



**Arthuci Francis Pereira Lima**

**Detecção de Tratamentos Térmicos e Anisotropia Magnética em um Aço SAE 4340 Através de Medidas de Permeabilidade Magnética**

**João Pessoa - PB  
Abril de 2021**



**Arthuci Francis Pereira Lima**

# **Detecção de Tratamentos Térmicos e Anisotropia Magnética em um Aço SAE 4340 Através de Medidas de Permeabilidade Magnética**

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

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Edgard de Macedo Silva, Dr.  
Orientador

João Pessoa – PB, Abril de 2021  
©Arthuci Francis Pereira Lima – arthuci@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP  
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

L732d

Lima, Arthuci Francis Pereira.

Detecção de Tratamentos Térmicos e Anisotropia Magnética em um Aço SAE 4340 Através de Medidas de Permeabilidade Magnética / Arthuci Francis Pereira Lima. – 2021.

77 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Edgard de Macedo Silva.

1. Engenharia de materiais. 2 Ensaio eletromagnético. 3. Ensaios não-destrutivos. 3. Permeabilidade magnética. 4. Tratamentos térmicos. 5. Anisotropia Magnética. I. Título.

CDU 620.179

Bibliotecária responsável Josinete Nóbrega de Araújo – CRB15/116

# **Detecção de Tratamentos Térmicos e Anisotropia Magnética em um Aço SAE 4340 Através de Medidas de Permeabilidade Magnética**

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

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27/04/2021.

## **BANCA EXAMINADORA**



---

**Edgar de Macedo Silva, Dr. – IFPB**  
Orientador



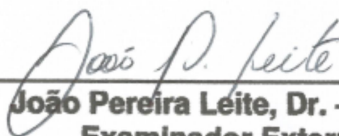
---

**Alfredo Gomes Neto, Dr. – IFPB**  
Examinador Interno



---

**Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB**  
Examinador Interno



---

**João Pereira Leite, Dr. – UFPB**  
Examinador Externo

João Pessoa – PB  
Abril de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por compartilhar meus planos e nortear o caminho a ser seguido em cada fase da minha vida.

Aos professores que fizeram parte da minha vida até o presente momento, não esquecendo os do processo de alfabetização, os do SENAI que me apoiaram na vida profissional e na vida pessoal com conselhos que trago até hoje, os do IFPB nos cursos técnicos que sempre com vasto conhecimento técnico me fizeram buscar os seus níveis de conhecimento – fato que busco até hoje, e os da graduação e PPGEE que além de excelentes professores tecnicamente falando, se destacam no campo das relações interpessoais, o que foi um diferencial para mim. Não podia deixar de citar de forma nominal meu orientador, o professor Dr. Edgard, que já no curso técnico se mostrava bastante solidário, e agora no programa de mestrado continuou a demonstrar essa característica quando me acolheu no grupo do GSCMat e nortear os caminhos que precisava traçar a fim de alcançar minhas metas.

Aos colegas do trabalho que me ajudaram nesse processo de obtenção de conhecimento.

E não podia deixar de mencionar a família, em especial minha mãe (Zilva) com todo tipo de apoio que eu poderia receber e minha querida esposa (Jorcyane), que também foi muito paciente, se mostrou compreensiva em saber que durante vários finais de semanas e feriados prolongados não poderíamos sair, e sim tomar bastante café nas rotinas de estudo.

## EPÍGRAFE

“Sustentar o fogo, que a vitória é  
nossa”.

*Almirante Barroso*

## RESUMO

Variações microestruturais resultam em mudanças das propriedades magnéticas dos materiais ferromagnéticos. Essas levam à mudança na permeabilidade magnética dos materiais e, baseado nisso, ensaios eletromagnéticos vêm sendo desenvolvidos para identificar as variações das microestruturas. No presente trabalho, um ensaio eletromagnético baseado na aplicação de intensidades de campo na região de reversibilidade magnética é aplicado para detecção de efeito de tratamentos térmicos em um aço SAE 4340, que possui alta capacidade de endurecimento em profundidade e possui vasta aplicação na indústria, como na aeroespacial onde é usado em trens de pouso de aviões. Quatro diferentes tratamentos térmicos: um recozimento na temperatura de 850 °C, austenitização a 1000 °C seguida de resfriamento ao forno, em óleo e em água foram analisados e comparados com a condição como recebida do material em estudo. Foi aplicada uma intensidade de campo magnético fixa no centro das amostras circulares, a fim de se analisar o valor da permeabilidade magnética para os tratamentos aplicados. Também foi analisada a influência dos tratamentos na anisotropia magnética do aço em estudo. Uma intensidade de campo magnético fixa foi aplicada em amostras circulares tratadas, bem como essas foram rotacionadas com passos de 45 até 360 graus. A análise dos resultados de permeabilidade magnética obtidos mostra que o ensaio é capaz de diferenciar os tratamentos, sendo sensível a variação da quantidade do constituinte ferrita, que é ferromagnética, bem como a presença da estrutura martensita mostrando poder ser correlacionado com medidas de dureza. Além disso, foi possível constatar a presença de uma direção de fácil magnetização, independente da microestrutura do tratamento térmico empregado.

Palavras-Chave: ensaio eletromagnético; permeabilidade; tratamentos térmicos.

## ABSTRACT

Microstructural variations result in changes in the magnetic properties of ferromagnetic materials. These lead to changes in the magnetic permeability of materials and, based on this, electromagnetic tests have been developed to identify variations in microstructures. In the present work, an electromagnetic test based on the application of field intensities in the region of magnetic reversibility is applied to detect the effect of heat treatments on a SAE 4340 steel, which has a high depth hardening capacity and has a wide application in the industry, such as in aerospace where it is used in aircraft landing gear. Four different heat treatments: an annealing at a temperature of 850 °C, austenitization at 1000 °C followed by cooling in the oven, in oil and in water were analyzed and compared with the condition as received from the material under study. A fixed magnetic field intensity was applied in the center of the circular samples, in order to analyze the value of the magnetic permeability for the applied treatments. The influence of treatments on the magnetic anisotropy of the steel under study was also analyzed. A fixed magnetic field strength was applied to treated circular samples, and these were rotated with steps from 45 to 360 degrees. The analysis of the obtained magnetic permeability results shows that the test is able to differentiate the treatments, being sensitive to the variation in the amount of the ferrite constituent, which is ferromagnetic, as well as the presence of the martensite structure showing that it can be correlated with hardness measures. In addition, it was possible to verify the presence of a direction of easy magnetization, independent of the microstructure of the heat treatment employed.

Keywords: electromagnetic test; permeability; heat treatments.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos.....	21
Figura 2-	Curva de magnetização característica para aços e ferro-fundido.....	23
Figura 3-	Região de interface dos domínios magnéticos – paredes de domínio a 180°.....	23
Figura 4-	Representação da influência dos materiais com diferentes permeabilidades nas linhas de fluxo magnético.....	25
Figura 5-	Curva de magnetização para as amostras Tipo 1 – SAE 1045.....	26
Figura 6-	Equipamento experimental de teste: (1) sistema de alimentação; (2) solenoide; (3) sensor Hall; (4) amostra; (5) placa de aquisição de dados; (6) computador; (7) bancada; (8) potenciômetro.....	27
Figura 7-	Configuração experimental usada para o ensaio não destrutivo baseado no efeito Hall.....	28
Figura 8-	Variação da permeabilidade magnética, dureza e meia altura para as amostras de material envelhecidas a 425 °C em a) e a 475 °C em b).....	30
Figura 9-	Campo magnético induzido versus ângulo de rotação: amostra com 2 mm de espessura, no centro e na borda (a) e dependência angular a 2 mm do centro (b).....	32
Figura 10-	Diagrama de fases Fe-C.....	33
Figura 11-	Exemplificação da faixa de recozimento dos aços.....	35
Figura 12-	Microestrutura de um aço AISE 1010 submetida a recozimento com aumento de 50x.....	36
Figura 13-	Temperaturas recomendadas, para aços carbono, para a austenitização para recozimento, normalização e têmpera.....	37
Figura 14-	Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento e normalização, superpostos à curva TRC de um aço.....	38
Figura 15-	Microestrutura de um aço AISE 1010, normalizado com aumento de 50x.....	38

Figura 16-	Microestrutura de um aço SAE 4340 submetida a têmpera com água obtida por MEV.....	39
Figura 17-	Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenimento.....	40
Figura 18-	Micrografias MEV representativas das amostras: (a) martensita (b) martensita revenida a 600 °C, (c) perlita-ferrita fina, (d) ferrita-perlita grossa.....	45
Figura 19-	Valores de dureza das amostras (M: martensita; TM-600: martensita revenida a 600 °C; FP-F: perlita-ferrita fina; CP-F: perlita-ferrita grossa).....	46
Figura 20-	Valores dos parâmetros magnéticos para várias fases obtidas por medições de ruído de Barkhausen (M: martensita; TM- 600: martensita revenida a 600 °C; FP-F: perlita-ferrita fina; CP-F: perlita-ferrita grossa).....	47
Figura 21-	Microestruturas obtidas por MEV de aço SAE-4340 em condições de (a) recozido, (b) resfriado a óleo e (c) resfriado com água.....	48
Figura 22-	Variação da dureza com diferentes tratamentos térmicos com: (a) SAE-1040 e (b) SAE-4340.....	49
Figura 23-	Influência de diferentes fases do SAE-4340 na velocidade do som.....	50
Figura 24-	Relação entre dureza Vickers e velocidade do som em diferentes teores de ferrita-perlita no SAE-4340.....	51
Figura 25-	Desenho das amostras do aço 4340 com suas espessuras e tratamentos térmicos.....	53
Figura 26-	Representação esquemática dos ciclos térmicos empregados nas amostras do aço SAE-4340.....	53
Figura 27-	Bancada experimental para o ensaio de permeabilidade magnética.....	54
Figura 28-	Equipamento de ensaio (GSCMat, IFPB, PB): (1) fonte de alimentação; (2) cabo blindado; (3) micrômetro; (4) amostra; (5) solenoide; (6) gaiola de Faraday; (7) placa de dados; (8) computador; (9) sensor Hall; (10) bateria 12 Vcc .....	55
Figura 29-	Durômetro RASN utilizado no ensaio.....	58

Figura 30-	Esquema de posicionamento dos componentes da bancada para estudo da detecção do tratamento térmico no material: amostra (1), sensor Hall (2), solenoide (3) e fonte (4).....	59
Figura 31-	Esquema de posicionamento do sensor para medições do efeito da anisotropia com aplicação do campo induzido.....	60
Figura 32-	Micrografia óptica da amostra como recebida (200x).....	62
Figura 33-	Micrografia óptica da amostra recozida a 850 °C (200x).....	62
Figura 34-	Micrografia óptica da amostra resfriada ao forno (recozimento a 1000 °C e 200x).....	63
Figura 35-	Micrografia óptica da amostra resfriada com óleo (500x).....	64
Figura 36-	Micrografia óptica da amostra resfriada com água (100% de martensita/500x).....	65
Figura 37-	Valores de dureza Rockwell C obtidos para cada amostra em função dos tratamentos aplicados.....	66
Figura 38-	Variação das medidas de permeabilidade magnética em função do tratamento empregado na amostra como recebida, recozida (850 °C), resfriada no forno (recozida a 1000 °C), resfriada em óleo e resfriada em água.....	67
Figura 39-	Correlação entre dureza x permeabilidade magnética para as amostras do aço SAE-4340.....	68
Figura 40-	Variação da permeabilidade magnética de cada amostra com seu respectivo tratamento térmico, após as mesmas serem rotacionadas de 45 em 45 graus.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais famílias de aços conforme a classificação ABNT (COLPAERT, 2008).....	43
Tabela 2 - Variação da composição química do aço SAE 4340 (TARTAGLIA, 2008).....	44
Tabela 3 - Resumo com os tratamentos térmicos aplicados nas amostras...	52
Tabela 4 - Características do solenoide.....	56

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISE	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
ASM	<i>American Society for Metals</i> (Sociedade Americana de Metais)
B	Campo magnético induzido
Br	Remanescência
C	Carbono
Cr	Cromo
END	Ensaaios Não Destrutivos
Fe <sub>3</sub> C	Cementita
G	Gauss
GSCMat	Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais
H	Intensidade de campo magnético aplicado
h	Horas
HB	<i>Hardness Brinell</i> (Dureza Brinell)
Hc	Campo coercitivo
HV	<i>Hardness Vickers</i> (Dureza Vickers)
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i>
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
K	Constante de anisotropia
L	Comprimento do solenoide
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mo	Molibdênio
MO	Microscópio Óptico

Ms	Magnetização de saturação
N	Número de Espiras
Ni	Níquel
NBR	Norma Brasileira
PM	Parâmetros Magnéticos
RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotivos)
SI	Sistema Internacional de Unidades
Ss	Sensibilidade do sensor Hall
T	Tesla
TRC	Transformação por Resfriamento Contínuo
TC	Tetragonal Compacto
°C	Graus Celsius
$\mu$	Permeabilidade magnética do material
$\mu_0$	Permeabilidade do vácuo
$\mu_r$	Permeabilidade relativa
$\Phi$	Fluxo magnético
$\alpha$	Ferrita
$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$	Perlita
$\gamma$	Austenita
$\Omega$	Ohms

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1.	OBJETIVOS.....	19
1.1.1.	Objetivo Geral.....	19
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	19
1.2.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1.	MAGNETIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	21
2.2.	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA.....	24
2.3.	TRABALHOS RELACIONADOS.....	27
2.4.	TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	32
2.4.1.	Recozimento.....	34
2.4.2.	Normalização.....	36
2.4.3.	Têmpera e Revenimento.....	38
2.5.	AÇO SAE-4340.....	40
2.6.	CARACTERIZAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS POR MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS.....	44
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1.	MATERIAL.....	52
3.2.	EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE.....	54
3.3.	ENSAIO EXPERIMENTAL.....	55
3.3.1.	Determinação da permeabilidade magnética.....	56
3.3.2.	Análise microestrutural do material.....	57
3.3.3.	Análise da dureza do material.....	58
3.3.4.	Estudo do comportamento da permeabilidade magnética em função das microestruturas obtidas no material.....	58
3.3.5.	Estudo do efeito da anisotropia do material.....	59
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1.	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	61
4.2.	ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA EM FUNÇÃO DA MICROESTRUTURA DOS TRATAMENTOS.....	66
4.3.	ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE DUREZA X PERMEABILIDADE MAGNÉTICA.....	68
4.4.	ESTUDO DA ANISOTROPIA MAGNÉTICA DO MATERIAL.....	69

5.	CONCLUSÃO.....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
	ANEXO A - Campo magnético em relação à intensidade.....	77



## 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos dos Ensaaios Não Destrutivos (END) é certificar que o componente que está sendo examinado está apto para o serviço pretendido. A Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI) define os END como sendo técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. A maneira mais comum de fazer isso é examinando o componente com END nas aplicações mais convencionais para detectar falhas ou descontinuidades, tais como vazios, inclusões, rachaduras, nos materiais ou estruturas. Já para aplicações não convencionais, pode-se utilizá-las para detectar transformações microestruturais.

Existem algumas técnicas de END já consolidadas no mercado que são: Correntes Parasitas, Emissão Acústica, Radiografia, Radioscopia, Gamagrafia, Ensaio Visual, Estanqueidade, Líquido Penetrante, Partículas Magnéticas, Ultrassom e Termografia (ABENDI, 2012). Dentre estas, destacam-se, com uma grande relação de proximidade do presente estudo, que podem acompanhar as variações microestruturais de materiais ferromagnéticos, as técnicas de correntes parasitas e a de ruído de Barkhausen. O presente trabalho também se propõe a acompanhar essas variações microestruturais por meio da análise da permeabilidade magnética.

