



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

JOSÉ LUCAS SIQUEIRA FREITAS

**AVALIAÇÃO DO TEOR DE MARTENSITA NOS AÇOS CARBONO A36 E AISI
1045 UTILIZANDO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO MAGNÉTICO**

FORTALEZA
2026

JOSÉ LUCAS SIQUEIRA FREITAS

AVALIAÇÃO DO TEOR DE MARTENSITA NOS AÇOS CARBONO A36 E AISI 1045
UTILIZANDO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO MAGNÉTICO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Seixas Campos

FORTALEZA

2026

JOSÉ LUCAS SIQUEIRA FREITAS

AVALIAÇÃO DO TEOR DE MARTENSITA EM AÇOS CARBONO A36 E AISI 1045
ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS MAGNÉTICOS.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Emanuel Seixas Campos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Caio Victor Pereira Pascoal
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. João Victor Barroso Xavier
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por suas bênçãos, pela força e perseverança concedidas ao longo de toda a trajetória acadêmica.

Ao meu pai, pelo apoio incondicional, ensinamentos e incentivo constantes, fundamentais para minha formação.

À minha mãe, pelo amor, pelos valores transmitidos e pelo exemplo de força e resiliência.

Ao Prof. Dr. Emanuel Seixas Campos, pela excelente orientação, dedicação, conselhos e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Jorge Luiz Cardoso, pela disponibilidade e auxílio durante a realização dos tratamentos térmicos no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM).

Aos professores do curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, pelo conhecimento transmitido ao longo da graduação.

Ao Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), pela infraestrutura e suporte técnico disponibilizados.

Aos colegas do Centro de Ensaio Não Destrutivos (CENDE), em especial João Pedro Gonçalves e Cauã Saraiva, pelo apoio durante a realização dos ensaios

Ao meu amigo João da Silva Cavalcante, por todo o apoio, amizade e ajuda desde o ingresso na universidade.

À minha esposa, Luana Beatriz, pelo companheirismo, apoio e incentivo constantes.

Ao meu filho, que mesmo tão pequeno, foi fonte constante de motivação, alegria e força ao longo desta caminhada.

“A matemática, vista corretamente, possui não apenas verdade, mas também suprema beleza [...]”

(BERTRAND RUSSELL)

RESUMO

Os aços ao carbono são amplamente utilizados em aplicações estruturais e mecânicas devido ao seu bom equilíbrio entre custo e propriedades mecânicas. Essas propriedades estão diretamente relacionadas à microestrutura do material, a qual pode ser significativamente modificada por meio de tratamentos térmicos. Nesse contexto, métodos capazes de avaliar alterações microestruturais de forma não destrutiva tornam-se cada vez mais relevantes. Os ensaios magnéticos têm sido amplamente investigados como técnicas não destrutivas para a caracterização microestrutural de aços ao carbono, uma vez que as propriedades magnéticas desses materiais são fortemente influenciadas pelas transformações de fase induzidas por tratamentos térmicos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes tratamentos térmicos na microestrutura dos aços ASTM A36 e AISI 1045, com ênfase na formação de martensita, por meio da análise de parâmetros magnéticos extraídos de curvas de histerese, correlacionando-os com resultados de ensaios de dureza. As amostras foram analisadas nas condições de como recebido, têmpera em óleo, têmpera em solução salina e têmpera seguida de revenimento. Os ensaios magnéticos foram realizados utilizando uma sonda magnética baseada em um sistema de bobinas, permitindo a obtenção dos laços de histerese B–H em uma única orientação em relação ao campo magnético aplicado. Os sinais elétricos adquiridos foram processados em ambiente GNU Octave, possibilitando a extração de parâmetros como campo coercivo, indução remanente e magnetização de saturação. Ensaios de dureza Rockwell foram conduzidos para fornecer suporte mecânico à análise dos resultados magnéticos. Os resultados evidenciaram uma correlação positiva entre o campo coercivo e a dureza para ambos os aços analisados, sendo essa relação mais pronunciada no aço AISI 1045, em função de sua maior temperabilidade e maior fração de martensita formada após os tratamentos térmicos. No aço ASTM A36, devido ao baixo teor de carbono, as variações observadas foram mais limitadas, tornando-se mais evidentes apenas na condição de têmpera em solução salina. Dessa forma, os resultados demonstram que os ensaios magnéticos constituem uma ferramenta eficaz e não destrutiva para a avaliação indireta de alterações microestruturais e propriedades mecânicas em aços carbono.

Palavras-chave: ensaios magnéticos; curva de histerese; campo coercivo; dureza Rockwell; aços carbono.

ABSTRACT

Carbon steels are widely used in structural and mechanical applications due to their favorable balance between cost and mechanical properties. These properties are directly related to the material microstructure, which can be significantly modified through heat treatments. In this context, methods capable of evaluating microstructural changes in a non-destructive manner have become increasingly relevant. Magnetic testing techniques have been widely investigated as non-destructive methods for the microstructural characterization of carbon steels, since the magnetic properties of these materials are strongly influenced by phase transformations induced by heat treatments. In this context, the present study aimed to evaluate the influence of different heat treatments on the microstructure of ASTM A36 and AISI 1045 steels, with emphasis on martensite formation, through the analysis of magnetic parameters extracted from hysteresis curves and correlated with hardness test results. The samples were analyzed in the as-received condition, oil quenching, saline solution quenching, and quenching followed by tempering. Magnetic tests were performed using a magnetic probe based on a coil system, allowing the acquisition of B–H hysteresis loops in a single orientation relative to the applied magnetic field. The acquired electrical signals were processed using the GNU Octave environment, enabling the extraction of parameters such as coercive field, remanent induction, and saturation magnetization. Rockwell hardness tests were conducted to provide mechanical support for the analysis of the magnetic results. The results showed a positive correlation between coercive field and hardness for both steels analyzed, with a more pronounced relationship observed for AISI 1045 steel due to its higher hardenability and greater fraction of martensite formed after heat treatments. For ASTM A36 steel, due to its low carbon content, the observed variations were more limited, becoming more evident only in the saline solution quenching condition. Therefore, the results demonstrate that magnetic testing constitutes an effective and non-destructive tool for the indirect evaluation of microstructural changes and mechanical properties in carbon steels.

Keywords: magnetic testing; hysteresis curve; coercive field; Rockwell hardness; carbon steels

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da organização e do comportamento dos domínios magnéticos em um material ferromagnético antes, durante e após a aplicação de um campo magnético externo.....	17
Figura 2 – Curva de histerese magnética típica de um material ferromagnético, mostrando a relação entre a densidade de fluxo magnético (B) e o campo magnético aplicado (H), bem como os principais parâmetros magnéticos.....	18
Figura 3 - Microestrutura ferrítica-perlítica típica do aço ASTM A36, evidenciando regiões de ferrita (α) e perlita (P).....	21
Figura 4 - Microestrutura martensítica típica do aço AISI 1045 após tratamento de têmpera, caracterizada por morfologia acicular e elevada densidade de defeitos cristalinos.	22
Figura 5 – Amostras dos aços ASTM A36 e AISI 1045 utilizadas nos ensaios magnéticos ...	27
Figura 6 – Configuração da bancada experimental utilizada nos ensaios de caracterização magnética e mecânica, mostrando os principais componentes do sistema: (A) gerador de corrente alternada (Keithley 3390), (B) Amplificador operacional bipolar (Kepco BOP 20-20 D), (C) sonda magnética e (D) osciloscópio digital (Agilent Infinium series).	28
Figura 7 – Fotografia da sonda magnética utilizada nos ensaios	33
Figura 8– Representação esquemática da sonda magnética utilizada nos ensaios, ilustrando a bobina indutora responsável pela aplicação do campo magnético $H(t)$, a bobina sensora para detecção da resposta magnética $B(t)$ e a posição da amostra no interior do circuito magnético.	33
Figura 9 – Sinais elétricos adquiridos durante os ensaios magnéticos: tensão aplicada à bobina indutora, registrada no Canal 2 do osciloscópio (CH2, curva em azul), e tensão induzida na bobina sensora, registrada no Canal 3 (CH3, curva em rosa), obtidos simultaneamente durante a excitação magnética da amostra.	36
Figura 10 – Curvas de histerese magnética médias do aço ASTM A36 para as diferentes condições de tratamento térmico	40
Figura 11 – Curvas de histerese magnética médias do aço AISI 1045 para as diferentes condições de tratamento térmico.	43
Figura 12– Curvas médias da tensão aplicada (CH2) em função da tensão induzida (CH3) para o aço ASTM A36, considerando os tratamentos térmicos CR, O, SAL e R.	46
Figura 13 – Curvas médias da tensão aplicada (CH2) em função da tensão induzida (CH3) para o aço AISI 1045, considerando os tratamentos térmicos CR, O, SAL e R.	47

Figura 14 – Correlação entre o campo coercivo (H_c) e a dureza Rockwell B para o aço ASTM A36 submetido aos tratamentos térmicos de como recebido (CR), têmpera em óleo (O), têmpera em solução salina (SAL) e revenido (R).	50
Figura 15 – Correlação entre o campo coercivo (H_c) e a dureza Rockwell C para o aço AISI 1045 submetido aos tratamentos térmicos de como recebido (CR), têmpera em óleo (O), têmpera em solução salina (SAL) e revenido (R).	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros magnéticos médios do aço ASTM A36 obtidos a partir das curvas de histerese para diferentes tratamentos térmicos	41
Tabela 2- Parâmetros magnéticos do aço AISI 1045 obtidos a partir das curvas de histerese	44
Tabela 3 - Valores de dureza Rockwell B (HRB) do aço ASTM A36 para diferentes tratamentos térmicos.	48
Tabela 4 - Valores de dureza Rockwell C (HRC) do aço AISI 1045 para diferentes tratamentos térmicos	49

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Densidade de Fluxo
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
i	Corrente elétrica
d	Distância
H	Campo Magnético
N_1	Número de espiras da bobina de excitação
N_2	Número de espiras da bobina leitora
L_m	Comprimento médio de uma Bobina
ϕ	Fluxo Magnética
A	Área da seção transversal
M	Campo Magnetizante
V	Tensão induzida
t	Tempo
f_s	Taxa de amostragem
Z_1	Impedância da bobina indutora
V(t)	Sinal medido no Canal 2

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Materiais ferromagnéticos	16
3.2	Curva de Histerese Magnética	18
3.3	Influência do teor de carbono e da microestrutura dos aços A36 e 1045	20
3.4	Influência dos tratamentos térmicos nas propriedades magnéticas dos aços	23
3.5	Ensaio magnéticos e sua aplicação na caracterização de aços ao carbono	24
4	METODOLOGIA	26
4.1	Materiais	26
4.2	Bancada experimental e instrumentação	27
4.3	Tratamentos Térmicos das Amostras	30
4.3.1	<i>Condição Como Recebido (CR)</i>	30
4.3.2	<i>Têmpera em Óleo (O)</i>	30
4.3.3	<i>Têmpera em Sal (S)</i>	31
4.3.4	<i>Revenido (R)</i>	31
4.4	Fundamentação matemática das curvas de histerese	32
4.5	Aquisição dos Sinais	35
4.6	Processamento dos Dados no GNU Octave	36
4.7	Ensaio de Dureza	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	Resultados magnéticos do aço ASTM A36	40
5.2	Resultados da caracterização magnética do aço AISI 1045	42
5.3	Tensões aplicadas e tensões induzidas médias	45
5.4	Correlação entre dureza e parâmetros magnéticos	48
5.4.1	<i>Resultados de dureza dos aços ASTM A36 e AISI 1045</i>	48
5.4.2	<i>Correlação entre o campo coercivo e a dureza</i>	49
6	CONCLUSÃO	53

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos magnéticos têm sido amplamente investigados como técnicas para a avaliação microestrutural de aços ao carbono, uma vez que as propriedades magnéticas desses materiais são fortemente influenciadas pela composição química, pelo histórico de processamento e pelas transformações de fase induzidas por tratamentos térmicos (JILES, 2016; CULLITY; GRAHAM, 2011). Em aços de baixo e médio teor de carbono, como os aços ASTM A36 e AISI 1045, modificações microestruturais decorrentes de tratamentos térmicos promovem alterações significativas nas propriedades magnéticas, sobretudo em função da formação de fases endurecidas, como a martensita.

Os ensaios não destrutivos magnéticos têm sido amplamente investigados como técnicas para a avaliação microestrutural de aços ao carbono, uma vez que as propriedades magnéticas desses materiais são fortemente influenciadas pela composição química, pelo histórico de processamento e pelas transformações de fase induzidas por tratamentos térmicos (JILES, 2016; CULLITY; GRAHAM, 2011). Em aços de baixo e médio teor de carbono, como os aços ASTM A36 e AISI 1045, modificações microestruturais decorrentes de tratamentos térmicos promovem alterações significativas nas propriedades magnéticas, sobretudo em função da formação de fases endurecidas, como a martensita.

Dessa forma, as medidas magnéticas tornam-se ferramentas relevantes para a correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas, permitindo a caracterização indireta desses materiais sem a necessidade de métodos destrutivos. Essa abordagem tem despertado interesse tanto acadêmico quanto industrial, especialmente no desenvolvimento de técnicas de monitoramento e controle de qualidade baseadas em ensaios não destrutivos (THOMPSON; JILES, 1997).

O aço A36, que é amplamente utilizado em estruturas metálicas, possui propriedades magnéticas similares às do aço 1020, devido ao baixo teor de carbono, o que lhe confere boa ductilidade e facilidade de magnetização (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; JILES, 2016). Já o aço 1045, de médio teor de carbono, apresenta maior dureza e resistência mecânica, além de maior temperabilidade. Essas diferenças estruturais e composicionais impactam diretamente a resposta magnética dos materiais, influenciando parâmetros como a coercividade (H_c), a remanência (B_r) e a magnetização de saturação (M_s).

A curva de histerese magnética constitui uma ferramenta fundamental para a caracterização de materiais ferromagnéticos, pois descreve a relação entre a densidade de fluxo magnético e a intensidade do campo magnético aplicado (CULLITY; GRAHAM, 2011; JILES,

2016). A partir dessa curva, podem ser determinados parâmetros como a coercividade, e remanência magnética, a magnetização de saturação, a permeabilidade magnética, o campo de saturação e a área do ciclo de histerese, esta última diretamente associada às perdas magnéticas por ciclo de magnetização. Esses parâmetros são fortemente influenciados pela microestrutura do material, uma vez que a presença de diferentes fases e microconstituintes, como ferrita, martensita e perlita, interfere no movimento das paredes de domínio magnético e na resposta do material à aplicação de um campo externo (BOZORTH, 1993; HUBERT; SCHÄFER, 1998).

Neste trabalho, foram realizados ensaios experimentais para a obtenção de parâmetros magnéticos de amostras dos aços A36 e AISI 1045, por meio da análise das curvas de histerese magnética desses materiais. Para cada aço, foram avaliados dois grupos de amostras, correspondentes à condição como recebido e a diferentes condições de tratamento térmico de têmpera. As medições magnéticas foram realizadas em relação à direção original de laminação das amostras. A partir do processamento dos sinais magnéticos adquiridos, foram determinados os principais parâmetros magnéticos de interesse, incluindo a coercividade (H_c), a densidade de fluxo magnético remanente (B_r), a densidade de fluxo magnético máxima (B_{max}) e a magnetização de saturação (M_s). Adicionalmente, foram realizados ensaios de dureza Rockwell (HRB e HRC) nas amostras, cujos resultados foram correlacionados com os parâmetros magnéticos obtidos, visando avaliar a relação entre as modificações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos, e em especial o teor de martensita, e as respostas fornecidas pelos ensaios magnéticos, considerados como uma técnica não destrutiva de caracterização.

