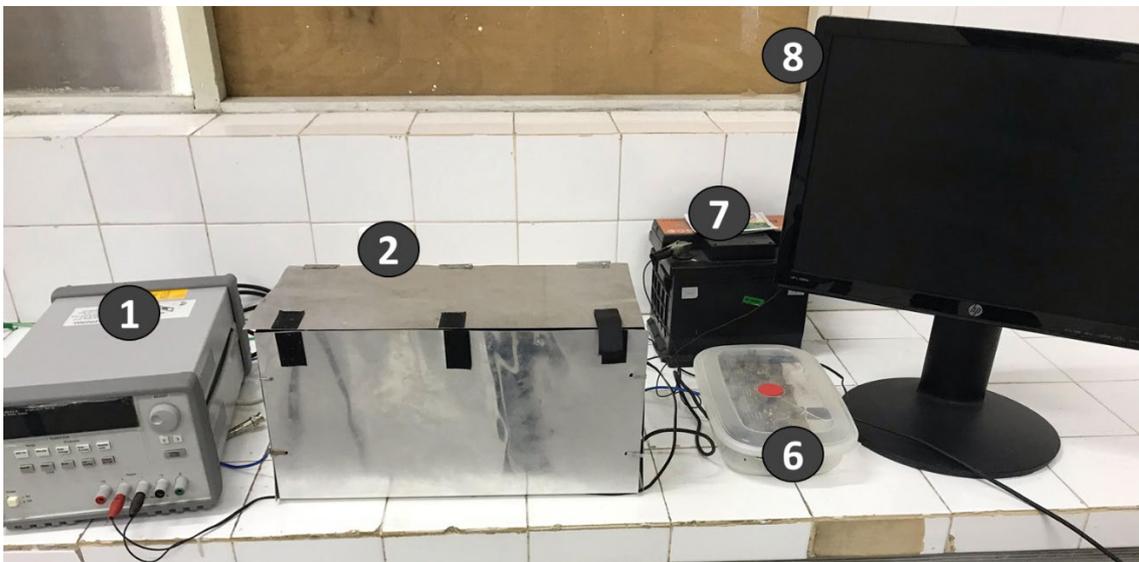
A configuração experimental utilizada para os ensaios de permeabilidade magnética, conforme Figura 16, Figura 17 e Figura 18, é composta por uma fonte de tensão contínua (1), gaiola de Faraday (2), uma bobina emissora (3), a amostra estudada (4), sensor de efeito Hall (5), placa eletrônica de aquisição de dados (6), bateria de 12 V (7) e computador (8). Os cabos são blindados para reduzir as interferências do ambiente. A fonte de tensão contínua é configurada manualmente em 5 V. A placa de aquisição é operada diretamente por um programa de computador, realizando 1000 medições por segundo.

Figura 16 – Circuito esquemático da bancada de medição de permeabilidade magnética.



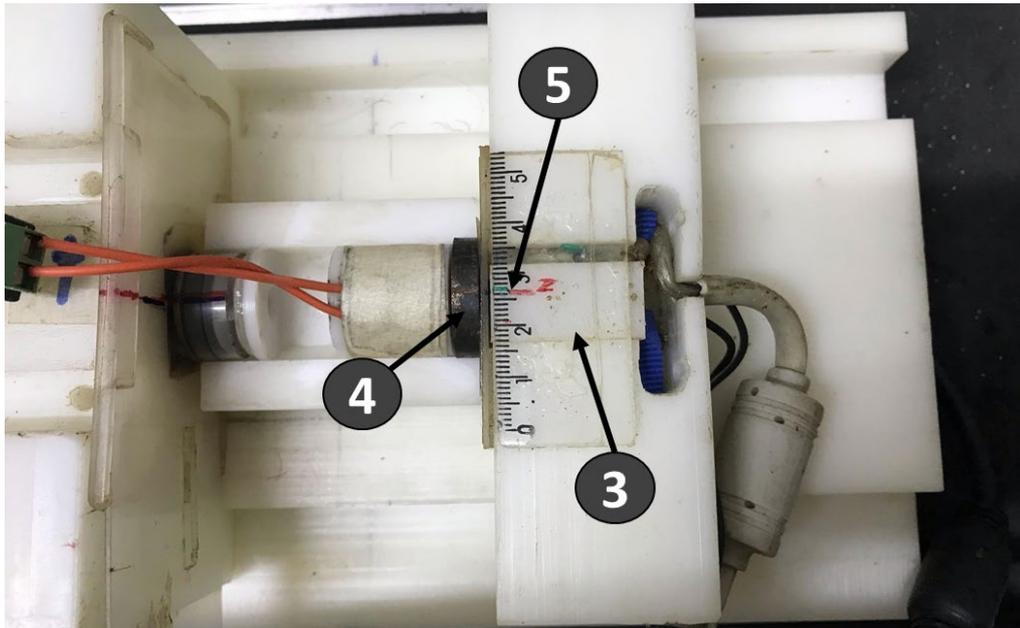
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 17 – Bancada de medição de permeabilidade magnética do GSCMat.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 18 – Lado interno da bancada de medição de permeabilidade magnética.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Cada amostra é posicionada junto a bobina e o sensor, para ser magnetizada. A fonte de tensão contínua envia um sinal elétrico de 5 V contínuos para a bobina emissora, que o transforma em um campo magnético contínuo que flui pelo interior da amostra. Essa configuração foi utilizada nos trabalhos de Silva (2019) e Lima (2021). A densidade de fluxo que percorre o material é medida pelo sensor do tipo Hall linear, do modelo SS495 A, da fabricante Allegro Microsystems, com sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss, sendo alimentado por uma tensão contínua de 5 V advinda da placa de aquisição.

O sensor é posicionado no centro de uma das faces da amostra, alinhado com a bobina emissora, e conectado à placa de aquisição de dados, que por sua vez está interligada ao computador via conexão USB. Foram realizadas cinquenta medições tanto na estrutura em vazio quanto em cada amostra. Os dados obtidos foram processados para determinar os valores da permeabilidade magnética ( $\mu$ ), ressaltando-se que essa é uma propriedade específica de cada material.

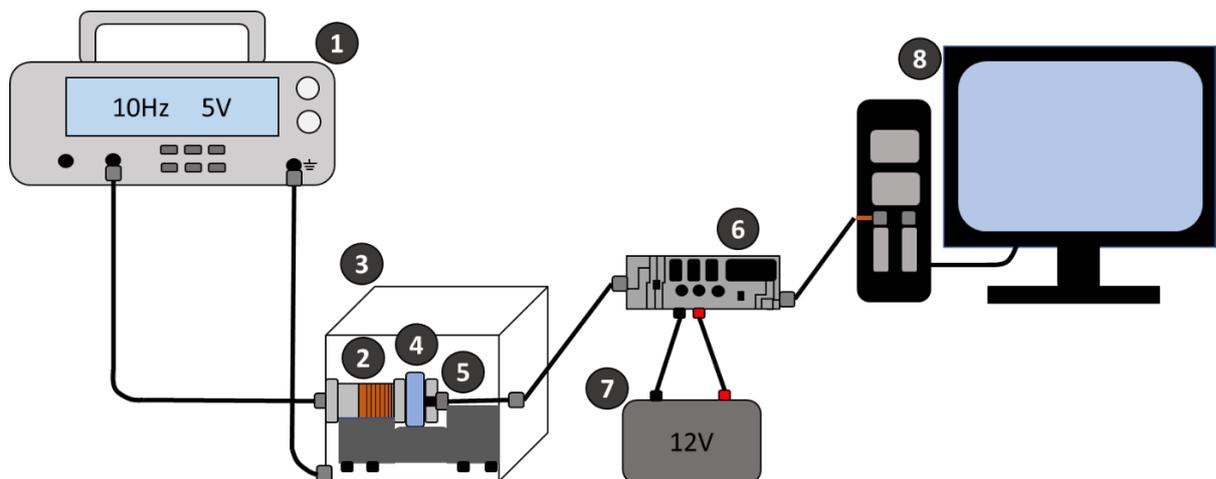
O valor da intensidade de campo magnético aplicado (H) é obtido, aproximadamente, com a medição em vazio, ou seja, sem a presença de material na bancada de medição. Já a densidade de fluxo magnético resultante da interação (B) é medida a partir dos valores coletados com a presença das amostras. Com tais dados coletados é realizado o cálculo da permeabilidade ( $\mu$ ) a partir da relação do entre

intensidade de campo magnético aplicado e densidade de fluxo magnético resultante da aplicação para as cinquenta medidas e calculado a média aritmética com intervalo de confiança. As medidas foram realizadas no sistema CGS.

### 3.2.2 Ensaios da análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico

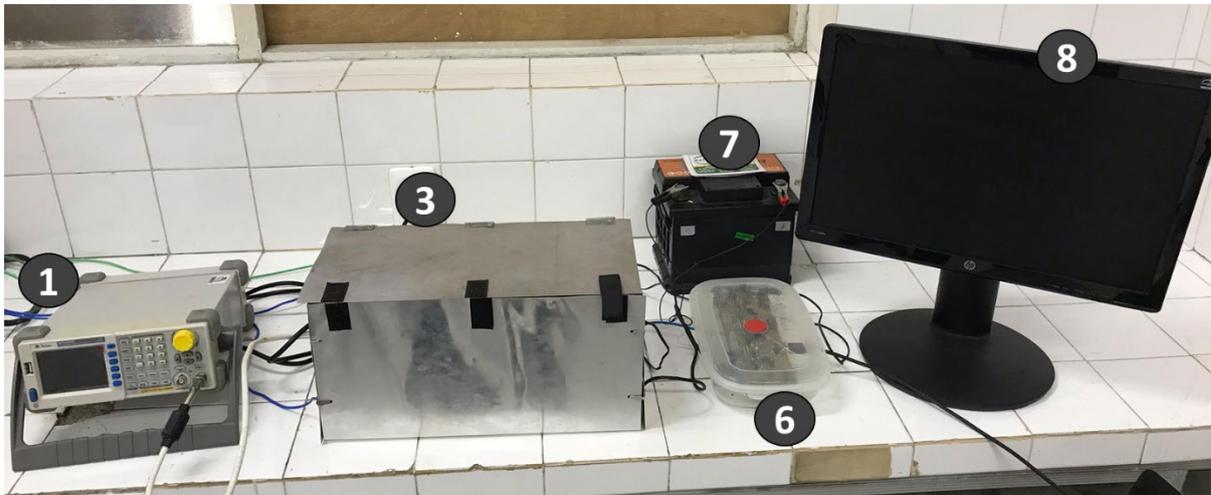
Para a realização de ambos os ensaios foi utilizado uma bancada do laboratório GSCMat do IFPB, conforme Figura 19, Figura 20 e Figura 21, composta por um gerador de sinais (1), uma bobina emissora (2), gaiola de Faraday (3), a amostra analisada (4), sensor de efeito Hall (5), placa eletrônica de aquisição de dados (6), bateria de 12 V (7) e um computador para o recebimento e tratamento dos dados (8).

Figura 19 - Circuito esquemático da bancada de medição do RMB.