A otimização e controle das propriedades de componentes do aço é vital, pois a concorrência na indústria exige melhorias no desempenho dos equipamentos que cada vez mais requerem uma maior produtividade. Assim, o desenvolvimento de técnicas não destrutivas para caracterização de microestruturas e determinação de propriedades mecânicas tem sido um desafio por muitos anos (GÜR e ÇAM, 2007).

Neste trabalho se busca acompanhar as variações microestruturais resultantes de tratamentos térmicos que provocam mudanças das propriedades magnéticas do aço SAE 4340. Essas mudanças são as alterações da permeabilidade magnética. Esse tipo de END já foi utilizado por outros autores em outros materiais que comprovaram sua eficácia, como Silva *et al.* (2016b) que utilizaram essa técnica para acompanhar as variações microestruturais de um aço inoxidável duplex UNS S31803 que ocorreu devido à decomposição monofásica.

Eles verificaram a partir dos resultados obtidos que a permeabilidade magnética pode ser usada para rastrear com sucesso a formação da fase  $\alpha'$  a partir de uma fase  $\alpha$  em um aço inoxidável duplex. Em outro estudo, Silva *et al.* (2016a) estudaram amostras de um aço laminado SAE 1045 (formado por microestruturas de perlita e ferrita) que foram submetidas a campos magnéticos induzidos na região de reversibilidade de domínios magnéticos para detecção da direção de fácil magnetização. Eles chegaram à conclusão, a partir dos resultados obtidos, que a abordagem não destrutiva proposta foi promissora para avaliar a anisotropia magnética em aços independentemente da geometria da amostra.

Na década de 1960, uma crescente demanda impulsionou a evolução das ligas metálicas tratadas termicamente, tudo por imposição dos programas aeroespaciais que tinham a intenção de obterem materiais mais resistentes mecanicamente. Essa demanda gerou uma série de combinações até se chegar às ligas com percentual de carbono mais baixo e altos teores de elementos de liga, se destacando aí o aço SAE-4340 (CARDOSO, 2011). Uma das principais características do aço SAE 4340 é sua elevada temperabilidade, endurecimento por formação de martensita, onde na sua composição química destacam-se alguns elementos como o cromo, níquel e molibdênio. Isso o torna desejável na fabricação de diferentes componentes mecânicos, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. Outra característica importante é sua elevada resistência à fadiga.

A busca por se caracterizar microestruturas obtidas por diferentes tratamentos térmicos sempre é apresentada no decorrer dos anos através de diferentes técnicas, como a de Gur e Çam (2007) que utilizaram o ruído magnético de Barkhausen e métodos ultrasônicos para a avaliação da microestrutura dos aços comerciais SAE 1040 e SAE 4140, após a realização de alguns tratamentos térmicos. Cavalcante *et al.* (2008) também demonstraram um experimento onde amostras de aço carbono SAE 1045 submetidas a diferentes tratamentos foram expostas a um campo magnético e os valores de tensão Hall foram medidos, correlacionando a permeabilidade com as microestruturas obtidas. Já El Rayes *et al.* (2014) utilizaram a velocidade ultrasônica, a atenuação sonora e os resultados de ensaios mecânicos dos aços SAE-1040 e SAE-4340 para efetuarem a caracterização microestrutural após três tipos de tratamento térmicos.

No presente trabalho é feito um estudo de detecção de tratamentos térmicos e anisotropia magnética em um aço 4340. Este é aplicado na região de densidade de fluxo magnético  $B$  abaixo de 0,1 T, onde se predomina a região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos dos aços. Deste modo se tem como detectar variações de microestruturas e consequentemente de propriedades mecânicas devida à imposição de ciclos térmicos em materiais ferromagnéticos. Por meio do estudo da anisotropia magnética se verifica a direção de fácil magnetização nas amostras e se ocorrem alterações decorrentes das imposições de ciclos térmicos. De acordo com a definição da ABENDI, o ensaio é END e possui várias vantagens, onde para essa pesquisa, ressalta-se a vantagem do baixo custo do equipamento e o fato de poder ser executado na peça em serviço. Outro ponto que merece destaque é o fato de que por ser a permeabilidade uma propriedade intrínseca do material, as mudanças geométricas não alteram os resultados.

## 1.1. OBJETIVOS

A seguir estão relacionados os principais objetivos que guiam este trabalho:

### 1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo detectar tratamentos térmicos e anisotropia magnética em um aço SAE-4340 por medidas de permeabilidade magnética.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- i. Determinar como diferentes tratamentos térmicos alteram os valores de permeabilidade de um aço SAE 4340, na região de reversibilidade do movimento dos domínios magnéticos.
- ii. Correlacionar os resultados de permeabilidade com as microestruturas obtidas nos tratamentos.
- iii. Correlacionar os resultados de permeabilidade com os resultados de dureza das amostras tratadas.

- iv. Analisar a presença de anisotropia magnética no aço estudado e o efeito do tratamento térmico na direção de fácil magnetização.

## 1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução, composta por formulação do problema e objetivos. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, que trata dos conceitos necessários para o entendimento da abordagem proposta neste trabalho. Ainda dentro desse capítulo são apresentados os trabalhos relacionados. No capítulo três está abordada a metodologia. Posteriormente, no quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões colhidos ao longo da pesquisa. E por último, no capítulo cinco está a conclusão decorrente da pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

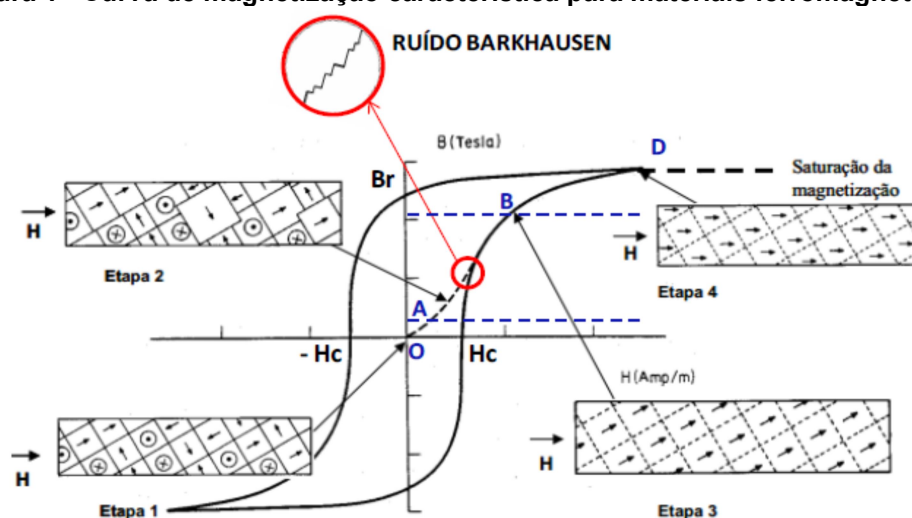
Dentre a enorme gama de END existentes os métodos magnéticos constituem uma importante classe, sendo utilizados para avaliação de defeitos e descontinuidades, desenvolvidos para a caracterização do estado microestrutural dos materiais. A grande sensibilidade das propriedades magnéticas às alterações microestruturais é o fator que impulsiona esta aplicação (PRAXEDES, 2012).

Não são recentes os estudos na área dos domínios magnéticos, onde já se observava que qualquer irregularidade interna é uma provável causa de atraso na movimentação das paredes do domínio, promovendo variações descontínuas na magnetização (BECKER apud PRAXEDES, 2012). Esses estudos possibilitam que as alterações microestruturais, seja devido às influências mecânicas, tratamentos térmicos ou composição química, possam ser avaliadas através da observação das propriedades magnéticas, sem a necessidade de causar dano estrutural ou superficial ao material ou componente.

### 2.1. MAGNETIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O comportamento dos materiais ferromagnéticos é representado pela curva de magnetização, que relaciona duas variáveis: intensidade de campo magnético  $H$  e densidade de fluxo magnético  $B$ . Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos.

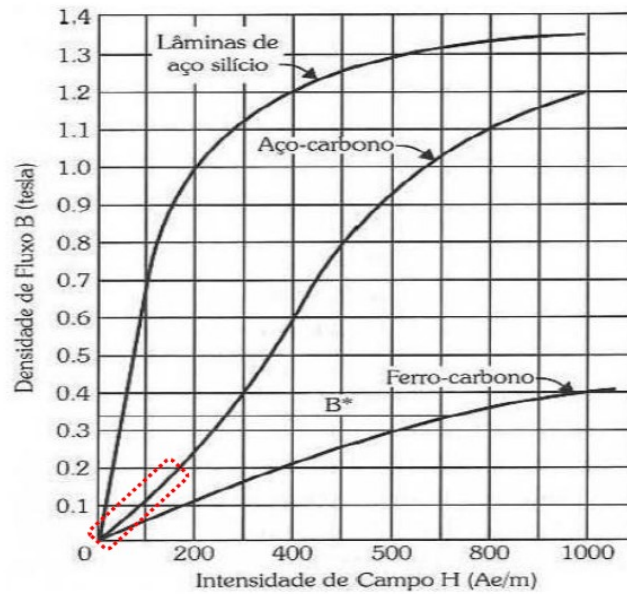


Fonte: LEITE, 2014

Da análise da Figura 1, é possível obter algumas informações, das quais de caráter geral tem-se que  $H$  representa a intensidade de campo magnético,  $B$  a densidade de fluxo magnético,  $B_r$  a remanescência e  $H_c$  o campo coercitivo (CULLITY, 2009; CALLISTER, 2002). Em uma análise mais específica, pode-se citar o observado por Serna-Girardo, (2007) que detalhou as regiões, sendo que a região O-A representa a faixa de deslocamento reversível das paredes de domínio magnético – região em que esta pesquisa se concentra, onde os domínios estão orientados ao acaso e a aplicação de campos magnéticos de baixo valor não causa mudança na sua orientação. Já na região A-B, a aplicação de um campo magnético crescente é suficiente para favorecer o crescimento de domínios orientados na mesma direção do campo aplicado, fazendo com que os mesmos domínios não favoráveis à aplicação diminuam ou desapareçam. Continuando o aumento do campo magnético, os domínios tendem a se orientar na direção do eixo de fácil magnetização mais próxima da direção de aplicação do campo, e mais adiante na região B-D sofrem uma última rotação, agora, se alinhando na mesma direção do campo magnético.

A curva de magnetização do aço-carbono, do aço silício e de um ferro-carbono é apresentada na Figura 2. A inclinação desta curva representa a permeabilidade magnética do material  $\mu$  e se mantém fixa na região de linearidade da curva. Da análise da Figura 2, pode-se notar que para aços-carbono, a permeabilidade pode ser considerada constante para densidade de fluxo magnético da ordem de até 2000 Gauss (0,2 Tesla). Esta região corresponde à região de reversibilidade dos domínios magnéticos (ANDRADE, 2016).

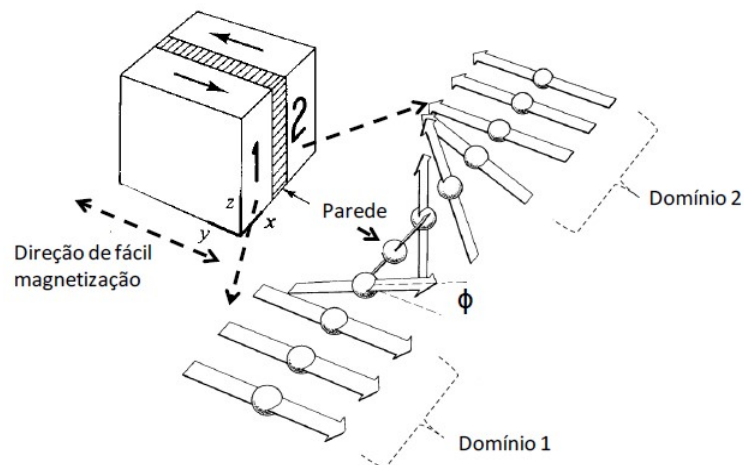
Figura 2 - Curva de magnetização característica para aços e ferro-fundido.



Fonte: NASCIMENTO JÚNIOR, 2011.

Importante destacar que as propriedades micromagnéticas dos materiais ferromagnéticos é o que torna possível a sua magnetização. Na Figura 3 observa-se que esses materiais possuem pequenas regiões chamadas de domínios magnéticos que apresentam magnetização espontânea não nula e são separadas por interfaces chamadas de paredes de domínio ou paredes de Bloch. Ali se tem uma ampliação da região de interface entre dois domínios magnéticos, que estão representados por domínios 1 e 2. A direção de fácil magnetização está representada pelo eixo y e corresponde à direção de orientação dos spins dos átomos nas direções dos domínios 1 e 2. O ângulo  $\phi$  corresponde ao ângulo entre dois spins vizinhos (LEITE, 2014).

Figura 3 - Região de interface dos domínios magnéticos – paredes de domínio a 180°.



Fonte: adaptado de CULLITY, 2009

Em complemento as informações expressas na Figura 3, pode-se destacar o que foi demonstrado por Cullity (2009) que na região de interface entre os domínios 1 e 2 a direção de orientação dos spins muda suavemente com a variação do ângulo  $\varphi$ . Ali duas energias estão presentes, a energia de troca e a energia de anisotropia. A energia de troca corresponde à energia necessária para que dois domínios vizinhos possam mudar a direção suavemente, variando o ângulo  $\varphi$  entre eles e aumenta com o quadrado de  $\varphi$ , tendendo a também aumentar o valor da espessura da parede de Bloch. Já a energia de anisotropia está relacionada com a constante de anisotropia  $K$  do material e varia proporcionalmente com o volume da parede de Bloch (LEITE, 2014).

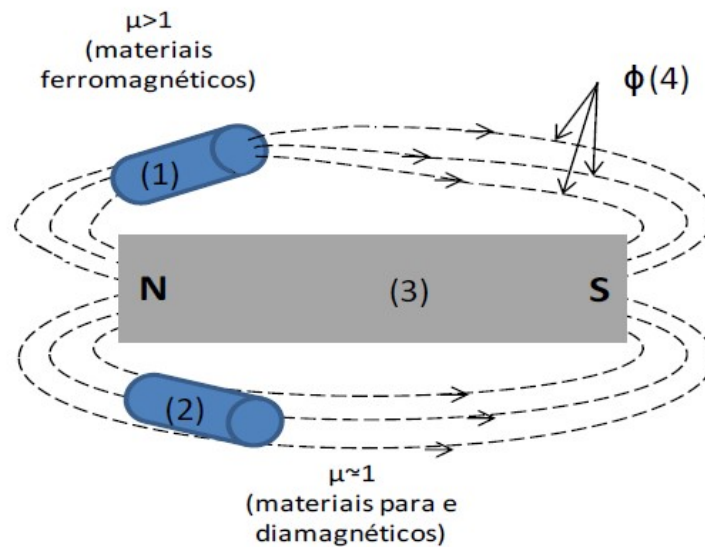
## 2.2. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Conforme relatado por Nascimento Junior (2011), a permeabilidade magnética  $\mu$  representa a facilidade de passagem de um fluxo magnético através de um material e é maior em materiais ferromagnéticos. Os materiais apresentam uma maior ou menor resistência à indução magnética. O efeito produzido pela colocação de um material mais ou menos permeável na direção das linhas de fluxo magnético foi apresentado por Leite (2014). As amostras de materiais com diferentes comportamentos magnéticos estão representadas por (1) e (2) onde um ímã representa a fonte geradora do campo magnético (3) e as linhas de fluxo magnético produzidas estão representadas por (4), conforme demonstra a Figura 4.

