



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS JOÃO PESSOA
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALISSON ALVES DOS SANTOS

**ENSAIO ELETROMAGNÉTICO NÃO DESTRUTIVO PARA ANÁLISE DE TRATAMENTO
TÉRMICO POR MEDIDAS DE PERMEABILIDADE**

JOÃO PESSOA

2025

ALISSON ALVES DOS SANTOS

**ENSAIO ELETROMAGNÉTICO NÃO DESTRUTIVO PARA ANÁLISE DE TRATAMENTO
TÉRMICO POR MEDIDAS DE PERMEABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito curricular obrigatório para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Edgard de Macedo Silva
Coorientador: Thyago Leite de Vasconcelos Lima

JOÃO PESSOA

2025

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

S237e Santos, Alisson Alves dos.

Ensaio eletromagnético não destrutivo para análise de
tratamento térmico por medidas de permeabilidade / Alisson
Alves dos Santos. – 2025.

18 f. : il.

TCC (Graduação – Bacharelado em Engenharia Mecânica) –
Instituto Federal de Educação da Paraíba / Departamento de
Ensino Superior / Coordenação do Superior de Bacharelado em
Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação : Prof. Dr. Edgard de Macedo Silva.

Coorientação : Prof. Dr. Thyago Leite de Vasconcelos
Lima.

1. Ensaio não destrutivo. 2. Permeabilidade magnética. 3.
Tratamento térmico. I. Título.

CDU 620.179(043)

Bibliotecária responsável: Lucrecia Camilo de Lima – CRB 15/132



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

ALISSON ALVES DOS SANTOS

202021140010

Ensaio Eletromagnético não Destrutivo para Análise de Tratamento Térmico por Medidas de Permeabilidade

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Trabalho aprovado pela banca examinadora em 15 de agosto de 2025.

BANCA EXAMINADORA:

(assinaturas eletrônicas via SUAP)

Dr. Edgard de Macedo Silva,

IFPB (Orientador)

Dr. Thyago Leite de Vasconcelos Lima

IFPB (Coorientador)

Dr. Walter Macedo Lins Fialho

IFPB (Examinador)

Dr. Francisco Antônio de França Neto

IFPB (Examinador)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Edgard de Macedo Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/08/2025 11:02:49.
- **Walter Macedo Lins Fialho**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/08/2025 15:00:07.
- **Thyago Leite de Vasconcelos Lima**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/08/2025 16:07:09.
- **Francisco Antonio de Franca Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/08/2025 07:58:40.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 749975
Verificador: 27ed877517
Código de Autenticação:



Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, JOÃO PESSOA / PB, CEP 58015-435
<http://ifpb.edu.br> - (83) 3612-1200

SUMÁRIO

Resumo.....	7
Abstract.....	7
1 Introdução.....	8
2 Referencial teórico.....	10
3 Procedimento metodológico.....	11
4 Resultados e discussões.....	13
5 Considerações finais.....	16
Agradecimentos.....	17
Financiamento.....	17
Conflito de interesses.....	17
Referências.....	17

Ensaio eletromagnético não destrutivo para análise de tratamento térmico por medidas de permeabilidade

Alisson Alves dos Santos^{[1]*}, Edgard de Macedo Silva^[2], Filipe Fragoso de Abreu^[3].

^[1] santos.alisson@academico.ifpb.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil.

^[2] edgard@ifpb.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil.

^[3] abreu.filipe@academico.ifpb.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil.

* autor correspondente

Resumo

Os aços de médio carbono são comumente utilizados após a aplicação de tratamentos térmicos, moldando suas propriedades mecânicas. Contudo, alterações na microestrutura de materiais podem provocar, também, mudanças em suas propriedades magnéticas. Testes não destrutivos são alternativas para a análise de estruturas em serviço, oferecendo menor custo e maior agilidade na entrega de resultados. Assim, testes baseados em medições de campo magnético podem ser utilizados, a fim de detectar, de forma não destrutiva, efeitos de ciclos térmicos. A permeabilidade magnética é uma propriedade intrínseca de cada meio, sendo esta a relação entre o campo magnético aplicado e a densidade de fluxo medida no material. No presente trabalho, foi realizado um ensaio de análise de permeabilidade magnética em um aço SAE 1040, a fim de detectar os efeitos de tratamentos térmicos de recozimento e têmpera. O campo magnético foi emitido por um ímã, enquanto a densidade de fluxo magnético foi medida por um sensor de efeito Hall. Os resultados mostram uma relação direta entre o crescimento do grão e a permeabilidade magnética, mantendo valores médios baixos para microestruturas mais finas. Adicionalmente, foram feitos ensaios de metalografia e de dureza Vickers. São testes já consolidados que, por correlação, validam os resultados do teste de permeabilidade magnética.

Palavras-chave: ensaio não destrutivo, permeabilidade magnética, tratamento térmico.

Non destructive electromagnetic test for heat treatment analysis by permeability measurements

Abstract

Medium carbon steels are commonly used after heat treatment, shaping their mechanical properties. However, changes in the microstructure of materials can also cause changes in their magnetic properties. Non-destructive testing is an alternative for analyzing structures in service, offering lower costs and faster delivery of results. Thus, tests based on magnetic field measurements can be used to detect the effects of thermal cycles in a non-destructive manner. Magnetic permeability is an intrinsic property of each medium, being the relationship between the applied magnetic field and the flux density measured in the material. In this work, a magnetic permeability analysis test was performed on SAE 1040 steel to detect the effects of annealing and quenching heat treatments. The magnetic field was emitted by a magnet, while the magnetic flux density was measured by a Hall effect sensor. The results show a direct relationship between grain growth and magnetic permeability, maintaining low average values for finer microstructures. In addition, metallography and Vickers hardness tests were performed. These are well-established tests that, by correlation, validate the results of the magnetic permeability test.

Keywords: heat treatment, non destructive test, magnetic permeability.

1 Introdução

Mudanças microestruturais em ligas ferromagnéticas podem levar à variação de permeabilidade magnética dos materiais. Isto torna os ensaios eletromagnéticos não destrutivos atrativos para estudo de transformações de fases por aplicação de ciclos térmicos, como em processos de soldagem, e a análise de estruturas submetidas a tratamentos térmicos (SANTOS, 2023, 2024). Ensaios de suscetibilidade e permeabilidade magnéticas na região de reversibilidade do movimentos das paredes dos domínios magnéticos, bem como baseados no ruído magnético de Barkhausen e variações da amplitude de harmônicos têm sido utilizados para esses fins (SILVA, 2016).