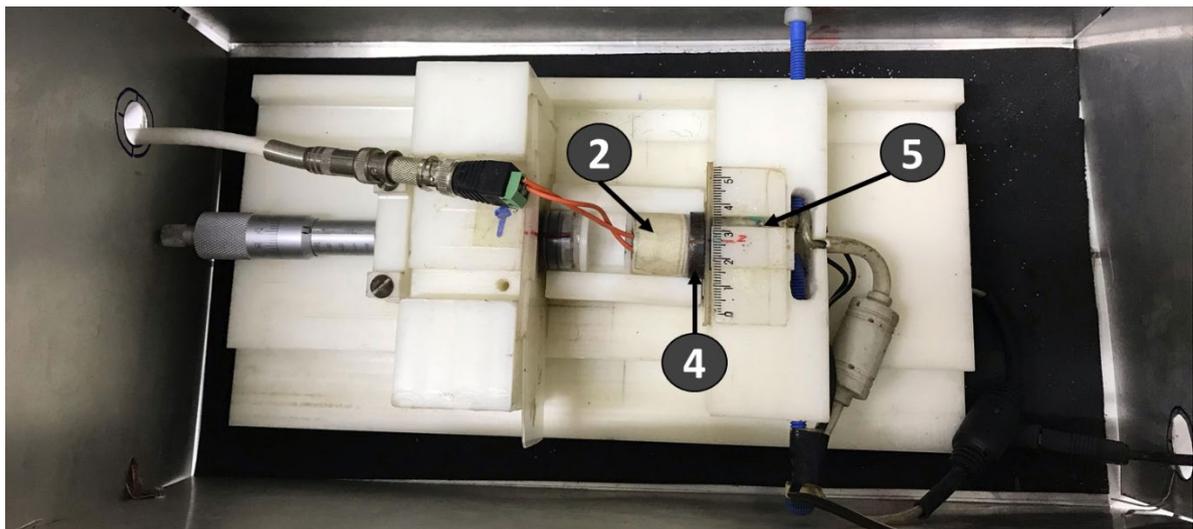
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 20 – Bancada para medir ruído magnético e o primeiro harmônico da onda emissora pertencente ao GSCMat.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 21 – Lado interno da bancada de medição do ruído magnético e primeiro harmônico.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Para emissão dos sinais é utilizado o gerador de função Minipa MFG-4205B e a bobina emissora, que apresenta em sua composição 6000 espiras de fio de cobre esmaltado nº 38, envolvido sobre um núcleo de aço SAE 1010 e 19,5 mm de comprimento. Os dados são coletados por um sensor de efeito Hall com as mesmas características descritas na configuração para medir permeabilidade magnética. A placa de aquisição de dados é alimentada pela fonte de tensão (12 V) e operada diretamente por um programa de computador, realizando 10000 medições por segundo. A estrutura metálica que envolve os dispositivos de medição, funciona com base nos princípios de uma gaiola de Faraday, reduzindo as interferências externas.

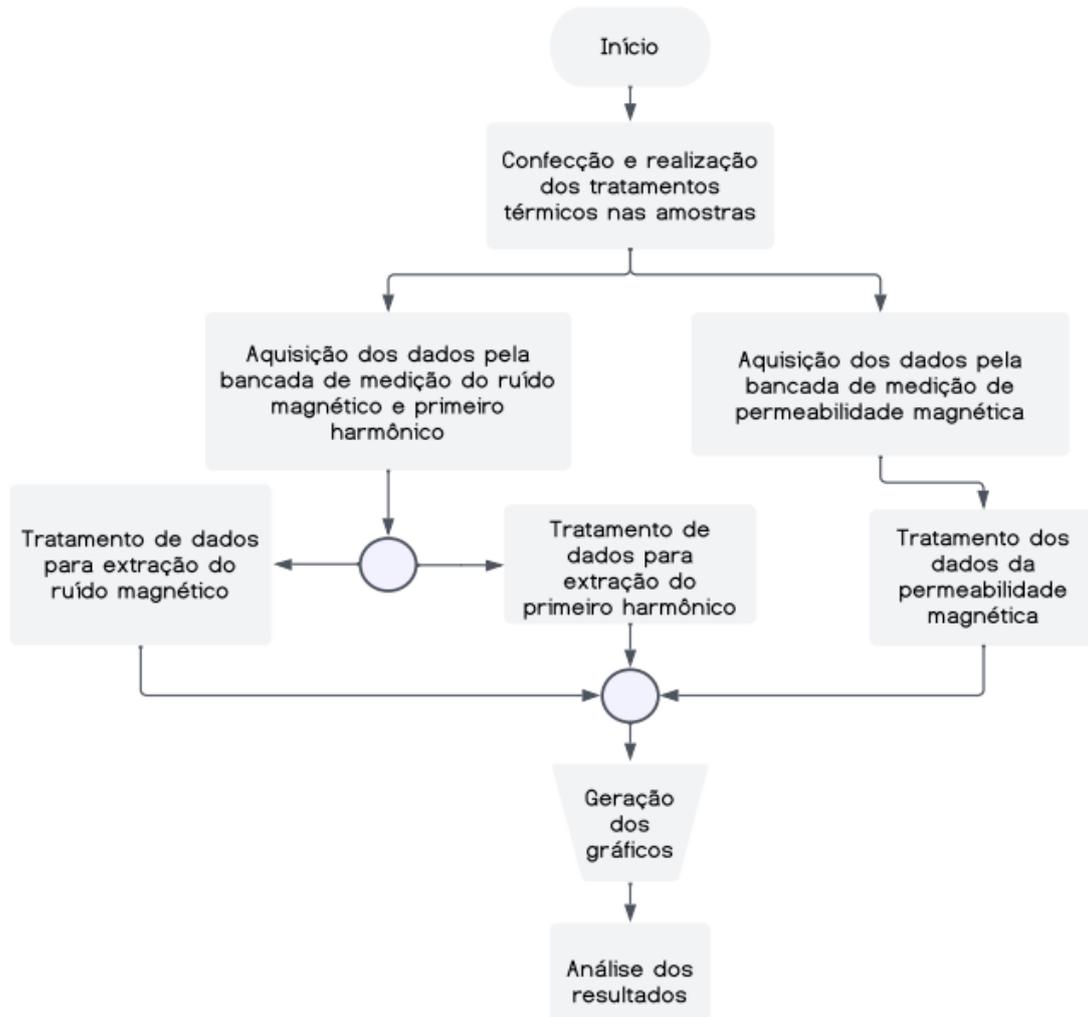
Cada amostra é posicionada no espaço entre a bobina e o sensor, para ser magnetizada. O gerador de sinais é configurado para enviar um sinal senoidal com 1 V de amplitude e 5 Hz de frequência para a bobina emissora. Essa configuração foi adotada em virtude de trabalhos anteriores, como o realizado por Carvalho (2018) e Lima (2023), que coletaram os melhores resultados de análise do RMB com frequências de 5 Hz e 25 Hz, e a pesquisa realizada por Sampaio (2023) evidencia resultados consistentes aplicando sinais com amplitudes na faixa de 1 V até 2 V.

Ao ser gerado, o sinal atravessa a amostra, interagindo com seus domínios magnéticos e resultando em um sinal ruidoso, captado pelo sensor e enviado ao computador via conexão USB. Cinquenta medições foram realizadas em cada amostra. Em seguida, os resultados são processados em um programa específico que permite aplicar transformada rápida de Fourier para transpor os sinais para o domínio da frequência. Um filtro passa-altas de 1000 Hz é aplicado para eliminar frequências indesejadas. Por último, calcula-se os valores de RMS dos dados, usados como parâmetro para análise da intensidade do ruído magnético.

Para o ensaio eletromagnético que utiliza o primeiro harmônico, o procedimento metodológico realizado segue os mesmos passos do ensaio de análise do ruído magnético, diferindo na etapa de tratamento dos dados, no qual um filtro passa-baixas é utilizado. A média da amplitude do primeiro harmônico do sinal resultante é adquirida como parâmetro de análise.

Os ensaios eletromagnéticos seguem o fluxo de execução representado no fluxograma da Figura 22, disposta a seguir.

Figura 22 - Etapas de execução dos ensaios eletromagnéticos.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

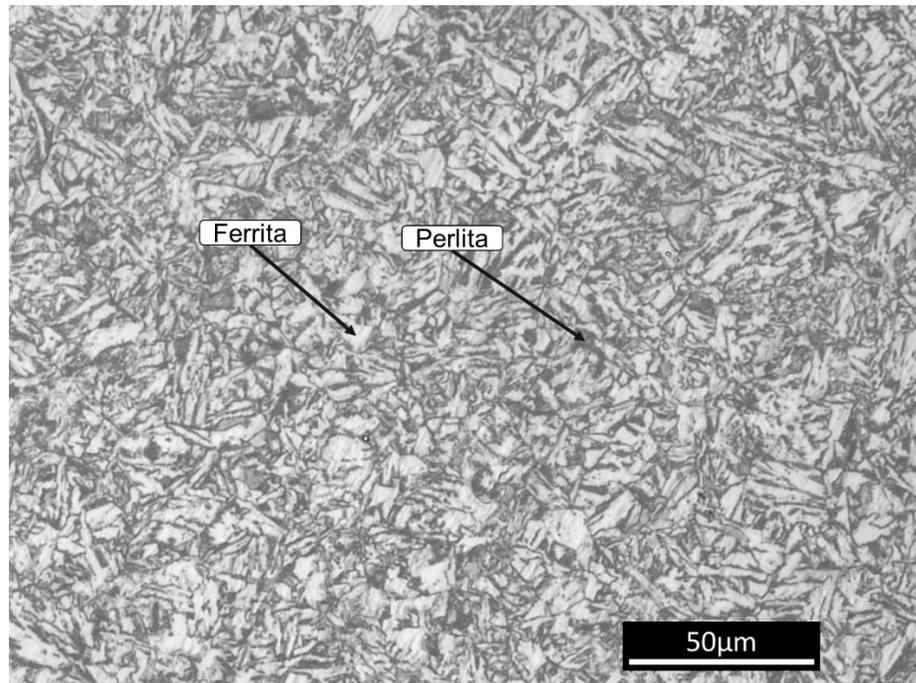
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão exibidos os resultados e as discussões relacionadas ao estudo dos ensaios eletromagnéticos de permeabilidade magnética, análise do ruído magnético e avaliação do primeiro harmônico para diferentes tratamentos térmicos aplicados aos aços SAE 1040 e SAE 4340. Foram examinados os efeitos da temperatura de recozimento e do tratamento de têmpera nesses aços, que possuem diferentes temperabilidades. Os resultados obtidos foram comparados com os ensaios de dureza Vickers e com a micrografia das microestruturas.

### 4.1 ANÁLISE DAS MICROESTRUTURAS OBTIDAS PELOS TRATAMENTOS TÉRMICOS APLICADOS

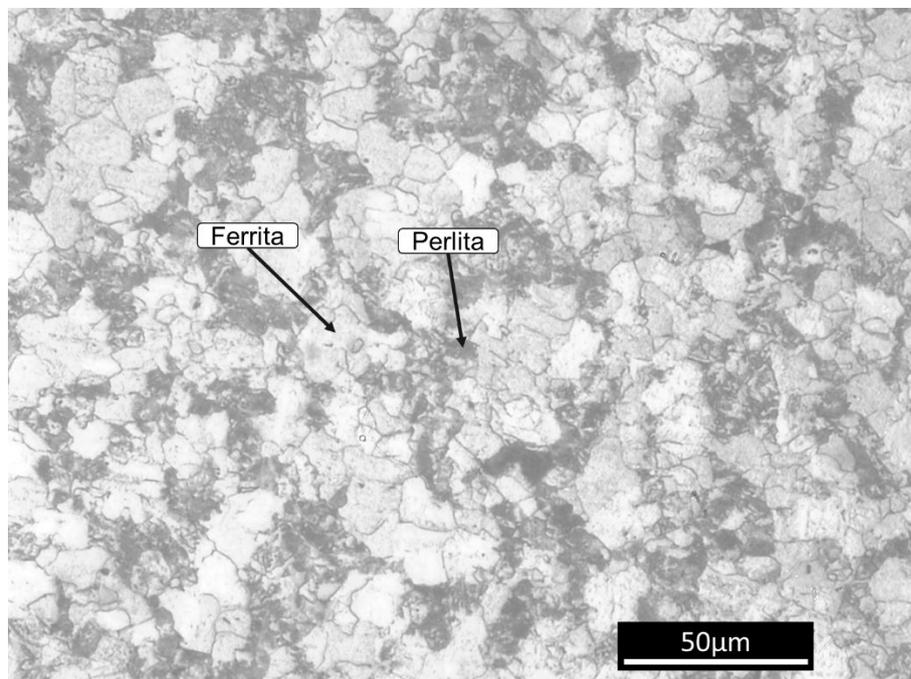
Após a confecção das amostras, foram realizadas micrografias de ambos os aços para permitir a análise microestrutural. As Figuras 23, 24, 25 e 26 apresentam as microestruturas obtidas por microscopia óptica do aço SAE 1040, seguindo a seguinte ordem: como recebido (sem tratamento térmico), recozido a 850 °C, recozido a 1000 °C e temperado a 1000 °C. Da mesma forma, as Figuras 27, 28, 29 e 30 exibem as microestruturas do aço SAE 4340, na seguinte sequência: como recebido (sem tratamento térmico), recozido a 850 °C, recozido a 1000 °C e temperado a 1000 °C.