Da análise da Figura 4 pode-se verificar que ocorrem perturbações causadas na direção das linhas de fluxo magnético em função desses materiais apresentarem diferentes valores de  $\mu$  (materiais ferromagnéticos  $\mu_r > 1$  e materiais para e diamagnéticos  $\mu_r \cong 1$ ). Tais efeitos são utilizados como objeto de estudo para detecção de diferentes microestruturas de aços pela observação da densidade de fluxo magnético  $B$  em função da intensidade de campo magnético aplicado  $H$  para avaliação da permeabilidade magnética, conforme a Equação 1.



**Figura 4 – Representação da influência dos materiais com diferentes permeabilidades nas linhas de fluxo magnético.**



Fonte: LEITE, 2014

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

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

Onde:

- $\mu$  = permeabilidade do material (H/m);
- $\mu_r$  = permeabilidade relativa do material (adimensional);
- $\mu_0$  = permeabilidade do vácuo (H/m);
- $B$  = densidade de fluxo magnético (T); e
- $H$  = campo magnético aplicado (A/m).

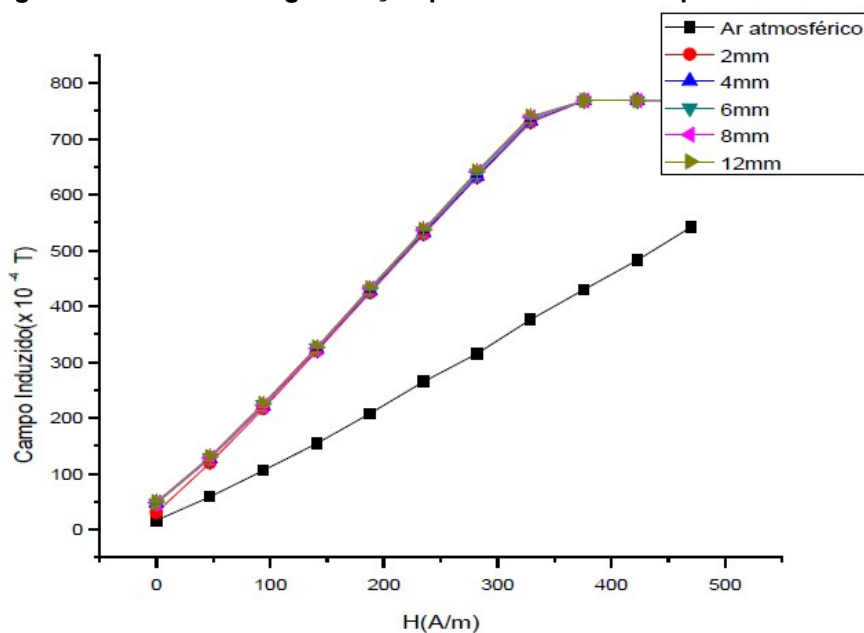
Onde  $B$  representa a densidade de fluxo magnético no material e tem como unidade no Sistema Internacional (SI) o Tesla (T), onde  $1T = 10^4$  Gauss. Já o  $H$

representa o campo magnético aplicado no material, capaz de gerar a indução magnética e tem como unidade no SI o A/m.

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

Andrade (2016) analisou o comportamento da permeabilidade na região de reversibilidade da parede dos domínios magnéticos do aço SAE 1045, que pode ser dividida em três regiões, só tendo um comportamento linear em sua primeira região, onde os valores de  $B$  são baixos, na faixa de centenas de Gauss, para o aço. Na faixa de trabalho escolhida pela autora, onde os resultados estão apresentados na Figura 5, a resposta de  $B$  em função de  $H$  foi linear para todas as espessuras das amostras Tipo 1 (foi variado apenas as espessuras, para um diâmetro prefixado de 24 mm), sendo o comportamento esperado na região de reversibilidade de sua curva de magnetização.

**Figura 5 – Curva de magnetização para as amostras Tipo 1 – SAE 1045.**

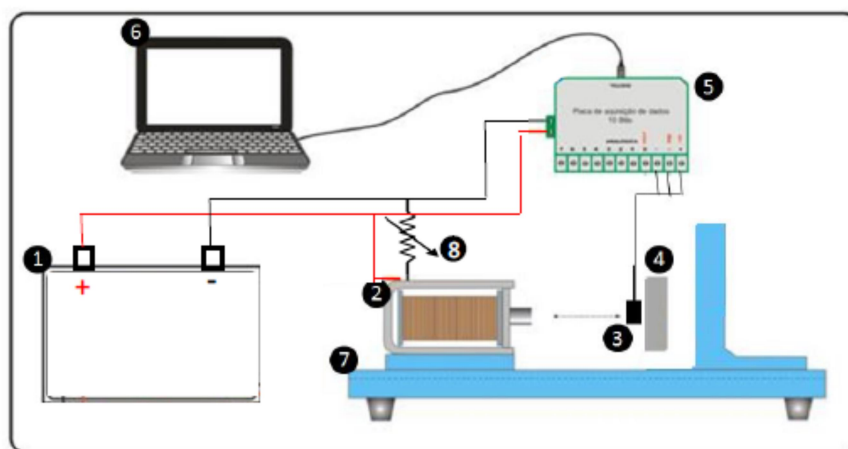


Fonte: SILVA, 2014

Ainda da observação da Figura 5 vê-se que para intensidade de campo magnético aplicado na bobina a partir de 325 A/m, ocorre a estabilização no valor de  $B$  em torno de 700 Gauss. Nesta faixa de trabalho o valor de  $B$  ainda varia linearmente com o aumento no valor de  $H$ , mas não consegue ser captado pelo equipamento, em virtude de uma restrição do sensor utilizado, que satura para valores maiores que esse (HONEYWELL DIVISION, 2018).

Com a utilização da bancada apresentada na Figura 6, Andrade (2016) também analisou os valores de campos induzidos em função dos campos externos aplicados até a saturação do sensor, para uma amostra de 8 mm de espessura e diâmetro de 24 mm. Ela observou que após a remoção do campo externo aplicado, os valores de campo induzidos voltaram ao mesmo valor inicial, antes da aplicação de campo, mostrando não haver campo remanescente da magnetização e confirmando que o trabalho estava sendo realizado na região de reversibilidade dos domínios magnéticos.

**Figura 6 – Equipamento experimental de teste: (1) sistema de alimentação; (2) solenoide; (3) sensor Hall; (4) amostra; (5) placa de aquisição de dados; (6) computador; (7) bancada; (8) potenciômetro.**



Fonte: ANDRADE, 2016

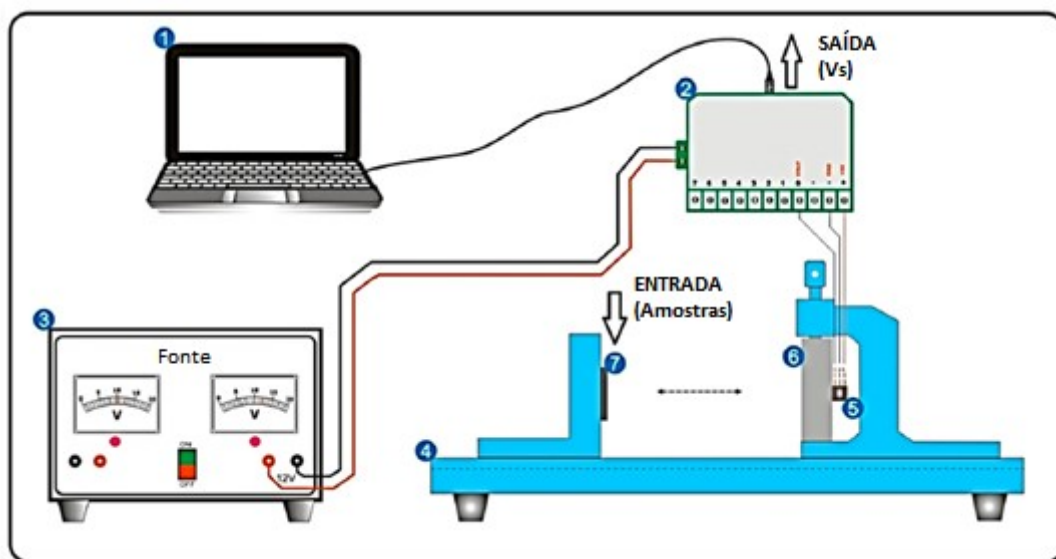
### 2.3. TRABALHOS RELACIONADOS

Cavalcante *et al.* (2008) demonstraram um experimento onde amostras de aço carbono SAE 1045 submetidas a diferentes tratamentos foram expostas a um campo de 300 G e os valores de tensão Hall foram medidos. Os resultados mostraram que o sensor baseado em efeito Hall foi sensível a mudanças

microestruturais, e que pode ser usado efetivamente para a caracterização de materiais não destrutivos. Esses autores também apresentaram a potencialidade dos valores de tensão Hall pós-processados por uma rede neuronal artificial de retropropagação para identificar as microestruturas do material tratado.

Silva *et al.* (2016b) propuseram o uso de uma bancada de avaliação da permeabilidade magnética, com a utilização de um sensor de efeito Hall para rastrear as variações microestruturais do aço inoxidável duplex UNS S31803 de maneira não destrutiva, a Figura 7 ilustra essa montagem. As amostras de material foram submetidas a envelhecimento térmico a 425 °C e 475 °C por 0 (conforme recebido) até 200 h, que são as condições térmicas associadas à transformação microestrutural da fase  $\alpha'$ . Como exemplo, as mudanças microestruturais são os dados de entrada do sensor e a tensão do sensor, a saída.

**Figura 7 - Configuração experimental usada para o ensaio não destrutivo baseado no efeito Hall: (1) computador; (2) placa de aquisição de dados; (3) fonte de alimentação; (4) bancada; (5) sensor Hall; (6) amostra; (7) ímã.**



Fonte: adaptado de SILVA *et al.*, 2016b.

Um campo magnético de 430 G foi aplicado levando-se em conta que o sensor utilizado satura a 600 G, e a permeabilidade magnética  $\mu$  foi calculada com base na tensão Hall de acordo com a Equação 2:

$$\mu = \frac{(V_s - 2,5) \times 10^3}{S_s \times H} \quad (2)$$

Onde:

$V_s$  = tensão de saída em volts;

2,5 V = Tensão de offset;

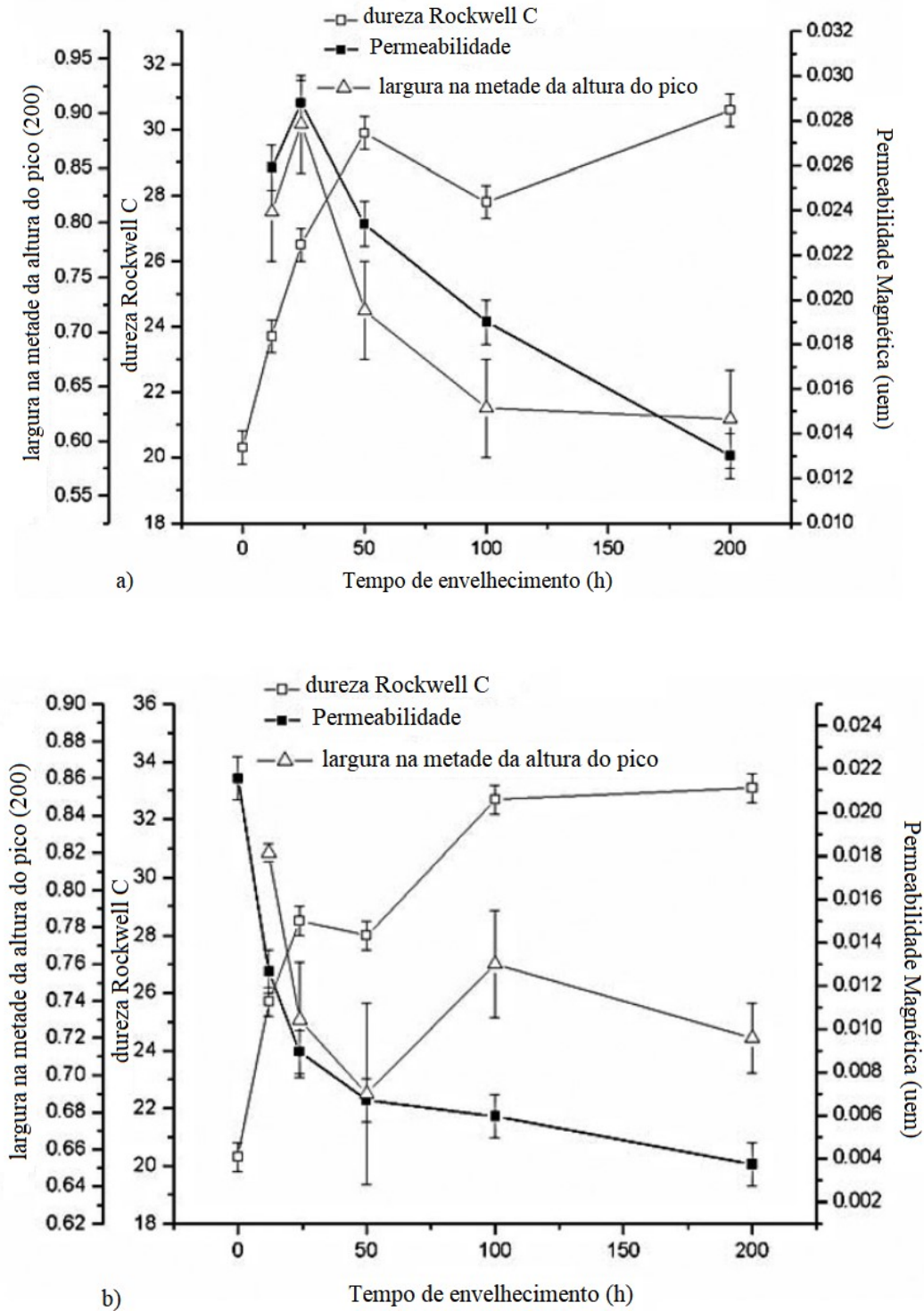
$S_s$  = sensibilidade de saída do sensor é igual a 3,125 mV/G; e

H = campo magnético aplicado em Gauss.

Eles também utilizaram a difração de raios X na caracterização microestrutural das amostras de envelhecimento térmico para validar os achados obtidos com base na permeabilidade magnética. A faixa de temperatura estudada é caracterizada pela decomposição da fase  $\alpha$  inicial em duas fases: uma fase  $\alpha$  pobre em cromo e outra fase  $\alpha$  rica em cromo. Nestas condições, a fase  $\gamma$  não sofre nenhuma transformação. A fase  $\alpha$  se decompõe espontaneamente formando uma fase chamada  $\alpha'$  que possui uma composição química próxima à composição da fase original. Eles verificaram que os resultados da permeabilidade magnética, calculados com base nas tensões de saída do sensor de efeito Hall, tiveram um comportamento semelhante ao da largura em medidas de meia altura.