A curva de magnetização de um material ferromagnético é formada por três regiões distintas: reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos, irreversibilidade e rotação. A primeira se caracteriza por apresentar a permeabilidade constante, sendo a relação entre densidade de fluxo magnético e intensidade de campo magnético aplicado. Devido a esta facilidade de medição de permeabilidade na região de reversibilidade, esta vem sendo utilizada para desenvolvimento de ensaios eletromagnéticos, sendo aplicadas em análise de anisotropia magnética, acompanhamento da formação de constituintes fragilizantes em aços inoxidáveis, estudo de tratamentos térmicos, entre outras aplicações (FIALHO, 2015; LEITE, 2014; LIMA, 2021).

O aço SAE 1040 é um aço carbono comum com teor de carbono de 0,4 %, considerado médio. Este grupo compreende aços com concentrações de carbono entre aproximadamente 0,25 e 0,60 %p. São comumente utilizados após a aplicação de tratamentos térmicos, que otimizam suas propriedades mecânicas. As etapas destes tratamentos térmicos compreendem a austenitização, têmpera e revenido. São, em sua maioria, utilizados na condição de revenido, com microestrutura de martensita revenida. No entanto, esse tipo de aço possui uma temperabilidade (capacidade de endurecimento) baixa, sendo possível apenas serem tratados sob taxas de resfriamento altas e em seções finas de material. A temperabilidade pode ser melhorada através de elementos de liga, como cromo, níquel e molibdênio (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

No trabalho desenvolvido por Cavalcante et al. (2008), sensores de efeito Hall têm sido utilizados na caracterização microestrutural de aços submetidos a uma variedade de tratamentos térmicos. Amostras de aço carbono SAE 1045 submetidas a diferentes tratamentos foram expostas a um campo de 300 Gauss e valores de tensão Hall foram medidos. Os resultados mostraram que o sensor baseado em efeito Hall foi sensível a alterações microestruturais e que pode ser utilizado com eficácia para caracterização não destrutiva de materiais. Os autores também apresentaram o potencial dos valores de tensão Hall pós-processados por uma rede neural artificial de retropropagação para identificar as microestruturas do material tratado.

Leite (2014) investigou, de forma não destrutiva, um aço SAE 1045 e uma liga de alumínio ASTM 6261, com diferentes geometrias. A técnica é baseada na aplicação de campos magnéticos na região de reversibilidade magnética, comum aos dois materiais. Como resultado, o método foi sensível à textura metalográfica presente no aço, tornando-a promissora para determinação da direção de melhor magnetização de materiais com anisotropia magnética. Além disso, foi observado que a geometria era fator determinante na intensidade do campo magnético induzido, sendo necessárias correções matemáticas para análise de peças com diferentes dimensões.

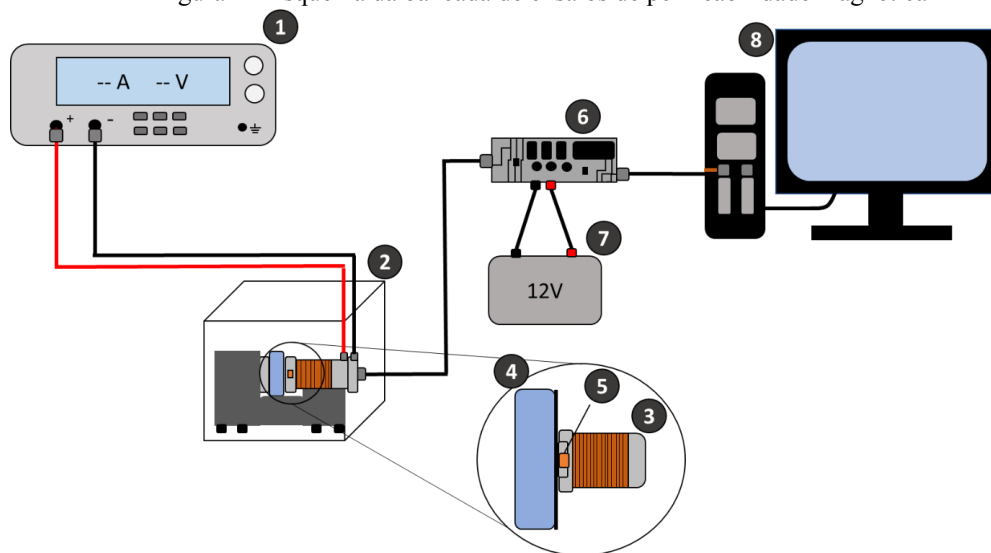
Fialho (2015) realizou um ensaio não destrutivo baseado em medidas de campo magnético, para detecção da fase sigma em um aço inoxidável duplex (AID) SAF 2205. Esta fase indesejada é não magnética, rica em cromo e possui alta dureza, reduzindo a resistência à corrosão e a tenacidade do AID. Sua precipitação ocorre sob ciclos térmicos em temperaturas acima de 600 °C. Neste estudo, foram obtidas amostras submetidas a envelhecimento térmico nas temperaturas de 800 °C e 900 °C, com tempos de permanência de 15, 60 e 120 minutos, a fim de gerar diferentes quantidades de fase sigma. Uma das amostras foi analisada como recebida do processo de fabricação. O ensaio aplicado foi sensível às frações volumétricas diminutas de sigma, e os resultados acompanharam a formação da fase. Os valores de permeabilidade magnética são maiores para o material como recebido, e diminuem conforme a precipitação de fase sigma avança.

Lima (2021) investigou o efeito de tratamentos térmicos na permeabilidade e na anisotropia magnética, em um aço SAE 4340, material de baixa liga de Cr, Ni e Mo. Uma das amostras foi analisada como recebida. Os tratamentos térmicos estudados foram de recozimento a 850 °C e a 1000 °C, e de têmpera, tendo óleo e água como meios de resfriamento. O recozimento a 850 °C gerou um aumento na permeabilidade magnética, atribuído ao aumento de fase ferrita na microestrutura. Na

amostra sob recozimento a 1000 °C, foi observada uma redução na permeabilidade. Este comportamento se deve à redução da ferrita e aumento da presença de perlita: uma fase formada por lamelas alternadas de ferrita e cementita. Esta fase dificultou o movimento das paredes dos domínios magnéticos e, portanto, reduziu a permeabilidade magnética.