Figura 23 - Material aço SAE 1040 como recebido.



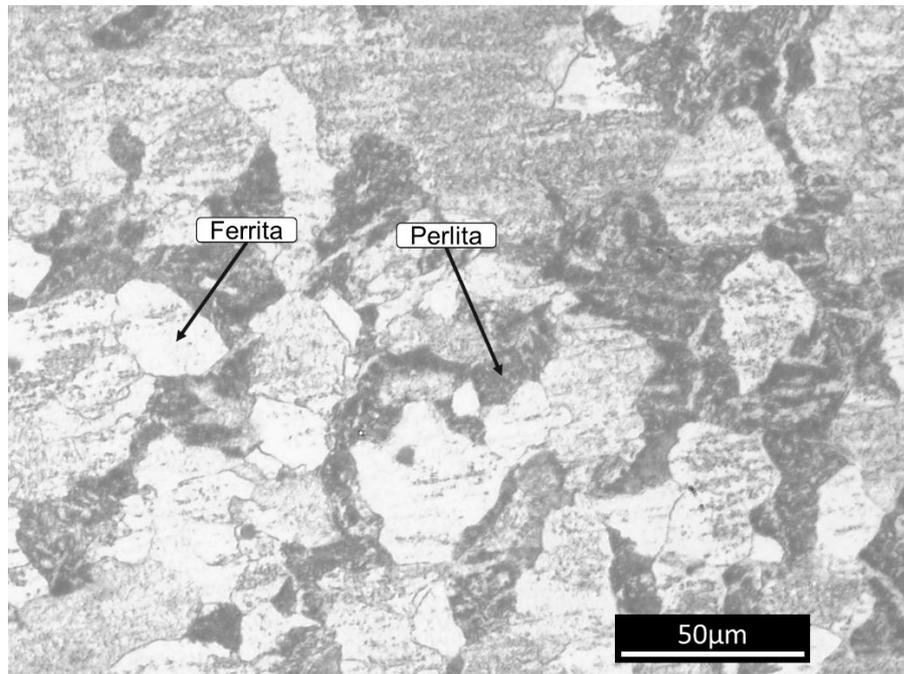
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 24 - Material aço SAE 1040 recozido em temperatura de 850 °C.



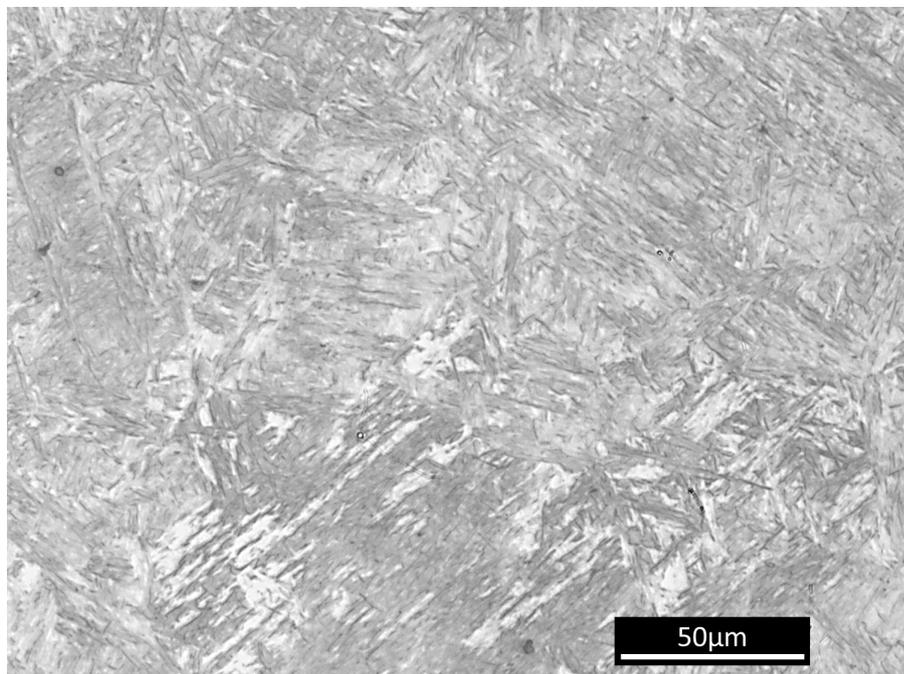
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 25 - Material aço SAE 1040 recozido em temperatura de 1000 °C.



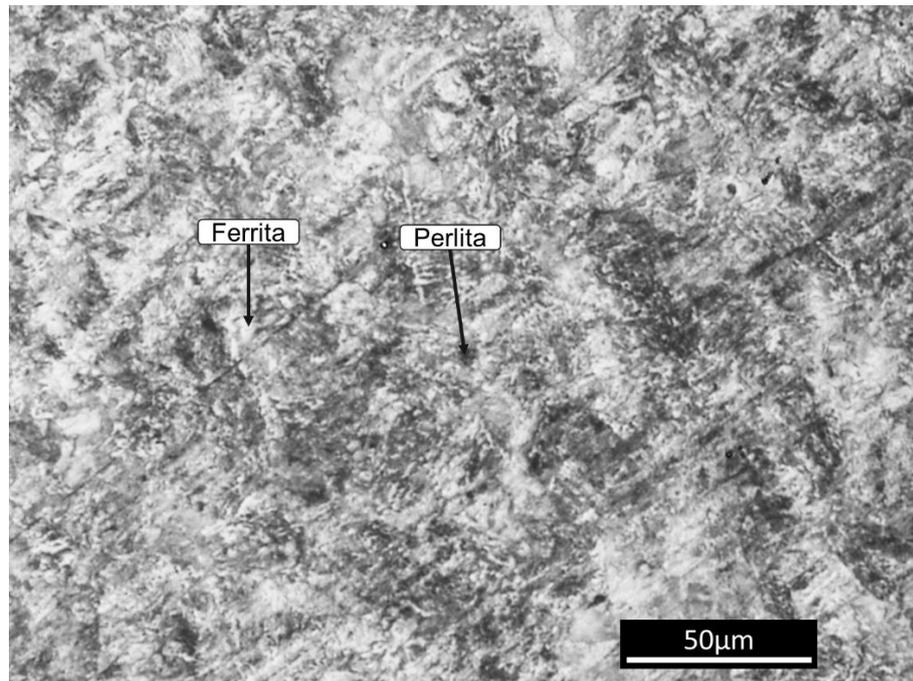
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 26 - Material aço SAE 1040 após têmpera em 1000 °C.



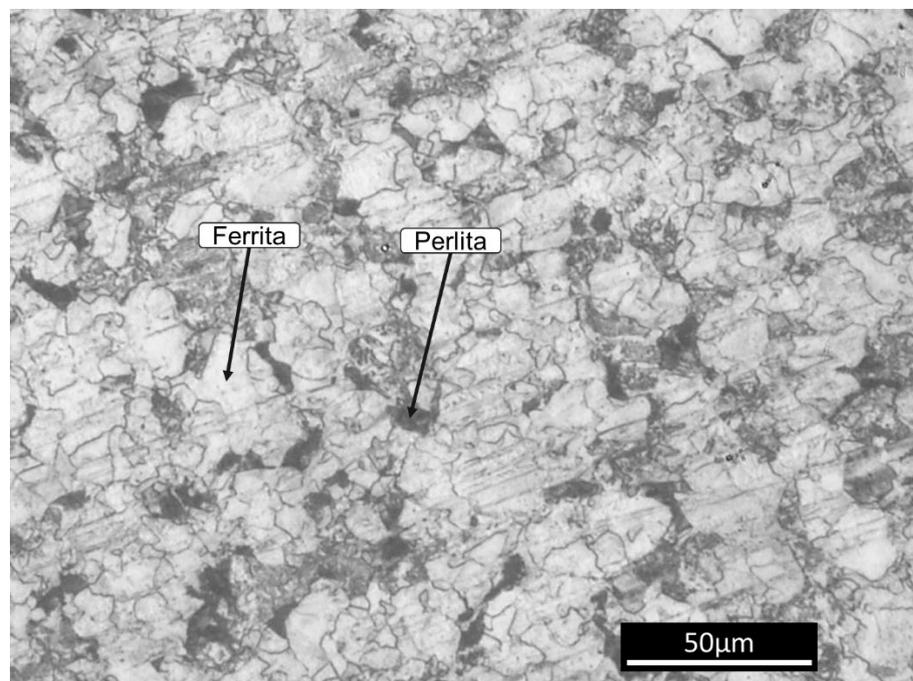
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 27 - Material aço SAE 4340 como recebido.



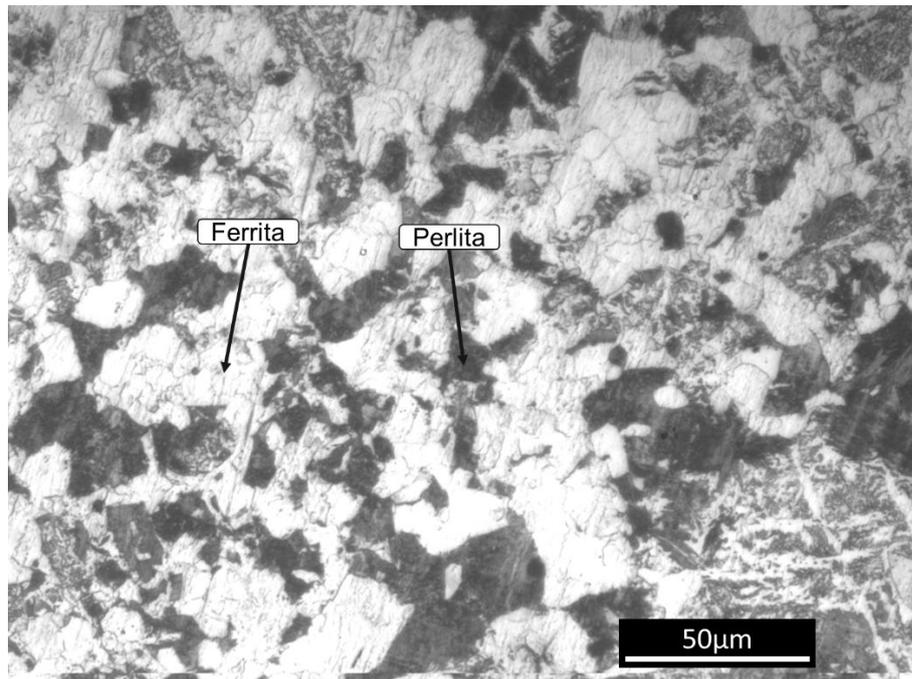
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 28 - Material aço SAE 4340 recozido em temperatura de 850 °C.