Foi observado que a tensão de saída do sensor é proporcional à densidade das linhas de fluxo magnético que o atinge. Para o material envelhecido a 425 °C os resultados da permeabilidade magnética, calculados com base nas tensões de saída do sensor de efeito Hall, tiveram um comportamento semelhante ao estudo da difração de raios X (observou-se um aumento para tempos de envelhecimento até cerca de 24 h, este aumento é causado pela formação da fase  $\alpha'$ ) e foram afetados pelas variações microestruturais do material em estudo, como pode ser visto na Figura 8a. E para a temperatura de 475 °C, eles também observaram que as curvas de permeabilidade magnética apresentaram redução significativa para tempos de envelhecimento inferiores a 50 h como mostra a Figura 8b, e tendem a se estabilizar após esse tempo de envelhecimento devido à cinética de formação da fase  $\alpha'$  e suas características ferromagnéticas.

**Figura 8 - Variação da permeabilidade magnética, dureza e meia altura para as amostras de material envelhecidas a 425 °C em a) e a 475 °C em b).**



Fonte: adaptado de SILVA *et al.*, 2016b.

Os resultados obtidos confirmaram que as medições de tensão Hall são afetadas pelas transformações de fase que ocorrem no aço inoxidável duplex UNS S31803 nas duas temperaturas estudadas (425 °C e 475 °C), e são adequados para rastrear a formação da fase  $\alpha'$  de uma maneira não destrutiva. Isto foi confirmado

pela correlação com a técnica de difração de raios X, que é uma técnica de inspeção já consolidada neste domínio. Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores que observaram a diminuição da medida de susceptibilidade magnética na mesma faixa de temperatura e a microestrutura formada dificulta o movimento das paredes do domínio magnético e, portanto, a susceptibilidade magnética é diminuída (PARDAL *et al.*, 2012).

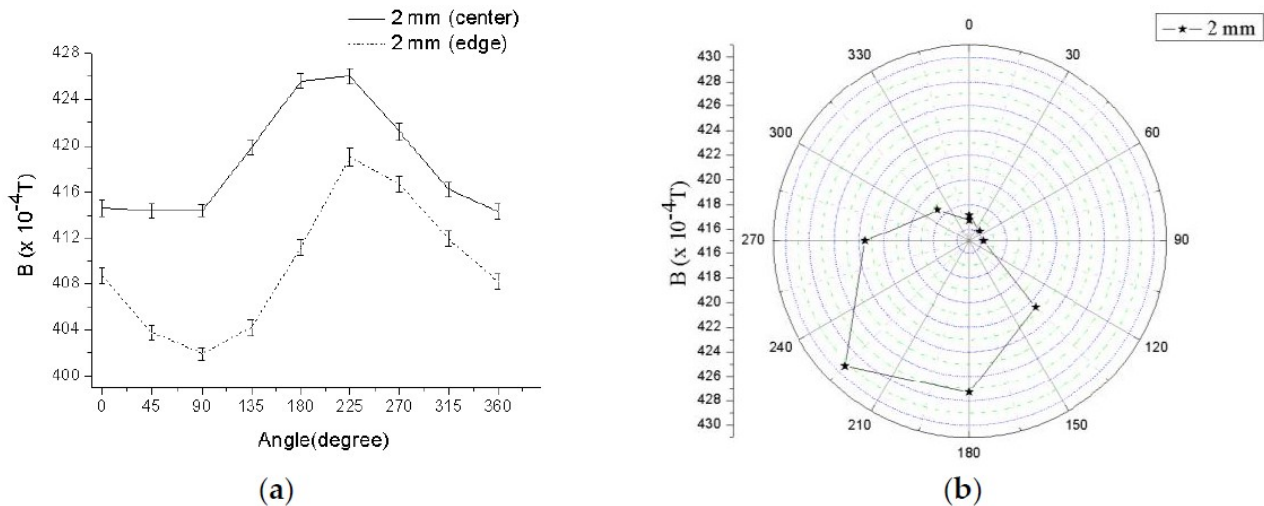
Em outro estudo, Silva *et al.* (2016a) utilizaram uma bancada experimental onde amostras de aço laminado SAE 1045 (formado por microestruturas de perlita e ferrita) foram submetidas a campos magnéticos induzidos na região de reversibilidade de domínios magnéticos para detecção da direção de fácil magnetização. Os campos magnéticos foram aplicados em amostras circulares com diferentes espessuras e ângulos variando de 0° a 360° com degraus de 45°. O campo magnético externo  $H$  foi gerado por um solenoide e aplicado perpendicularmente à face de teste circular. O sensor Hall foi colocado na superfície de teste em dois locais: no ponto central da amostra em teste e a 6 mm deste ponto. Além disso, a direção do eixo do sensor Hall era paralela à superfície de teste.

Foi destacado que processos de fabricação convencionais causam deformação plástica que levam à anisotropia magnética em materiais processados. O comportamento magnético da maioria dos aços ferromagnéticos comerciais é geralmente anisotrópico e eles geralmente apresentam um eixo de fácil magnetização. Mudanças na direção deste eixo estão relacionadas a mudanças mecânicas e anomalias que ocorrem nos processos de fabricação, logo um aprofundamento nesse campo pode permitir que os engenheiros otimizem o volume, a massa e o desempenho geral de dispositivos, como máquinas elétricas na indústria por exemplo.

Como diferencial da sua pesquisa, Silva *et al.* (2016a) destacam que o seu trabalho demonstra que a abordagem proposta pode identificar com sucesso a direção de fácil magnetização local independentemente da geometria da amostra e em áreas de teste de apenas 4,5 cm<sup>2</sup>, o que não ocorre com outros métodos não destrutivos que requerem áreas maiores que 25 cm<sup>2</sup> como os de Caldas-Morgan e Padovese, (2012) e Sanchez *et al.*, (2007). O procedimento usado para estudar a anisotropia magnética foi baseado em medidas adquiridas em duas regiões diferentes das amostras: no centro e próximo à borda das amostras, e girando as amostras de 0° a 360°. O comportamento obtido para o campo magnético induzido

$B$  versus o ângulo de rotação pode ser visto nas Figuras 9a e 9b. Como todas as amostras testadas foram do mesmo material comercial pode-se concluir que não houve alteração da permeabilidade do material. O campo magnético externo foi mantido constante.

**Figura 9 - Campo magnético induzido versus ângulo de rotação: amostra com 2 mm de espessura, no centro e na borda (a) e dependência angular a 2 mm do centro (b).**



Fonte: SILVA et al., 2016a.

A abordagem proposta pelos autores pode ser aplicada com sucesso na avaliação experimental da anisotropia magnética em aços. A abordagem é não destrutiva e pode ser usada no estudo das propriedades magnéticas locais e das propriedades magnéticas dos aços de acordo com diferentes direções de magnetização. Essa abordagem também foi capaz de determinar a direção de fácil magnetização do aço estudado em amostras com diferentes dimensões e até diferentes geometrias. A abordagem proposta utiliza corrente contínua para gerar um campo magnético externo que é aplicado na região da reversibilidade magnética. Esta região pertence à região de baixa perda de indução e mostrou-se sensível à anisotropia magnética, o que não foi observado em outros trabalhos que relataram apenas achados na região de altas perdas induzidas.

## 2.4. TRATAMENTOS TÉRMICOS

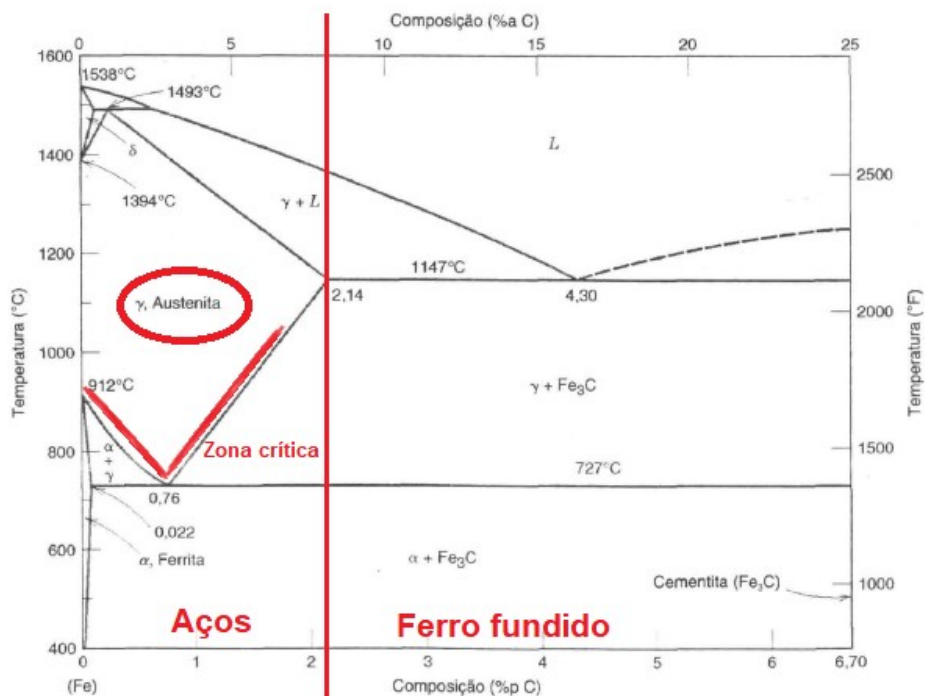
Tratamento térmico pode ser definido como uma operação ou conjunto de operações (no caso de tratamento completo) através dos quais se submete o aço, em estado sólido, a um ou vários ciclos térmicos (ABNT NBR NM 136, 1997).



Importante destacar que nem sempre os tratamentos térmicos são intencionais, pois em alguns casos peças metálicas sofrem tratamentos térmicos durante o processo de fabricação, passando por ciclos de aquecimento ou resfriamento decorrentes de tais processos, que podem comprometer suas propriedades. Como exemplo pode-se citar a operação de soldagem de estruturas de aço, que ao serem aquecidas até temperaturas elevadas podem sofrer mudanças de microestruturas durante o resfriamento a partir de altas temperaturas, comprometendo a tenacidade da estrutura como um todo. Outro fator que merece ser mencionado e que também altera as propriedades dos materiais são as operações de conformação plástica a frio, que podem introduzir tensões indesejadas, no interior do material e esgotar sua capacidade de sofrer deformação plástica adicional, tornando-os frágeis (TSCIPTSCHIN, 2020).

Na Figura 10 está representado um diagrama de fases Fe-C. Nela é possível observar mais claramente as divisões das fases por teor de carbono (%) e temperatura de aquecimento (°C). Para os aços, que se limitam a 2,11% de carbono, observam-se os constituintes formados por ferrita ( $\alpha$ ), perlita ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) e austenita ( $\gamma$ ) que vão depender da temperatura atingida no tratamento do aço.

**Figura 10 – Diagrama de fases Fe-C.**



Fonte: adaptado de CALLISTER, 2002.

O tratamento térmico aplicado nos aços consiste em aplicações de ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento, onde se busca ir até a zona austenítica para depois ocorrer a transformação através de definição da trajetória de resfriamento (COLPAERT, 2008).

Segue um breve resumo dos principais tratamentos térmicos empregado nos aços.

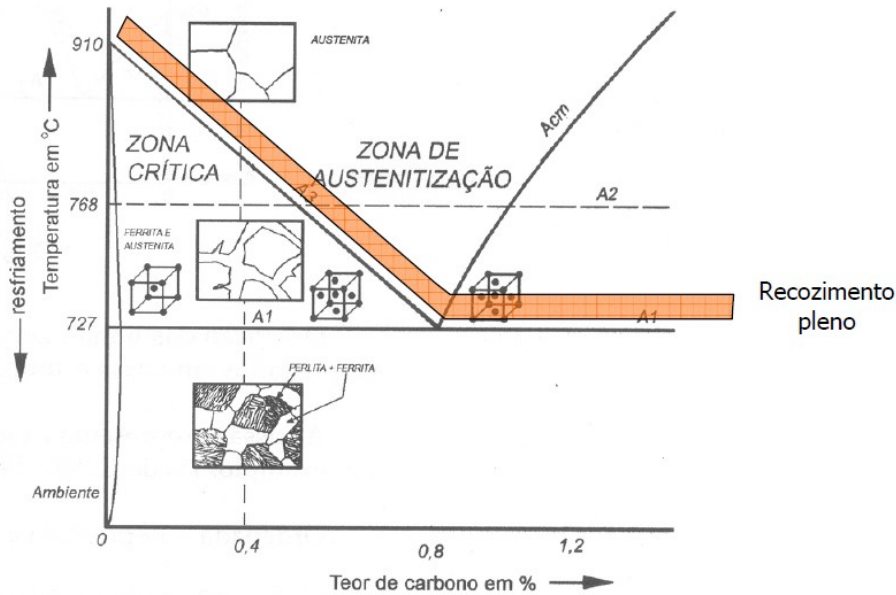
#### 2.4.1. Recozimento

O recozimento, por vezes denominado recozimento pleno, consiste no aquecimento do aço até acima ou dentro da zona crítica (temperatura situada entre 727 e 910 °C a depender do teor de carbono do aço, com a presença de ferrita ( $\alpha$ ) + austenita ( $\gamma$ ) e austenita ( $\gamma$ ) + cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) como demonstra a Figura 11), seguido de um esfriamento lento – dentro do forno, por exemplo, (COLPAERT, 2008).

Normalmente, este tratamento é utilizado visando restituir ao material as propriedades alteradas por um tratamento mecânico ou térmico que possa ter sido anteriormente aplicado ao mesmo e refinar e/ou homogeneizar estruturas brutas de fusão (COLPAERT, 2008).

A Figura 11 abaixo apresenta na cor laranja a faixa onde pode ocorrer o tratamento de recozimento que vai depender da composição do aço - no caso dos aços com teor de carbono menor que 0,8% é feito a aproximadamente 50 °C acima da zona crítica, e para aços com teor de carbono maior que 0,8 % é feito em temperatura de 50 °C acima do limite inferior da zona crítica (TSCHIPTSCHIN, 2020).

Figura 11 – Exemplificação da faixa de recozimento dos aços.



Fonte: TSCHIPTSCHIN, 2020.

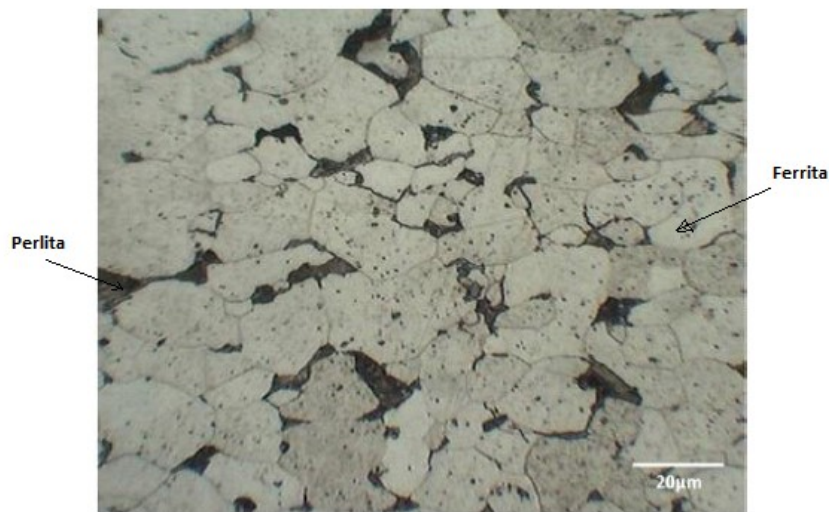
Segundo Colpaert (2008) o recozimento “apaga”, por assim dizer, as estruturas resultantes de tratamentos térmicos ou mecânicos anteriormente sofridos pelo material porque, ao passar pela zona crítica, ocorrem a nucleação e crescimento de novos grãos de austenita, qualquer que seja a microestrutura apresentada pelo material antes do aquecimento. Logo em seguida, esta austenita se decompõe em condições de resfriamento lento, aproximando as estruturas de equilíbrio.