Abreu (2025) realizou diversos ensaios eletromagnéticos, dentre eles o de análise de permeabilidade magnética. O objetivo do estudo foi determinar a influência de tratamentos térmicos nos aços SAE 1040 e SAE 4340. Ambos possuem o mesmo teor de carbono, e diferenciam-se pela presença de elementos de liga neste último, conferindo-lhe uma maior temperabilidade em relação ao SAE 1040. Os tratamentos térmicos aplicados foram de recozimento a 850 °C, recozimento a 1000 °C e têmpera precedida por austenitização a 1000 °C. Os testes foram conduzidos em um equipamento experimental (Figura 1) cuja geração do campo era feita por uma fonte de tensão contínua (1), conectada a uma bobina emissora (3) próxima a uma das faces da amostra (4). A densidade de fluxo foi medida por um sensor Hall (5) na mesma face. O sensor foi conectado a uma placa de aquisição de dados (6) alimentada por uma fonte de tensão contínua de 12 V e conectada a um computador (8) via conexão USB.

Figura 1 - Esquema da bancada de ensaios de permeabilidade magnética



Fonte: Abreu (2025, p. 50)

Ao contrário do constatado por Lima (2021), os resultados indicaram relação direta entre o crescimento do grão e o aumento da permeabilidade magnética nas amostras que passaram por recozimento a 850 °C e a 1000 °C, respectivamente. A amostra temperada em água formou martensita, microestrutura que dificulta a passagem do fluxo magnético e, portanto, apresenta redução nos valores das medidas de permeabilidade magnética, nesse caso, confirmando parcialmente os resultados de Lima (2021) (ABREU, 2025).

No presente trabalho, uma configuração de ensaio eletromagnético não destrutivo, com aplicação de intensidade de campo magnético na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos é aplicada para estudo da variação da temperatura de recozimento e velocidade de resfriamento em um aço SAE 1040, através de aplicação de tratamentos de recozimento e têmpera. Uma intensidade de campo magnético fixa é aplicado através de um ímã posicionado em uma das faces da amostra e um sensor de efeito Hall na superfície oposta. O objetivo desta configuração é reduzir a complexidade do equipamento experimental, fazendo com que possa ser facilmente transportado e rapidamente executado. Os ENDs são validados por análise comparativa com ensaios metalográficos por microscopia óptica e de dureza Vickers.

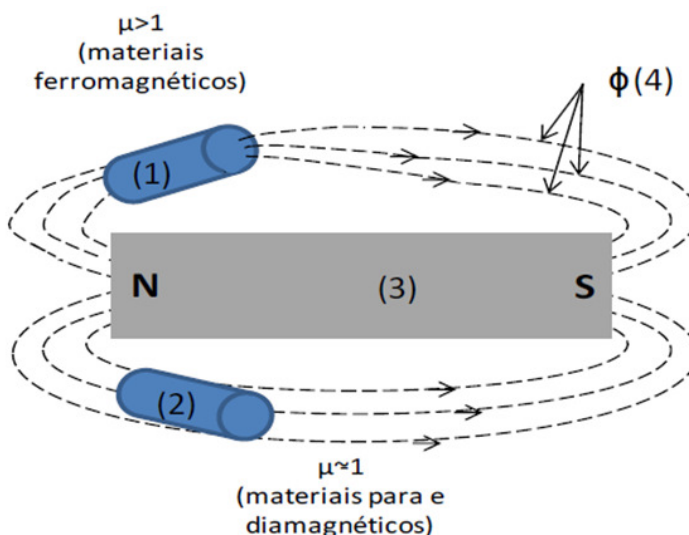
A seguir, é feita uma discussão acerca do magnetismo e suas grandezas, introduzindo o conceito de campo indutor e densidade de fluxo e suas diferenças, assim como a noção de permeabilidade magnética, seu comportamento e o motivo de ser uma grandeza útil para levantamento em testes não destrutivos.

2 Referencial teórico

A permeabilidade magnética (μ) representa a facilidade de passagem de um fluxo magnético através de um material e é maior em materiais ferromagnéticos. Os materiais apresentam uma maior ou menor resistência à indução magnética. O efeito produzido pela colocação de um material mais ou menos permeável na direção das linhas de fluxo magnético foi apresentado por Leite (2014). As amostras de materiais com diferentes comportamentos magnéticos estão representadas por (1) e (2) onde um ímã representa a fonte geradora do campo magnético (3) e as linhas de fluxo magnético produzidas estão representadas por (4), conforme demonstra a Figura 2.

Através da análise da Figura 1 pode-se verificar que ocorrem perturbações causadas na direção das linhas de fluxo magnético em função desses materiais apresentarem diferentes valores de μ (materiais ferromagnéticos $\mu_r > 1$ e materiais para e diamagnéticos $\mu_r \approx 1$). Tais efeitos são utilizados como objeto de estudo para detecção de diferentes microestruturas de aços pela observação da densidade de fluxo magnético (B) em função da intensidade de campo magnético aplicado (H) para avaliação da permeabilidade magnética.

Figura 2 - Representação da influência dos materiais com diferentes permeabilidades nas linhas de fluxo magnético.



Fonte: Leite (2014, p. 36)

Para o estudo da permeabilidade dos aços, é importante salientar que a permeabilidade magnética é uma propriedade específica de cada material. E para tal análise se faz necessário entender as relações desta com outras, como a permeabilidade relativa (μ_r) que representa a razão entre a permeabilidade do material e a permeabilidade do vácuo μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) e como se relaciona com duas outras propriedades magnéticas: campo magnético induzido (B) em função do campo magnético aplicado (H), conforme demonstra a Equação 1.