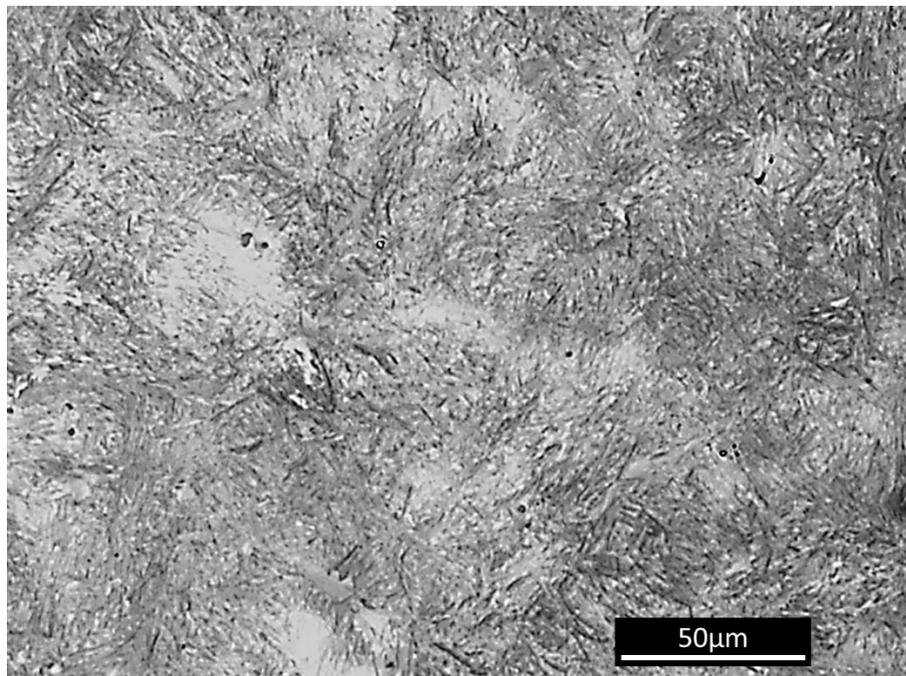
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 29 – Material aço SAE 4340 recozido em temperatura de 1000 °C.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

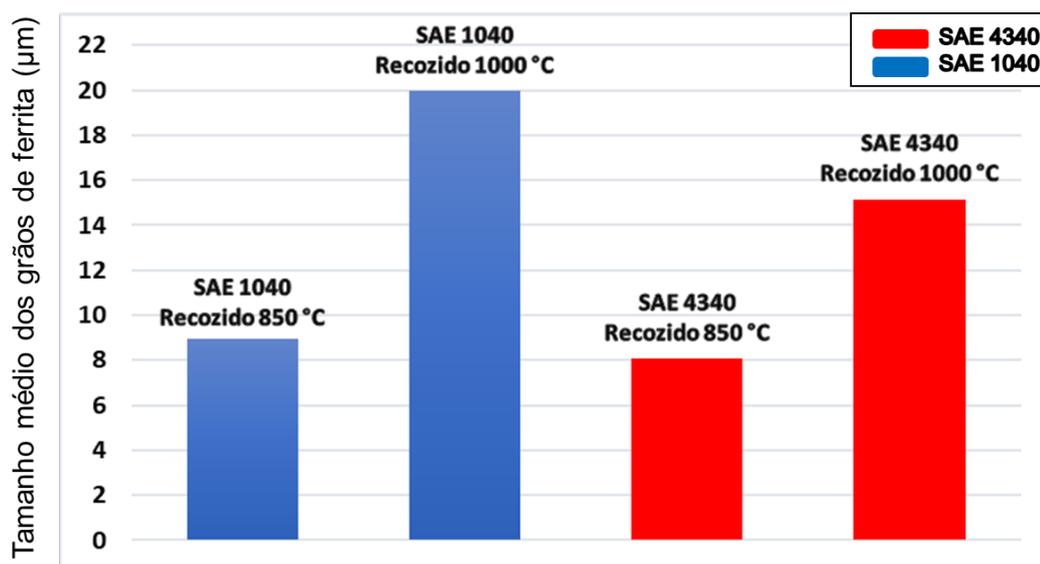
Figura 30 - Material aço SAE 4340 após têmpera em 1000 °C.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Dentre as amostras do aço SAE 1040, a micrografia da amostra na condição como recebida (sem tratamento), exibe a presença de uma microestrutura de grãos finos de ferrita (região clara) e perlita (região escura), conforme Figura 24. Todavia, quando tratada em temperatura de 850 °C (recozimento) nota-se um crescimento de grão, que é acentuado no recozimento à temperatura de 1000 °C (Figura 25 e Figura 26). Já para a amostra submetida ao tratamento de têmpera a 1000 °C, a microestrutura é composta pela martensita (Figura 26). Quando se trata das amostras do aço SAE 4340, é observado comportamento semelhante para ambos os tratamentos, contudo, para cada condição, as microestruturas obtidas são mais finas, ou seja, o tamanho de grão apresenta menores dimensões, conforme dados da Figura 31.

Figura 31 – Tamanho médio dos grãos de ferrita conforme mudança na temperatura do recozimento para o aço SAE 1040 e aço SAE 4340.



Fonte: Elaboração 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 Fe e C somente, o que o define como um aço carbono comum, o aço SAE 4340 possui em sua composição, a adição de elementos de liga, como o Cr, Ni, Mo, entre outros, o que leva esse ser considerado um aço liga (ÇALIK, 2009; PARK *et al.*, 2023).

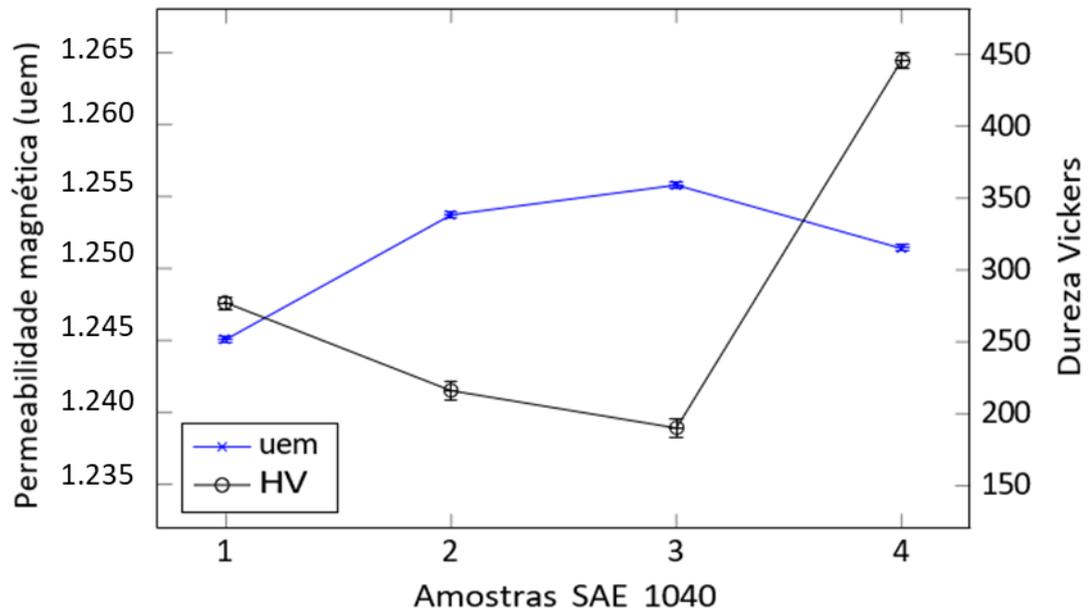
O aumento das quantidades de elementos de liga nos aços SAE 4340 levam a retardar o tempo de transformação, visto que uma maior quantidade de elementos necessita de um maior tempo de consumo durante o tratamento térmico e assim retarda o tempo inicial de formação de ferrita e perlita e com isso reduz o tempo de permanência em altas temperaturas, para uma mesma taxa de resfriamento (BAKHSI; MIRAK, 2022). Assim há um tempo menor para crescimento de grão e a formação de microestruturas mais finas no aço SAE 4340, em comparação com o aço SAE 1040. Microestruturas mais finas possuem maior quantidade de contornos de grão e aumentam a dureza do material.

#### 4.2 ANÁLISE DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DOS DIFERENTES TRATAMENTOS EM AMBOS OS AÇOS

As Figuras 32 e 33 mostram as variações das medidas de permeabilidade magnética ( $\mu_m$ ) e dureza Vickers (HV), em função das diferentes condições, ou seja, material como recebido, tratado a 850 °C e 1000 °C, para os aços SAE 1040 e SAE 4340, respectivamente. Nota-se maiores valores de dureza para o SAE 4340, por possuir maior quantidade de elementos de liga.

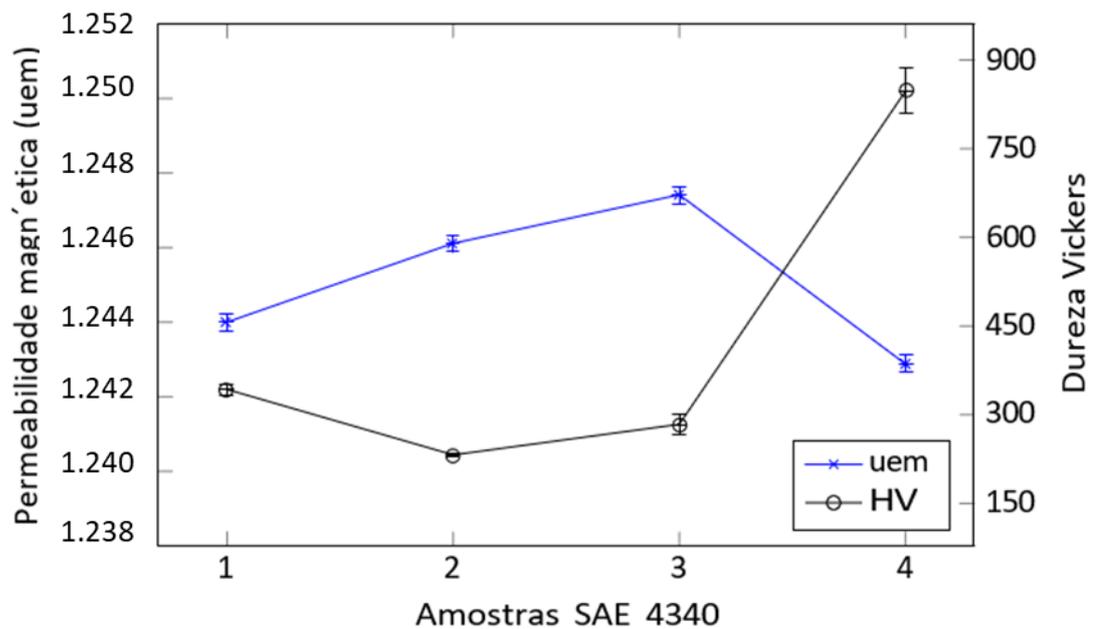
A Figura 32 mostra que para o aço SAE 1040 ocorre uma redução de dureza para o recozimento a 850 °C e em seguida a continuidade da queda para o recozimento à temperatura de 1000 °C. Nesse aço, por não possuir elementos de liga, a variação de dureza segue conforme esperado para o tratamento aplicado, uma vez que ao passar pelo tratamento a 850 °C o material sofre o efeito de crescimento dos grãos em sua microestrutura, eliminando possíveis defeitos e as tensões internas, consequentemente resultando em uma redução da dureza e aumento da ductilidade. Já quando recozido à temperatura de 1000 °C, o aço atinge temperatura dentro da faixa austenítica, conforme diagrama de fases ferro-carbono. Nessa faixa, ocorre o crescimento dos grãos austeníticos, o que reduz ainda mais a dureza do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Contudo, as medidas de permeabilidade, das amostras tratadas, mostram um aumento em relação ao material inicial. O aumento do tamanho de grão favorece a passagem do fluxo magnético devido à redução das quantidades de contornos de grão. Isto facilita a passagem do fluxo magnético e aumento da permeabilidade do material que segue comportamento inverso às medidas de dureza (TAVARES *et al.*, 2019; ÇALIK, 2009; BAKHSI; MIRAK, 2022).

Figura 32 - Variações das medidas de permeabilidade magnética e dureza para as amostras do aço SAE 1040 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 33 - Variações das medidas de permeabilidade magnética e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).