Importante observar na execução do tratamento de recozimento alguns fatores, por exemplo, a temperatura de recozimento, pois cada composição química apresenta uma temperatura mais adequada para o recozimento pleno, que é da ordem de 20 a 50 °C acima do limite superior da zona crítica, para aços hipoeutetóides. Para o estudo do aço 4340 com 0,40% de carbono, foi ajustado para uma temperatura de 850 °C, conforme consta na metodologia. Outro fator que merece destaque é o tempo de permanência à temperatura (patamar), que é o tempo de manutenção à temperatura de patamar e deve ser suficiente para a ocorrência da formação e uniformização da austenita. Em qualquer caso, deve-se garantir que o centro da peça atinja, também, a temperatura de patamar (COLPAERT, 2008).

Na Figura 12 pode-se observar um exemplo da microestrutura obtida por Microscópio Óptico (MO) de um aço AISE 1010 submetido ao tratamento de recozimento. Nela é possível observar uma estrutura formada por ferrita (região clara) e perlita (região escura) (FERREIRA *et al.*, 2016).

A influência dos tratamentos térmicos é notada em literaturas específicas, como em Cullity (2009) que observou que o recozimento provoca o aumento do tamanho do grão, reduz a quantidade de contornos e diminui o bloqueio dos movimentos dos domínios magnéticos e assim aumenta a permeabilidade magnética, e tenha menores perdas de histerese do que para o material em condição deformada. Conforme observado por Martinez *et al.* (2006) quanto maior o tempo de recozimento, maior a permeabilidade magnética. Essas observações se fazem importantes, pois no estudo da permeabilidade magnética tais alterações são esperadas de acordo com o tratamento aplicado ao aço.

**Figura 12 - Microestrutura de um aço AISE 1010 submetida a recozimento com aumento de 50x.**



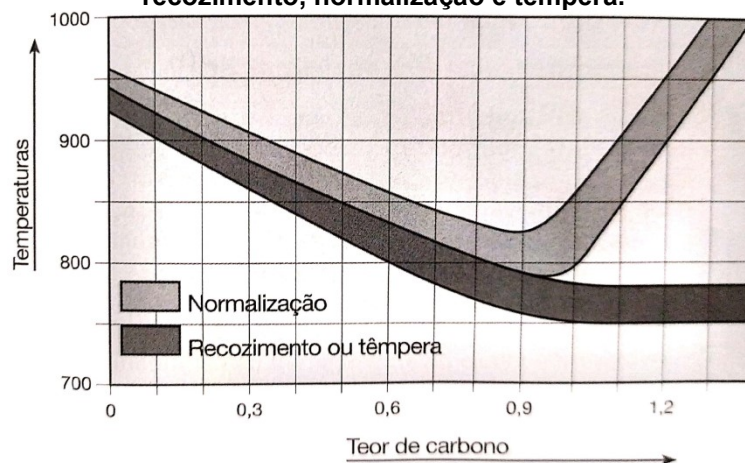
**Fonte: adaptado de FERREIRA *et al.*, 2016**

#### 2.4.2. Normalização

A normalização é o tratamento térmico indicado para obter uma estrutura homogênea e refinada e também para melhorar a resistência e a tenacidade de aços que são submetidos a trabalho a quente convencional, onde normalmente apresentam estruturas pouco homogêneas e com tamanho de grão grosseiro (COLPAERT, 2008). A Figura 13 apresenta as temperaturas recomendadas para aços carbono e que podem ser empregados para aços com baixo teor de elementos

de liga. Nela é possível observar a faixa de temperatura para aplicação da normalização e que varia de acordo com o teor de carbono do aço.

**Figura 13 – Temperaturas recomendadas, para aços carbono, para a austenitização para recozimento, normalização e têmpera.**

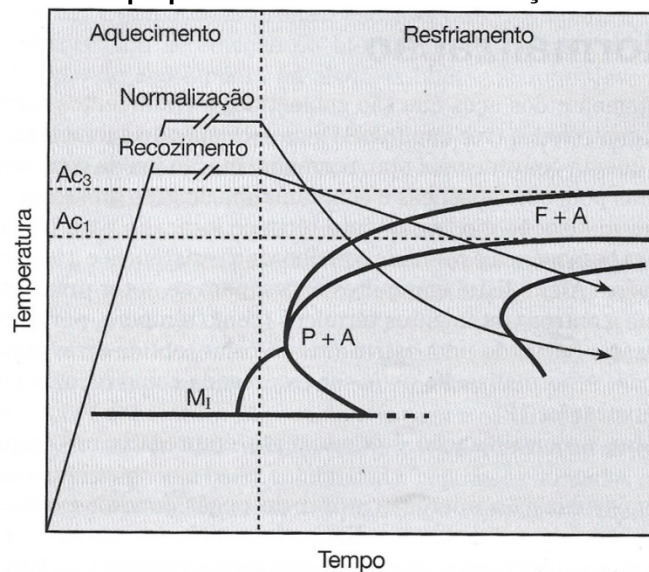


**Fonte: COLPAERT, 2008.**

Ela é empregada para a homogeneização microestrutural de peças fundidas e forjadas, de peças submetidas a tratamentos incorretos ou desvios de tratamento térmico e obtenção de microestrutura homogênea e “refinada” visando propriedades mecânicas finais, especialmente quando boas combinações de resistência e tenacidade são requeridas em aços estruturais e em aços, em que a aplicação de têmpera e revenimento não são uma alternativa econômica (COLPAERT, 2008).

O ciclo térmico de normalização consiste no aquecimento para austenitização completa, seguida de resfriamento ao ar. A Figura 14 apresenta os processos de normalização e recozimento, os dois têm o mesmo objetivo que é a obtenção do mínimo de dureza só que a normalização forma uma estrutura de grãos mais finos do que o recozimento, pois passa menos tempos em altas temperaturas. O recozimento forma ferrita e perlita grosseira e a normalização ferrita e perlita fina. Materiais de alta temperabilidade como o aço 4340 são fornecidos como normalizados. Essa mesma figura apresenta o ciclo térmico superposto a curva de Transformação por Resfriamento Contínuo (TRC) que surgiram para atender à situação real do processo, onde o tempo à temperatura é considerado e que podem prever a microestrutura e a dureza conforme o resfriamento utilizado.

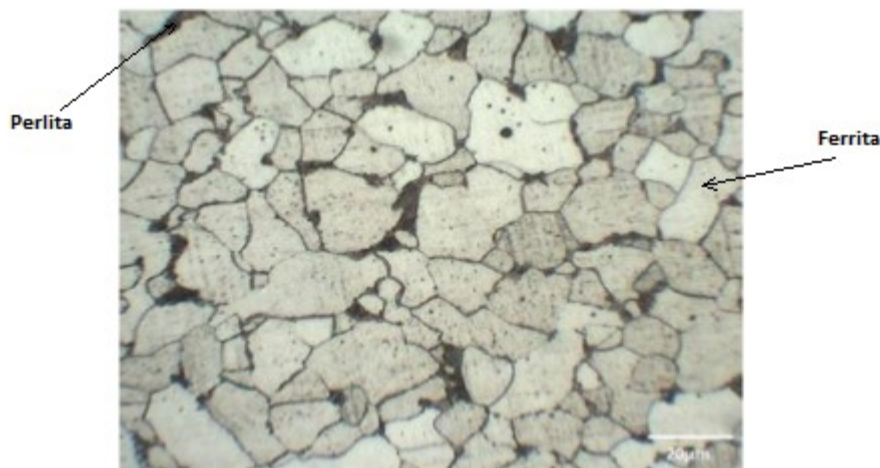
**Figura 14 - Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento e normalização, superpostos à curva TRC de um aço.**



Fonte: COLPAERT, 2008

Na Figura 15 está representado um exemplo de microestrutura obtida após o tratamento de normalização para o aço AISE 1010. É possível observar grãos de ferrita (maior quantidade) e perlita finas distribuídos de forma homogênea (FERREIRA *et al.*, 2016).

**Figura 15 - Microestrutura de um aço AISE 1010, normalizado com aumento de 50x.**



Fonte: adaptado de FERREIRA *et al.*, 2016

### 2.4.3. Têmpera e Revenimento

Quando empregado sem qualificativo, o termo “têmpera” indica um tratamento visando à formação de martensita (ABNT NBR NM 136, 1997). O

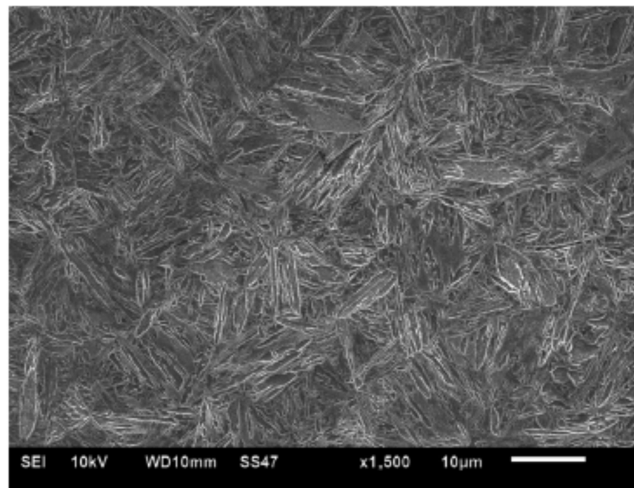


tratamento de têmpera consiste em aquecer o aço até uma temperatura acima da zona crítica (austenitização) para se obter uma microestrutura austenítica, mantê-lo neste patamar de temperatura por um determinado tempo e em seguida resfriá-lo bruscamente para se obter a formação da martensita – que é uma estrutura muito dura e frágil com reticulado tetragonal compacto (TSCHIPTSCHIN, 2020). Esse tratamento tem como objetivo obter o máximo de dureza com a formação da martensita e é importante destacar que o meio de resfriamento depende da capacidade de endurecimento de cada material. A dureza é uma medida da resistência do material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou um risco) (CALLISTER, 2002).

Alguns fatores definem a profundidade de endurecimento e a distribuição de dureza ao longo da seção em uma peça após a têmpera, são eles: a temperabilidade do aço, tamanho e forma da peça, temperatura de austenização e meio de têmpera (COLPAERT, 2008).

Na Figura 16 está exemplificada a microestrutura obtida por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de um aço SAE 4340 submetido ao tratamento de têmpera sendo resfriado em água, sendo essa estrutura composta de 100% de martensita com ripas relativamente curtas (EL RAYES *et al.*, 2014).

**Figura 16 - Microestrutura de um aço SAE 4340 submetida à têmpera com água obtida por MEV.**

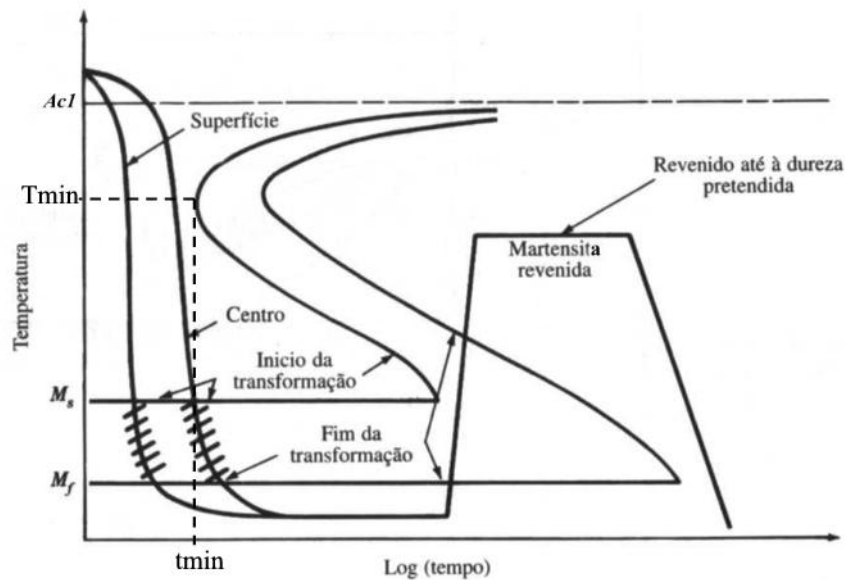


**Fonte: EL RAYES, 2014**

As microestruturas martensíticas que são as obtidas após o processo de têmpera têm, em geral, níveis de tensões residuais excessivos e ductilidade e tenacidade muito baixas para permitir seu emprego na maior parte das aplicações. Logo, é necessário realizar um tratamento térmico subsequente, chamado

revenimento, que provoca alterações microestruturais e alivia as tensões decorrentes do seu processo de formação, para que as peças possam ser empregadas (COLPAERT, 2008). A Figura 17 exemplifica esses tratamentos.

Figura 17 - Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenimento.



Fonte: VILAR, 1981.

Esse tratamento consiste no aquecimento a temperaturas inferiores a temperatura de aproximadamente 700 °C para aumentar a ductilidade e tenacidade e ajustar a resistência mecânica ao nível desejado e promover alívio de tensões.

Ao se analisar as características das mais diversas microestruturas para um estudo da permeabilidade magnética, as análises de Praxedes (2012) se mostram adequadas e de grande valia para o objeto de estudo, onde foi verificado que a formação de martensita provoca o endurecimento da rede, dificultando a dinâmica das paredes de domínio. Isso se reflete em um ciclo de histerese mais largo, com maior campo coercitivo e maiores perdas, quando comparado com uma amostra recozida, para uma mesma densidade de fluxo máxima. Para um mesmo campo aplicado, a martensita alcança menores valores de densidade de fluxo do que a amostra recozida. Ou seja, há uma diminuição da permeabilidade.

## 2.5. AÇO SAE-4340

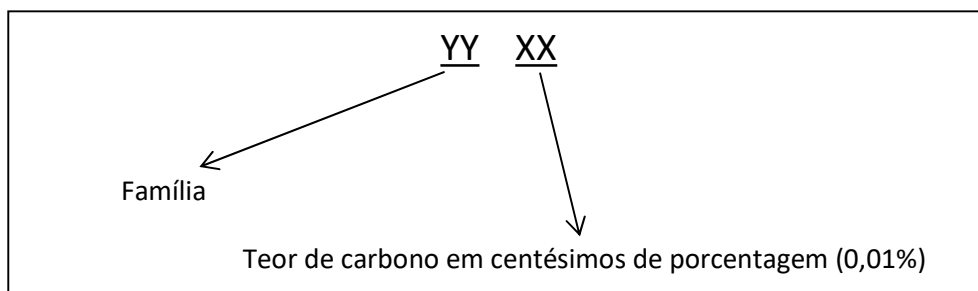
Uma das principais características do aço SAE 4340 é sua elevada temperabilidade, onde na sua composição química destacam-se alguns elementos



como o cromo-níquel-molibdênio. Graças a essa combinação, pode ser utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, inclusive componentes mais espessos, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. Também possui elevada resistência à fadiga. Dentro a enorme gama de fornecedores no mercado nacional, algumas especificações variam, mas de uma maneira geral é fornecido com dureza máxima de 260 HB. Também pode ser encontrado no estado temperado e revenido. Devido a sua propriedade, que lhe classifica como aço para construção mecânica tem sua aplicação mais difundida em componentes para sistemas mecânicos, principalmente estruturais, onde se necessita uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções, ou seja, na prática são eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas, mangas e cilindros (GDD, 2020).