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 = B/H \quad (1)$$

na qual:

μ = permeabilidade do material (H/m);

μ_r = permeabilidade relativa do material (adimensional);

μ_0 = permeabilidade do vácuo (H/m);

B = campo magnético induzido (Gauss); e

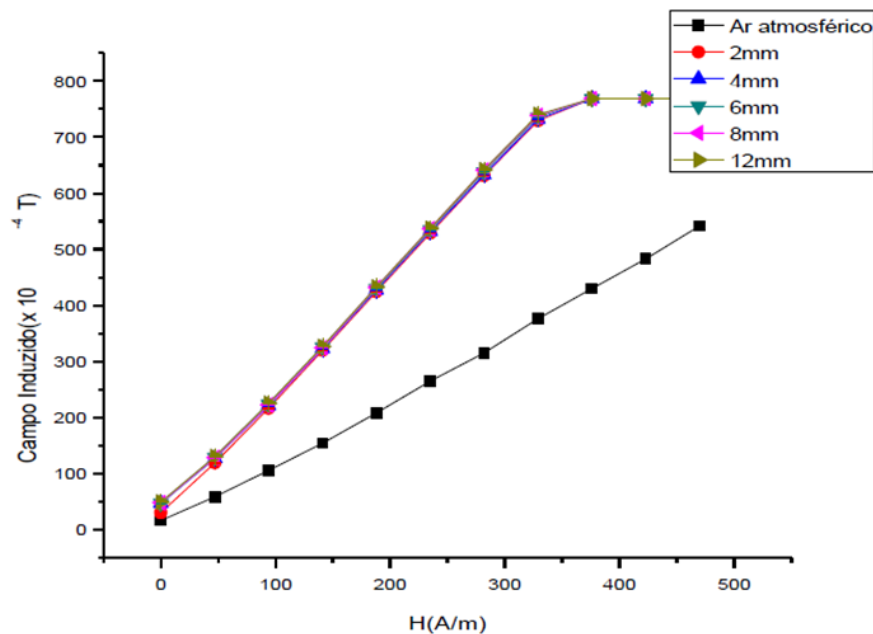
H = campo magnético aplicado (A/m).

Na equação 1, B representa o campo magnético induzido no material e tem como unidade no Sistema Internacional (SI) o Tesla (T), onde $1\text{ T} = 10^4\text{ Gauss}$. Já o H representa o campo magnético aplicado no material, capaz de gerar a indução magnética e tem como unidade no SI o A/m.

Os materiais ferrosos são fortemente influenciados pelas ações dos campos magnéticos. A curva de magnetização possui três regiões distintas de movimentação das paredes dos domínios magnéticos. A região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos; a região de irreversibilidade; e a de rotação e saturação (WLODARSKI, 2006). Na região de reversibilidade o comportamento entre a intensidade de campo magnético e a densidade de linhas de campo é linear e uma vez sendo cessado o campo externo os domínios retornam para suas posições iniciais sem deixar campo remanescente (SERNA-GIRALDO, 2007).

Andrade (2016) analisou o comportamento da permeabilidade na região de reversibilidade da parede dos domínios magnéticos do aço SAE 1045, que pode ser dividida em três regiões, só tendo um comportamento linear em sua primeira região, onde os valores de B são baixos, na faixa de centenas de Gauss, para o aço. Na faixa de trabalho escolhida pela autora, onde os resultados estão apresentados na Figura 2, a resposta de B em função de H foi linear para todas as espessuras das amostras Tipo 1 (foi variado apenas as espessuras, para um diâmetro prefixado de 24 mm), sendo o comportamento esperado na região de reversibilidade de sua curva de magnetização.

Figura 3 - Curva de magnetização para as amostras Tipo 1 – SAE 1045.



Fonte: Andrade (2016, p. 49)

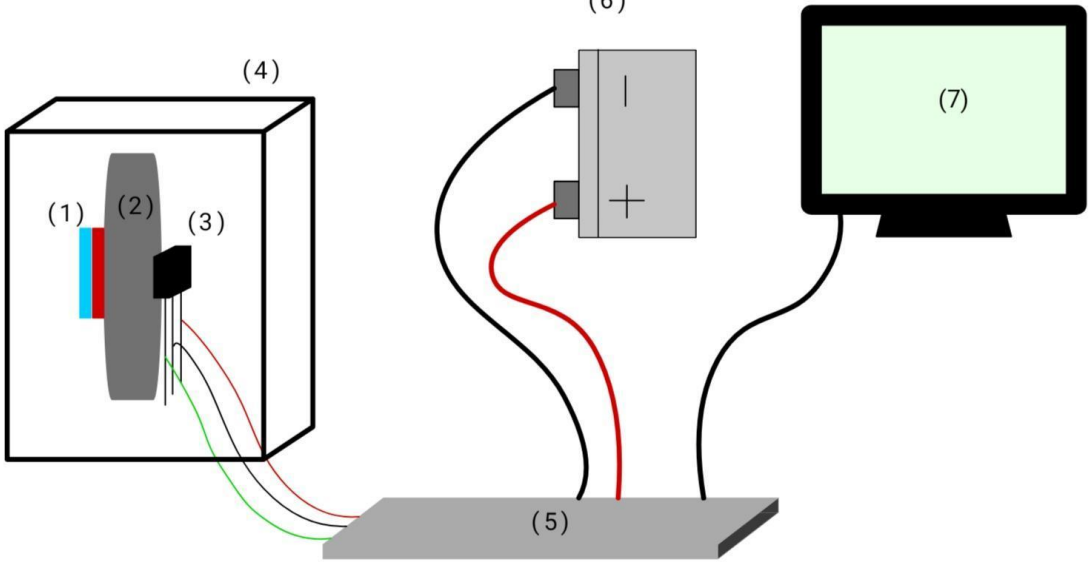
Ainda da observação da Figura 2 vê-se que para intensidade de campo magnético aplicado na bobina a partir de 325 A/m, ocorre à estabilização no valor de B em torno de 700 Gauss. Nesta faixa de trabalho o valor de B ainda varia linearmente com o aumento no valor de H , mas não consegue ser captado pelo equipamento, em virtude de uma restrição do sensor utilizado, que satura para valores maiores que esse (HONEYWELL DIVISION, 2024).

3 Procedimento metodológico

O trabalho foi realizado no laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais (GSCMat), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). O equipamento experimental desenvolvido para realização de ensaios de permeabilidade magnética é apresentado na Figura 4. Consiste em um ímã (1), a amostra estudada (2), sensor Hall (3), gaiola de Faraday (4), placa eletrônica de aquisição de dados (5), bateria (6) e computador (7).