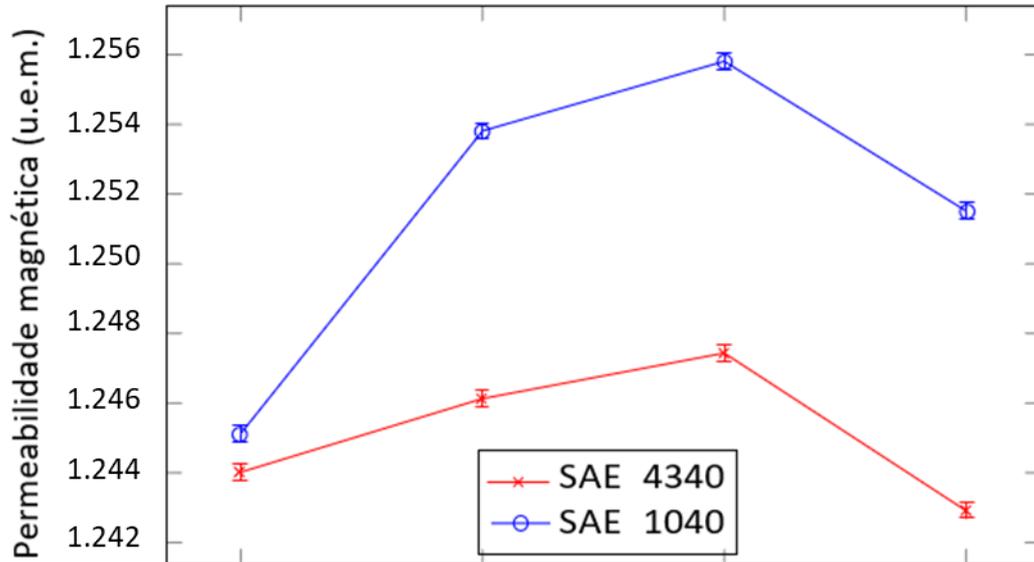


Fonte: Elaboração própria, 2025.

A Figura 33 apresenta uma redução na dureza para a amostra nº 2, tratada a 850 °C, seguido de um aumento para a amostra tratada a temperatura de 1000 °C. A presença de elementos de liga leva a formação de carbonetos em temperaturas maiores, que elevam os valores de dureza. Entretanto, o efeito do aumento de grão é mais sensível nas medidas de permeabilidade, pois o constituinte ferrita tem alta permeabilidade e seu crescimento leva ao aumento da facilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos e favorece a passagem do fluxo magnético (TAVARES *et al.*, 2019; ÇALIK, 2009). Para a amostra nº 4 é possível averiguar que houve um decréscimo acentuado dos valores de permeabilidade e um significativo crescimento dos valores de dureza. Esse comportamento está relacionado a microestrutura fina da martensita que dificulta a passagem do fluxo magnético e gera um aumento da dureza devido a maior dificuldade de deslizamento dos planos atômicos do material.

A comparação das medidas de permeabilidade magnética dos aços SAE 1040 e SAE 4340 (Figura 34) evidencia a capacidade do método em diferenciar aços com o mesmo teor de carbono e em detectar a presença de martensita em aços com a presença de elementos de liga. Esses resultados indicam o potencial de uma metodologia experimental não destrutiva para a análise microestrutural de aços em serviço.

Figura 34 - Variações das medidas de permeabilidade magnética em função das diferentes amostras para os aços SAE 1040 e SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).



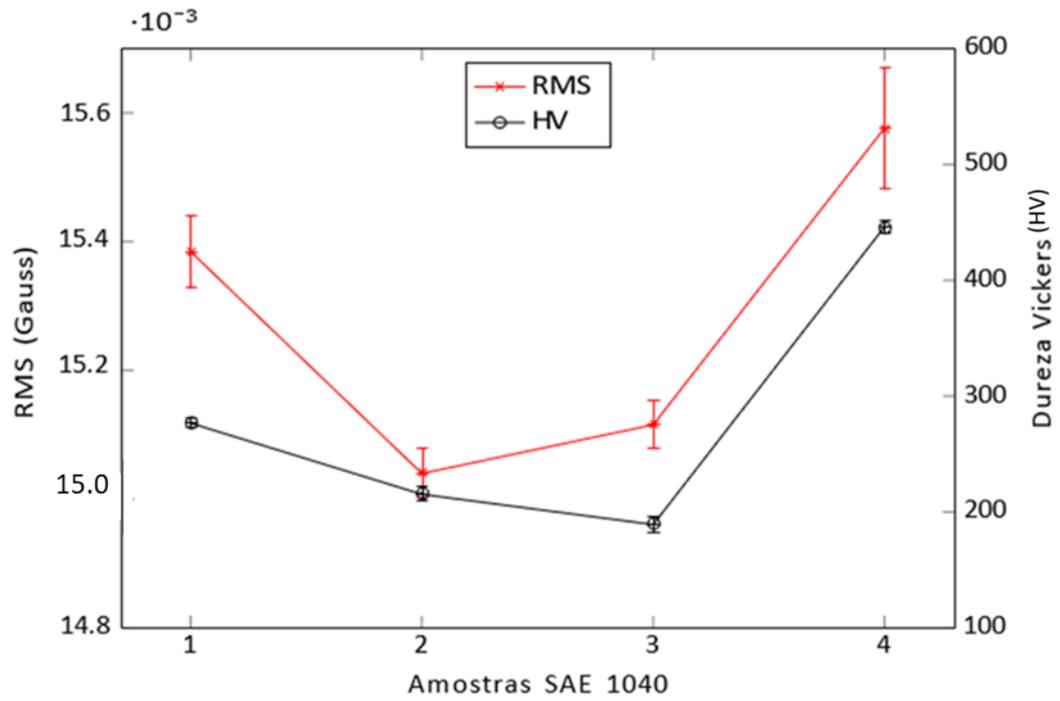
Fonte: Elaboração própria, 2025.

#### 4.3 ANÁLISE DO ENSAIO DO RUÍDO MAGNÉTICO DOS DIFERENTES TRATAMENTOS EM AMBOS OS AÇOS

As Figuras 35 e 36 exibem os gráficos dos valores da RMS do ruído magnético (Gauss) e as medidas de dureza Vickers (HV) das amostras do aço SAE 1040 e do aço SAE 4340, respectivamente. As amostras nº 1 (material como recebido) de ambos os aços apresentaram maiores durezas em relação às outras amostras, devido ao processo de fabricação, no qual há grande quantidade de grãos pequenos, o que dificulta a movimentação dos planos atômicos. Esse comportamento liga-se diretamente com os resultados do ruído magnético. Devido a maior quantidade de fronteiras entre os grãos, o movimento das paredes dos domínios sofre interação com uma maior quantidade de contornos de grãos e por consequência geram maior ruído (DIWAKAR *et al.*, 2022; NESLUŠAN *et al.*, 2019).

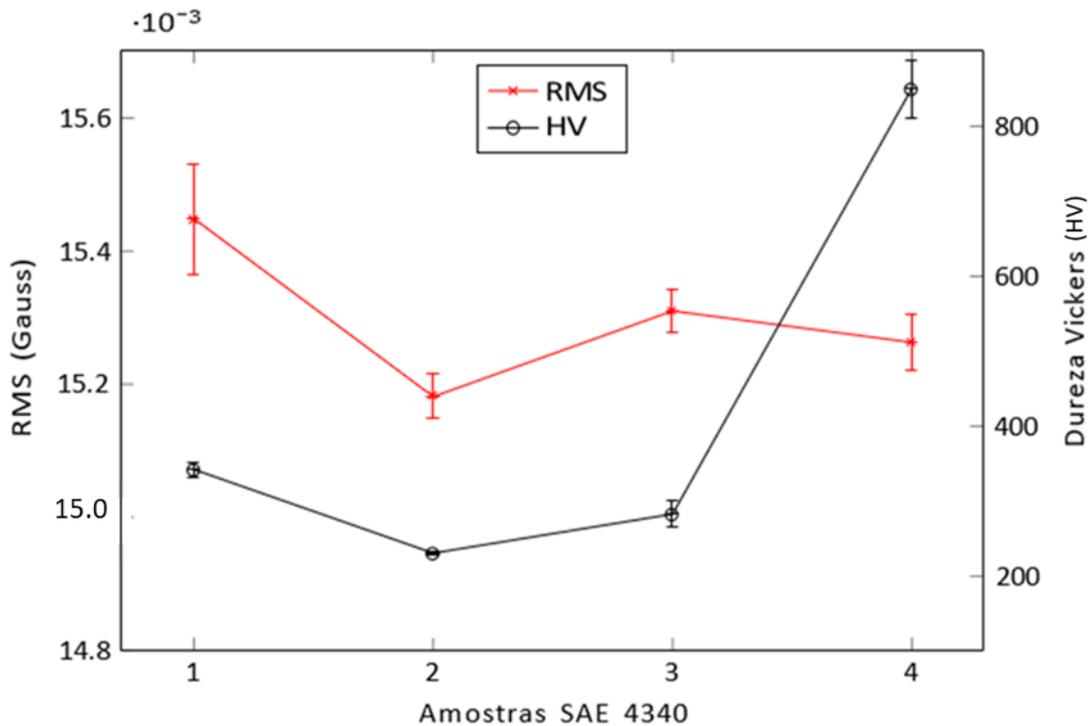
Quando realizada a comparação das micrografias, dos valores de dureza e do ruído magnético das amostras nº 1 (como recebida) de ambos os aços, os resultados indicam que os dados seguem o comportamento esperado apresentando valores maiores que as amostras tratadas termicamente, conforme influência do tamanho de grão.

Figura 35 - Variações das medidas de ruído magnético e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 1040 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 36 - Variações das medidas de ruído magnético e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).



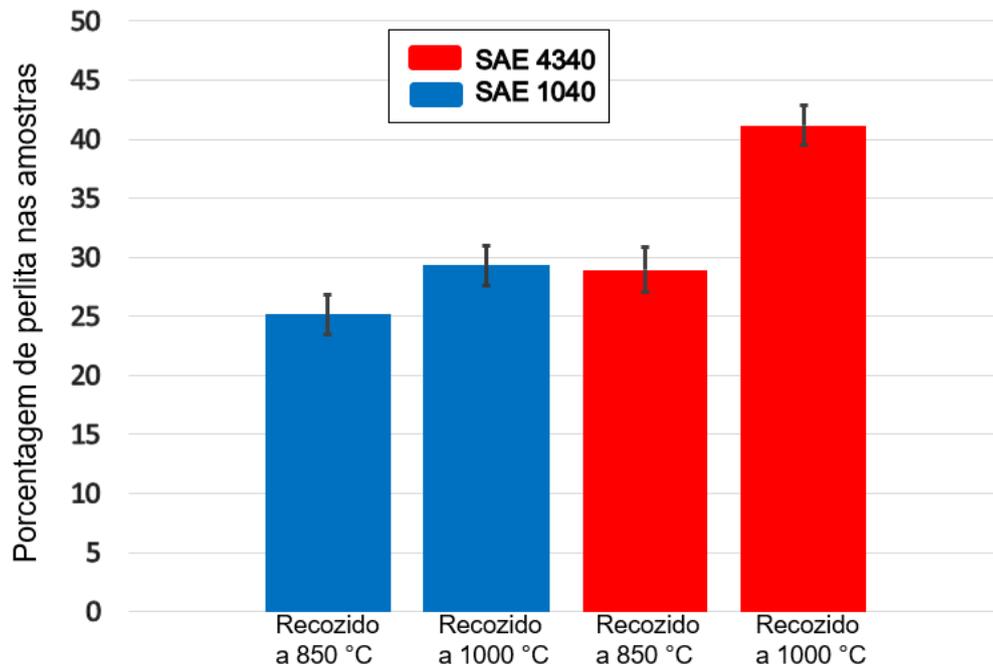
Fonte: Elaboração própria, 2025.

As amostras n° 2 e n° 3 (tratadas termicamente) em ambos os aços, que passaram por recozimento, apresentaram menor dureza e ruído magnético em relação às amostras n° 1 (como recebida) respectivamente. Esses valores estão relacionados diretamente com a formação microestrutural, ou seja, o tratamento térmico de recozimento tem como funções reduzir dureza, eliminar tensões residuais e aumentar tamanho do grão (MARINHO, 2018).

A presença de grãos maiores e microestrutura uniforme reduz o ruído magnético devido à menor quantidade de obstáculos para o movimento das paredes dos domínios magnéticos durante a passagem do campo magnético variável. No entanto, em ambos os aços, a amostra n° 3 (tratada a 1000 °C) apresentou maiores valores do ruído magnético em relação a amostra n° 2 (tratada a 850 °C) devido ao crescimento da perlita, conforme dados da Figura 37, e a formação dos carbonetos que sobrepõem a influência do efeito do crescimento de grão. Isso ocorre devido à morfologia da perlita ser formada a partir de estrutura lamelar irregular criando mais obstáculos à movimentação dos domínios magnéticos, como também à presença dos

precipitados de carbonetos. Portanto, tais fatores exercem influência na estrutura granular e favorecem a amostra nº 3 em possuir maiores valores do ruído magnético.