De forma geral, os resultados obtidos indicam que os parâmetros magnéticos extraídos das curvas de histerese são sensíveis às alterações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos aplicados aos aços estudados. Observou-se que o aumento da dureza, associado à maior fração de martensita, resulta em elevação da coercividade e modificação da resposta magnética dos materiais, enquanto condições microestruturais mais macias apresentam comportamento magnético mais favorável à magnetização. Esses resultados demonstram o potencial dos ensaios magnéticos como uma técnica não destrutiva eficaz para a avaliação indireta da microestrutura de aços carbono, corroborando a viabilidade da correlação entre propriedades magnéticas e mecânicas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência dos tratamentos térmicos de têmpera na microestrutura dos aços ASTM A36 e AISI 1045, por meio da análise de parâmetros magnéticos extraídos de curvas de histerese, correlacionando esses parâmetros com os resultados de ensaio de dureza.

2.2 Objetivos Específicos

- Submeter amostras dos aços ASTM A36 e AISI 1045 a diferentes tratamentos térmicos, visando promover alterações microestruturais, especialmente a formação de martensita.
- Montar e validar o sistema experimental de medição magnética composto por sonda magnética e osciloscópio digital
- Realizar a aquisição dos sinais de corrente na bobina indutora e de tensão induzida na bobina de medição.
- Processar os sinais experimentais no software GNU Octave e traçar as curvas de histerese magnética.
- Determinar parâmetros magnéticos característicos, tais como coercividade, remanescência magnética, magnetização de saturação e dispersão estatística das medições.
- Comparar o comportamento magnético dos aços A36 e AISI 1045 em função da condição microestrutural.
- Realizar ensaios de dureza e correlacionar os resultados mecânicos com os parâmetros magnéticos obtidos experimentalmente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

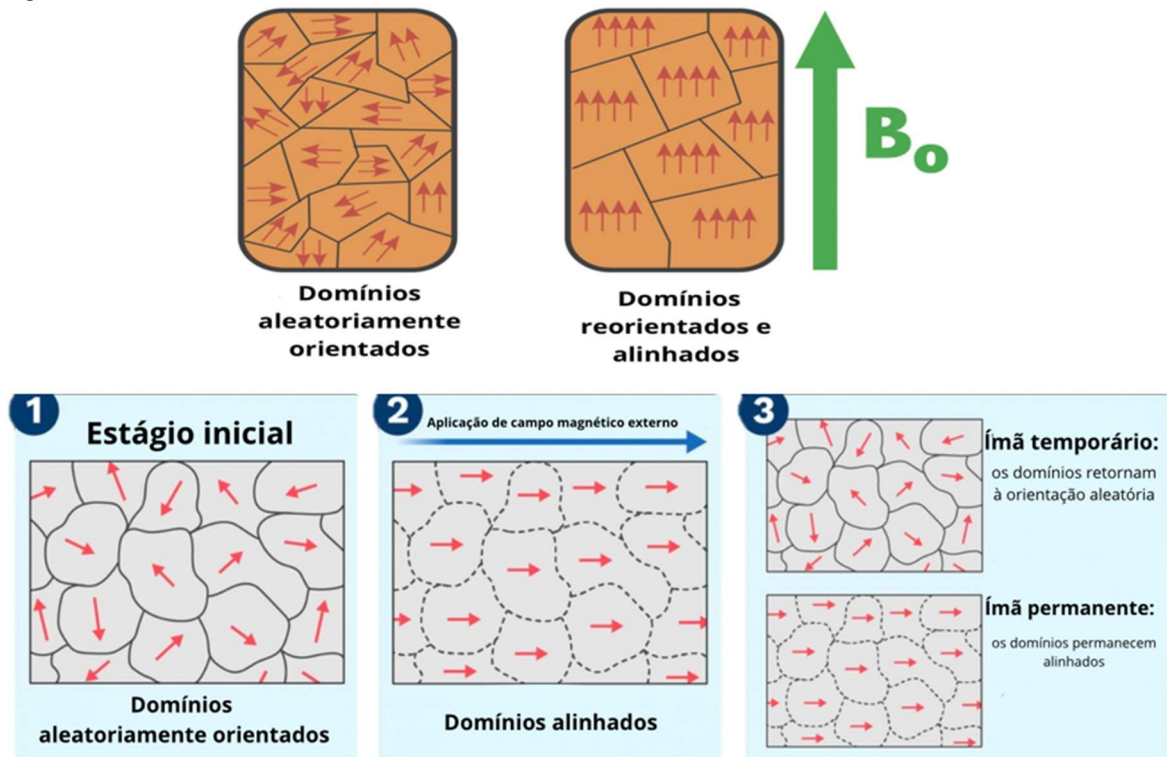
3.1 Materiais ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos distinguem-se dos demais materiais magnéticos pela presença de uma magnetização espontânea, mesmo na ausência de um campo magnético externo. Esse comportamento está associado à organização dos momentos magnéticos atômicos em regiões denominadas domínios magnéticos, nas quais os dipolos encontram-se alinhados em uma mesma direção devido às interações de troca entre os átomos. Em um material não magnetizado, esses domínios apresentam orientações distintas entre si, resultando em magnetização macroscópica aproximadamente nula (BOZORTH, 1993).

Quando um campo magnético externo é aplicado ao material ferromagnético, ocorre inicialmente o deslocamento das paredes de domínio, favorecendo o crescimento daqueles domínios cujas direções estão mais próximas da orientação do campo aplicado. Com o aumento da intensidade do campo, além do movimento das paredes, observa-se a rotação progressiva dos momentos magnéticos no interior dos domínios, até que o material atinja a condição de saturação magnética. Esse processo é reversível apenas parcialmente, sendo responsável pelo comportamento de histerese observado nos materiais ferromagnéticos (Cullity e Graham, 2011; Jiles, 2016).

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da organização dos domínios magnéticos em um material ferromagnético. Observa-se que, na ausência de campo magnético externo, os domínios encontram-se distribuídos aleatoriamente, enquanto a aplicação de um campo promove o alinhamento preferencial dos domínios na direção do campo, aumentando a magnetização do material. Essa representação auxilia na compreensão dos mecanismos físicos responsáveis pela magnetização e desmagnetização dos aços ao carbono.

Figura 1 – Representação esquemática da organização e do comportamento dos domínios magnéticos em um material ferromagnético antes, durante e após a aplicação de um campo magnético externo.



Fonte: Adaptado de Cullity e Graham (2011) e Jiles (2016)

O movimento das paredes de domínio magnético é fortemente influenciado pela microestrutura do material, sendo sensível à presença de defeitos cristalinos, discordâncias, tensões internas, teor de carbono e fases presentes. Em aços de baixo teor de carbono, como o aço ASTM A36 em condição ferrítica-perlítica, as paredes de domínio encontram menor resistência ao deslocamento, resultando em comportamento magneticamente mais macio, caracterizado por baixa coercividade e elevada permeabilidade magnética. Por outro lado, em aços submetidos a tratamentos térmicos que promovem a formação de martensita, observa-se um aumento significativo da densidade de discordâncias e das tensões internas, o que dificulta o movimento das paredes de domínio (THOMPSON; JILES, 1997; CHIKAZUMI, 1997).

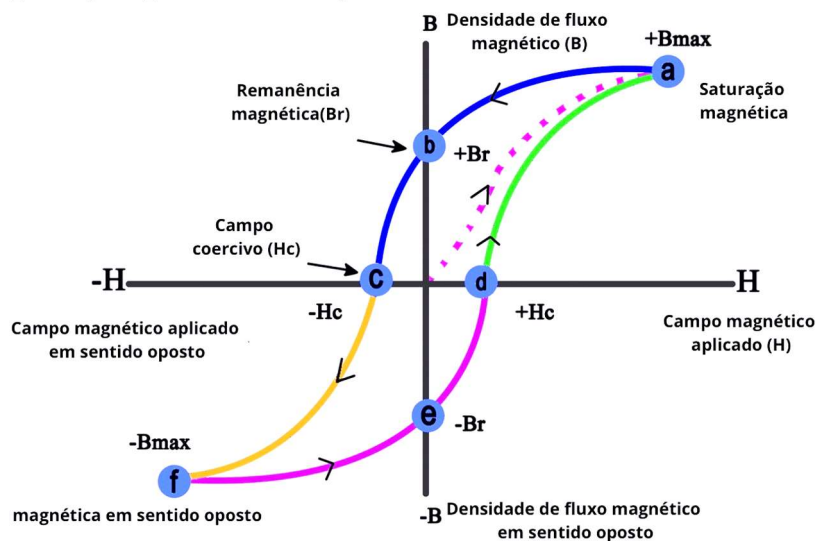
No caso do aço AISI 1045, que apresenta maior teor de carbono em comparação ao A36, a microestrutura resultante após tratamentos térmicos tende a ser mais rígida, com maior fração de fases duras, o que se reflete em maior resistência à magnetização e em alterações nos parâmetros magnéticos. Dessa forma, as diferenças microestruturais entre os aços A36 e 1045 influenciam diretamente o comportamento magnético desses materiais, tornando a análise dos domínios magnéticos um ponto fundamental para a compreensão dos resultados obtidos por meio de ensaios magnéticos (ASM HANDBOOK, 1991; CHIKAZUMI, 1997).

3.2 Curva de Histerese Magnética

A curva de histerese magnética descreve o comportamento de um material ferromagnético quando submetido a um campo magnético externo cíclico, estabelecendo a relação entre a densidade de fluxo magnético B e a intensidade do campo magnético aplicado H . Esse comportamento é consequência dos mecanismos físicos associados ao deslocamento das paredes de domínio magnético e à rotação dos momentos magnéticos, os quais apresentam caráter parcialmente irreversível. Como resultado dessa irreversibilidade, os caminhos de magnetização e desmagnetização não coincidem, originando o laço fechado característico da histerese magnética (CULLITY; GRAHAM, 2011; JILES, 2016).

Partindo de um estado inicialmente desmagnetizado, o aumento progressivo do campo magnético aplicado promove, inicialmente, o crescimento dos domínios magneticamente favoráveis à direção do campo, por meio do deslocamento das paredes de domínio. Com o aumento da intensidade do campo, passa a predominar a rotação dos momentos magnéticos no interior dos domínios, até que o material atinja a condição de saturação magnética, na qual praticamente todos os domínios encontram-se alinhados com o campo aplicado. Esse estado corresponde ao valor máximo da densidade de fluxo magnético, denominado $+B_{m\acute{a}x}$, e representa o limite físico da magnetização do material para aquela condição microestrutural (BOZORTH, 1993; CHIKAZUMI, 1997).

Figura 2 – Curva de histerese magnética típica de um material ferromagnético, mostrando a relação entre a densidade de fluxo magnético (B) e o campo magnético aplicado (H), bem como os principais parâmetros magnéticos.



Fonte: Adaptado de diagramas clássicos de histerese (Cullity).

Conforme ilustrado na Figura 2, ao reduzir o campo magnético aplicado até zero após a saturação, o material não retorna ao estado inicial, permanecendo uma densidade de fluxo residual denominada remanência magnética (B_r). Esse parâmetro está associado à estabilidade dos domínios magnéticos alinhados após a remoção do campo externo e fornece uma medida da capacidade do material de reter magnetização (Cullity; Graham, 2009).

Para anular essa magnetização residual, torna-se necessário aplicar um campo magnético em sentido oposto ao inicialmente aplicado. A intensidade desse campo necessária para reduzir a densidade de fluxo magnético a zero é denominada campo coercivo (H_c). O valor de (H_c) representa a resistência do material à desmagnetização e está diretamente relacionado às barreiras impostas ao movimento das paredes de domínio magnético, tais como defeitos cristalinos, tensões internas, discordâncias e fases microestruturais mais rígidas, como a martensita (BOZORTH, 1993; HUBERT; SCHÄFER, 1998).

Com o aumento do campo magnético em sentido oposto, o material atinge novamente a condição de saturação, agora caracterizada por $-B_{max}$. O retorno do campo ao sentido positivo completa o ciclo de magnetização e desmagnetização, formando o laço fechado da histerese magnética. A área interna desse laço está diretamente associada às perdas magnéticas por ciclo, representando a energia dissipada durante os processos irreversíveis de magnetização (JILES, 2016).

Além da remanência e do campo coercivo, outros parâmetros extraídos da curva de histerese são de grande interesse para a caracterização do comportamento magnético dos materiais ferromagnéticos. A permeabilidade magnética indica a facilidade com que o material se magnetiza sob a ação de um campo externo e está fortemente relacionada à mobilidade das paredes de domínio. O campo de saturação fornece informações sobre a intensidade de campo necessária para promover o alinhamento completo dos domínios magnéticos, sendo sensível às características microestruturais do material (CULLITY; GRAHAM, 2011).

É importante destacar que esses parâmetros magnéticos podem ser influenciados por fatores de confusão, como geometria da amostra, orientação de medição, histórico magnético prévio, tensões residuais e condições de excitação do campo magnético. No entanto, quando esses fatores são controlados experimentalmente, as variações observadas nos parâmetros da histerese podem ser associadas predominantemente às alterações microestruturais induzidas por tratamentos térmicos, como a formação de martensita em aços ao carbono (THOMPSON; JILES, 1997).

Dessa forma, a análise da curva de histerese magnética constitui uma ferramenta eficaz para a caracterização indireta da microestrutura de aços ao carbono, permitindo

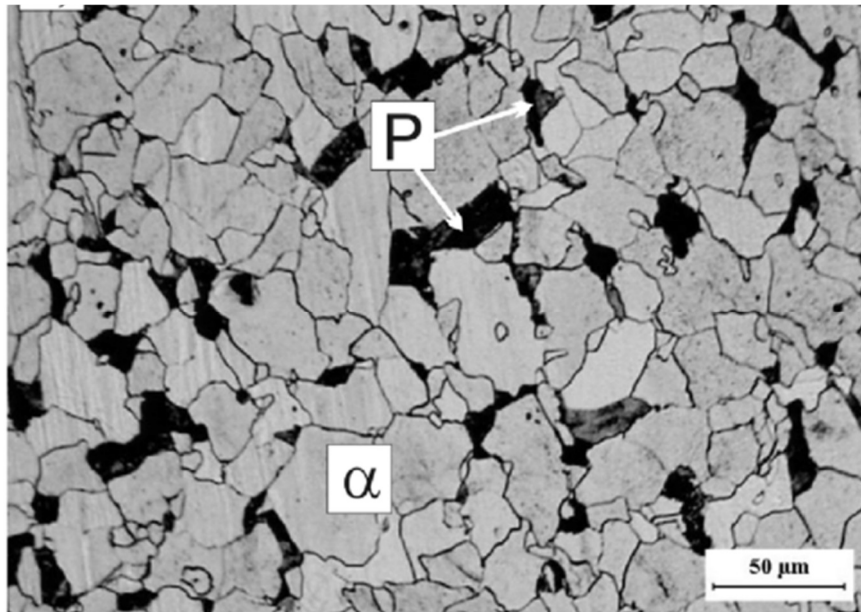
correlacionar parâmetros magnéticos, como remanência, coercividade, permeabilidade e perdas magnéticas, com transformações microestruturais, sem a necessidade de métodos destrutivos convencionais (Cullity e Graham, 2011; Jiles, 2016).

3.3 Influência do teor de carbono e da microestrutura dos aços A36 e 1045

O teor de carbono exerce papel fundamental na definição das propriedades mecânicas e magnéticas dos aços ao carbono, uma vez que influencia diretamente as fases presentes na microestrutura e a resposta do material a tratamentos térmicos. À medida que o teor de carbono aumenta, observa-se maior potencial para a formação de fases mais duras, como a perlita refinada e a martensita, o que resulta em alterações significativas tanto no comportamento mecânico quanto no comportamento magnético do material.