O ímã possui 8 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. É responsável pela geração do campo indutor H . No seu polo norte, que se localiza em uma das faces, foi medida uma densidade de fluxo de 1000 Gauss com Gaussímetro. O ímã é fixado no centro de uma das faces da amostra, e o polo norte fica em contato com ela. Na outra face da amostra, o sensor Hall é posicionado. O modelo usado é o SS495A, da Allegro Microsystems. Possui sensibilidade de 3,125 mV/Gauss, e tensão de alimentação contínua de 5 V. O conjunto é protegido de interferências eletromagnéticas do ambiente pela gaiola de Faraday.

Figura 4 - Equipamento experimental para ensaios não destrutivos de permeabilidade magnética (6)



Fonte: elaborado pelos autores

A placa de aquisição de sinais possui um conversor analógico-digital, que transforma a tensão de saída do sensor, e o envia para o computador por conexão USB. A placa é alimentada pela bateria automotiva de 12 V.

Trabalhos anteriores (ABREU, 2025; FIALHO, 2015; OLIVEIRA, 2016) desenvolveram procedimentos nos quais o campo indutor era gerado por uma bobina conectada a uma fonte de tensão contínua. A substituição pelo ímã na bancada de testes é uma das ações propostas para reduzir a complexidade e volume dos componentes necessários para testes desta natureza, e cerne do presente trabalho.

O aço SAE 1040 foi escolhido para o estudo, sob a forma de vergalhão laminado com 25 mm de diâmetro. Através de usinagem em plaina limadora, foi usinado um rasgo no sentido do comprimento do material. Este rasgo é usado como referência nos ensaios eletromagnéticos, a fim de manter a mesma orientação angular em todas as amostras, minimizando os possíveis efeitos de anisotropia magnética. Quatro unidades com 5 mm de comprimento foram obtidas. Para o processo de corte, foi usada uma serra de fita e fluido de corte para evitar sobreaquecimento.

Três unidades foram submetidas a tratamentos térmicos de recozimento e de têmpera, em um forno tipo mufla Jung. Uma das amostras foi analisada na condição de como recebida do processo de fabricação. Cada condição estudada está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 – Tratamentos térmicos aplicados nas amostras estudadas

Amostra	Tratamento Térmico
1	Condição de como recebida
2	Austenitização a 850 °C, resfriada ao forno
3	Austenitização a 1000 °C, resfriada ao forno
4	Austenitização a 1000 °C, resfriada em água à temperatura ambiente

Fonte: elaborado pelos autores

O ensaio metalográfico foi conduzido após a aplicação dos tratamentos térmicos, que consistiu na preparação e análise das amostras de acordo com os seguintes passos:

1. Lixamento manual com lixas de grãos 100, 220, 320, 400 e 600;
2. Polimento em máquina com pasta de alumina de grãos 0,3 e 0,05 μm ;
3. Ataque químico com reagente de nital 2%;
4. Microscopia óptica com aumento de 200x, utilizando um microscópio Nikon, com sistema de aquisição de imagem digital acoplado.

Ensaio de dureza Vickers foram executados em todas as amostras, usando um microdurômetro Shimadzu. Os ensaios metalográficos e as medidas de dureza representam parâmetros confiáveis que, por correlação com os demais, validam os resultados do ensaio não destrutivo.

O ensaio de permeabilidade magnética aplicado consiste na execução das seguintes etapas:

1. Através do *software* no computador, configurar placa de aquisição de dados;
2. Posicionamento da amostra estudada conforme indicado na Figura 1, e com rasgo de referência sempre virado para cima;
3. No *software*, realizar a rotina de medição 10 vezes;
4. Retirar amostra do equipamento e repetir os passos 2 e 3, para todas as amostras;
5. Retirar a última amostra e realizar mais 10 rotinas de medição, usando uma peça de mesma espessura, mas feita de alumínio.

Através do *software*, a placa de aquisição de sinais é configurada para operar a uma taxa de amostragem de 1 kHz, e cada rotina de medição tem 1 s de duração. Cada rotina de medição gera um grupo de dados que podem ser listados. Ao realizar a listagem, o *software* também calcula a média aritmética do grupo.

A última etapa é realizada sob ausência de qualquer material ferromagnético. Materiais paramagnéticos como o alumínio possuem permeabilidades magnéticas muito próximas a 1. Assim, a densidade de fluxo medida no material paramagnético foi considerada numericamente igual ao campo indutor H .

Em seguida, calcula-se a permeabilidade magnética de acordo com a Equação 1. Usando todas as rotinas de medição das densidades de fluxo e do campo indutor, pode-se obter, igualmente, 10 valores de permeabilidade magnética, para cada condição estudada.