Figura 37 – Variação da porcentagem de perlita conforme mudança na temperatura do recozimento para o aço SAE 1040 e aço SAE 4340.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

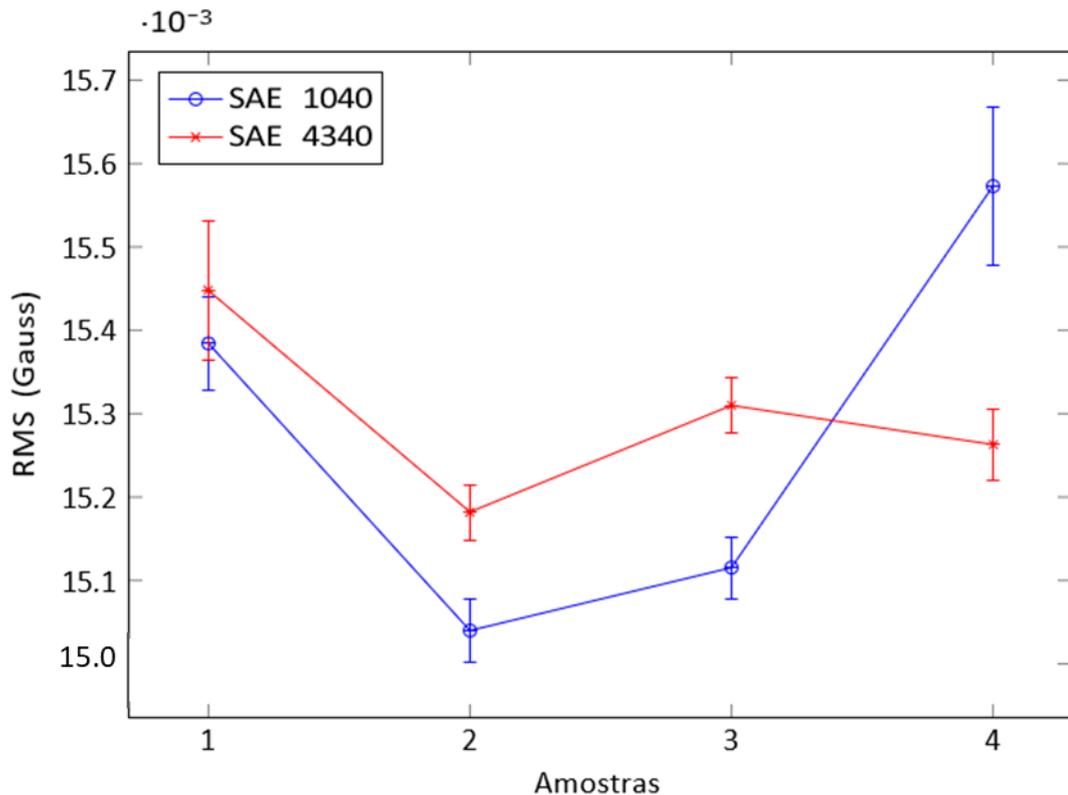
Para as amostras nº 4, referentes ao tratamento de têmpera em temperatura de 1000 °C, o aço SAE 1040 apresenta comportamento da dureza e do ruído magnético semelhantes, onde, devido à estrutura granular em formato de agulha presente na martensita, há grande quantidade de contornos de grãos que funcionam como barreiras para a movimentação da parede de domínio. Como consequência, ocorre a geração de ruído magnético com maior intensidade em relação as demais amostras, como também há maior valor de dureza devido à martensita possuir estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), que possui número pequeno de sistemas de escorregamento, em relação as demais amostras, além de átomos intersticiais de carbono, meio eficiente para restringir o movimento de discordâncias (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Para o aço SAE 4340, observou-se um comportamento divergente entre a dureza e o ruído magnético, uma vez que, conforme a microestrutura formada por martensita, ou seja, estruturas com grãos menores, esperava-se que os valores do

ruído magnético também fossem mais elevados. No entanto, o que explica esse comportamento é que o aço SAE 4340, ao ser exposto ao tratamento de têmpera a 1000 °C, forma uma microestrutura composta por martensita mais refinada e em profundidade que possui maior quantidade de contornos de grão, dificulta o movimento das paredes dos domínios magnéticos e diminui a geração do ruído magnético. Dessa forma, para superar uma quantidade maior de contornos de grão, a energia necessária para o deslocamento de uma parede de domínio torna-se maior. Caso a parede de domínio não tenha energia suficiente para superá-los, ela fica aprisionada (GUIMARÃES, 2009). Essa afirmação é confirmada nos resultados obtidos por Diwakar et al. (2022), que constataram que as características do RMB estão associadas com o tamanho do grão. Quando há mais limites de grão no aço, ocorre uma maior dificuldade nas atividades da parede do domínio magnético em campos magnéticos menos intensos, evidenciando a necessidade de campo magnético mínimo para movimento da parede do domínio em estruturas com grãos menores como é o caso da estrutura fina da martensita com a presença dos elementos de liga que aumentam as barreiras. Assim, conclui-se que a análise da amostra n° 4 do aço SAE 4340 necessita de um campo magnético com maior intensidade para a adequada correlação com as demais microestruturas.

Quando comparados os aços, o SAE 4340, que possui grãos menores, apresenta valores de dureza e ruído magnético mais elevados do que os do aço SAE 1040, cuja microestrutura é composta por grãos maiores. Este comportamento mostra que, apesar da influência da perlita, o ruído magnético apresentou valores maiores em todas as amostras do aço SAE 4340 em relação ao aço SAE 1040, com exceção da amostra n° 4, conforme necessidade de aplicação de campo magnético de maior intensidade. Esse resultado é consistente com o fato de que materiais com grãos menores tenham maior dureza e ruído magnético mais intenso, em comparação com materiais com grãos maiores, conforme figura 38.

Figura 38 - Variações das medidas de ruído magnético em função dos diferentes tratamentos para os aços SAE 1040 e SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).

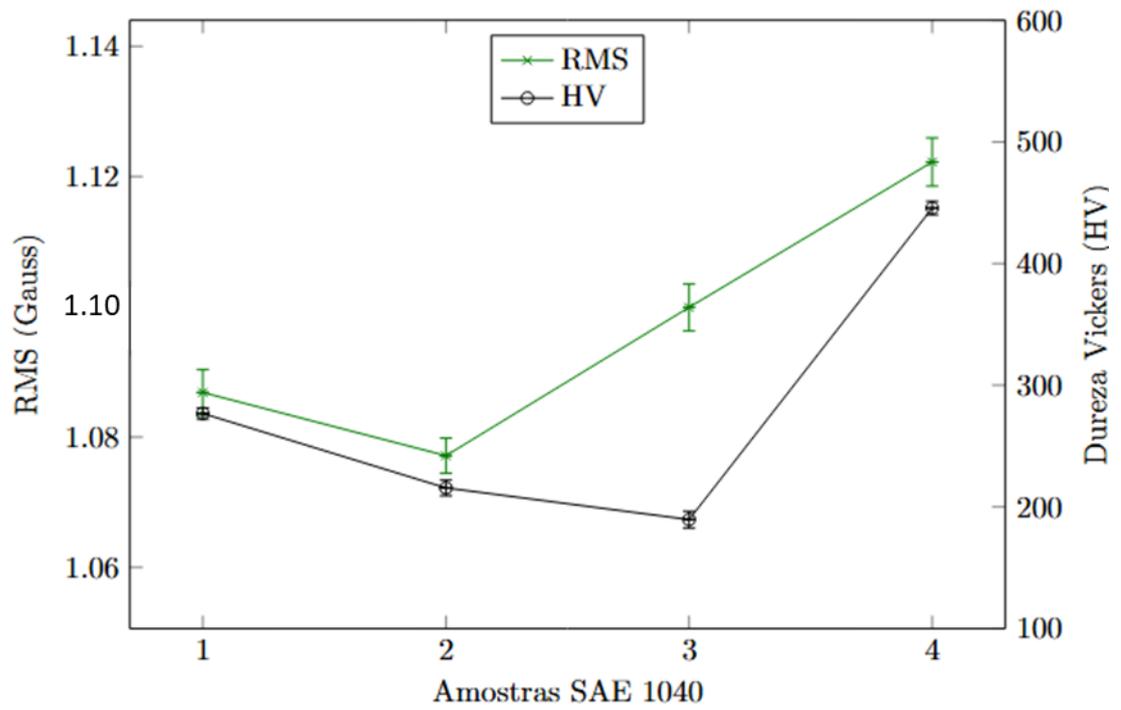


Fonte: Elaboração própria, 2025.

#### 4.4 ANÁLISE DO ENSAIO DO PRIMEIRO HARMÔNICO DOS DIFERENTES TRATAMENTOS EM AMBOS OS AÇOS

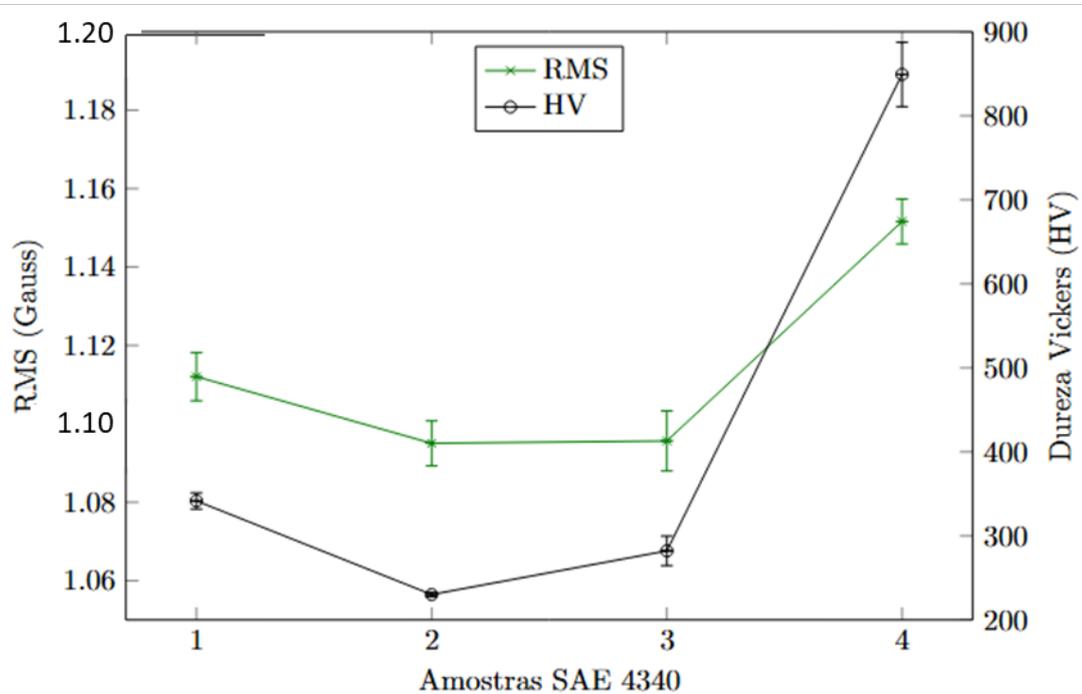
As Figuras 39 e 40 exibem os gráficos dos valores da RMS (Gauss) da amplitude do primeiro harmônico da onda emissora e as medidas de dureza Vickers (HV) das amostras do aço SAE 1040 e do aço SAE 4340, respectivamente. De modo geral, os resultados obtidos apresentam semelhanças aos utilizados para a análise do ruído magnético, mas com algumas diferenças pontuais.

Figura 39 - Variações das medidas do primeiro harmônico e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 1040 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 40 - Variações das medidas da média do primeiro harmônico e dureza, em função das diferentes amostras para o aço SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).



Fonte: Elaboração própria, 2025.