O aço ASTM A36 apresenta baixo teor de carbono, tipicamente inferior a 0,25%, o que conduz, em condições normais de processamento, a uma microestrutura predominantemente ferrítica-perlítica. Essa microestrutura caracteriza-se por elevada ductilidade e menor dureza, sendo típica de aços de baixo carbono (Callister; Rethwisch, 2014). Do ponto de vista magnético, essa configuração microestrutural implica menor densidade de barreiras ao deslocamento das paredes de domínio, uma vez que a ferrita apresenta estrutura cristalina mais simples e menor concentração de defeitos cristalinos. A *Figura 3* exemplifica essa condição microestrutural, evidenciando a predominância da fase ferrítica (α) intercalada por colônias de perlita (P). A disposição relativamente homogênea dessas fases favorece a movimentação das paredes de domínio magnético, o que se reflete em um comportamento magneticamente mais macio, caracterizado por menores valores de campo coercivo e laços de histerese mais estreitos (Cullity; Graham, 2009).

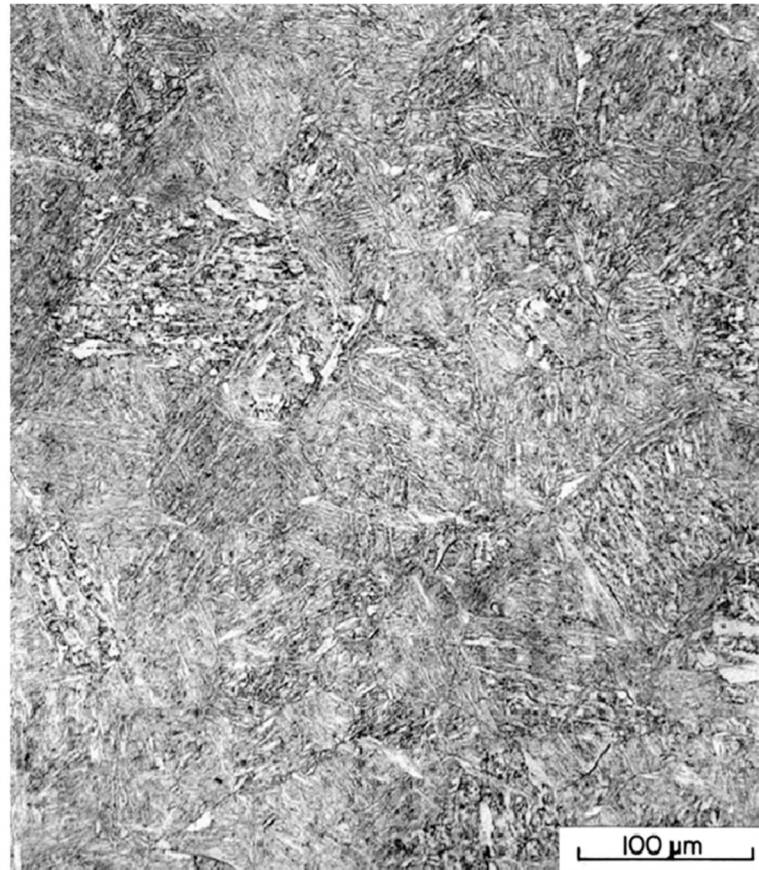
Figura 3 - Microestrutura ferrítica-perlítica típica do aço ASTM A36, evidenciando regiões de ferrita (α) e perlita (P).



Fonte: Adaptado de ASM Handbook (1991).

Por outro lado, o aço AISI 1045 possui teor de carbono intermediário, em torno de 0,45%, o que amplia significativamente sua capacidade de endurecimento por tratamento térmico. Quando submetido a processos como a têmpera, a transformação da austenita em martensita torna-se mais pronunciada nesse aço, resultando em aumento expressivo da dureza e da resistência mecânica. Essa transformação microestrutural altera profundamente os mecanismos de magnetização, uma vez que a martensita introduz elevada densidade de discordâncias, tensões internas e interfaces de fase. A Figura 4 ilustra a microestrutura martensítica típica do aço AISI 1045 após tratamento de têmpera, caracterizada por morfologia acicular e elevada heterogeneidade estrutural. Essa configuração microestrutural impõe barreiras adicionais ao deslocamento das paredes de domínio magnético, exigindo campos magnéticos mais elevados para a reversão da magnetização.

Figura 4 - Microestrutura martensítica típica do aço AISI 1045 após tratamento de têmpera, caracterizada por morfologia acicular e elevada densidade de defeitos cristalinos.



Fonte: Adaptado de ASM Handbook (1991).

Do ponto de vista magnético, o aumento do teor de carbono e da fração de martensita reflete-se em maior resistência à magnetização e à desmagnetização. A presença de fases duras atua como barreira ao deslocamento das paredes de domínio, promovendo aumento do campo coercivo, redução da permeabilidade magnética e ampliação da área do laço de histerese. Dessa forma, as diferenças microestruturais observadas entre os aços ASTM A36 e AISI 1045 explicam diretamente as variações nos parâmetros magnéticos obtidos experimentalmente.

Além do teor de carbono, o histórico de tratamentos térmicos desempenha papel decisivo na microestrutura final dos aços e, conseqüentemente, em seu comportamento magnético. Tratamentos como têmpera e revenimento modificam a distribuição e a morfologia das fases presentes, alterando o grau de mobilidade das paredes de domínio magnético. Assim,

variações nos parâmetros magnéticos extraídos das curvas de histerese podem ser associadas às transformações microestruturais induzidas por esses tratamentos.

Nesse contexto, a análise comparativa do comportamento magnético dos aços ASTM A36 e AISI 1045, submetidos a diferentes condições microestruturais, constitui uma abordagem relevante para a correlação entre composição química, microestrutura e propriedades magnéticas. Essa correlação é particularmente importante para o desenvolvimento e a validação de técnicas magnéticas não destrutivas voltadas à caracterização microestrutural de aços ao carbono (Callister Jr. e Rethwisch, 2020; Cullity e Graham, 2011).

3.4 Influência dos tratamentos térmicos nas propriedades magnéticas dos aços

Os tratamentos térmicos aplicados aos aços ao carbono têm como principal objetivo modificar a microestrutura do material, promovendo alterações controladas em suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, em seu comportamento magnético. Processos como têmpera e revenimento atuam diretamente na transformação das fases presentes, na densidade de discordâncias e no estado de tensões internas, fatores que exercem influência significativa sobre os mecanismos de magnetização e desmagnetização dos materiais ferromagnéticos.

A têmpera consiste no aquecimento do aço até a região austenítica, seguido de resfriamento rápido, resultando na transformação da austenita em martensita. Essa fase apresenta estrutura tetragonal de corpo centrado, elevada densidade de discordâncias e altos níveis de tensões internas. Do ponto de vista magnético, a formação de martensita dificulta o movimento das paredes de domínio magnético, uma vez que os defeitos cristalinos e as tensões internas atuam como obstáculos à sua mobilidade. Como consequência, observa-se aumento do campo coercivo, redução da permeabilidade magnética e ampliação da área do laço de histerese.

O revenimento, por sua vez, é aplicado após a têmpera com o objetivo de aliviar tensões internas e ajustar as propriedades mecânicas do material. Durante esse tratamento, ocorre a decomposição parcial da martensita, com formação de estruturas como martensita revenida e precipitação de carbonetos finos. Essas modificações microestruturais reduzem a rigidez do material em comparação à condição temperada, favorecendo maior mobilidade das paredes de domínio. Do ponto de vista magnético, isso se reflete em diminuição do campo coercivo e em comportamento magneticamente mais macio quando comparado ao estado temperado.

A resposta magnética aos tratamentos térmicos depende fortemente do teor de carbono do aço. Em aços de baixo teor de carbono, como o ASTM A36, a fração de martensita formada após a têmpera é limitada, mesmo sob resfriamento rápido, resultando em alterações menos pronunciadas nos parâmetros magnéticos. Já em aços de médio teor de carbono, como o AISI 1045, a formação de martensita é significativamente mais intensa, o que conduz a mudanças mais expressivas no comportamento magnético após tratamentos térmicos, especialmente no que se refere à coercividade e às perdas magnéticas.

Dessa forma, a comparação entre diferentes condições térmicas permite compreender a relação entre microestrutura e propriedades magnéticas dos aços ao carbono. Variações nos parâmetros extraídos das curvas de histerese, como remanência, campo coercivo, permeabilidade e área do laço, podem ser associadas às transformações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos aplicados. Essa sensibilidade torna os ensaios magnéticos particularmente atrativos como técnicas não destrutivas para a avaliação indireta da microestrutura e do estado de tratamento térmico dos materiais.

No contexto do presente trabalho, a análise do efeito dos tratamentos térmicos sobre o comportamento magnético dos aços ASTM A36 e AISI 1045 fornece subsídios para a correlação entre propriedades magnéticas e mecânicas, especialmente quando associada aos resultados de dureza. Essa abordagem integrada contribui para a compreensão do potencial dos ensaios magnéticos como ferramenta de caracterização microestrutural aplicada à engenharia metalúrgica (Cullity e Graham, 2011; Callister Jr. e Rethwisch, 2020).

3.5 Ensaios magnéticos e sua aplicação na caracterização de aços ao carbono

Ensaio magnéticos têm sido amplamente empregados em pesquisas acadêmicas e tecnológicas para a caracterização de materiais ferromagnéticos, especialmente os aços ao carbono. Essa abordagem fundamenta-se na geração controlada de um campo magnético e na medição da resposta magnética do material, permitindo a obtenção de parâmetros associados ao comportamento magnético e à microestrutura do material analisado. A simplicidade operacional, aliada à boa reprodutibilidade dos resultados, torna esse tipo de ensaio particularmente atrativo no contexto de técnicas não destrutivas.

A literatura demonstra que métodos baseados na análise da curva de histerese magnética são sensíveis a variações microestruturais decorrentes do teor de carbono e do histórico de tratamento térmico dos aços. Alterações na fração de fases, como ferrita, perlita e martensita, influenciam diretamente o movimento das paredes de domínio magnético,

refletindo-se em parâmetros como campo coercivo, remanescência magnética, permeabilidade e perdas magnéticas. Dessa forma, ensaios magnéticos realizados por meio de sistemas com bobinas permitem inferir indiretamente o estado microestrutural dos materiais, sem a necessidade de procedimentos destrutivos (Cullity e Graham, 2011; Jiles, 2016).

Diversos estudos acadêmicos empregaram arranjos experimentais semelhantes, utilizando bobinas indutoras e sensores acoplados a sistemas de aquisição de dados para a reconstrução da curva B–H. Trabalhos como os de Mesquita (2021), Huallpa (2011) e Seixas (2022) demonstram a aplicação dessa metodologia na avaliação do comportamento magnético de aços ao carbono e corroboram a viabilidade do uso de técnicas magnéticas como ferramentas de caracterização microestrutural. Nessas investigações, observa-se que variações nos parâmetros magnéticos estão associadas a diferenças no teor de carbono e nas condições de tratamento térmico.

No contexto do presente trabalho, essa abordagem é empregada para comparar o comportamento magnético dos aços ASTM A36 e AISI 1045, materiais que apresentam diferenças significativas no teor de carbono e na resposta aos tratamentos térmicos. A utilização de ensaios magnéticos baseados em bobinas, aliada à análise das curvas de histerese, possibilita discutir a influência da microestrutura sobre as propriedades magnéticas desses aços, reforçando o potencial da técnica como método não destrutivo de caracterização microestrutural.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

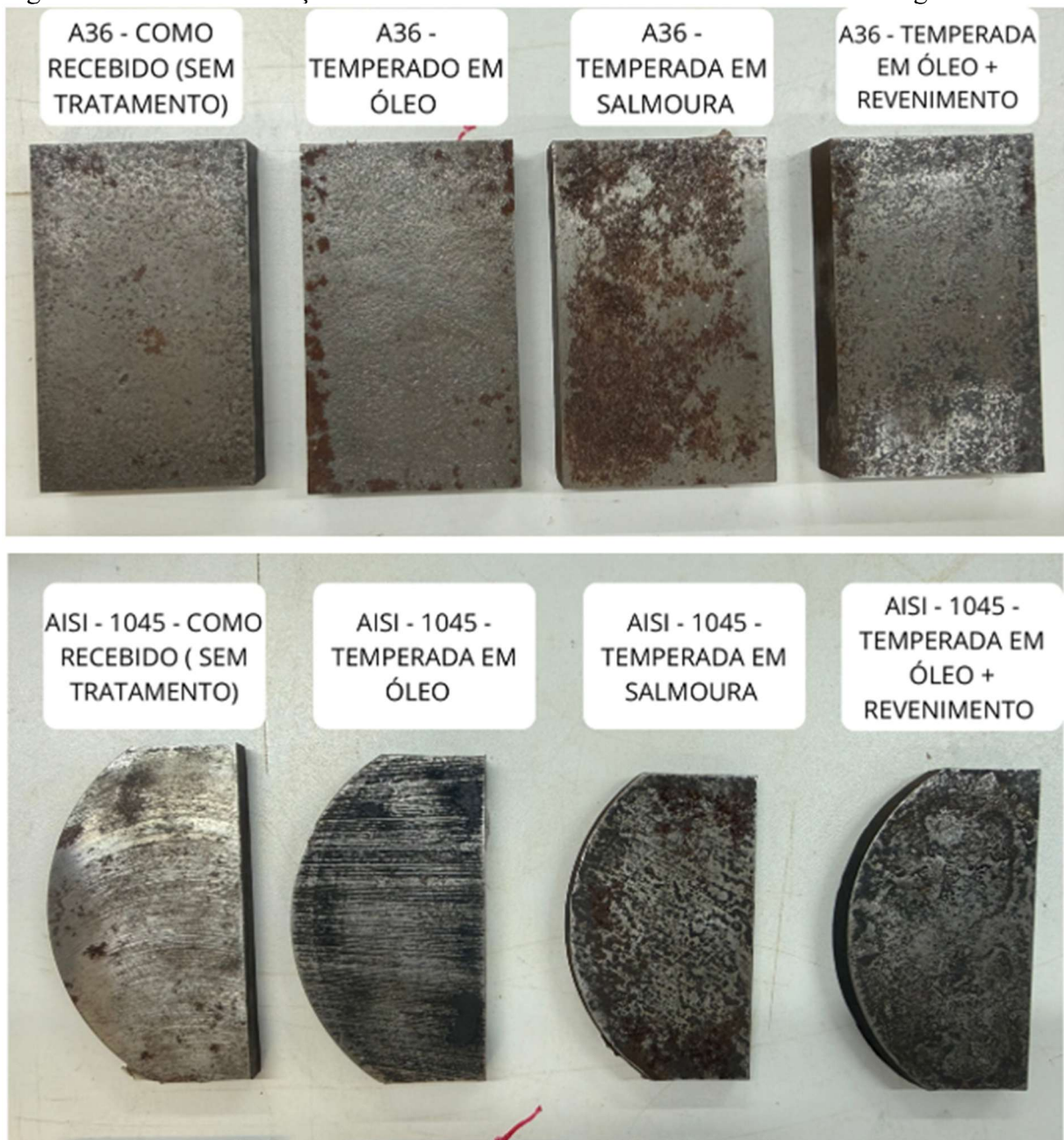
Foram utilizadas amostras dos aços carbono ASTM A36 e AISI 1045, ambos amplamente empregados na indústria metalúrgica, porém caracterizados por diferentes teores de carbono e, conseqüentemente, distintas respostas microestruturais e magnéticas. O aço ASTM A36 apresenta baixo teor de carbono, com composição química típica equivalente à do aço AISI 1020, contendo aproximadamente 0,20% em massa de carbono. Já o aço AISI 1045 possui teor de carbono intermediário, em torno de 0,45% em massa, o que lhe confere maior potencial de endurecimento por tratamento térmico. Essas composições são valores nominais amplamente reportados na literatura e em normas técnicas, não tendo sido realizada análise química no presente trabalho (Callister Jr. e Rethwisch, 2020).