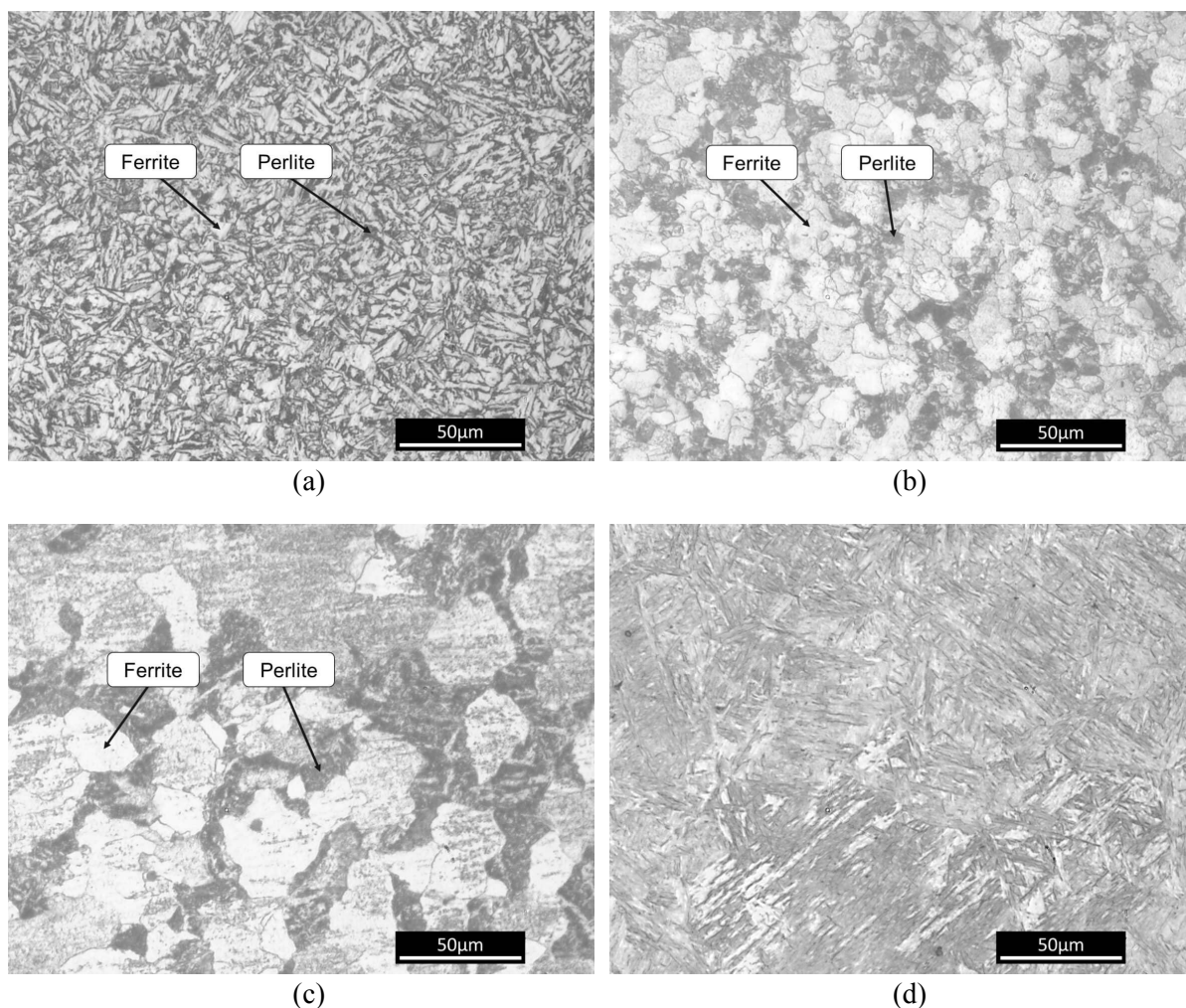
Um tratamento estatístico é feito nesta população de 10 valores de permeabilidade. A média aritmética é calculada. Em seguida, foram determinados o desvio padrão e erro padrão. A tabela t student foi utilizada para, finalmente, calcular a margem de erro, considerando um nível de confiança de 95%.

Os resultados dos ensaios de metalografia, dureza e permeabilidade magnética foram correlacionados. Ao submeter o END à comparação com parâmetros já consolidados, os seus resultados são validados.

4 Resultados e discussões

Os resultados do ensaio metalográfico são ilustrados na Figura 5. A Figura 5a mostra 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). Todavia, quando tratada em temperatura de 850 °C (recozimento) nota-se na Figura 5b um crescimento de grão, que é acentuado no recozimento à temperatura de 1000 °C (Figura 5c). Já para a amostra submetida ao tratamento de têmpera a 1000 °C, a microestrutura é composta pela martensita (Figura 5d) exibe formação significativa de agulhas de martensita, devido à alta severidade do tratamento térmico de têmpera em água.

Figura 5 - Micrografias do aço SAE 1040 nas condições de como recebida da amostra 1 (a), recozimento a 850 °C da amostra 2 (b) e 1000 °C da amostra 3 (c); e temperado em água da amostra 4(d)



Fonte: dados da pesquisa

O tratamento térmico de recozimento na temperatura de 850 °C foi realizado na região intercrítica do aço SAE 1040. Nesta temperatura, tem-se a presença dos constituintes ferrita e austenita, e o recozimento favorece o crescimento de grãos aumentando a quantidade de ferrita em relação à perlita, durante o resfriamento. Todavia, o tratamento na temperatura de 1000 °C entra na região em que o aço SAE 1040 está totalmente austenítico e com o recozimento ocorre a formação de ferrita e perlita mais grosseira, mas em quantidade maior do que o tratamento de recozimento a 850 °C. Com a utilização do método de interceptação linear de Heyn (ABREU, 2025) verificou que a microestrutura recozida a 850 °C apresentava 25% de perlita e 75% de ferrita, já a microestrutura recozida a 1000 °C apresentava um valor de 30% de perlita e 70% de ferrita na sua composição, todas as medidas foram realizadas com um intervalo de confiança de 95%. A presença dessas fases também foram observadas por El Rayes *et al.* (2014) e Barros *et al.* (2015) que estudaram o mesmo tipo de aço.

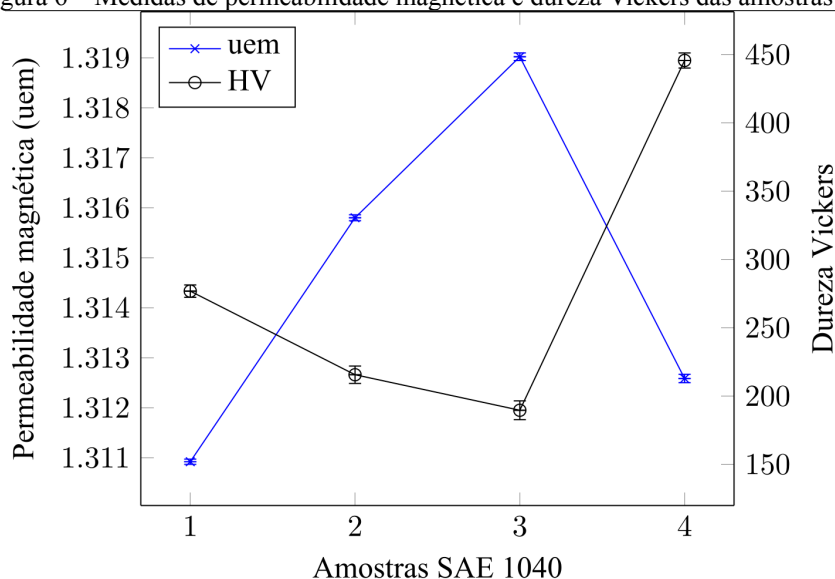
A Figura 6 ilustra as medidas de permeabilidade magnética, assim como as medidas de dureza Vickers; em função de cada tratamento térmico estudado. No gráfico, a amostra 1, analisada como recebida, obteve dureza de 276,8 HV. As duas amostras seguintes apresentaram 215,6 HV e 189,6, respectivamente. Esta redução sucessiva é um resultado esperado, principalmente ao correlacioná-los com a micrografia das Figuras 5a, 5b e 5c, respectivamente. O tratamento térmico de recozimento provocou o crescimento dos grãos, gerando uma diminuição na quantidade de contornos e, consequentemente, facilitando o deslizamento de planos atômicos e aumentando a ductilidade do material. Contudo, o efeito do crescimento de grãos parece superar a variação da quantidade de perlita 5 % maior no recozimento na temperatura de 1000 °C. A amostra 4, temperada em água, obteve dureza

de 445,6 HV, sendo este, também, um resultado característico de sua microestrutura de agulhas de martensita, apresentada na Figura 5d.