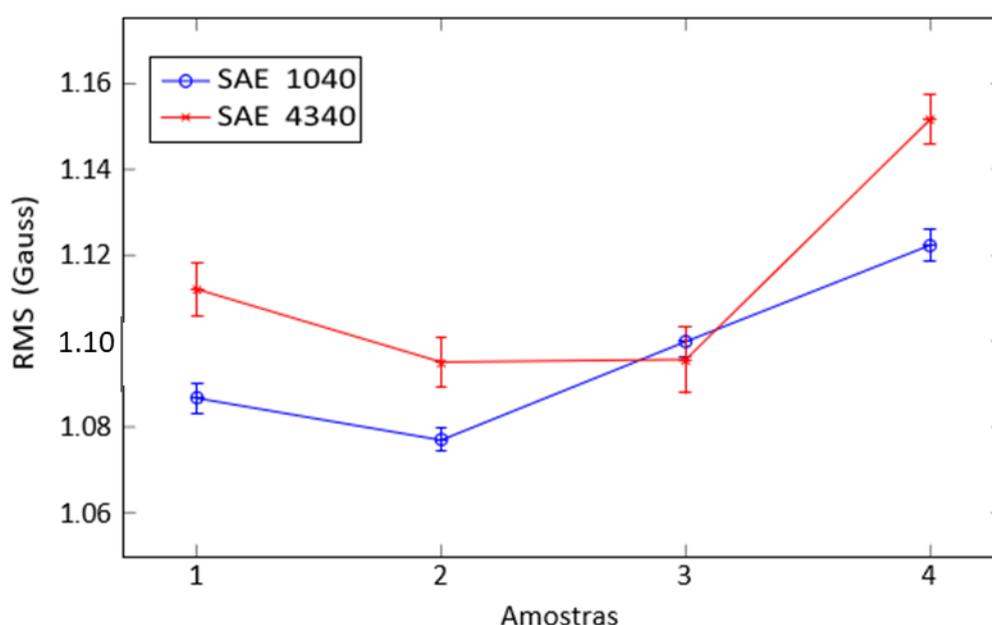
Analisando os dados das Figuras 39 e 40, as amostras nº 1 (material sem tratamento) apresentaram maior quantidade de fronteiras entre os grãos quando comparadas as amostras tratadas com recozimento em temperatura de 850 °C. Essa microestrutura possibilita que, durante o movimento das paredes dos domínios, haja interação com um maior número de contornos de grãos, o que, por consequência, afeta o valor da amplitude do primeiro harmônico da onda emissora gerando um valor maior que as amostras nº 2.

Já entre as amostras nº 2 e nº 3, referentes aos recozimentos em 850 °C e 1000 °C respectivamente, apresentam comportamentos distintos entre os dois aços. O aço SAE 1040 apresentou um aumento da amplitude do primeiro harmônico para a amostra nº 3 em relação a nº 2. Esse comportamento mostra que para a técnica o efeito causado pelo crescimento da perlita e o surgimento dos cabonetos sobrepôs o efeito do crescimento do grão, o que não ocorreu para o aço SAE 4340, onde a amostra recozida a 1000 °C apresentou um valor RMS aproximadamente equivalente ao da amostra recozida a 850 °C. Na ocasião, tamanho de grão sobrepôs o

crescimento da perlita e dos carbonetos. Esses resultados abrem oportunidades para aprofundamento no estudo da técnica para identificar melhor seu comportamento.

Para as amostras n° 4 em ambos os aços os valores obtidos foram superiores as demais amostras. Esse comportamento está ligado ao tratamento da tempera a 1000 °C, que provocou a formação da martensita, estrutura que gerou maior valor de amplitude do primeiro harmônico da onda emissora. A partir da análise da Figura 41 é possível verificar o comportamento das curvas referentes aos dois aços.

Figura 41 - Variações das medidas da média do primeiro harmônico, em função das diferentes amostras para os aços SAE 1040 e SAE 4340 nas condições: sem tratamento (1), recozida a 850 °C (2), recozida a 1000 °C (3) e temperada a 1000 °C (4).



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Comparando-se as técnicas utilizadas neste estudo com base nos resultados obtidos, verifica-se que os comportamentos dos ensaios de análise do ruído magnético e de avaliação do primeiro harmônico apresentaram semelhanças em relação ao comportamento do ensaio de dureza. Por outro lado, o ensaio de permeabilidade magnética apresentou comportamento divergente, seguindo uma tendência oposta em comparação com os dados de dureza.

No que diz respeito à sensibilidade na detecção de variações microestruturais, o ensaio de permeabilidade magnética revelou-se eficaz para diferenciar tanto as amostras de um mesmo aço quanto entre os dois tipos de aço analisados. A técnica

de análise do ruído magnético também demonstrou sensibilidade às variações microestruturais, contudo, apresentou comportamento não condizente com o esperado para a amostra n.º 4 do aço SAE 4340. Esse comportamento pode ser atribuído à necessidade de um campo magnético mais intenso para provocar a movimentação das paredes de domínio e, conseqüentemente, a geração do ruído magnético. A técnica de avaliação do primeiro harmônico mostrou-se sensível para diferenciar a amostra como recebida e a amostra que recebeu tratamento de têmpera do aço SAE 4340. Entretanto, observou-se sobreposição nos resultados referentes aos tratamentos de recozimento, tanto a 850 °C quanto a 1000 °C (amostras II e III) do aço SAE 4340, bem como entre os dois aços nas amostras recozidas a 1000 °C. Essa sobreposição indica dificuldade da técnica em diferenciar os tratamentos térmicos de recozimento para os aços estudados.

No que se refere à detecção da martensita, de modo geral, os ensaios de permeabilidade magnética e de avaliação do primeiro harmônico apresentaram boa sensibilidade à presença dessa microestrutura. Já o ensaio de análise do ruído magnético mostrou bons resultados na detecção de martensita no aço SAE 1040, porém não obteve o mesmo desempenho no aço SAE 4340. Esse resultado se deve, possivelmente, à limitação do método quando o campo magnético aplicado não é suficientemente intenso.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo em torno dos aços comerciais SAE 1040 e SAE 4340 que possuem diferentes temperabilidades, utilizando ensaios de permeabilidade magnética, análise do ruído magnético e análise do primeiro harmônico, chegando às seguintes conclusões:

O ensaio de permeabilidade magnética foi eficaz em diferenciar os dois materiais estudados, independente dos tratamentos térmicos aplicados. Sendo a presença dos elementos de liga a única diferença entre os dois materiais estudados, logo, esse ensaio conseguiu detectar a presença desses elementos. O aço SAE 4340, que possui elementos de liga, apresentou menor permeabilidade magnética.

Medidas de permeabilidade magnética mostram ser capazes de detectar variação de tamanho de grão provenientes dos tratamentos de recozimento nas temperaturas de 850 °C e 1000 °C. A redução da quantidade dos contornos de grão, a partir do crescimento destes, reduz as barreiras para o movimento das paredes dos domínios magnéticos e aumentam a permeabilidade.

Medidas de variações no ruído magnético também foram capazes de detectar mudanças de tamanho de grão nos aços estudados. Contudo, a presença de elementos de liga levou a formação de grãos menores nos aços SAE 4340 e maiores valores de RMS.

As medidas de variações nas medidas do primeiro harmônico da onda emissora não foram capazes de diferenciar medições entre os dois aços estudados, para recozimento a 1000 °C. Isto se deve ao efeito da formação de carbonetos sobrepor ao do tamanho de grão para o aço SAE 1040.

As três técnicas utilizadas foram capazes de detectar a diferença da microestrutura martensita formada nos aços estudados. Todavia, medidas com ruído magnético mostram serem sensíveis a intensidade de campo magnético aplicado.

## 6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da pesquisa realizada, a seguir, são feitas sugestões para trabalhos futuros envolvendo os assuntos objetos do presente estudo:

Devido a necessidade de um campo magnético de maior intensidade para obter melhores resultados com a amostra temperada a 1000 °C, do aço SAE 4340, se faz necessário estudar a variação do ruído magnético em função da intensidade do campo magnético aplicado;

Realizar um estudo para comparar amostras de aços de diferentes espessuras por meio dos ensaios eletromagnéticos utilizados no presente trabalho;

Realizar um estudo mais detalhado dos tipos de martensita;

Desenvolver ensaios de análise do primeiro harmônico em mais amostras tratadas com recozimento para identificar padrões de comportamento da técnica.

## 7. TRABALHOS PUBLICADOS

Durante o período de duração deste curso, foram apresentados em congressos os seguintes trabalhos acadêmicos relacionados a área de pesquisa:

ABREU, F. F.; SANTOS, A. A.; DUARTE E. J. B.; SILVA, E. M.; SILVA, J. B. O.; SOUSA, W. L. L.. Detecção da fase sigma em aço inoxidável duplex pela análise do ruído de barkhausen com magnetização por diferentes frequências. In: 25° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT 2024, Fortaleza-CE, Brazil. **Anais** [...], Fortaleza, 2024.

ABREU, F. F.; DUARTE, E. J. B.; SILVA, E.; EUROPEU, P. F. S.; DIAS, W. L.; CORREIA, S.. Detecção de variações da microestrutura do aço AISI 4340 por meio do Ruído Magnético de Barkhausen, *In*: 16° Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo - 16° CBMAG 2024, Formato virtual, Brasil, **Anais** [...], 2024.

SANTOS, A. A.; ABREU, F. F.; SILVA, E. M.; FIALHO, W. M. L.; LIMA, M. N. A.. Monitoring the 475 °C embrittlement by Barkhausen Noise measurements in a duplex stainless steel. *In*: 27th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2023, Florianópolis-SC, Brazil. **Anais** [...], Florianópolis, 2023.

SANTOS, A. A.; ABREU, F. F.; CARREIRO, L.; SILVA, E. M.; LEITE, J. P.; LIMA, A. F. P.. Análise de aços com diferentes temperabilidades pela análise do ruído magnético de Barkhausen. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2024, Natal-RN, Brazil. **Anais** [...], Natal, 2024.

SANTOS, A. A.; ABREU, F. F.; CARREIRO, L.; SILVA, E. M.; EUROPEU, P. F. S.; CORREIA, S. É. N.. Estudo da influência da temperatura no recozimento de aços através da análise do ruído magnético de barkhausen. In: 25° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT 2024, Fortaleza-CE, Brazil. **Anais** [...], Fortaleza, 2024.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAKARSH, G.; VAMSI, B. S.; KAVYA, S.; VARMA, S. V.; SUDHAKAR, I. Influence of different cooling media on morphology, mechanical and corrosion of AISI 1040 grade steel. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

ASTUDILLO, M. R. N.; NÚÑEZ, N. M.; PUMAREGA, M. I. L.; FERRARI, G.; RUZZANTE, J.; GOMEZ, M. Study of martensite induced by deformation with Magnetic Barkhausen Noise technique. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 556, p. 169454, 2022.

ANAZAWA, R. M. et al. Caracterização microestrutural e mecânica dos aços 4340 e 300M após tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. *In*: Conferência Brasileira Sobre Temas de Tratamento Térmico, 6., 2012, Atibaia-SP, Brasil. **Anais [...]**. Atibaia, 2012.

BAKHSI, 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.

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.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CASARIN, S. J. **Caracterização da temperabilidade de um aço C-Mn microligado ao boro, através de dilatometria e curvas de transformações de fases por resfriamento contínuo**. 1996. p. 181. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, G. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 844 p.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, G. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2024. 864 p.

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.

CALDAS-MORGAN, M; PADOVESE, L. R. Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method. **NDT&E Int**, v. 45, p. 148-155, 2012.

CARVALHO FILHO, J. A. **Ensaio eletromagnético baseado no ruído de Barkhausen para acompanhamento de transformações microestruturais**. 2018.

61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

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.

COLPAERT, H.; SILVA, A. L. V. C. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996. 576 p.

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.

DIWAKAR, V.; SHARMA, A.; YUSUFZAI, M. Z. K.; VASHISTA, M. Barkhausen noise signal analysis of IS 2062 steel and AISI D2 tool steel with different range of magnetizing frequency and intensity. **Journal of Nondestructive Testing**, v. 58, n. 9, p. 821–832, 2022.