As amostras de ambos os aços foram preparadas a partir de barras maciças e submetidas a diferentes condições microestruturais, de modo a permitir a avaliação da influência do teor de carbono e do histórico térmico sobre o comportamento magnético. As condições analisadas neste estudo foram: como recebido (CR), correspondente à condição original de fornecimento do material; têmpera em óleo (O); têmpera em sal (S); e revenido (R), aplicado após a têmpera. Os detalhes dos procedimentos térmicos empregados, incluindo temperaturas e tempos de aquecimento e resfriamento, são descritos na seção 4.2.

As amostras foram confeccionadas com dimensões geométricas compatíveis com a sonda magnética utilizada nos ensaios, visando garantir adequada inserção no sistema de medição e minimizar efeitos geométricos sobre os resultados magnéticos. Todas as amostras apresentaram dimensões semelhantes entre si, assegurando a reprodutibilidade das medições e a comparabilidade dos resultados obtidos.

A Figura 5 apresenta uma fotografia representativa das amostras dos aços ASTM A36 e AISI 1045 após o tratamento térmico, evidenciando a geometria adotada para os ensaios magnéticos.

Figura 5 – Amostras dos aços ASTM A36 e AISI 1045 utilizadas nos ensaios magnéticos



Fonte: elaborado pelo autor.

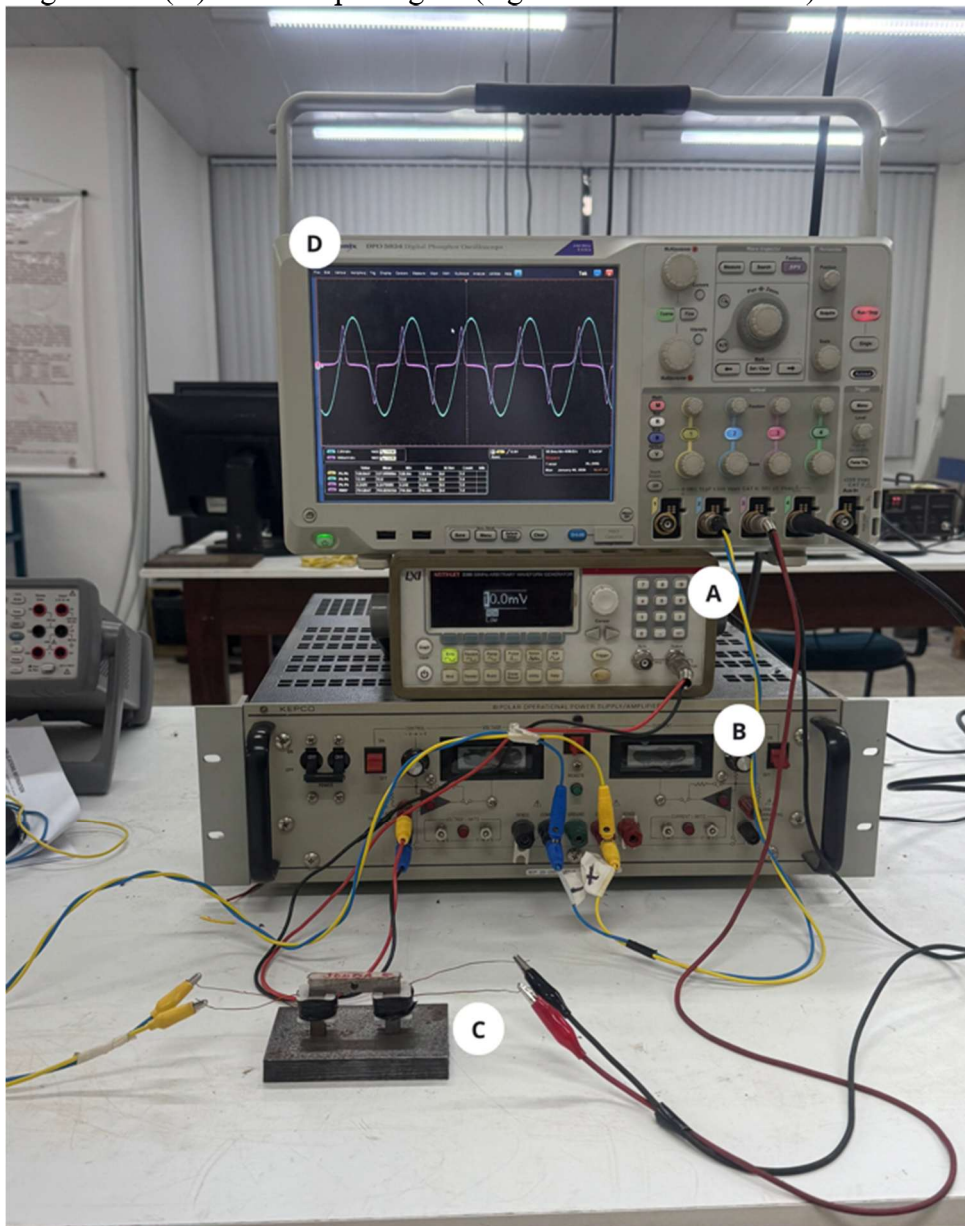
4.2 Bancada experimental e instrumentação

Os ensaios experimentais realizados neste trabalho foram conduzidos em uma bancada dedicada à caracterização magnética de materiais ferromagnéticos, instalada no CENDE (centro de Ensaio Não Destrutivos). A bancada experimental foi organizada de modo a permitir a aplicação controlada de campos magnéticos alternados nas amostras, bem como a aquisição dos sinais elétricos associados à resposta magnética dos materiais. Arranjos experimentais desse tipo são amplamente utilizados na obtenção de laços de histerese magnética

por meio de sistemas de bobinas, conforme descrito na literatura especializada sobre caracterização magnética de materiais ferromagnéticos (CULLITY; GRAHAM, 2011; JILES, 2016).

A Figura 6 apresenta a configuração da bancada experimental utilizada neste trabalho, evidenciando os principais componentes do sistema empregados nos ensaios de caracterização magnética e mecânica.

Figura 6 – Configuração da bancada experimental utilizada nos ensaios de caracterização magnética e mecânica, mostrando os principais componentes do sistema: (A) gerador de corrente alternada (Keithley 3390), (B) Amplificador operacional bipolar (Kepco BOP 20-20 D), (C) sonda magnética e (D) osciloscópio digital (Agilent Infinium series).



Fonte: elaborado pelo autor.

A bancada experimental é composta por um gerador de corrente alternada, um amplificador operacional bipolar, uma sonda magnética, um osciloscópio digital e cabos de conexão. Esse conjunto de instrumentação é característico de ensaios magnéticos quasiestáticos, nos quais são empregadas baixas frequências de excitação, de modo a minimizar efeitos dinâmicos e perdas associadas a correntes parasitas, permitindo a análise do comportamento magnético intrínseco dos materiais em resposta ao campo aplicado (JILES, 2016).

O gerador de corrente alternada é responsável pela geração do sinal elétrico de excitação aplicado à bobina indutora da sonda magnética, possibilitando o controle da forma de onda, da frequência e da amplitude do sinal durante os ensaios. Esse sinal é enviado ao amplificador operacional bipolar que foi utilizado para fornecer a corrente necessária à magnetização das amostras, garantindo estabilidade e repetibilidade durante os ciclos de excitação magnética, conforme recomendado em sistemas experimentais para ensaios de histerese magnética (CULLITY; GRAHAM, 2011).

A sonda magnética constituiu o elemento central da bancada experimental, sendo responsável pela aplicação do campo magnético nas amostras e pela detecção da resposta magnética do material, por meio de um conjunto de bobinas indutora e sensora. As amostras foram posicionadas no interior da sonda durante os ensaios, permitindo a aplicação do campo magnético e a medição da variação do fluxo magnético associado ao processo de magnetização e desmagnetização. O funcionamento detalhado da sonda magnética, bem como o modelo físico adotado para a obtenção dos parâmetros magnéticos, é apresentado na Seção 4.4.

O osciloscópio digital foi utilizado para a aquisição simultânea dos sinais elétricos provenientes do sistema experimental. O sinal registrado no Canal 2 (CH2) correspondeu à tensão aplicada à bobina indutora, responsável pela geração do campo magnético no interior da amostra, enquanto o sinal registrado no Canal 3 (CH3) correspondeu à tensão induzida na bobina sensora, associada à variação do fluxo magnético no material. Esses sinais foram posteriormente exportados para processamento em ambiente computacional. O computador, equipado com o software GNU Octave, foi utilizado para o armazenamento, processamento e análise dos dados experimentais obtidos nos ensaios magnéticos.

Além da caracterização magnética, a bancada experimental foi complementada por equipamentos destinados à caracterização mecânica das amostras. Os ensaios de dureza foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), utilizando um durômetro Rockwell,

adotando-se a escala HRB para o aço ASTM A36 e a escala HRC para o aço AISI 1045, conforme recomendações técnicas para ensaios de dureza em aços carbono (ASTM E18, 2022).

4.3 Tratamentos Térmicos das Amostras

Os tratamentos térmicos aplicados às amostras de aço ASTM A36 e AISI 1045 tiveram como objetivo modificar a microestrutura dos materiais, de modo a produzir diferentes estados metalúrgicos e, conseqüentemente, diferentes respostas magnéticas e mecânicas. Esses tratamentos foram definidos com base em recomendações da literatura clássica de metalurgia física e em normas técnicas amplamente aceitas para aços ao carbono, como as diretrizes da ASM Handbook e normas da ABNT e ASTM para processos de têmpera e revenimento (ASM, 2016; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Os procedimentos de tratamento térmico foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM), utilizando forno elétrico com controle de temperatura adequado às etapas de austenitização, têmpera e revenimento empregadas neste estudo.

As amostras foram submetidas às seguintes condições térmicas: condição como recebido, têmpera em óleo, têmpera em sal e revenido, conforme descrito a seguir.

4.3.1 Condição Como Recebido (CR)

As amostras na condição como recebido (CR) foram analisadas sem a aplicação de qualquer tratamento térmico adicional, mantendo a microestrutura proveniente do processo industrial de fabricação. Nessa condição, os aços apresentam predominantemente microestruturas ferrítico-perlíticas, típicas de aços de baixo e médio teor de carbono, servindo como referência para comparação com as demais condições tratadas termicamente (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018; ASM INTERNATIONAL, 1991).

4.3.2 Têmpera em Óleo (O)

Para a realização da têmpera em óleo, as amostras foram aquecidas em forno elétrico até a temperatura de 900 °C, permanecendo nessa condição por 1 hora, garantindo a completa austenitização do material. Após o tempo de encharque, as amostras foram retiradas

do forno e imediatamente submetidas a resfriamento rápido em óleo, caracterizando o processo de têmpera.

O meio óleo foi selecionado por proporcionar uma taxa de resfriamento intermediária, inferior à de meios mais severos, como água ou banho de sal, porém suficientemente elevada para promover a transformação da austenita em martensita em aços de baixo e médio teor de carbono. De acordo com a literatura, a têmpera em óleo é amplamente recomendada para aços como o AISI 1045, pois permite a obtenção de microestruturas endurecidas com menor risco de trincas, empenamentos e elevados gradientes térmicos, quando comparada a meios de resfriamento mais agressivos (ASM Handbook, 2016; Callister Jr.; Rethwisch, 2020).

Além disso, o uso do óleo contribui para uma redução relativa das tensões internas geradas durante o resfriamento rápido, aspecto relevante para a análise do comportamento magnético, uma vez que defeitos cristalinos e tensões internas influenciam diretamente a mobilidade das paredes de domínio magnético (Jiles, 2016).

4.3.3 Têmpera em Sal (S)

O tratamento de têmpera em sal foi realizado de forma semelhante à têmpera em óleo quanto à etapa de aquecimento. As amostras foram aquecidas a 900 °C por 1 hora, assegurando a completa austenitização. Em seguida, foram submetidas a resfriamento em banho de sal, promovendo uma taxa de resfriamento rápida e mais uniforme quando comparada ao meio óleo.

O banho de sal foi utilizado como meio de resfriamento rápido por proporcionar, segundo a literatura, uma taxa de extração de calor mais elevada e mais uniforme quando comparada a meios como o óleo. Esse tipo de resfriamento é descrito como capaz de reduzir gradientes térmicos durante a têmpera, favorecendo uma transformação mais homogênea da austenita em martensita ao longo do volume da amostra (ASM Handbook, 2016).

4.3.4 Revenido (R)

As amostras previamente submetidas à têmpera em óleo passaram posteriormente pelo tratamento de revenimento, com o objetivo de reduzir tensões internas, aumentar a

tenacidade e ajustar as propriedades mecânicas e magnéticas finais do material. O revenimento foi realizado a 450 °C, com tempo de permanência de 1 hora, seguido de resfriamento ao ar.

De acordo com a literatura, durante o revenimento ocorre a decomposição parcial da martensita, com precipitação de carbonetos finos e redução das tensões internas, conduzindo a uma microestrutura mais estável termodinamicamente (Callister Jr.; Rethwisch, 2020). Essas modificações microestruturais tendem a influenciar o comportamento magnético dos aços, uma vez que a redução de defeitos cristalinos e tensões internas está associada a maior mobilidade das paredes de domínio magnético (Jiles, 2016).

Dessa forma, o tratamento de revenimento é empregado neste estudo como uma etapa de ajuste microestrutural, possibilitando a avaliação da influência da redução das tensões internas e da modificação da martensita temperada sobre os parâmetros magnéticos, os quais serão analisados posteriormente por meio das curvas de histerese magnética.

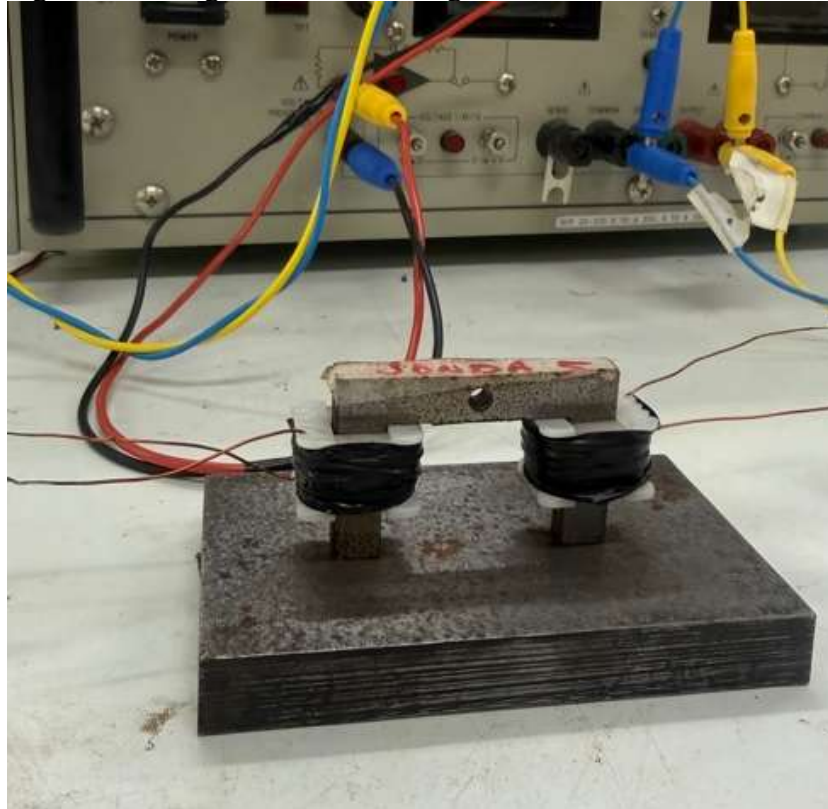
4.4 Fundamentação matemática das curvas de histerese

O sistema experimental foi constituído por um gerador de corrente alternada, um amplificador operacional bipolar, uma sonda magnética composta por bobina indutora e bobina sensora, resistores para medição de corrente elétrica, um osciloscópio digital para aquisição dos sinais elétricos e um computador para armazenamento e processamento dos dados experimentais.