No geral, as medidas de permeabilidade magnética seguiram a tendência inversa à da dureza. A amostra 1 obteve média de 1,310 uem. As amostras 2 e 3 apresentam aumentos sucessivos, de 1,315 e 1,319 uem, respectivamente. A amostra 4 obteve 1,312 uem de permeabilidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Lima (2021), em aços com o mesmo teor de carbono. Correlacionando com as micrografias apresentadas na Figura 5, as microestruturas mais finas possuem mais contornos de grãos, que atuam como barreiras que dificultam o movimento das paredes dos domínios magnéticos, ou, em outras palavras, dificultam a passagem das linhas de campo magnético. Portanto, a densidade de fluxo medida pelo sensor Hall é maior conforme o grão cresce, aumentando os valores médios de permeabilidade magnética (ABREU, 2025).

A amostra 4 (austenitizada a 1000 °C e resfriada em água) mostrou uma redução em relação a amostra 3 (austenitizada a 1000 °C e resfriada ao forno). Isto indica que o ensaio foi capaz de detectar o efeito da velocidade de resfriamento após o tratamento de recozimento e a formação do constituinte martensita. Quando submetido ao processo de têmpera, o aço é resfriado rapidamente da faixa de austenitização até a temperatura ambiente, na qual cada grão de austenita se transforma repentinamente em ripas de martensita por cisalhamento, como confirmado por Gür e Çam (2007). Em comparação com a perlita, a martensita possui maior distorção da estrutura cristalina e presença de contornos de grão. Contudo, os valores de permeabilidade do tratamento de têmpera a partir de 1000 °C resultaram em permeabilidade acima da condição inicial. Isto está relacionado com o maior tamanho de grão da austenita (GÜR E ÇAM, 2007).

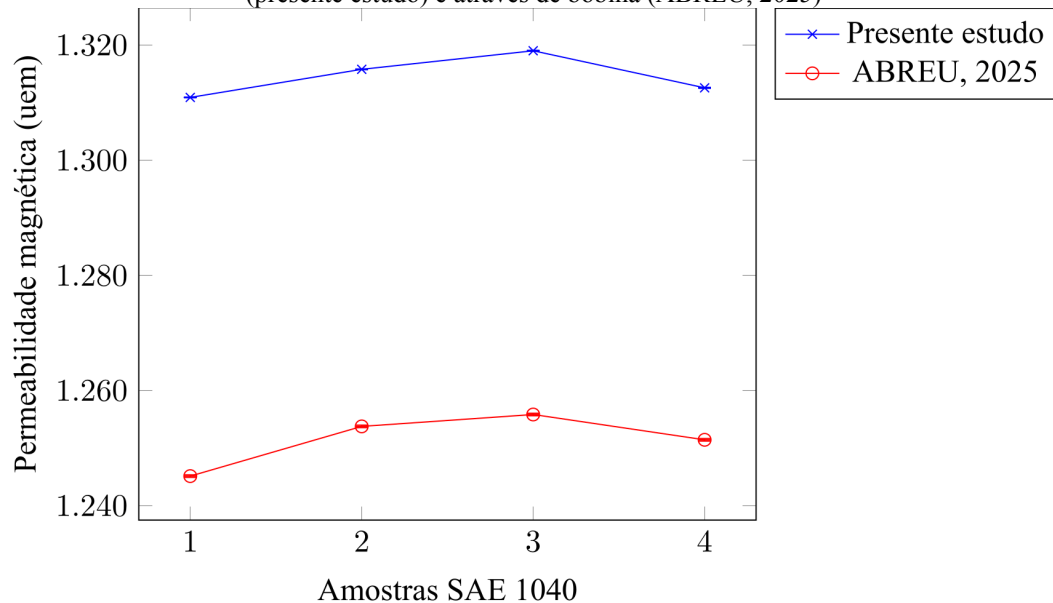
Figura 6 – Medidas de permeabilidade magnética e dureza Vickers das amostras estudadas



Fonte: dados da pesquisa

Na Figura 7, os mesmos valores de permeabilidade magnética da Figura 6 estão ilustrados. No mesmo eixo, estão também os resultados encontrados por Abreu (2025), que investigou o aço SAE 1040 em condições geométricas e termodinâmicas idênticas às do presente trabalho. Contudo, os ensaios realizados por Abreu (2025) tiveram como fonte de intensidade de campo magnético aplicado uma bobina. É possível observar que o comportamento da permeabilidade magnética ao longo dos tratamentos térmicos aplicados é o mesmo em ambos os testes. Os dois resultados constroem a mesma tendência de aumento de permeabilidade conforme o grão aumenta, e queda conforme o aumento de contornos de grãos.

Figura 7 - Medidas de permeabilidade magnética por emissão de campo magnético através de ímã (presente estudo) e através de bobina (ABREU, 2025)



Fonte: dados da pesquisa

Ainda observando-se a Figura 7, os valores médios do ensaio baseado na geração do campo magnético por ímã estão acima dos valores medidos por Abreu (2025), por um acréscimo médio de 4,8%. Esta diferença não deveria ocorrer na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos, pois a permeabilidade é constante. Porém, nota-se que as diferenças obtidas para todos os tratamentos são constantes. Isto pode ser associado às diferenças entre os métodos do teste. A emissão do campo magnético do teste proposto por Abreu (2025) é feita a partir de uma bobina energizada por fonte de tensão contínua. Ademais, sua medição da densidade de fluxo pelo sensor Hall é feita na mesma face na qual a bobina está posicionada, ou seja, o sensor mede a intensidade que sai da bobina, que possui um núcleo, e aplica no material. Todavia, na configuração do presente trabalho, ao chegar no sensor, o fluxo magnético tem sua intensidade afetada pela permeabilidade da bobina. A diferença entre os resultados está associada à presença do núcleo da bobina.