De acordo com Açosporte (2020) o aço SAE 4340 apresenta algumas características importantes que justificam sua aplicação, sendo um aço para beneficiamento de alta resistência mecânica, elevada temperabilidade, alta tenacidade, baixa usinabilidade e baixa soldabilidade. Graças a essas características são aplicados na fabricação de eixos, bielas, virabrequins e peças com alta solicitação mecânica; na indústria aeroespacial – como em trens de pouso de aeronaves; automobilística; de máquinas e equipamentos.

Da Costa e Mei (2010) destacam que o sistema de classificação dos aços empregados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (NBR NM 87) é basicamente o mesmo usado pelo AISI (*American Iron and Steel Institute*) e pela SAE (*Society of Automotive Engineers* - J 404). Esses órgãos de classificação dividem os aços em grupos principais e, os subdividem em famílias de acordo com as semelhanças em suas características. Tais subdivisões, são designadas por conjuntos de algarismos, em geral quatro, da seguinte forma:



De acordo com a classificação designada pelas instituições apresentadas, e detalhando o aço objeto de estudo do presente trabalho, o aço 4340 é um aço da família 43, isto é, com 1,8% Ni, 0,80% Cr, 0,25% Mo e com 40 centésimos de porcentagem de carbono, isto é, 0,40% C. Outro fator que merece destaque é que além dos algarismos, às vezes podem aparecer letras na classificação, principalmente “H”, após os algarismos, que indica temperabilidade assegurada e “B” entre os dois grupos de dois algarismos que indica a presença de boro, para aumento da temperabilidade. Na prática se tem, por exemplo, um aço 8620H é um aço com resposta ao tratamento térmico mais consistente que o 8620. O aço 10B46 é essencialmente um aço 1046 (aço com 0,46% C), ao qual se adiciona um mínimo de 5 ppm de boro, que melhora a temperabilidade (DA COSTA e MEI, 2010).

Abaixo segue um breve resumo com os principais tratamentos térmicos que podem ser empregados no aço SAE 4340:

- i. Recozimento: De uma maneira geral, para esse tratamento deve ser empregada uma temperatura próxima de 850 °C, por no mínimo 1 hora, para cada 25 mm de material envolvido no processo. Após, resfriar lentamente no forno que é a característica desse tratamento;
- ii. Normalização: Já para este tratamento, deve ser realizado na temperatura variando de 860 a 880 °C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm de material. Após, para se obter uma estrutura homogênea com grãos mais finos deve-se resfriar ao ar;
- iii. Têmpera: Austenitizar em temperatura que varia entre 840 a 870 °C. Aquecer por um período de 1 hora para cada 25 mm de espessura do material envolvido no processo e adicionar 1 hora para cada 25 mm caso necessário, de acordo com a espessura da peça. Resfriar em óleo ou polímero; e
- iv. Revenimento: Esse tratamento deve ser realizado imediatamente após a têmpera. De acordo com a dureza desejada, deve-se selecionar a temperatura para esse tratamento, pois a dureza cai continuamente de acordo com a temperatura atingida. Manter na temperatura de revenimento por no mínimo 1 hora para cada 25 mm de espessura do material. Importante ressaltar que se deve evitar uma faixa de temperatura para esse tratamento (entre 230 a 370 °C), pois ali a tenacidade é bastante prejudicada (GDD, 2020).

A Tabela 1 apresenta as principais famílias de aços classificados junto a ABNT (COLPAERT, 2008).

**Tabela 1 - Principais famílias de aços conforme a classificação ABNT (COLPAERT, 2008).**

<b>Aços carbono</b>	10xx	Aço carbono
	11xx	Aço carbono resulfurado (corte fácil)
	12xx	Aço carbono resulfurado e refosforado (corte fácil)
<b>Aços de baixa liga (construção mecânica)</b>	13xx	Mn 1,75%
	23xx	Ni 3,5%
	25xx	Ni 5,0%
	31xx	Ni 1,25%, Cr 0,65%
	33xx	Ni 3,50%, Cr 1,55%
	40xx	Mo 0,25%
	41xx	Cr 0,50% ou 0,95%, Mo 1,12% ou 0,20%
	<b>43xx</b>	<b>Ni 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25%</b>
	46xx	Ni 1,55% ou 1,80%, Mo 0,20% ou 0,25%
	47xx	Ni 1,05%, Cr 0,45%, Mo 0,20%
	48xx	Ni 3,50%, Mo 0,25%
	50xx	Cr 0,80% ou 0,40%
	51xx	Cr 0,80% ou 1,05%
	5xxxx	Cr 0,50% ou 1,00% ou 1,45%, C 1,00%
	61xx	Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo
	86xx	Ni 0,55%, Cr 0,50% ou 0,65%, Mo 0,20%
	87xx	Ni 0,55%, Cr 0,50%, Mo 0,25%
	92xx	Mn 0,85%, Si 2,00%
	93xx	Ni 3,25%, Cr 1,20%, Mo 0,12%
	98xx	Ni 1,00%, Cr 0,80%, Mo 0,25%

Na Tabela 2 encontram-se os principais componentes do aço SAE 4340 com as suas respectivas variações expressas em percentuais (TARTAGLIA, 2008).

**Tabela 2 – Variação da composição química do aço SAE 4340 (TARTAGLIA, 2008).**

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
0,38	0,15	0,65	0,70	1,65	0,20
---	---	---	---	---	---
0,43	0,35	0,85	0,90	2,00	0,30

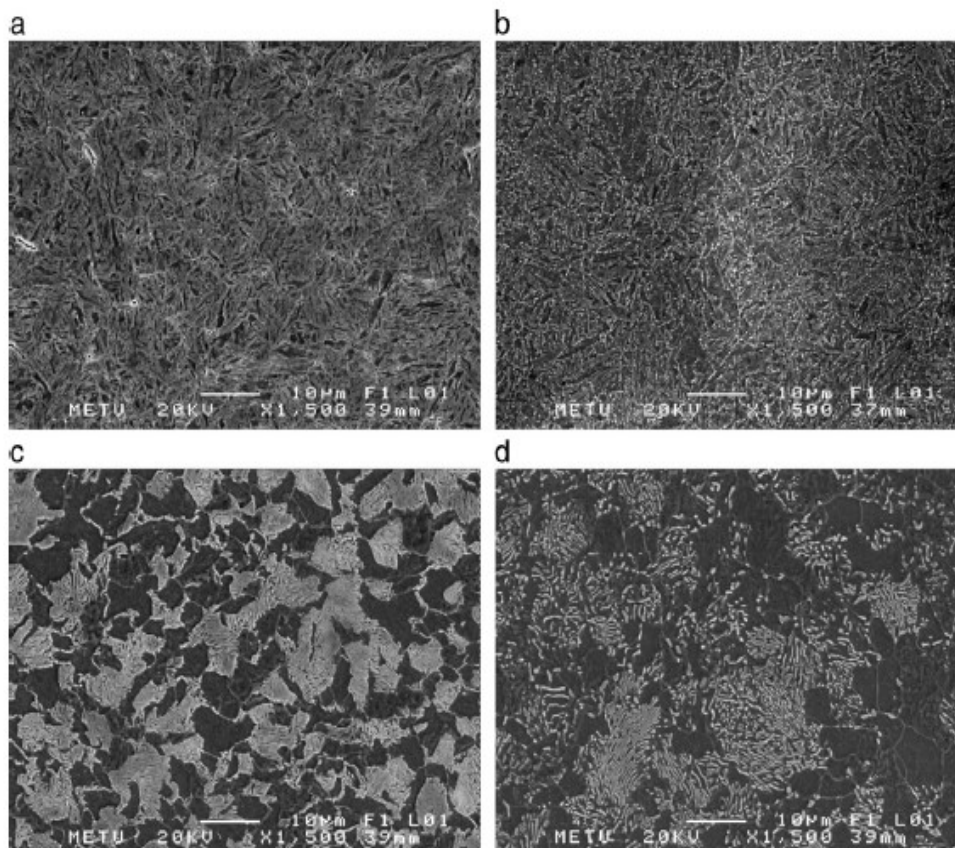
## 2.6. CARACTERIZAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS POR MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS.

Gür e Çam (2007) compararam o desempenho do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) e métodos ultrassônicos para a avaliação da microestrutura de aços comerciais. Após a austenitização das amostras de aço SAE-1040 e SAE-4140, foram realizados vários tratamentos térmicos para obtenção de microestruturas constituídas por martensita, martensita revenida, ferrita-perlita fina e ferrita-perlita grossa. As microestruturas foram inicialmente caracterizadas por investigação do MEV e medidas de dureza. A magnitude e a posição dos picos do ruído de Barkhausen foram determinadas através de um sistema comercial (Rollscan/ $\mu$ scan 500-2), onde um campo magnético cíclico foi induzido em um pequeno volume da amostra com uma bobina, energizada com corrente alternada.

As medições foram realizadas com ondas com frequências de 125 Hz. O valor dos Parâmetros Magnéticos (PM) foi calculado pelo sistema, multiplicando o valor dos pulsos de tensão eficaz induzidos (R.M.S) na bobina de captação durante o período de magnetização por 100. As taxas de propagação das ondas longitudinais foram determinadas com a técnica de pulso-eco ultrassônico. Após a análise, eles observaram que a resposta ao ruído Barkhausen e velocidade do som vão ao mínimo para a martensita, e ambos tendem a aumentar na seguinte sequência: martensita revenida, perlita-ferrita fina e perlita-ferrita grossa. Eles também mostraram que as características magnéticas são mais sensíveis às variações da microestrutura do que à velocidade do som.

A Figura 18 mostra as micrografias MEV representativas das amostras, indicando a presença das microestruturas pretendidas por Gür e Çam (2007). O resfriamento em água resultou em uma estrutura martensítica, Figura 18a, e ao revenir a temperatura de 600 °C, a morfologia dos precipitados de carboneto mudou da forma de agulha para a forma esferoidal, Figura 18b. No caso dos tratamentos isotérmicos (Figuras 18 c e d), devido à taxa de nucleação da perlita nos grãos de austenita, muito mais núcleos se forma a 600 °C, Figura 18c, em comparação com aqueles formado a 680 °C, Figura 18d.

**Figura 18 - Micrografias MEV representativas das amostras: (a) martensita (b) martensita revenida a 600 °C, (c) perlita-ferrita fina, (d) ferrita-perlita grossa.**

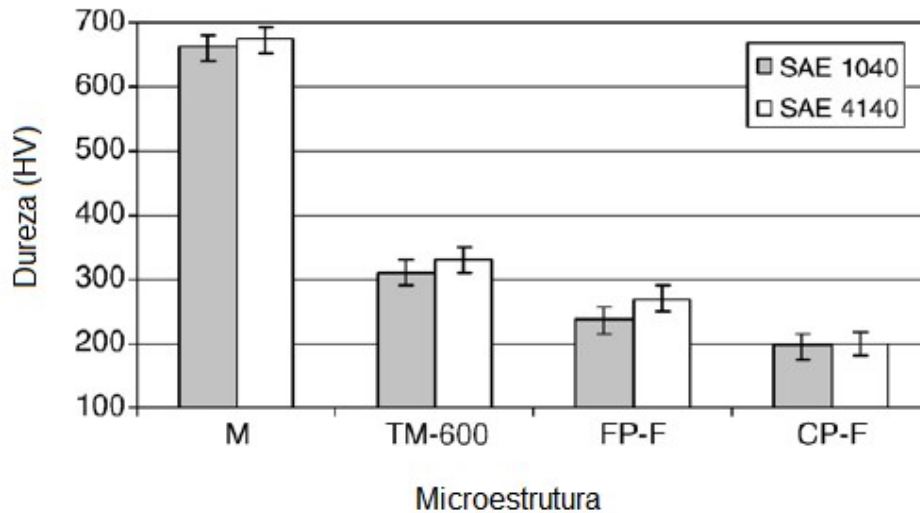


Fonte: GÜR e ÇAM, 2007

Na Figura 19 observam-se as comparações das durezas obtidas pelos autores para os dois aços estudados, em função da microestrutura analisada (M: martensita; TM-600: martensita revenida a 600 °C; FP-F: perlita-ferrita fina; CP-F: perlita-ferrita grossa). Os valores de dureza Vickers apresentados apoiam os resultados das investigações metalográficas. Os mais altos valores foram detectados nas amostras com estrutura martensítica (M), sendo 658 HV para o aço SAE 1040 e 674 HV para o aço SAE 4140. As amostras consistindo de perlita-ferrita

grossa (CP-F) têm a dureza mais baixa, sendo 178 HV para o aço SAE 1040 e 199 HV para aço SAE 4140.

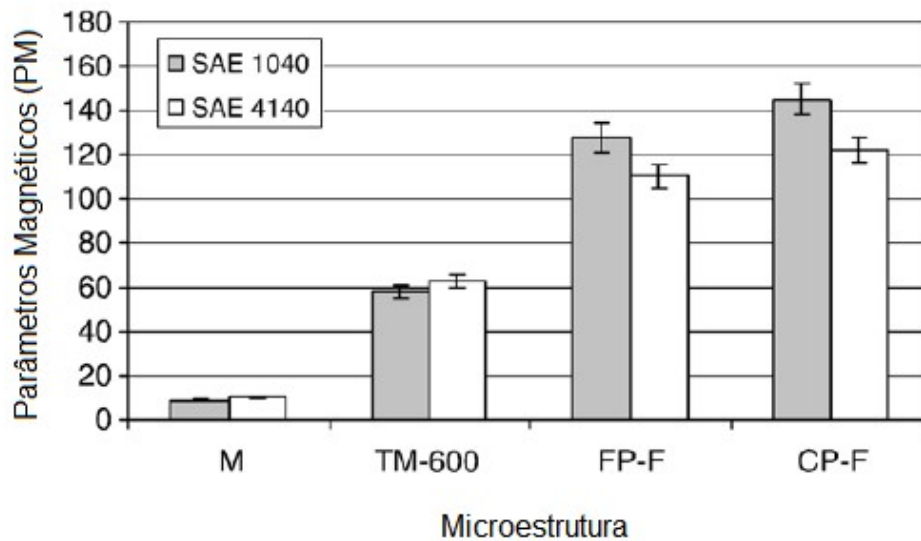
**Figura 19 - Valores de dureza das amostras (M: martensita; TM-600: martensita revenida a 600 °C; FP-F: perlita-ferrita fina; CP-F: perlita-ferrita grossa).**



Fonte: adaptado de GÜR e ÇAM, 2007

Na Figura 20 são apresentados os valores dos Parâmetros Magnéticos (PM), que nos mostra as variações das medidas magnéticas em função das microestruturas obtidas nos tratamentos. Ali é possível observar que a estrutura resfriada que gerou a martensita (M) tem o menor valor de PM e a amplitude do pico aumenta subsequentemente para martensita revenida (TM-600), perlita-ferrita fina (FP-F) e perlita-ferrita grossa (CP-F).

Figura 20 - Valores dos parâmetros magnéticos para várias fases obtidas por medições de ruído de Barkhausen (M: martensita; TM- 600: martensita revenida a 600 °C; FP-F: perlita-ferrita fina; CP-F: perlita-ferrita grossa).