A sonda magnética foi elemento central da montagem experimental, sendo responsável tanto pela aplicação do campo magnético nas amostras quanto pela detecção da resposta magnética do material. A Figura 7 apresenta uma fotografia da sonda magnética utilizada nos ensaios, evidenciando a bobina indutora, a bobina sensora e a posição da amostra no interior do circuito magnético.

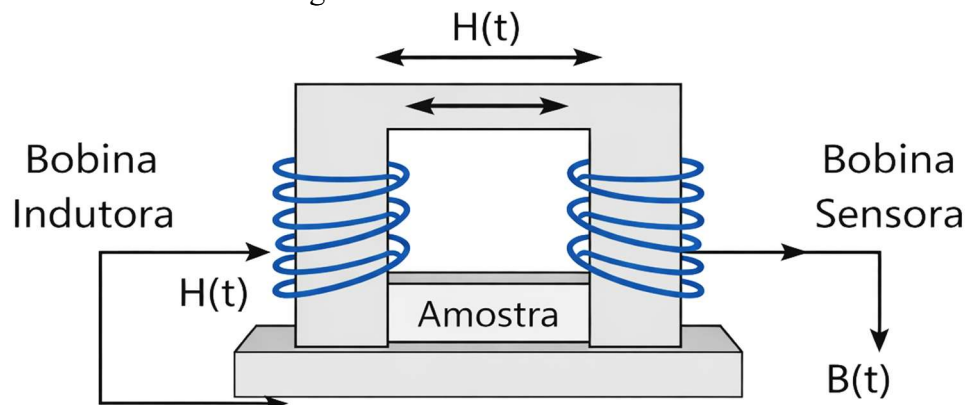
A fim de facilitar a compreensão do princípio físico de funcionamento da sonda magnética e da obtenção das grandezas magnéticas envolvidas, a Figura 8 apresenta uma representação esquemática simplificada do sistema de medição empregado neste trabalho.

Figura 7 – Fotografia da sonda magnética utilizada nos ensaios



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8– Representação esquemática da sonda magnética utilizada nos ensaios, ilustrando a bobina indutora responsável pela aplicação do campo magnético $H(t)$, a bobina sensora para detecção da resposta magnética $B(t)$ e a posição da amostra no interior do circuito magnético.



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado na Figura 8, a aplicação de uma corrente alternada na bobina indutora, composta por 100 espiras e conectada a um gerador de sinal acoplado a um amplificador operacional bipolar, resulta na circulação de uma corrente alternada responsável pela geração de um campo magnético variável no tempo, $H(t)$. Esse campo é guiado pelo núcleo

magnético da sonda e atravessa a amostra, fechando o circuito magnético. A magnetização da amostra provoca uma variação temporal do fluxo magnético no circuito, a qual é detectada pela bobina sensora por meio da tensão induzida em seus terminais. A tensão aplicada à bobina indutora foi monitorada por meio do Canal 2 (CH2) do osciloscópio, enquanto a relação entre o campo aplicado $H(t)$ e a densidade de fluxo magnético $B(t)$ permitiu a obtenção das curvas de histerese magnética do material.

O campo magnético aplicado $H(t)$ foi determinado a partir da relação:

$$H(t) = \frac{N_1 i(t)}{L_m} \quad (1)$$

em que N_1 é o número de espiras da bobina indutora, $i(t)$ é a corrente elétrica medida no circuito e L_m é o comprimento médio do caminho magnético associado à amostra.

A bobina sensora, composta por 100 espiras, foi conectada ao Canal 3 (CH3) do osciloscópio e utilizada para registrar a tensão induzida associada à variação temporal do fluxo magnético no material. De acordo com a Lei de Faraday, a tensão induzida na bobina sensora pode ser expressa por:

$$V(t) = -N_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (2)$$

$$\Phi(t) = B \cdot A \quad (3)$$

onde N_2 é o número de espiras da bobina sensora e $\Phi(t)$ representa o fluxo magnético.

A densidade de fluxo magnético $B(t)$ foi obtida a partir da integração temporal da tensão induzida, segundo a expressão:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A} \int V(t) dt \quad (4)$$

em que A corresponde à área efetiva da seção transversal da amostra. Como os sinais elétricos foram adquiridos de forma discretizada pelo osciloscópio, a integração da tensão induzida foi realizada numericamente durante o processamento dos dados experimentais.

Durante os ensaios magnéticos, as amostras foram posicionadas no interior da sonda magnética com alinhamento paralelo ao campo magnético aplicado (0°), correspondendo à direção longitudinal em relação à geometria da amostra. Essa configuração foi adotada de forma a garantir maior reprodutibilidade das medições e reduzir a influência de variáveis geométricas e direcionais nos resultados obtidos.

A escolha de uma única orientação de medição permitiu concentrar a análise na influência das transformações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos sobre os

parâmetros magnéticos extraídos das curvas de histerese, tais como o campo coercivo (H_c), a indução remanescente (B_r) e a magnetização de saturação (M_s), sem considerar efeitos associados à anisotropia magnética do material (Cullity e Graham, 2011; Jiles, 2016).

Antes da realização de cada medida, as amostras foram submetidas a um procedimento de desmagnetização, com o objetivo de eliminar efeitos de magnetização residual que pudessem influenciar os resultados obtidos. Esse procedimento foi adotado de forma sistemática antes de cada aquisição dos sinais magnéticos, garantindo condições iniciais equivalentes para todas as amostras e tratamentos avaliados.

A desmagnetização consistiu na aplicação de ciclos sucessivos de magnetização com amplitude de campo progressivamente decrescente, até a redução da magnetização residual a valores próximos de zero, conforme procedimento amplamente descrito na literatura especializada (Cullity e Graham, 2011).

4.5 Aquisição dos Sinais

A aquisição dos sinais elétricos durante os ensaios magnéticos foi realizada por meio de um osciloscópio digital, acoplado ao sistema de bobinas descrito na Seção 4.4. A excitação magnética foi aplicada à bobina indutora da sonda magnética por meio de um gerador de sinal de corrente alternada associado a um amplificador operacional bipolar, sendo este responsável por fornecer a tensão alternada necessária à magnetização das amostras.

A tensão aplicada à bobina indutora foi registrada pelo Canal 2 (CH2) do osciloscópio. Embora o CH2 não realize a medição direta da corrente elétrica, esse sinal é proporcional à excitação aplicada ao sistema e foi utilizado como referência para a determinação do campo magnético aplicado H , conforme descrito na Seção 4.4.

Simultaneamente, a bobina sensora, posicionada na sonda magnética, foi responsável por registrar a tensão induzida associada à variação temporal do fluxo magnético no material. Esse sinal foi adquirido pelo Canal 3 (CH3) do osciloscópio e é proporcional à derivada temporal do fluxo magnético e, conseqüentemente, à derivada temporal da densidade de fluxo magnético (dB/dt), conforme a Lei de Faraday.

Os ensaios magnéticos foram realizados utilizando uma frequência de excitação de 10 Hz e uma amplitude de excitação de 3,5 Vpp (volts pico a pico) aplicada à bobina indutora.

Para cada condição experimental — material e tratamento térmico — foram realizadas dez aquisições sucessivas dos sinais magnéticos, com o objetivo de garantir a repetibilidade dos resultados e reduzir a influência de ruídos elétricos e variações

experimentais. Todas as medições foram realizadas com as amostras posicionadas no interior da sonda magnética em uma única orientação, alinhada ao campo magnético aplicado (0°), conforme definido no escopo deste trabalho.

Os sinais adquiridos pelo osciloscópio foram exportados em formato digital .dat, preservando a resolução temporal e a integridade dos dados experimentais. Posteriormente, esses arquivos foram utilizados no processamento numérico para a obtenção das curvas de histerese magnética e dos parâmetros magnéticos de interesse.

A Figura 9 ilustra um exemplo típico dos sinais elétricos adquiridos durante os ensaios magnéticos, evidenciando a tensão aplicada à bobina indutora, registrada no Canal 2 do osciloscópio (CH2), e a tensão induzida registrada pela bobina sensora no Canal 3 (CH3).

Figura 9 – Sinais elétricos adquiridos durante os ensaios magnéticos: tensão aplicada à bobina indutora, registrada no Canal 2 do osciloscópio (CH2, curva em azul), e tensão induzida na bobina sensora, registrada no Canal 3 (CH3, curva em rosa), obtidos simultaneamente durante a excitação magnética da amostra.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.6 Processamento dos Dados no GNU Octave

O processamento dos dados experimentais foi realizado em ambiente computacional utilizando o software GNU Octave, com o objetivo de reconstruir os laços de histerese magnética B-H e extrair os principais parâmetros magnéticos das amostras analisadas.

As rotinas desenvolvidas permitiram o tratamento sistemático de múltiplas aquisições experimentais, assegurando repetibilidade, redução de ruídos e consistência estatística dos resultados.

Inicialmente, os sinais adquiridos pelo osciloscópio foram exportados no formato .dat, correspondendo ao sinal de tensão aplicado ao circuito da bobina indutora (Canal 2 – CH2) e ao sinal de tensão induzida na bobina sensora (Canal 3 – CH3). Para cada condição experimental, foram consideradas dez medições independentes, armazenadas em pares de arquivos, os quais foram organizados em uma lista única para processamento automático.

Após a importação dos dados no GNU Octave, os sinais brutos foram submetidos a um processo de filtragem por média móvel, com o objetivo de atenuar ruídos de alta frequência associados à aquisição experimental. Em seguida, foi realizada a centralização dos sinais, subtraindo-se o valor médio de cada aquisição, de modo a eliminar componentes contínuos indesejados.

O campo magnético aplicado $H(t)$ foi calculado a partir do sinal de tensão proporcional à corrente da bobina indutora, considerando a impedância do circuito elétrico e as características geométricas da bobina, conforme a relação:

$$H(t) = \frac{N_1 V(t)}{Z_1 L_m} \quad (5)$$

Em que N_1 é o número de espiras da bobina indutora, $V(t)$ é o sinal medido no Canal 2, Z_1 é a impedância da bobina indutora e L_m é o comprimento médio do caminho magnético.

A densidade de fluxo magnético $B(t)$ foi obtida a partir do sinal de tensão induzida na bobina sensora (CH3), por meio de integração numérica discreta, uma vez que os dados são adquiridos de forma amostrada no tempo. Esse procedimento foi realizado por meio do somatório cumulativo do sinal, conforme:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A f_s} \sum V_{ind}(t) \quad (6)$$

onde N_2 é o número de espiras da bobina sensora, A é a área efetiva da seção transversal da amostra e f_s é a taxa de amostragem do sistema de aquisição.

Para cada medição, os sinais $H(t)$ e $B(t)$ foram segmentados em ciclos completos de magnetização. Os ciclos individuais foram reorganizados em matrizes, permitindo o cálculo do ciclo médio de cada medição por meio da média ponto a ponto ao longo dos ciclos selecionados. Esse procedimento reduziu as flutuações experimentais e melhorou a definição das curvas de histerese.

Durante o processamento, foi realizada uma verificação do sentido de varredura do laço de histerese por meio do cálculo da área do ciclo médio. Quando identificado um laço com

orientação anti-horária, os sinais foram automaticamente invertidos, garantindo consistência física e comparabilidade entre todas as medições.

A partir dos laços de histerese médios de cada medição, foram extraídos os parâmetros magnéticos individuais:

- Densidade de fluxo magnético remanente $B(r)$, determinada por interpolação nos cruzamentos de $H = 0$;
- campo coercivo $H(c)$, obtido a partir dos cruzamentos de $B = 0$;
- densidade de fluxo magnético máxima $B_{m\acute{a}x}$;
- magnetização de saturação $M(s)$, calculada a partir da relação:

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (7)$$

Posteriormente, os laços de histerese obtidos a partir das medições individuais foram alinhados e combinados, resultando em uma curva de histerese média global representativa de cada condição experimental analisada. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de reduzir a influência de ruídos experimentais, pequenas variações instrumentais e efeitos transitórios, garantindo maior robustez estatística e representatividade física dos resultados. A partir dessa curva média global, foram novamente extraídos os principais parâmetros magnéticos, tais como a indução remanescente $B(r)$, o campo coercivo $H(c)$, a densidade de fluxo magnético máxima $B_{m\acute{a}x}$ e a magnetização de saturação $M(s)$, permitindo comparação direta com os valores médios e respectivos desvios padrão obtidos a partir das medições individuais.

Além da geração das curvas $B \times H$, o processamento dos dados incluiu a construção de gráficos comparativos dos sinais elétricos adquiridos nos diferentes canais do osciloscópio, bem como a organização sistemática dos resultados em tabelas contendo valores individuais, médias e desvios padrão. Essa abordagem foi adotada para assegurar rastreabilidade, consistência estatística e transparência na análise dos dados, além de possibilitar a identificação de tendências e a comparação objetiva entre as diferentes condições microestruturais e tratamentos térmicos avaliados.

4.7 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados com o objetivo de complementar a caracterização das amostras e possibilitar a correlação entre propriedades mecânicas e comportamento magnético. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) utilizando um durômetro Rockwell, conforme o procedimento padronizado pela norma ASTM E18 (2022).

Para o aço ASTM A36, os ensaios foram conduzidos na escala Rockwell B (HRB), utilizando penetrador esférico de aço com carga total de 100 kgf, conforme recomendado para aços de baixo teor de carbono. Para o aço AISI 1045, os ensaios foram realizados na escala Rockwell C (HRC), empregando penetrador cônico de diamante e carga total de 150 kgf, adequada para a faixa de dureza esperada após os tratamentos térmicos aplicados.

Em cada condição analisada (material e tratamento térmico), foram realizadas seis medições de dureza em pontos distintos da superfície da amostra. As indentações foram distribuídas de forma a evitar interferência entre medições consecutivas, respeitando espaçamento mínimo entre pontos, conforme recomendações normativas. O valor de dureza representativo de cada condição foi obtido por meio da média aritmética das seis medições realizadas.