O presente trabalho mostrou que a configuração apresentada serve para simplificar a configuração de ensaio sem a necessidade do uso de fonte de tensão para energizar a bobina, sendo capaz de detectar as variações de tratamentos estudados.

5 Considerações finais

O presente trabalho analisou a influência da temperatura de recozimento e velocidade de resfriamento após o recozimento, em um aço SAE 1040 chegando às seguintes conclusões:

A análise comparativa com ensaios já consolidados de metalografia e dureza Vickers mostrou que os ensaios não destrutivos de permeabilidade magnética foram capazes de detectar variação das propriedades magnéticas em função do tratamento térmico aplicado. As medidas de permeabilidade magnética mostram-se 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 aumenta a permeabilidade. Além disso, o efeito do crescimento de grão mostrou superar a variação na quantidade de perlita nestes tratamentos. As medidas também mostram ser capaz de detectar a influência da velocidade de resfriamento após o recozimento. Estas foram capazes de detectar o constituinte martensita após a têmpera aplicada a partir da temperatura de 1000 °C.

Apesar de haver precauções contra efeitos de anisotropia magnética no procedimento metodológico, ainda existem limitações na posição relativa entre o ímã, a peça estudada e o sensor, fazendo com que haja diferenças nos valores médios a depender da posição nas quais se emite e capta o sinal. Apesar dessas limitações, o ensaio pôde ser correlacionado e validado.

Como sugestões de estudos futuros, o mesmo ensaio pode ser realizado para outros materiais

ferromagnéticos, a fim de determinar a influência de elementos de liga, ou de detectar fases fragilizantes. Adicionalmente, o equipamento para ensaios eletromagnéticos pode ser simplificado ainda mais. Outra solução para aquisição de dados pode ser testada, que dependa de tecnologias portáteis com alta eficiência energética. Para investigar a divergência de valores entre os ensaios apresentados por Abreu (2025), outro estudo poderia investigar a influência do material do núcleo da bobina nas medições dos dois métodos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFPB, por providenciar o espaço físico e equipamentos usados, e ao CNPq, por financiar parcialmente esta pesquisa.

Financiamento

Pesquisa parcialmente financiada pelo CNPq, número de processo 164120/2023-8.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABREU, F. F. **Estudo da influência de tratamentos térmicos em aços de diferentes capacidades de endurecimento através de ensaios eletromagnéticos**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/4560>. Acesso em: 06 ago. 2025.

ANDRADE, A. L. S. S. **Ensaio eletromagnético não destrutivo para detecção de anisotropia**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/334>. Acesso em: 06 ago 2025.

BARROS, R. A.; ABDALLA, A. J.; RODRIGUES, H. L.; PEREIRA, M. S. Characterization of a SAE/AISI 4340 steel with different microstructures. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 34, n. 2, p. 71-74, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17563/rbav.v34i2.957>.

CALLISTER, W. D. e RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

CAVALCANTE, A. F., ALBUQUERQUE, V. H. C., SILVA, E. M., SANTOS, N. C., SILVA, A. A. A study of the application of a Hall sensor and an artificial neural network for recognition of different types of thermal treatment by which an SAE 1045 steel was subjected. *In*: XXIX CILAMCE, n. 29, 2008, Maceió, Alagoas, Brazil, 2008.

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**, v. 216, p. 188–198, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.005>.

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. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/8960>. Acesso em: 06 ago. 2025.

GÜR, C. H.; ÇAM, 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, pp. 447-454, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.06.008>.

HONEYWELL DIVISION. Linear Hall-Effect Sensor ICs, datasheet, 2024. Disponível em:

<https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/siot/en-us/products/sensors/magnetic-sensors/linear-and-angle-sensor-ics/ss490-series-linear-sensor-ics/documents/sps-siot-sensors-linear-hall-effect-ics-ss490-series-datasheet-005843-2-en-ciid-50358.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2025.

LEITE, J. P. **Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material**. 2014. 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/7574>. Acesso em: 06 ago. 2025.

LIMA, A. F. P. **Deteção de tratamentos térmicos e anisotropia magnética em um aço SAE 4340 através de medidas de permeabilidade magnética**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/1317>. Acesso em: 06 ago. 2025.

OLIVEIRA, A. V. G. **Ensaio eletromagnético para detecção de fase sigma em aços inoxidáveis duplex**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/339>. Acesso em: 06 ago. 2025.

SANTOS, A. A. Análise de aços com diferentes temperabilidades pela análise do ruído magnético de Barkhausen. *In: CONEM 2024*, n. 12, 2024, Natal, **Anais do Conem 2024**. Natal: ABCM, 2024. DOI: <https://dx.doi.org/10.26678/ABCM.CONEM2024.CON24-0983>.

SANTOS, A. A. Monitoring the 475 °C embrittlement by Barkhausen noise measurements in a duplex stainless steel. *In: COBEM 2023*, n. 27, 2023, Florianópolis **Cobem 2023 Proceedings**. ABCM, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2023.COB2023-0876>.

SILVA, E. M., LEITE, J. P.; FRANÇA NETO, F. A. DE, LEITE, J. P., FIALHO, W. M. L., DE ALBUQUERQUE, V. H. C., AND TAVARES, J. M. R. S. **Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel**. *J. Test. Eval.*, v. 44, n. 3, p. 20130313, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20130313>.

SERNA-GIRALDO, C.P. **Avaliação de juntas soldadas de aços carbono através do ruído magnético de Barkhausen**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-27072007-154839/pt-br.php>. Acesso em: 06 ago. 2025.

WLODARSKI, Z. **Analytical description of magnetization curves**. *Physica B* 373 (2006) 323–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.12.242>.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Restrito

Trabalho de conclusão de curso

Assunto:	Trabalho de conclusão de curso
Assinado por:	Alisson Alves
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Direito Autoral (Art. 24, III, da Lei no 9.610/1998)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Alisson Alves dos Santos, ALUNO (202021140010) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA - CAMPUS JOÃO PESSOA, em 18/08/2025 15:17:18.

Este documento foi armazenado no SUAP em 18/08/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1577642
Código de Autenticação: a72943d4db