Fonte: adaptado de GÜR e ÇAM, 2007

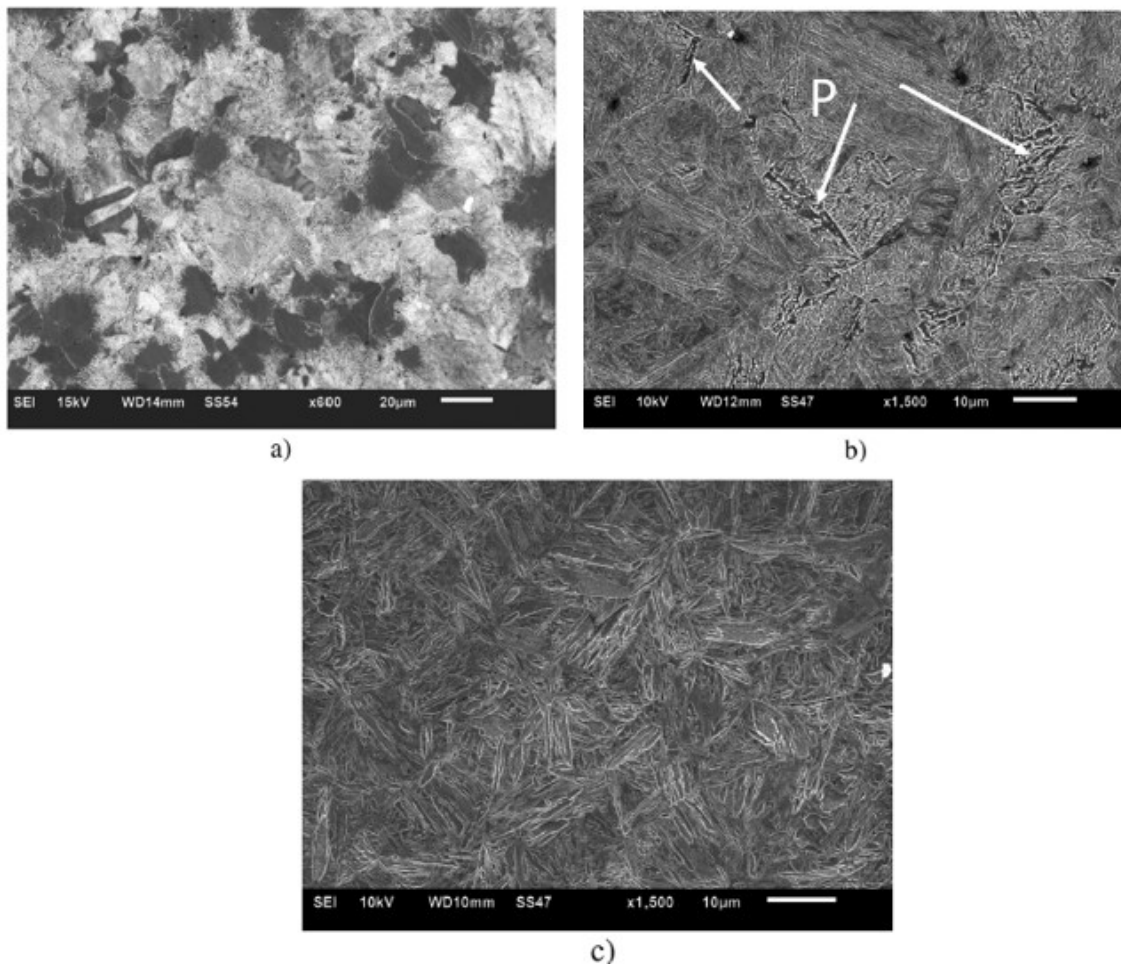
Observa-se que o RMB pode fornecer uma boa oportunidade para avaliação de microestrutura de aços e parece ser muito mais sensível às variações da microestrutura nos aços. Uma vez que as relações quantitativas entre parâmetros RMB e os parâmetros microestruturais são estabelecidos, o método RMB pode ser usado de forma eficiente e eficaz para avaliar o estado da microestrutura dos componentes de aço ferromagnético durante fabricação ou serviço.

El Rayes *et al.* (2014) demonstraram a caracterização microestrutural e os resultados de ensaios mecânicos que foram correlacionados com a velocidade ultrassônica e a atenuação dos aços SAE-1040 e SAE-4340 após a aplicação de tratamentos térmicos. Ambos os tipos de amostras foram submetidos a três tipos de tratamento térmicos; o primeiro foi recozimento a 850 °C, o segundo foi austenitização a 1000 °C seguido por resfriamento com óleo e o terceiro foi austenitização similar, porém resfriado com água. Os tratamentos do aço SAE-1040 resultaram em microestruturas contendo diferentes teores de ferrita e perlita, diferentes espaçamentos interlamelares e também diferentes tamanhos de grãos.

Um teor semelhante de ferrita e perlita foi obtido ao recozimento do SAE-4340, enquanto a têmpera com óleo e com água resultaram em martensita. A Figura 21a-c mostram as microestruturas recozida, resfriadas com óleo e água, respectivamente do aço SAE-4340 obtidas por MEV. A estrutura recozida, Figura

21a, é composta de grãos de perlita (clara) e ferrita (escura). As medições mostraram que esta microestrutura é composta de 59% de perlita e 41% de ferrita. O tamanho do grão medido é de cerca de 11,6  $\mu\text{m}$ . A estrutura resfriada com óleo, Figura 21b, é composta por longas ripas de martensita (clara) coexistindo com uma subestrutura de poucas placas de martensita (regiões marcadas com P-escuro). A microestrutura resfriada com água é composta de 100% de martensita com ripas relativamente curtas, como na Figura 21c. Deve-se notar que, devido à presença de ripas de martensita, não foi possível ver claramente os limites de grãos da austenita anterior nas amostras.

**Figura 21 - Microestruturas obtidas por MEV de aço SAE-4340 em condições de (a) recozido, (b) resfriado a óleo e (c) resfriado com água.**



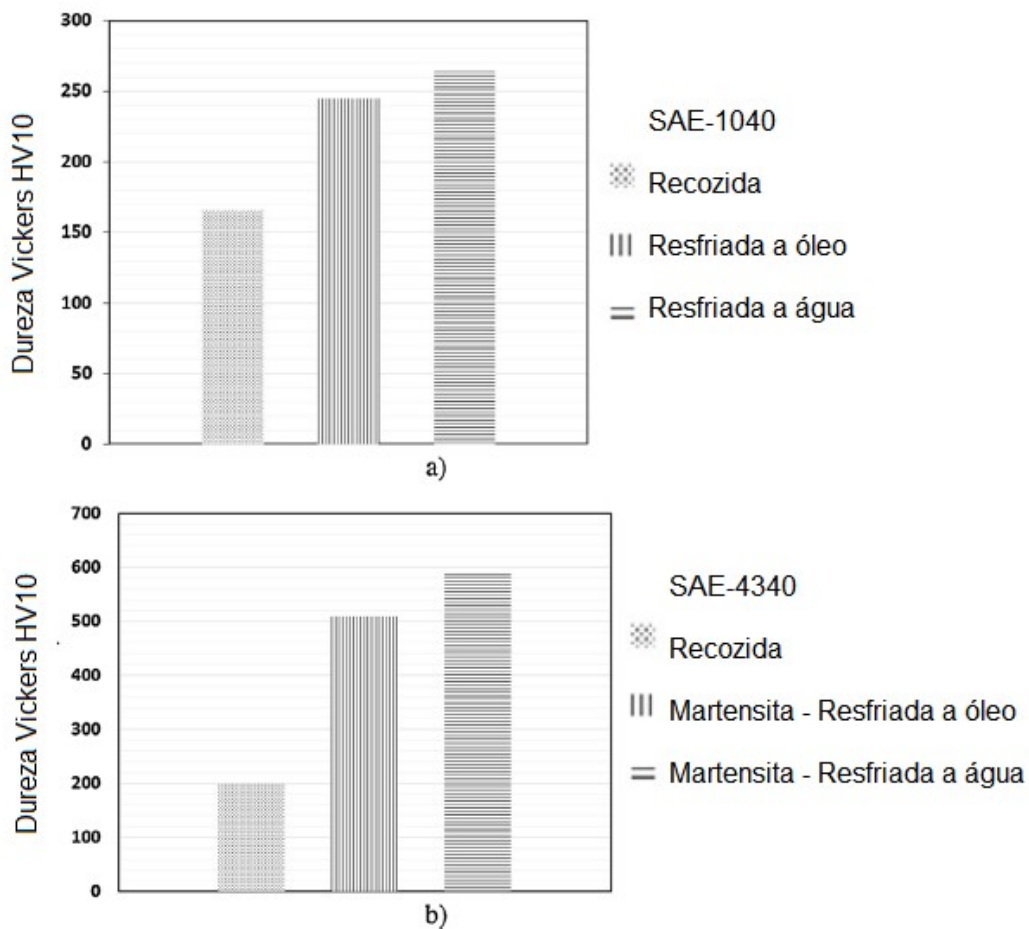
Fonte: EL RAYES *et al.*, 2014

El Rayes *et al.* (2014) também realizaram medidas de dureza Vickers para indicar a dureza das fases obtidas de diferentes tratamentos térmicos. Os resultados dos exames metalográficos são verificados por medidas de dureza. As Figuras 22a e b mostram que a dureza aumentou quando o tratamento térmico de ambos os



tipos de aço mudou de recozimento para resfriamento com óleo e água. Com o aço SAE-1040, como pode ser observado na Figura 22a, a dureza aumentou devido ao aumento do teor de perlita (fase dura) em relação à ferrita (fase macia), como mostrado anteriormente nos resultados microestruturais. Da mesma forma, com o aço SAE-4340, a dureza aumentou devido à mudança nas fases microestruturais sendo a perlita + ferrita obtida do recozimento, transformada em martensita nas taxas de resfriamento lenta e rápida obtidas do óleo e da água respectivamente, conforme representado na Figura 22b. A menor dureza da amostra resfriada com óleo em comparação com a resfriada com água deve-se ao fato de que o resfriamento mais lento utilizando o óleo leva a menor distorção na rede cristalina, menores tensões residuais e menores densidades de discordâncias, conforme relatado por Gür e Tuncer (2004).

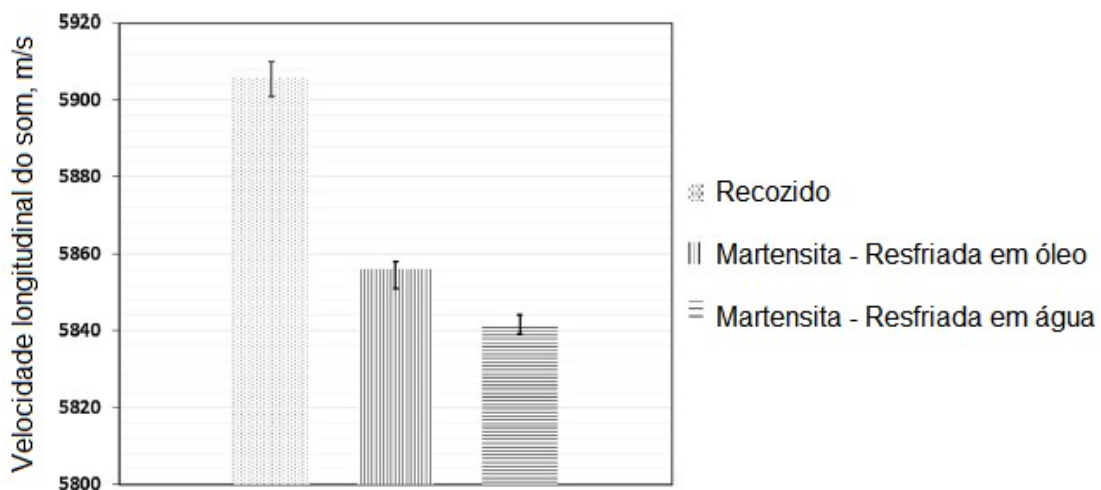
**Figura 22 - Variação da dureza com diferentes tratamentos térmicos com: (a) SAE-1040 e (b) SAE-4340.**



Fonte: adaptado de EL RAYES *et al.*, 2014

El Rayes *et al.* (2014) também relacionaram as medidas de velocidade ultrassônica das ondas longitudinais, e verificaram que as mesmas foram sensíveis às variações microestruturais resultantes dos diferentes tratamentos térmicos aplicados no aço SAE-1040 e 4340. Isso pode ser notado ao se observar a Figura 23 que relaciona a velocidade longitudinal do som e os diferentes tratamentos aplicados nas amostras do aço SAE-4340, ao mudar o tratamento térmico de recozimento para resfriamento a óleo e água foi verificada uma redução na velocidade do som. A razão para essa redução é devido à mudança na microestrutura da perlita para martensita semelhante ao que foi concluído por Prasad e Kumar (1994). Quando submetido ao processo de têmpera, o aço é resfriado rapidamente da faixa de austenitização até a temperatura ambiente, na qual cada grão de austenita se transforma repentinamente em ripas de martensita por cisalhamento, como confirmado por Gür e Çam (2007). Em comparação com a perlita, a martensita possui maior distorção da estrutura cristalina, maior densidade de discordâncias e menor módulo elástico, o que contribui para reduzir a velocidade do som.

**Figura 23 - Influência de diferentes fases do SAE-4340 na velocidade do som.**

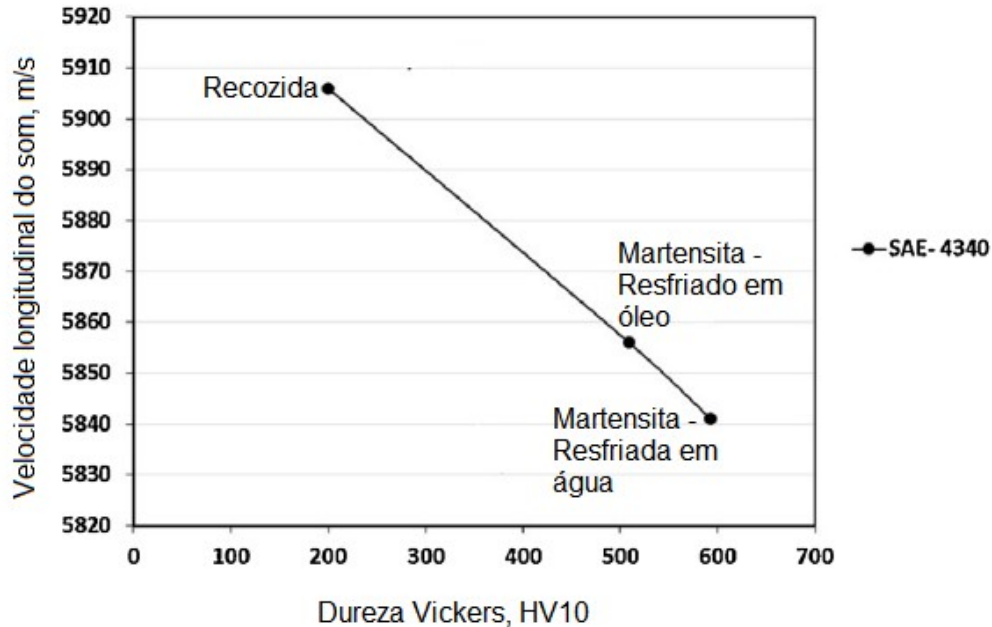


Fonte: adaptado de EL RAYES *et al.*, 2014

El Rayes *et al.* (2014) fizeram uma correlação entre propriedades ultrassônicas e mecânicas, onde uma relação inversa entre dureza e velocidade do som foi obtida com o aço SAE-4340 como mostra a Figura 24. Isso é atribuído à diferença nas microestruturas em que a martensita possui maior resistência a ondas

sonoras, bem como maior distorção da rede e densidade de discordâncias, o que reduz a velocidade do som mais do que a estrutura de perlita e ferrita.