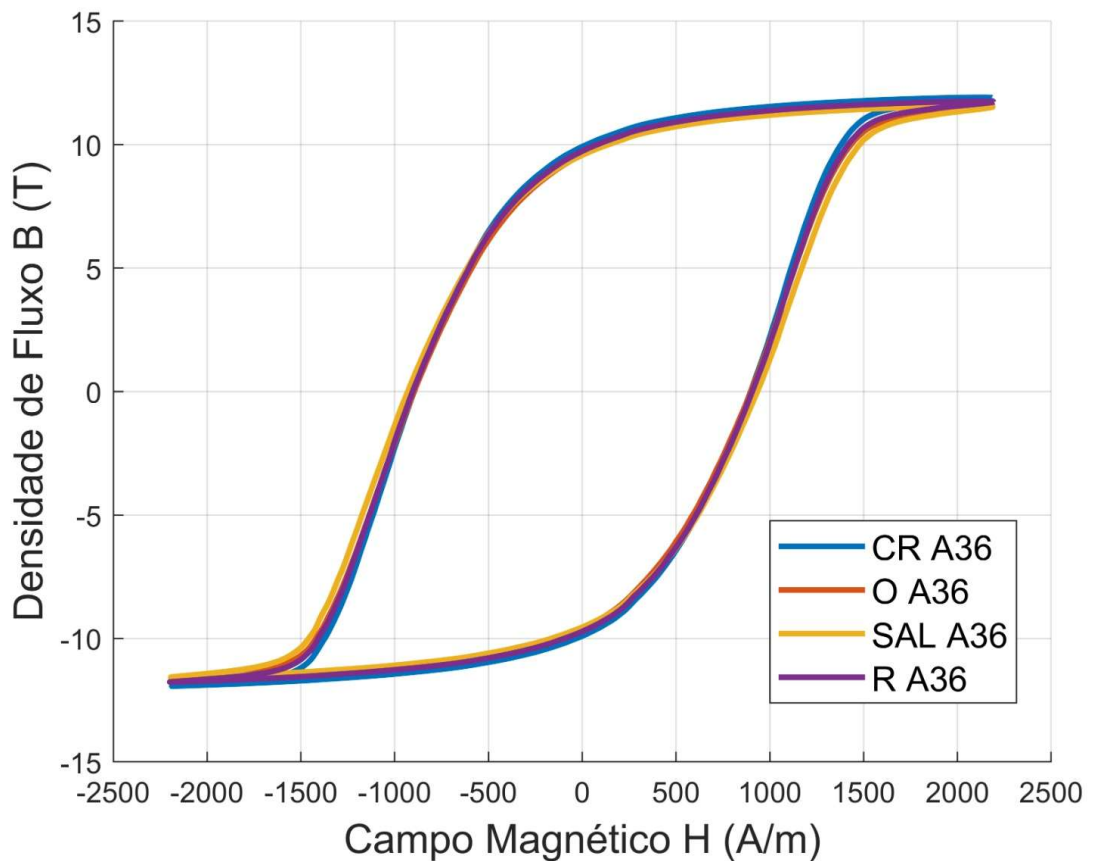
Os resultados obtidos nos ensaios de dureza foram posteriormente utilizados na seção 5 para análise comparativa e correlação com os parâmetros magnéticos extraídos dos laços de histerese, permitindo avaliar a influência das transformações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos sobre o comportamento magnético dos materiais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados magnéticos do aço ASTM A36

A Figura 10 apresenta as curvas de histerese magnética médias obtidas para o aço ASTM A36 nas diferentes condições analisadas: como recebido (CR), temperado em água salgada (SAL), temperado em óleo (O) e revenido (R), todas avaliadas na mesma orientação em relação à direção de laminação (ângulo 0°). As curvas foram construídas a partir do processamento dos sinais elétricos adquiridos experimentalmente, conforme descrito na metodologia.

Figura 10 – Curvas de histerese magnética médias do aço ASTM A36 para as diferentes condições de tratamento térmico



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 1 apresenta os valores médios dos principais parâmetros magnéticos extraídos das curvas de histerese — campo coercivo (H_c), remanência magnética (B_r),

densidade de fluxo máxima ($B_{m\acute{a}x}$) e magnetização de saturação (M_s) — juntamente com seus respectivos desvios padrões.

Tabela 1 - Parâmetros magnéticos médios do aço ASTM A36 obtidos a partir das curvas de histerese para diferentes tratamentos térmicos

Tratamento	Hc (A/m)	Br (T)	$B_{m\acute{a}x}$ (T)	M_s (A/m)
CR	897,85 ± 11,86	9,98 ± 0,19	12,12 ± 0,14	(9,54±0,12) x 10 ⁶
O	904,05 ± 12,31	9,68 ± 0,23	11,85 ± 0,16	(9,32±0,12) x 10 ⁶
SAL	936,66 ± 12,08	9,67 ± 0,23	11,80 ± 0,16	(9,28±0,13) x 10 ⁶
R	908,32 ± 14,50	9,80 ± 0,24	11,93 ± 0,18	(9,40±0,14) x 10 ⁶

Fonte: elaborada pelo autor.

A análise dos resultados evidencia que o campo coercivo (Hc) apresenta pequenas variaoes entre as diferentes condioes de tratamento térmico, com valores ligeiramente mais elevados para a condição SAL. Esse comportamento é compatível com o relatado na literatura para aços de baixo teor de carbono submetidos a diferentes meios de têmpera, nos quais variaoes na taxa de resfriamento podem promover alteraoes sutis na densidade de defeitos cristalinos e nas tensões internas, afetando de forma limitada a mobilidade das paredes de domínio magnético (Cullity e Graham, 2011; Jiles, 2016).

Estudos experimentais conduzidos em aços de composição similar ao ASTM A36 indicam que, mesmo após tratamentos térmicos de têmpera, a formação de martensita ocorre de maneira restrita, resultando em incrementos modestos da coercividade quando comparados a aços de médio e alto teor de carbono (Tejedor et al., 2018; Sablik et al., 2015). Assim, as variaoes observadas neste trabalho permanecem consistentes com o comportamento magneticamente macio esperado para aços de baixo carbono.

Os valores de remanência magnética (Br) e de densidade de fluxo máxima ($B_{m\acute{a}x}$) também se mantem próximos entre si para todas as condioes analisadas, indicando que a capacidade do material de reter magnetização após atingir a saturação magnética não é significativamente alterada pelos tratamentos térmicos aplicados. De maneira semelhante, a magnetização de saturação (M_s) apresenta valores praticamente constantes, reforçando a similaridade do comportamento magnético global do aço A36 independentemente da condição térmica.

Esse comportamento está em concordância com resultados reportados na literatura, os quais mostram que a magnetização de saturação é predominantemente governada pela composição química do material, em especial pelo teor de ferro, sendo pouco sensível a variaoes microestruturais induzidas por tratamentos térmicos em aços de baixo carbono

(Cullity e Graham, 2011; Callister Jr. e Rethwisch, 2020).

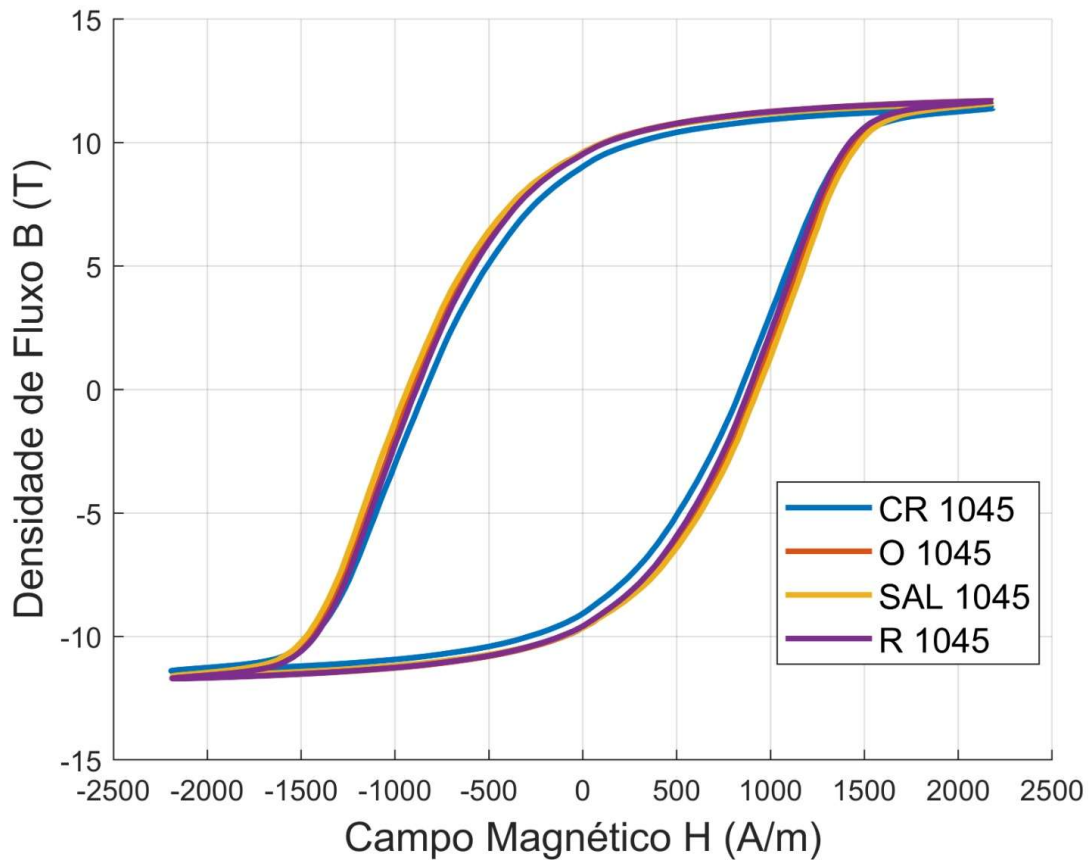
A resposta magnética observada pode ser associada ao baixo teor de carbono do aço ASTM A36, que limita a formação de fases endurecidas, como a martensita, mesmo após tratamentos térmicos de têmpera. Nessa condição, a microestrutura tende a permanecer predominantemente ferrítica-perlítica, o que favorece elevada mobilidade das paredes de domínio magnético e resulta em comportamento magneticamente macio (Jiles, 2016).

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que, para o aço ASTM A36, os tratamentos térmicos promovem apenas modificações graduais nos parâmetros magnéticos, em consonância com o comportamento amplamente reportado para aços de baixo teor de carbono na literatura. Esses resultados fornecem uma base consistente para a comparação com o aço AISI 1045, no qual a maior fração de martensita esperada após têmpera tende a produzir alterações magnéticas mais pronunciadas, conforme será discutido na seção seguinte.

5.2 Resultados da caracterização magnética do aço AISI 1045

A Figura 11 apresenta as curvas de histerese magnética médias do aço AISI 1045 nas condições como recebido (CR), têmpera em óleo (O), têmpera em solução salina (SAL) e revenido (R), obtidas para a orientação de 0° em relação à direção original de laminação. As curvas representam o comportamento médio do material para cada condição, permitindo a comparação direta do efeito dos diferentes tratamentos térmicos sobre a resposta magnética do aço AISI 1045.

Figura 11 – Curvas de histerese magnética médias do aço AISI 1045 para as diferentes condições de tratamento térmico.



Fonte: elaborado pelo autor.

De modo geral, observa-se que o aço AISI 1045 apresenta laços de histerese mais largos quando comparado ao aço ASTM A36, indicando um comportamento magneticamente mais duro. Esse comportamento está associado ao maior teor de carbono do aço 1045, que favorece a formação de microestruturas com maior fração de fases duras após tratamentos térmicos, especialmente martensita. Segundo Cullity e Graham (2011) e Jiles (2016), o aumento da fração de martensita e da densidade de defeitos cristalinos intensifica a resistência ao movimento das paredes de domínio magnético, resultando em maior campo coercivo e maior dissipação de energia por ciclo de histerese.

A condição como recebida (CR) apresenta os menores valores de campo coercivo (H_c) entre as amostras analisadas, conforme indicado na Tabela 2. Esse comportamento reflete uma microestrutura predominantemente ferrítica-perlítica, típica de aços de médio teor de carbono não tratados termicamente, na qual as paredes de domínio magnético encontram menor resistência ao deslocamento. Nessas condições, o material apresenta maior facilidade de magnetização e menor energia dissipada por ciclo de histerese, em concordância com o

comportamento descrito na literatura para microestruturas com baixa densidade de discordâncias (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Tabela 2– Parâmetros magnéticos do aço AISI 1045 obtidos a partir das curvas de histerese

Tratamento	Hc (A/m)	Br (T)	$B_{m\acute{a}x}$ (T)	Ms (A/m)
CR	840,36 ± 12,26	9,05 ± 0,17	11,52 ± 0,14	(9,07±0,12) x 10 ⁶
O	903,62 ± 5,56	9,64 ± 0,12	11,71 ± 0,16	(9,30±0,15) x 10 ⁶
SAL	932,61 ± 6,82	9,62 ± 0,16	11,73 ± 0,08	(9,24±0,09) x 10 ⁶
R	886,11 ± 11,91	9,56 ± 0,13	11,86 ± 0,11	(9,31±0,08) x 10 ⁶

Fonte: elaborada pelo autor.

Após a aplicação dos tratamentos de têmpera em óleo (O) e têmpera em solução salina (SAL), observa-se um aumento significativo do campo coercivo (Hc), conforme apresentado na Tabela 2. Esse comportamento está diretamente associado à formação de martensita, fase caracterizada por elevada densidade de discordâncias e tensões internas, que atuam como obstáculos ao movimento das paredes de domínio magnético. Como consequência, o material passa a exigir campos magnéticos mais elevados para a reversão da magnetização.

Ao comparar os meios de resfriamento utilizados, nota-se que a condição SAL apresenta os maiores valores de Hc entre as condições analisadas. Esse resultado indica uma têmpera mais severa quando comparada ao resfriamento em óleo, levando à formação de uma maior fração volumétrica de martensita. Do ponto de vista metalúrgico, esse comportamento é esperado, uma vez que o resfriamento em solução salina promove maiores taxas de extração de calor, reduzindo a formação de produtos difusionais e favorecendo a transformação martensítica (ASM INTERNATIONAL, 2016; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

A condição revenida (R) apresenta valores intermediários de campo coercivo, situando-se entre os valores observados para as condições temperadas e a condição como recebida. Esse comportamento reflete a redução parcial das tensões internas da martensita durante o revenimento, sem a completa eliminação da influência dessa fase sobre o comportamento magnético do material. Assim, o revenimento promove um equilíbrio entre resistência mecânica e resposta magnética, reduzindo a dureza excessiva da martensita, mas mantendo características magnéticas distintas da microestrutura ferrítica-perlítica original (JILES, 2016).

Os valores de remanência magnética (Br) e densidade de fluxo máximo ($B_{m\acute{a}x}$) apresentaram variações menos acentuadas entre as diferentes condições, indicando que esses parâmetros são menos sensíveis às transformações microestruturais do que o campo coercivo.

Ainda assim, pequenas variações observadas podem ser atribuídas às alterações na distribuição e estabilidade dos domínios magnéticos em função das fases presentes.

A Tabela 2 resume os valores médios e os respectivos desvios padrão dos parâmetros magnéticos extraídos das curvas de histerese do aço AISI 1045 para cada tratamento térmico. A baixa dispersão dos resultados evidencia a boa reprodutibilidade dos ensaios e a confiabilidade do procedimento experimental adotado.