DUARTE, E. J. B. **Detecção de Constituinte Prejudicial Sigma em Aço Inoxidável Duplex do tipo SAF 2205 pela Aplicação da Decomposição Empírica de Modos**. 2024. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024.

DUCHARNE, B.; GUPTA, B.; HEBRARD, Y.; COUDERT, J. B. Phenomenological Model of Barkhausen Noise Under Mechanical and Magnetic Excitations. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 54, n. 11, p. 1-6, 2018.

ECHEVERRI, E. A. A. **Análise numérica e experimental das tensões residuais geradas durante o processo de têmpera de cilindros de aço AISI 1045, 4140 e 4340**. 2012. p. 177. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

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.

FAGAN, P.; ZHANG, S.; SEBALD, G.; UCHIMOTO, T.; DUCHARNE, B. Barkhausen noise hysteresis cycle: Theoretical and experimental understanding. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 578, p. 170810, 2023.

FAGAN, P.; DUCHARNE, B.; DANIEL, L.; SKARLATOS, A. Multiscale modelling of the magnetic Barkhausen noise energy cycles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 517, p. 167395, 2021.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR. C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6. ed. Bookman, 2006.

FIALHO, W. M. L. **Ensaio não destrutivo baseado em medidas de campo magnético para acompanhamento da formação da fase sigma em um aço inoxidável duplex**. 2015. p. 128. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

FRANÇA NETO, F. A. **Estudo de uma nova técnica não destrutiva, baseada em medidas de permeabilidade magnética, para acompanhamento da fragilização de um aço inoxidável duplex**. 2011. p. 105. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

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.

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.

GRIJALBA, F. A. F. **Desenvolvimento de ensaio não destrutivo baseado no Ruído Magnético de Barkhausen para caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços**. 2010. p. 161. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. São Paulo, 2010.

GUIMARÃES, A. P. **Magnetismo e ressonância magnética em sólidos**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009. 355 p.

GUPTA, B.; DUCHARNE, B.; UCHIMOTO, T.; SEBALD, G.; MIYAZAKI, T.; TAKAGI, T. Non-destructive testing on creep degraded 12% Cr-Mo-W-V ferritic test samples using Barkhausen noise. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 498, p. 166102, 2020.

GURRUCHAGA, K.; MARTINEZ-DE-GUERENU, A.; SOTO, M.; ARIZTI, F. Magnetic Barkhausen Noise for Characterization of Recovery and Recrystallization. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 46, p. 513-516, 2010.

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.

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

İSPIRLİ, M. M.; YILMAZ, A. E. An investigation on characteristics of tracking failure in epoxy resin with harmonic and fractal dimension analysis. **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences**, v. 26, p. 245-256, 2018.

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.

KAHROBAEE, S.; HEJAZI, T. A RSM-based predictive model to characterize heat treating parameters of D2 steel using combined Barkhausen noise and hysteresis loop methods. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v.433, p. 131-140, 2017.

KLEBER, X.; VINCENT, A. On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel. **NDT & E International**, v. 37, n. 06, p. 439 – 445, 2004.

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.

LIMA, L. G. **Análise de tratamentos térmicos em um aço 4340 pelo Ruído Magnético de Barkhausen**. 2023. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

LI, P. WANG, X.; DING, D.; GAO, Z.; FANG, W.; ZHANG, C.; HE, C.; LIU, X. Surface decarburization depth detection in rods of 60si2mn steel with Magnetic Barkhausen Noise technique. **Sensors**, v. 23, p. 503, 2023.

LIN, Q.; JIANG, S.; TIAN, H.; DING, H.; WANG, W.; GUO, J.; LIU, Q. Study on non-destructive testing of rail rolling contact fatigue crack based on magnetic barkhausen noise. **Wear**, v. 528-529, p. 204965, 2023.

LINS, R. S. A. T. **Ensaio eletromagnético para análise do ruído de Barkhausen por meio de um sensor de campo magnético**. 2020. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

LEITE, J. P. **Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material**. 2014. p.155. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

LEYVA, P. A. L.; GÓMEZ, E. A.; MORA, H. P.; OROZCO, E. R. L.; GARCÍA, A. J. B. DE LA PEÑA, J. A. D. Análisis de esfuerzos residuales en el proceso de engargolado utilizando el Ruido Magnético de Barkhausen. **Acta universitaria**, México, v. 28, n. 1, p. 57-63, 2018.

MACIUSOWICZ, M.; PSUJ, G. Use of time-dependent multispectral representation of magnetic barkhausen noise signals for the needs of non-destructive evaluation of steel materials. **Sensors**, v.19, n. 6, 2019.

MACIUSOWICZ, M.; PSUJ, G. Analysis of the possibility of using various time-frequency transformation methods to barkhausen noise characterization for the need of magnetic anisotropy evaluation in steels. **Applied Sciences**, v. 11, n. 13, 2021.

MARINHO, M. N. **Influência da temperatura e do tempo de recozimento nas propriedades mecânicas e microestrutura de um aço microligado ao nióbio para aplicação na indústria automotiva.** 2018. 123 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2018.

MARTINS, L G. N.; DEMARCO, G.; PUHALES, F. S.; DEGRAZIA, G. A.; ACEVEDO, O. C. Aplicação da transformada de hilbert-huang em dados de velocidade medidos em túnel de vento. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM.** Ciência e Natura, v. 40, p. 266–271, 2018.

MATOS, T. S.; PORTELLA, K. F.; HENKE, S. L.; BRAGANÇA, M. D. G. P.; BERRÊDO, A. C. S. Avaliação da taxa de corrosão do aço carbono 1040 em solo por modulação de frequência eletroquímica (EFM). **Revista Matéria**, v. 25, p 4, 2020.

MELO, G. N. **Ruído de Barkhausen como ferramenta para identificação de modificações microestruturais em aço AISI 1020 soldado.** 2019. p. 132. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2019.

MOSES, A. J.; PATEL, H. V.; WILLIAMS, P. I. AC Barkhausen noise in electrical steels: Influence of sensing technique on interpretation of measurements. **Journal of Electrical Engineering**, v. 57, p 3-8, 2006.

MATLACK, K. H., KIM, J. Y., JACOBS, L. J., AND QU, J. Review of second harmonic generation measurement techniques for material state determination in metals. **Journal of Nondestructive Evaluation**., v. 34, n. 1, 2015.

NASCIMENTO JUNIOR, G. C. **Máquinas Elétricas: teoria e ensaios.** 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.

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.

NESLUŠAN, M.; ŠUGÁROVÁ, J.; HAUŠILD, P.; MINÁRIK, P.; ČAPEK, J.; JAMBOR, M.; ŠUGÁR, P. Barkhausen Noise Emission in AISI 321 Austenitic Steel Originating from the Strain-Induced Martensite Transformation. **Metals**, v. 11, n. 3. 2021.

OLIVEIRA, A. V. G. **Ensaio eletromagnético para detecção de fase sigma em aços inoxidáveis duplex.** 2016. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

ORTEGA-LABRA, O.; MARTÍNEZ-ORTIZ, P.; MANH, T. L.; VELAZQUEZ-LOZADA, E.; PEREZ-BENITEZ, J.A. What does a Barkhausen surface coil actually measure?. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 563, p. 169938, 2022.

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.

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.

PEREIRA, A. S.; SILVA, D. T.; BOVÉRIO, M. A.; MALUF, O.; VENTURA, A. C. M. Ensaio de temperabilidade dos aços 8640, 4140 e 4340. **SITEFA**, v. 3, n. 1, p. 79-95, 2020.

PINEDO, C. E. **Tratamentos Térmicos e Superficiais dos Aços**. 1. Ed. São Paulo: Blucher, 2021. 326 p.

QIAN, Z. Effect of Hard Particles on Magnetic Barkhausen Noise in Metal Matrix Composite Coatings: Modeling and Application in Hardness Evaluation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 58, n. 5, p. 1-12, 2022.

QIU, F. JOVIČEVIĆ-KLUG, M.; TIAN, G.; WU, G.; MCCORD, J. Correlation of magnetic field and stress-induced magnetic domain reorientation with Barkhausen Noise. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 523, 2021.

RYU, K. S.; PARK, J. S.; NAHM, S. H.; YU, K. M.; KIM, Y. B.; SON, D. Nondestructive evaluation of aged 1Cr-1Mo-0.25 V steel by harmonic analysis of induced voltage, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 231, n. 2-3, p. 294-298, 2001.

SAMPAIO, A. S. O. **Análise do primeiro harmônico para acompanhamento do constituinte sigma em um aço com diferentes espessuras**. 2023. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

SERNA GIRALDO, C. P. **Avaliação de juntas soldadas de aços carbono através do ruído magnético de Barkhausen**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SILVA, E.; SAMPAIO, A.; LIMA, L.; MEDEIROS, A.; CARVALHO, S.; LEITE, J.; LEITE, J., Harmonic analysis of electromagnetic waves for detecting embrittlement microstructures in a duplex stainless steel. In: 27th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2021, Florianópolis-SC, Brazil. **Anais [...]**, Florianópolis, 2021.

SILVA, E. M.; LINS, R. S. A. T.; LIMA, A. F. P.; LEITE, A. M. R. P.; ARAÚJO, B. R. Acompanhamento de microestrutura paramagnética fragilizante usando análise harmônica da tensão induzida. In: XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBTr 2018. Campina Grande, PB. **Anais [...]**. 2018.

SILVA, E.; CORREIA, S.; BARROS, I.; ALMEIDA, R.; CARVALHO, A.; GOMES, L. Análise do Ruído Magnético de Barkhausen por Meio da Transformada Wavelet

Discreta para Detecção de Microestrutura Fragilizante em um Aço. *In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBRT 2020*, Florianópolis, SC. **Anais [...]**. Florianópolis, 2020.

SILVA, E. M.; PAULA, A. M. R.; LEITE, J. P.; LEITE, J. P.; ANDRADE, L. S. S.; DE ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J. M. R. S. Detection of the Magnetic Easy Direction in Steels Using Induced Magnetic Fields. **Metals**, v. 6, n. 12, 2016A.

SILVA, E. M.; LEITE, J. P.; LEITE, J. P.; FIALHO, W. M. L.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J. M. R. S. Induced magnetic field used to detect the Sigma phase of a 2205 duplex stainless steel. **J Nondestruct Eval**, v. 35, n. 28, 2016B.

SILVA, E. M.; LEITE, J. P.; FRANÇA NETO, F. A.; LEITE, J. P.; FIALHO, W. M. L.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J. M. R. S. Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 3, p. 1106-1111, 2016C.

SILVA, F. E. M. **Desenvolvimento de um ensaio eletromagnético através de medidas de permeabilidades e simulações pelo método dos Elementos Finitos** 2019. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SILVA, J.; SILVA, E.; SAMPAIO, A.; LINS, R.; LEITE, J.; SILVA, V. A.; TAVARES, J. M. R. S. Detecting the Sigma Phase in Duplex Stainless Steel by Magnetic Noise and First Harmonic Analysis. **Metals**, v. 17, n.18, 2024.

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.

STUPAKOV, A.; PEREVERTOV, A; NESLUŠAN, M. Reading depth of the magnetic barkhausen noise. i. one-phasesemi-hard ribbons. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 513, p. 167086, 2020.

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.

TADIĆ, B. Multifractal analysis of Barkhausen noise reveals the dynamic nature of criticality at hysteresis loop. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, v. 2016, n. 6, p. 063305, 2016.

WILCZEK, A.; DŁUGOSZ, P.; HEBDA, M. Porosity Characterization of Aluminium Castings by Using Particular Non-destructive Techniques. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 34, 2015.

YAMAZAKI, T.; FURUYA, Y.; NAKAO, W. Experimental evaluation of domain wall dynamics by Barkhausen noise analysis in  $Fe_{30}Co_{70}$  magnetostrictive alloy wire. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 475, p. 240-248, 2019.

YOSHANDI, T. M.; HAMDANI, H. E.; ANNISA. Material analysis of lead aprons using radiography non-destructive testing. **Journal Renewable Energy & Mechanics (REM)**, v. 4, n. 2, p. 56-62, 2021.