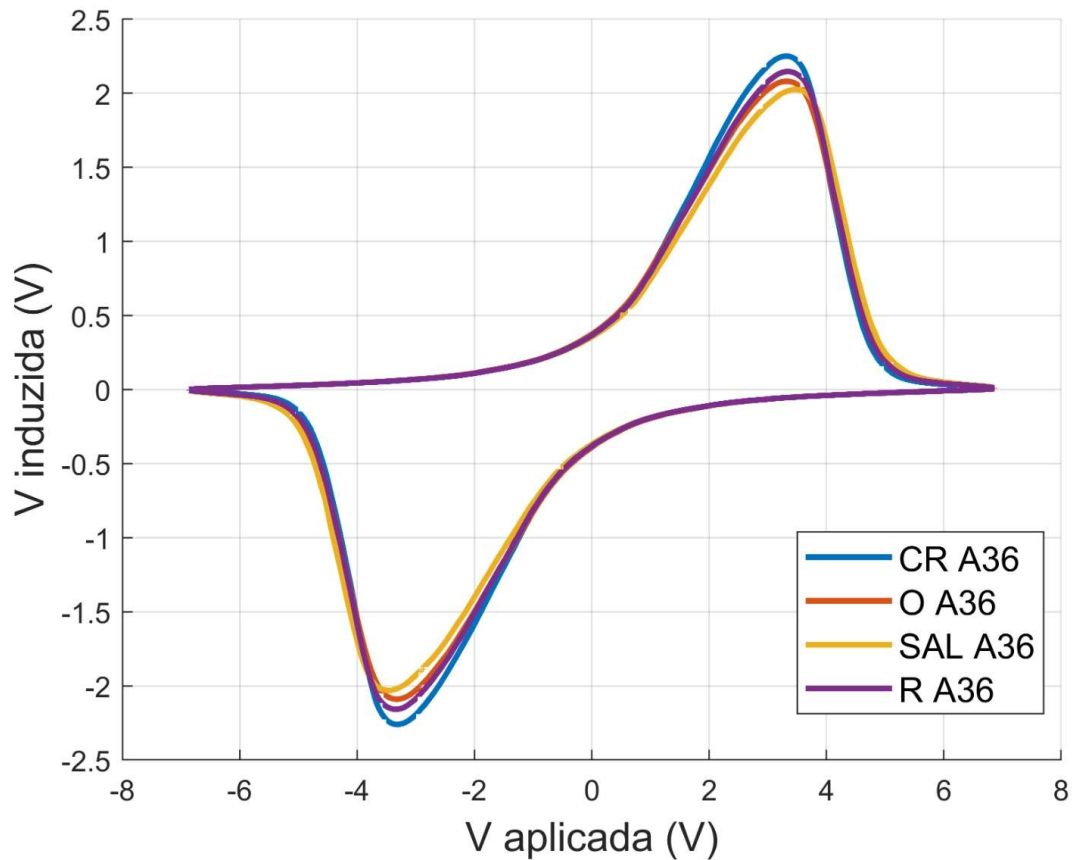
De forma geral, os resultados confirmam que os ensaios magnéticos são sensíveis às alterações microestruturais induzidas por tratamentos térmicos no aço AISI 1045, sendo o campo coercivo um parâmetro particularmente eficaz para a identificação da formação e modificação da martensita. Esses resultados fornecem subsídios importantes para a correlação entre propriedades magnéticas e mecânicas, discutida nas seções subsequentes deste trabalho.

5.3 Tensões aplicadas e tensões induzidas médias

As Figura 12 e Figura 13 apresentam as curvas médias da tensão aplicada à bobina indutora em função da tensão induzida na bobina sensora, obtidas durante os ensaios magnéticos dos aços ASTM A36 e AISI 1045, respectivamente, considerando a orientação de 0° em relação à direção original de laminação. As curvas correspondem à média dos ciclos de magnetização registrados para cada condição de tratamento térmico: como recebido (CR), têmpera em óleo (O), têmpera em salmoura (SAL) e revenido (R).

A tensão aplicada, registrada no Canal 2 (CH2) do osciloscópio, é proporcional à corrente elétrica que percorre a bobina indutora e, conseqüentemente, ao campo magnético aplicado às amostras. Já a tensão induzida, medida no Canal 3 (CH3), está associada à taxa de variação do fluxo magnético no material, conforme a Lei de Faraday, sendo sensível às mudanças microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos.

Figura 12– Curvas médias da tensão aplicada (CH2) em função da tensão induzida (CH3) para o aço ASTM A36, considerando os tratamentos térmicos CR, O, SAL e R.

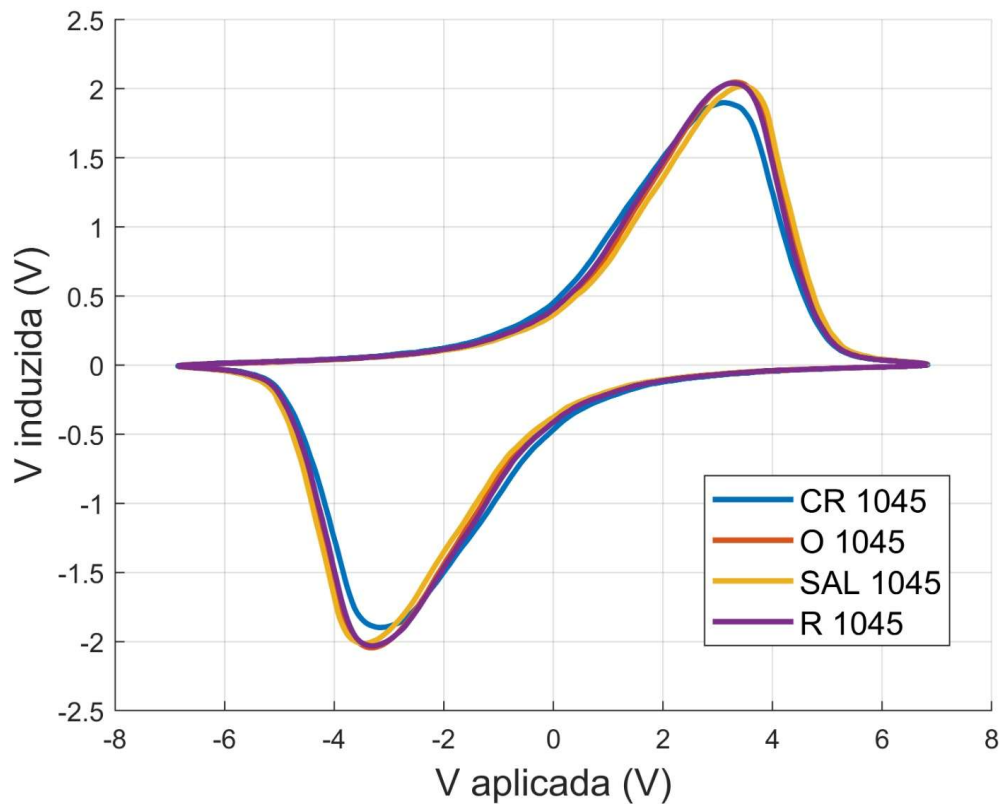


Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 12 mostra que, para o aço ASTM A36, as curvas de tensão induzida apresentam formas semelhantes entre os diferentes tratamentos térmicos, indicando comportamento magnético globalmente próximo. No entanto, observam-se diferenças sutis na amplitude dos picos de tensão induzida, especialmente entre as condições CR, SAL e R.

Essas variações estão associadas às alterações microestruturais promovidas pelos tratamentos térmicos. Embora o aço A36 apresente baixo teor de carbono, a têmpera pode gerar pequenas frações de martensita ou estruturas mais refinadas, aumentando a densidade de discordâncias e dificultando o movimento das paredes de domínio magnético. Como consequência, ocorrem modificações na taxa de variação do fluxo magnético, refletidas diretamente na tensão induzida.

Figura 13 – Curvas médias da tensão aplicada (CH2) em função da tensão induzida (CH3) para o aço AISI 1045, considerando os tratamentos térmicos CR, O, SAL e R.



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 13, referente ao aço AISI 1045, as diferenças entre as curvas tornam-se mais evidentes quando comparadas ao aço A36. Observa-se que as condições submetidas à têmpera (O e SAL) apresentam variações mais pronunciadas na amplitude e na forma da tensão induzida, em relação à condição como recebido e ao material revenido.

Esse comportamento está relacionado ao maior teor de carbono do aço 1045, que favorece a formação de martensita durante a têmpera. A presença dessa fase endurecida aumenta significativamente as tensões internas e a densidade de defeitos cristalinos, restringindo o movimento das paredes de domínio magnético. Dessa forma, a resposta dinâmica do fluxo magnético é alterada, resultando em diferenças mais expressivas nas curvas de tensão induzida.

De modo geral, os resultados obtidos confirmam que as curvas de tensão aplicada versus tensão induzida são sensíveis às modificações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos, especialmente no aço AISI 1045. Essa sensibilidade reforça o potencial do método magnético como ferramenta não destrutiva para a avaliação indireta de alterações microestruturais em aços ao carbono.

5.4 Correlação entre dureza e parâmetros magnéticos

Nesta seção é apresentada a correlação entre os parâmetros magnéticos obtidos a partir das curvas de histerese e os resultados dos ensaios de dureza Rockwell realizados nas amostras dos aços ASTM A36 e AISI 1045. O objetivo principal desta análise é avaliar a viabilidade do uso de parâmetros magnéticos, em especial o campo coercivo (H_c), como indicadores indiretos das alterações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos, particularmente aquelas associadas à formação e ao revenimento da martensita.

5.4.1 Resultados de dureza dos aços ASTM A36 e AISI 1045

Os ensaios de dureza foram realizados com o objetivo de fornecer uma base mecânica para a interpretação das alterações microestruturais induzidas pelos diferentes tratamentos térmicos aplicados aos aços ASTM A36 e AISI 1045. A dureza é uma propriedade diretamente relacionada à presença de fases duras, à densidade de discordâncias e ao nível de tensões internas do material, sendo, portanto, um parâmetro adequado para a correlação com os resultados obtidos nos ensaios magnéticos.

As amostras do aço ASTM A36 foram submetidas ao ensaio de dureza Rockwell na escala B (HRB), enquanto as amostras do aço AISI 1045 foram avaliadas por meio do ensaio de dureza Rockwell na escala C (HRC), conforme descrito na metodologia. Para cada condição de tratamento térmico, que foram como recebido (CR), têmpera em óleo (O), têmpera em solução salina (SAL) e têmpera seguida de revenimento (R). Foram realizadas seis medições distribuídas em diferentes regiões da superfície das amostras, sendo adotados a média aritmética e o desvio padrão como valores representativos.

Tabela 3 - Valores de dureza Rockwell B (HRB) do aço ASTM A36 para diferentes tratamentos térmicos.

Tratamento	HRB 1	HRB 2	HRB 3	HRB 4	HRB 5	HRB 6	HRB médio $\pm \sigma$
CR	72	70	69	70	70	72	70,5 \pm 1,2
O	80	80	80	84	84	80	81,3 \pm 1,9
SAL	96	96	98	97	98	97	97,0 \pm 0,9
R	73	76	76	74	75	75	74,8 \pm 1,1

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 3 apresenta os valores individuais de dureza Rockwell B obtidos para o aço ASTM A36, bem como as respectivas médias e desvios padrão para cada condição de

tratamento térmico. Observa-se que a condição como recebida (CR) apresenta os menores valores de dureza, compatíveis com uma microestrutura predominantemente ferrítica-perlítica. A aplicação dos tratamentos de têmpera promoveu aumento significativo da dureza, sendo o maior valor médio observado para a condição temperada em solução salina (SAL), em função da maior severidade do resfriamento. O tratamento de revenimento (R) resultou em redução da dureza em relação às condições temperadas, associada ao alívio parcial das tensões internas e à modificação da microestrutura endurecida.

Tabela 4 - Valores de dureza Rockwell C (HRC) do aço AISI 1045 para diferentes tratamentos térmicos

Tratamento	HRB 1	HRB 2	HRB 3	HRB 4	HRB 5	HRB 6	HRB médio $\pm \sigma$
CR	15	14	15	18	18	15	15,8 \pm 1,6
O	23	25	30	27	27	29	26,8 \pm 2,4
SAL	30	31	28	30	32	30	30,2 \pm 1,3
R	25	26	26	26	26	28	26,2 \pm 1,0

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 4 apresenta os resultados de dureza Rockwell C obtidos para o aço AISI 1045. De maneira geral, observa-se que esse material apresenta valores de dureza significativamente superiores aos do aço A36, o que é coerente com seu maior teor de carbono. A condição como recebida apresenta os menores valores de dureza, enquanto os tratamentos de têmpera promovem aumento expressivo dessa propriedade, especialmente para a condição SAL. O tratamento de revenimento conduz à redução parcial da dureza em relação à têmpera direta, refletindo a decomposição parcial da martensita e a diminuição das tensões internas, sem retorno completo às condições iniciais do material.

A análise conjunta das Tabela 3 e Tabela 4 evidencia que os tratamentos térmicos exercem influência direta sobre a dureza dos aços avaliados, sendo essa influência mais pronunciada no aço AISI 1045 devido à maior fração de martensita formada. Esses resultados fornecem subsídios fundamentais para a correlação entre dureza e parâmetros magnéticos, apresentada na seção seguinte, reforçando a sensibilidade dos ensaios magnéticos às alterações microestruturais induzidas por tratamentos térmicos.

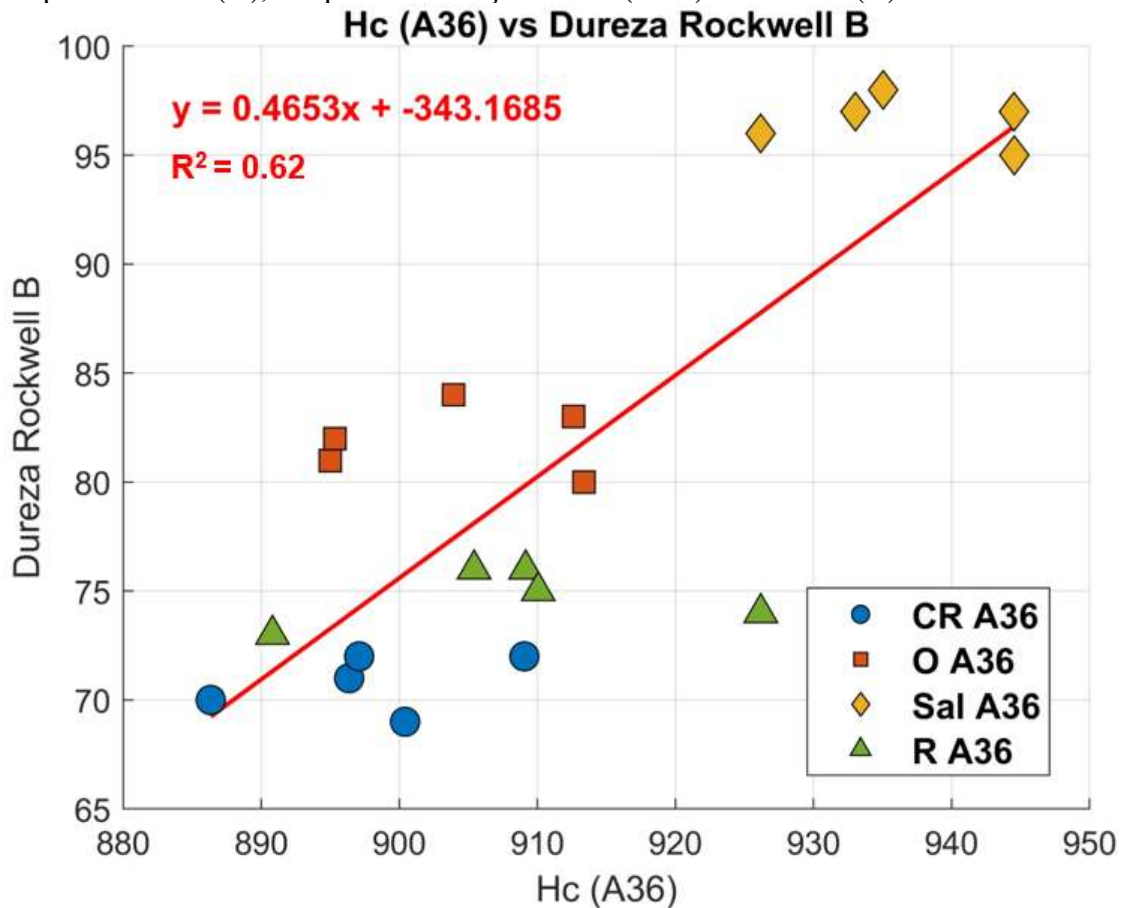
5.4.2 Correlação entre o campo coercivo e a dureza

A correlação entre o campo coercivo (H_c) e a dureza foi avaliada a partir da comparação direta entre os valores experimentais de H_c obtidos das curvas de histerese

magnética e os resultados dos ensaios de dureza Rockwell realizados nas amostras dos aços ASTM A36 e AISI 1045 submetidas aos diferentes tratamentos térmicos. As Figura 14 e Figura 15 apresentam, respectivamente, a relação entre Hc e a dureza Rockwell B para o aço A36 e entre Hc e a dureza Rockwell C para o aço AISI 1045.

De forma geral, observa-se uma tendência crescente entre o campo coercivo e a dureza para ambos os aços analisados, evidenciando uma correlação positiva entre esses parâmetros. Esse comportamento indica que microestruturas associadas a maiores valores de dureza também demandam campos magnéticos mais elevados para a magnetização, ou seja, uma força magnetizante maior para a movimentação dos domínios magnéticos.

Figura 14 – Correlação entre o campo coercivo (Hc) e a dureza Rockwell B para o aço ASTM A36 submetido aos tratamentos térmicos de como recebido (CR), têmpera em óleo (O), têmpera em solução salina (SAL) e revenido (R).

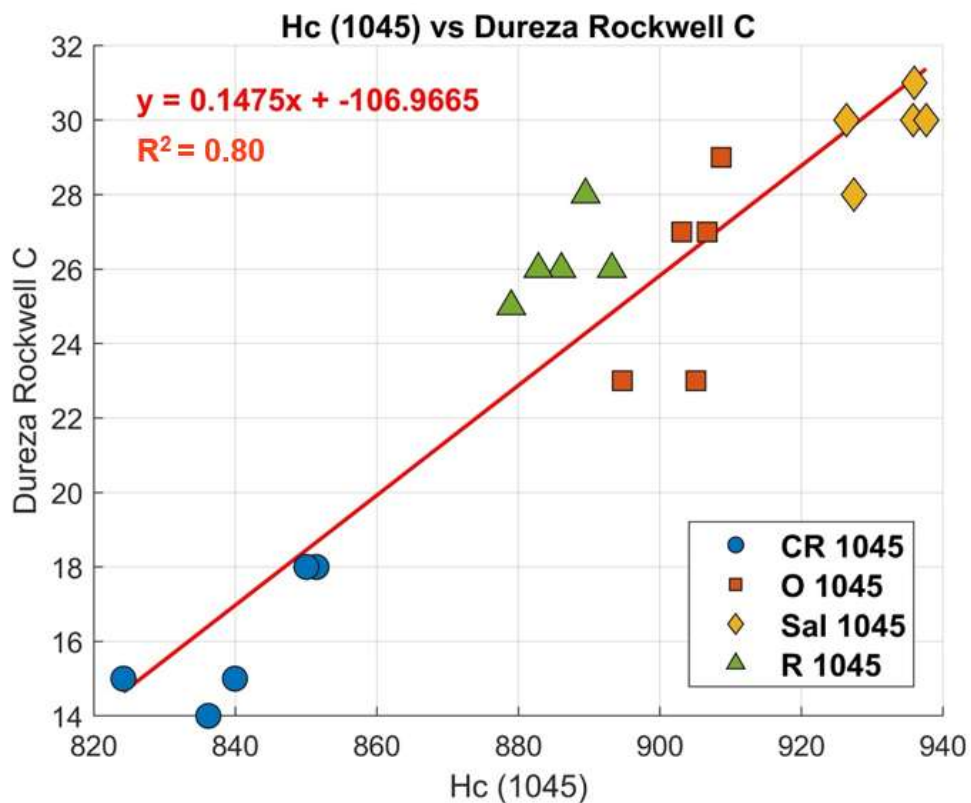


Fonte: elaborada pelo autor.

No caso do aço ASTM A36, representado na Figura 14, a correlação entre Hc e a dureza Rockwell B apresenta uma inclinação mais acentuada da reta de ajuste linear, indicando que pequenas variações no campo coercivo refletem alterações significativas na dureza do

material. Esse comportamento está relacionado ao baixo teor de carbono do A36, que limita a formação de martensita durante os tratamentos térmicos. Assim, apenas a têmpera mais severa, realizada em solução salina, promoveu uma alteração microestrutural mais significativa, resultando em aumento simultâneo da dureza e do campo coercivo. Nos tratamentos realizados em óleo e no revenimento, o resfriamento menos brusco favorece a presença de microestruturas mistas, com menor fração de martensita, o que explica a menor variação observada nesses parâmetros.

Figura 15 – Correlação entre o campo coercivo (Hc) e a dureza Rockwell C para o aço AISI 1045 submetido aos tratamentos térmicos de como recebido (CR), têmpera em óleo (O), têmpera em solução salina (SAL) e revenido (R).



Fonte: elaborada pelo autor.

Para o aço AISI 1045, mostrado na Figura 15, observa-se uma correlação mais consistente entre o campo coercivo (Hc) e a dureza Rockwell C, evidenciada pela maior concentração dos pontos experimentais em torno da reta de ajuste. Essa maior linearidade decorre do fato de que, nesse aço, tanto a dureza quanto o campo coercivo são fortemente governados pelo mesmo mecanismo microestrutural, associado à formação de martensita.

O maior teor de carbono do aço AISI 1045 confere ao material maior temperabilidade, favorecendo a formação de frações significativas de martensita após os tratamentos térmicos de têmpera em óleo e em solução salina. A martensita, caracterizada por elevada densidade de discordâncias, tensões internas e defeitos cristalinos, atua simultaneamente como fase endurecedora aumentando a dureza e como obstáculo ao movimento das paredes de domínio magnético, elevando o campo coercivo.

Como consequência, as variações impostas pelos tratamentos térmicos afetam de maneira semelhante ambos os parâmetros, resultando em uma relação mais direta e bem definida entre H_c e dureza no aço AISI 1045. Esse comportamento contrasta com o observado no aço ASTM A36, no qual a menor fração de martensita e a predominância de microestruturas ferrítico-perlíticas reduzem a sensibilidade conjunta desses parâmetros às alterações microestruturais.

Do ponto de vista microestrutural, o aumento simultâneo da dureza e do campo coercivo está diretamente associado à formação da martensita. Essa fase apresenta uma estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), caracterizada por elevada densidade de discordâncias, altas tensões internas e grande quantidade de defeitos cristalinos. Essas características dificultam o movimento das paredes de domínio magnético, tornando energeticamente mais custosa a reversão da magnetização. Consequentemente, é necessário aplicar um campo magnético externo mais intenso para anular a magnetização remanente, o que se reflete em maiores valores de H_c .

Além disso, o revenimento promove o alívio parcial das tensões internas da martensita, reduzindo a dureza e, simultaneamente, o campo coercivo, conforme observado nos resultados experimentais. Esse efeito reforça a sensibilidade dos parâmetros magnéticos às alterações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos.

Dessa forma, os resultados apresentados indicam que o campo coercivo pode ser utilizado como um parâmetro magnético indireto para estimar a dureza, desde que considerada a natureza estatística dessa correlação. Para o aço AISI 1045, a relação entre H_c e dureza Rockwell C apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,80$, indicando uma boa correlação, embora não perfeita. A dispersão observada em torno da reta de ajuste pode ser atribuída a variações microestruturais locais, como diferenças na fração de martensita formada, presença de tensões residuais e incertezas experimentais associadas aos ensaios mecânicos e magnéticos. Ainda assim, o valor de R^2 obtido evidencia que o ensaio magnético apresenta elevado potencial como ferramenta não destrutiva para a avaliação indireta da dureza e do estado microestrutural de aços ao carbono com maior teor de carbono, como o AISI 1045.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento no comportamento magnético e mecânico dos aços ASTM A36 e AISI 1045, por meio da análise de parâmetros magnéticos extraídos de curvas de histerese, correlacionando-os com resultados de ensaios de dureza. A metodologia adotada permitiu investigar a relação entre transformações microestruturais induzidas pelos tratamentos térmicos e a resposta magnética dos materiais, com ênfase no campo coercivo.

Os resultados obtidos para o aço ASTM A36 indicaram que, devido ao seu baixo teor de carbono, a formação de martensita após os tratamentos de têmpera é limitada, refletindo-se em variações relativamente moderadas tanto nos valores de dureza quanto nos parâmetros magnéticos analisados. Ainda assim, observou-se que a têmpera em solução salina promoveu o maior aumento do campo coercivo e da dureza, quando comparada à têmpera em óleo e à condição revenida. Esse comportamento está associado à maior severidade do resfriamento em meio salino, resultando em maior densidade de defeitos cristalinos e tensões internas. O revenimento, por sua vez, conduziu a valores próximos à condição como recebida, evidenciando o efeito do alívio de tensões e da redução da fração de martensita.

Para o aço AISI 1045, que apresenta maior teor de carbono e, conseqüentemente, maior temperabilidade, os efeitos dos tratamentos térmicos foram mais pronunciados. A têmpera, especialmente em solução salina, promoveu um aumento significativo da dureza e do campo coercivo, associado à formação de uma fração mais elevada de martensita. O tratamento de revenimento mostrou-se eficaz na redução parcial do campo coercivo e da dureza, indicando a diminuição das tensões internas e a estabilização da microestrutura, sem retorno completo à condição inicial. Esses resultados confirmam a forte dependência do comportamento magnético em relação à microestrutura e às fases presentes no material.

A análise da correlação entre o campo coercivo e a dureza evidenciou uma relação aproximadamente linear para ambos os aços, reforçando que o aumento da dureza está associado à maior densidade de discordâncias, tensões internas e à presença de martensita, que dificulta o movimento das paredes de domínio magnético, exigindo campos magnéticos mais elevados para a reversão da magnetização. Essa relação foi mais bem definida no aço AISI 1045, em função de sua maior sensibilidade microestrutural aos tratamentos térmicos, enquanto no aço ASTM A36 a correlação mostrou-se mais limitada, coerente com sua menor capacidade de formação de martensita.

Conclui-se, portanto, que a correlação entre o campo coercivo e a dureza apresenta maior potencial como ferramenta não destrutiva para a avaliação indireta de alterações microestruturais em aços ao carbono, especialmente em materiais com maior teor de carbono e maior sensibilidade aos tratamentos térmicos. Os resultados obtidos indicam que o uso de parâmetros magnéticos específicos, em particular o campo coercivo, pode contribuir de forma relevante para aplicações industriais e acadêmicas voltadas ao controle de qualidade e à caracterização de materiais ferromagnéticos. Trabalhos futuros podem aprofundar essa abordagem por meio da investigação de diferentes frequências de excitação, outros tratamentos térmicos e classes de aços, ampliando a robustez da correlação entre propriedades magnéticas e mecânicas.

REFERÊNCIAS

- AKBAY, T., ATKINSON, C. **The influence of diffusion of carbon in ferrite as well as in austenite on model of reaustenitization ferrite/cementite mixtures in Fe-C steels.** Journal of Materials Science. v.31, p.2221-2226, 1996.
- ANKENER, W. et al. **Micromagnetic and microstructural characterization of ferromagnetic steels.** Sensors (MDPI) (2022).
- ASM INTERNATIONAL. **ASM handbook: properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys.** v. 1. Materials Park: ASM International, 1991.
- ASM INTERNATIONAL. **Heat treating of carbon and alloy steels.** ASM Handbook, v. 4. Materials Park: ASM International, 2013.
- BHADESHIA, H. K. D. H. **Martensite and bainite in steels: transformation mechanisms.** London: Institute of Materials, 2001.
- BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism.** Princeton: IEEE Press, 1993.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction.** 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction.** 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- CHIKAZUMI, S. **Physics of ferromagnetism.** 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C.D. **Introduction to magnetic materials.** 2. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011.
- DUBOIS, M.; FAVERGEON, J. **Magnetic characterization of steel microstructures.** NDT & E International, v. 34, n. 2, p. 113–120, 2001.
- EDGAR, Apaza Huallpa. **Caracterização da transformação martensítica em temperaturas criogênicas.** Trabalho acadêmico – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- EDMONDS, D. V.; HE, K.; RIZZO, F. C.; DE COOMAN, B. C.; MATLOCK, D. K.; SPEER, J. G. **Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment.** Materials Science and Engineering: A, v. 438-440, p. 25-34, 2006.
- ERNANDES, K. C.; SILVA JÚNIOR, E. V. C.; SOUZA, V. B. **Estudo sobre a influência dos diferentes meios resfriadores com a dureza resultante para o aço sae 1045.** Revista Interdisciplinar Pensamento Científico, v. 4, n. 2, p. 112-123, 2018.
- FERREIRA, C. R. et al. **Tratamento térmico por indução eletromagnética em tubos de aço SAE 1045 para produção de hastes de sondagem geológica, REM-** Revista Escola de Minas. v.57, n. 1, p.23-26, 2004.

GUEDES, F. N. J.; MONNERAT, C. S. **Avaliação da resistência à corrosão no aço SAE 1045 devido aos tratamentos térmicos**. Revista Engenharia de Interesse Social, v. 1, n. 2, p. 1-9, 2017

HONEYCOMBE, R. W. K.; BHADSHIA, H. K. D. H. **Steels: microstructure and properties**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

HUBERT, A.; SCHÄFER, R. **Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures**. Berlin: Springer, 1998.

IDZA, I. R.; et al. **Influence of evolving microstructure on magnetic-hysteresis-loop properties**. Materials Science and Engineering, 2012.

JIAO, J. et al. **Experimental evaluation and theoretical analysis of magnetic hysteresis and microstructure effects**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2022).

JILES, D. C. **Magnetic methods in nondestructive testing**. Materials Evaluation, v. 48, n. 2, p. 271–276, 1990.

JILES, D. C.; ATHERTON, D. L. **Theory of ferromagnetic hysteresis**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 61, n. 1–2, p. 48–60, 1986.

JILES, D. **Introduction to magnetism and magnetic materials**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

KRAUSS, G. **Steels: processing, structure, and performance**. 2. ed. Materials Park: ASM International, 2015.

LESLIE, W. C. **The physical metallurgy of steels**. 1. ed. McGraw-Hill, 1982. 396p.

MACHADO, N. T. B.; DOS PASSOS, M. L. M.; RECCO, A. A. C.; RIANI, J. C. Análise das propriedades mecânicas do aço 1045 nitretado a plasma: com e sem tratamento de revenimento. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 5426-5433, 2014.

MOHAPATRA, J. N.; KUMAR, S.; AKELA, A. K.; et al. **Magnetic hysteresis loop as a tool for the evaluation of microstructure and mechanical properties of steels**. Journal of Materials Engineering and Performance.

MOORTHY, V.; SHAW, B. A. **Evaluation of residual stress using magnetic methods**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 223, n. 1, p. 43–52, 2001.

NASCIMENTO FILHO, Emanuel Seixas. **Avaliação do estado de tensões por medidas não destrutivas ultrassônicas e magnéticas**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. **Phase transformations in metals and alloys**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

PULLMAN, R.; ALTPETER, I. **Magnetic nondestructive evaluation of steels**. Materials Science Forum, v. 210–213, p. 151–158, 1996.

ROMERO, Silvio. **Caracterização magnética de aços submetidos a diferentes tratamentos térmicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

SABLIK, M. J. **Magnetic Barkhausen noise and hysteresis modeling**. *Journal of Applied Physics*, v. 74, n. 7, p. 4270–4278, 1993.

SABLIK, M. J.; JILES, D. C. **Coupled magnetoelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis**. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 29, n. 3, p. 2113–2123, 1993.
Spaldin, N.A. **Magnetic materials, fundamentals and applications**, 2ed. Cambridge press, 2011.

Stefania C-G., Atherton D.L., Clapham L. **Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel**. *Acta Mater.* 48, 3545, 2000.

SUDO, M., IWAI, T. **Deformation behavior and mechanical properties of ferrite-bainite-martensite (triphase) steel**. *Transactions ISIS*. v.23, p. 294-304, 1983.

THOMPSON, S. M.; JILES, D. C. **A review of magnetic methods for nondestructive evaluation**. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 32, n. 3, p. 445–452, 1997.

THOMPSON, S. M.; JILES, D. C. **Review of magnetic nondestructive evaluation methods**. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 29, n. 6, p. 3194–3198, 1993.

TOTEN, G. E.; HOWES, M. A. H.; INOUE, T. **Handbook of residual stress and deformation of steel**. Materials Park: ASM International, 2002.