**Figura 24 - Relação entre dureza Vickers e velocidade do som em diferentes teores de ferrita-perlita no SAE-4340.**



Fonte: adaptado de EL RAYES *et al.*, 2014

Algumas das conclusões de El Rayes *et al.* (2014) foram que no aço SAE-4340, a velocidade do som é reduzida na ordem de recozimento, resfriamento a óleo e resfriamento a água. Os principais parâmetros microestruturais que afetam as medições não destrutivas são a fração volumétrica de fases e o percentual de contornos de grãos. A velocidade ultrassônica pode ser bem correlacionada para avaliar as fases microestruturais e as propriedades mecânicas, como dureza.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAL

No presente trabalho foi utilizado um aço SAE-4340 (Cr-Ni-Mo), fornecido na forma de vergalhão laminado com 25 mm de diâmetro, a partir do qual foi cortado em cinco partes iguais de 5 mm de comprimento cada. Corte a serra com lubrificante para evitar o sobreaquecimento. A seleção desse tipo de aço foi baseada em sua importância em vários campos de aplicações industriais, nos quais ele é caracterizado principalmente pela durabilidade - é usado em trens de pouso de aeronaves, engrenagens e eixos de transmissão de potência. Além disso, os tipos de tratamentos térmicos escolhidos devem afetar características microestruturais, mecânicas e magnéticas assim como verificado por El Rayes *et al.* (2014).

As amostras foram submetidas a diferentes tipos de tratamentos térmicos em um forno elétrico de resistência. O primeiro tratamento foi austenitização a 850 °C por 30 min, seguido de resfriamento ao forno (recozimento completo). O segundo e o terceiro foram austenitização a 1000 °C por 30 min, seguidas de resfriamento a óleo e água (têmpera), respectivamente. O quarto foi austenitização a 1000 °C por 30 min, seguida de resfriamento ao forno (recozimento). Uma das amostras não foi submetida a nenhum tratamento e foi analisada como recebida do processo de fabricação. Essas amostras tiveram suas laterais e faces marcadas para garantir pontos de referência que permitissem correlacioná-las durante e após a realização das medições.

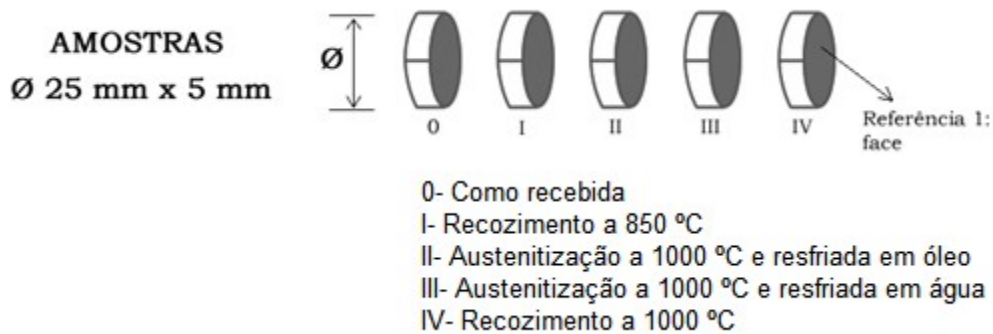
Um resumo com a numeração e tratamentos aplicados a cada amostra pode ser observado na Tabela 3.

**Tabela 3 - Resumo com os tratamentos térmicos aplicados nas amostras.**

Tipo de amostra	Nº da amostra	Tratamento aplicado	Tempo de tratamento (min)
	0	Como recebida	---
	I	Recozimento a 850 °C	30
Aço SAE 4340 (Ø 25 mm x 5 mm)	II	Austenitização a 1000 °C e resfriada em óleo	30
	III	Austenitização a 1000 °C e resfriada em água	30
	IV	Austenitização a 1000 °C e recozimento	30

Na Figura 25 se observa uma ilustração para melhor entendimento das dimensões das amostras e tratamentos térmicos que foram empregados. As mesmas são marcadas com números que lhes relaciona aos seus respectivos tratamentos conforme legenda da ilustração.

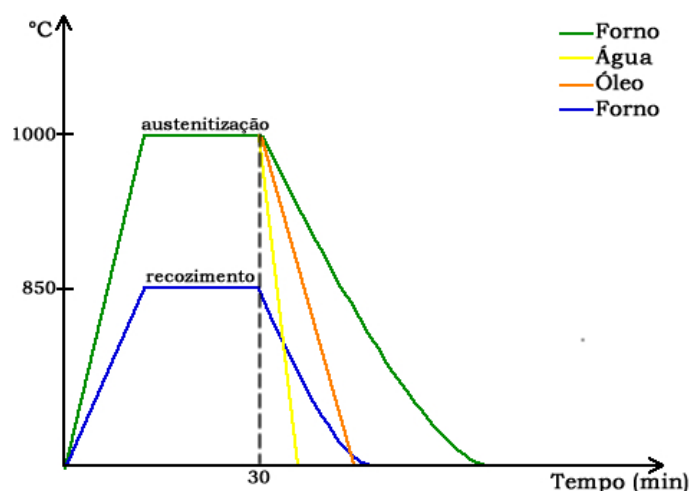
**Figura 25 – Desenho das amostras do aço 4340 com suas numerações e tratamentos térmicos**



Fonte: Própria

A Figura 26 ilustra os ciclos térmicos empregados nas amostras do aço SAE 4340, onde se aplicou os tratamentos de recozimento e austenitização. O comportamento dos aços durante o tratamento térmico depende basicamente das temperaturas de aquecimento e resfriamento, do tempo de permanência nestas temperaturas, das velocidades de aquecimento e resfriamento, como também da atmosfera no seu aquecimento (DA MAIA, FUTAMI e OLIVEIRA, 2019). O que se objetivou aqui foi a mudança nos tratamentos aplicados nas amostras, a fim de se obter diferentes microestruturas homogêneas.

**Figura 26 – Representação esquemática dos ciclos térmicos empregados nas amostras do aço SAE-4340.**

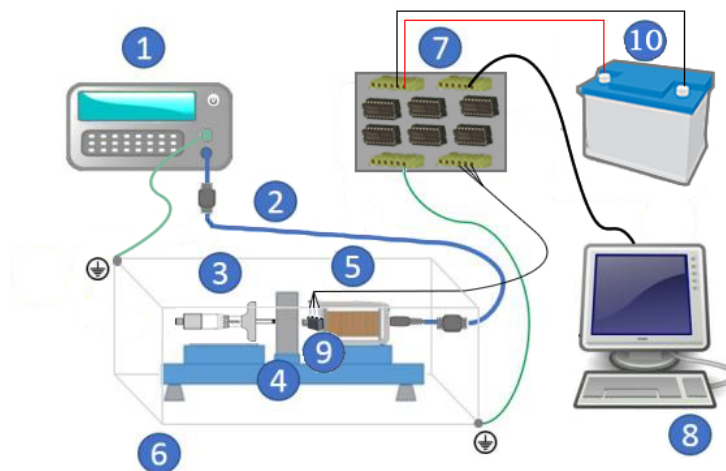


Fonte: Própria

## 3.2. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE

O equipamento de teste foi desenvolvido no laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais (GSCMat) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Sua configuração experimental pode ser melhor compreendida através da Figura 27.

**Figura 27 - Bancada experimental para o ensaio de permeabilidade magnética: (1) fonte de Corrente Contínua; (2) cabo blindado; (3) micrômetro para ajuste da amostra; (4) amostra; (5) solenoide; (6) gaiola de Faraday; (7) placa de aquisição de dados; (8) computador; (9) sensor Hall para detecção e (10) bateria 12 Vcc.**



Fonte: Própria

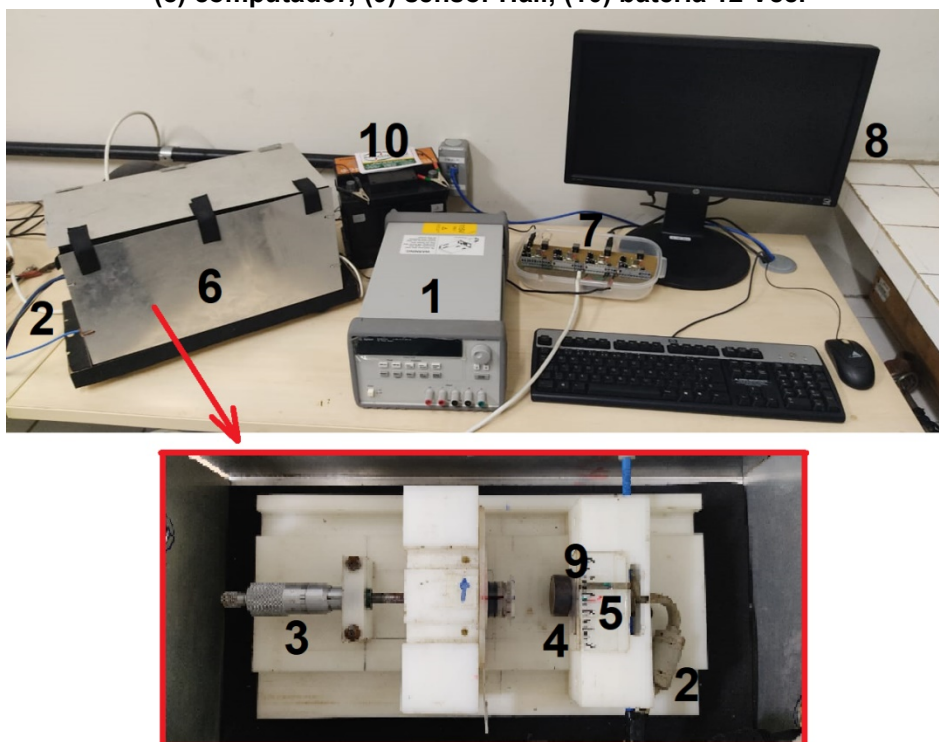
A alimentação do solenoide (5) se dá por uma fonte de corrente contínua (1). O solenoide tem as seguintes especificações: permeabilidade magnética ( $\mu$ ) 21,2567, resistência elétrica (R) 72  $\Omega$ , relação N/L (N = Núm. de espiras; L = Comp. solenoide) 133,8. O solenoide tem por função induzir um campo magnético na amostra (4) do aço SAE-4340. O sensor (9) escolhido é de efeito Hall linear modelo SS495A, da *Allegro MicroSystems*, com sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss e tensão de alimentação entre 0 e 10 V, tendo sido escolhido alimentá-lo com uma tensão contínua de 5 V proveniente da placa de aquisição (HONEYWELL DIVISION, 2018). Uma placa de aquisição de dados (7) multicanal é utilizada, a qual possui um conversor analógico-digital de 10 bits, uma entrada USB e uma saída regulada de tensão de 5 V e é alimentada por uma bateria de 12 Vcc de 55 A (10) que garante a estabilização do sinal, a saída regulada é utilizada na alimentação do sensor Hall.

Para garantir a mesma pressão entre as amostras e a bobina, é utilizado um micrômetro externo (3) 0-25 mm, resolução de 0,01 mm, fabricante Mitutoyo que movimenta a amostra e garante uma pressão constante. A bancada serve como

base para fixação do solenoide, do micrômetro e do sensor e é confeccionada em poliacetal, material com baixo coeficiente de atrito e boa estabilidade dimensional. A bancada conta com uma gaiola de Faraday (6) e cabo blindado (2) a fim de diminuir a interferência de sinais provenientes do meio. Para o tratamento dos sinais examinados, o computador (8) recebe os sinais da placa de aquisição de dados via cabo USB.

Para uma visualização mais real da bancada experimental, uma foto com todos os seus itens está apresentada na Figura 28.

**Figura 28 - Equipamento de ensaio (GSCMat, IFPB, PB): (1) fonte de alimentação; (2) cabo blindado; (3) micrômetro; (4) amostra; (5) solenoide; (6) gaiola de Faraday; (7) placa de dados; (8) computador; (9) sensor Hall; (10) bateria 12 Vcc.**



Fonte: Própria.

### 3.3. ENSAIO EXPERIMENTAL

O objetivo do trabalho é a detecção de tratamentos térmicos em aços SAE-4340. O estudo é realizado com cinco diferentes amostras para ser observado o efeito de como as diferentes microestruturas podem interferir nas respostas de densidade de linhas de campo  $B$  em um material ferromagnético, em função de uma intensidade de campo magnético aplicado  $H$  para avaliação da permeabilidade magnética. O princípio de funcionamento da técnica consiste em se aplicar uma

densidade de fluxo magnético no material para se obter o valor de  $B$  resultante da interação desse com a microestrutura. A permeabilidade magnética a ser analisada será a razão entre o valor final e o inicial da densidade de fluxo magnético  $B$  e servirá para avaliar a detecção da presença de tratamento térmico nas amostras estudadas. Além disso, é feito o estudo para verificar se é possível obter a direção de fácil magnetização do material em estudo, bem como verificar se a imposição de tratamentos exerce alguma alteração nessa direção.

### 3.3.1 Determinação da permeabilidade magnética

Para a execução dos ensaios, optou-se por aplicar uma tensão de 5 V na bobina de indução, baseado em trabalhos de alguns autores como Cavalcante (2013), Silva *et al.* (2016b) e Andrade (2016) que utilizaram as mesmas configurações do solenoide e verificaram que este valor apresenta-se num limiar intermediário ao ponto de saturação do sensor Hall, para aplicação da intensidade de campo magnético aplicado, não sofrendo interferência desse ponto de saturação. Um resumo com as características do solenoide pode ser observado na Tabela 4.

**Tabela 4 – Características do solenoide.**

Permeabilidade Magnética ( $\mu$ )	Resistência elétrica (R)	Relação N/L (N= nº de espiras e L= comp. do solenoide)
21,2567	72 $\Omega$	133,8

A permeabilidade magnética do núcleo do solenoide é obtida a partir da tangente de um gráfico que correlacione a variação de  $B$  (densidade de fluxo magnético) contra  $H$  (intensidade de campo magnético). Esse estudo foi apresentado na dissertação de Cavalcante (2013) onde mostra que a curva entre a densidade de linhas de campo e a intensidade de campo magnético é linear, e sabendo-se que para uma bobina com núcleo a relação entre a intensidade de campo e a densidade de campo magnético no sistema CGS é dado pela Equação 3:

$$B = \mu H \quad (3)$$

Onde:

$\mu$  = Permeabilidade do material.



Pode-se calcular a permeabilidade através da tensão de 5 V aplicados com a relação apresentada na Equação 4:

$$i = V/R \quad (4)$$

Onde:

$i$  = corrente

$V$  = tensão aplicada na bobina; e

$R$  = resistência da bobina.

Logo:

$$= 5/72$$

$$= 0,069 \text{ A}$$

$$B = (21,2567) \cdot (H),$$

$$\text{onde } H = NI/L = (133,8010) \cdot (0,069)$$

$$B = (21,2567) \cdot (9,2322)$$

$$B = 196,24 \text{ Gauss}$$

A permeabilidade magnética calculada é a razão entre o  $B$  que foi obtido no experimento com a presença da amostra dividido por 196,24 Gauss que foi o  $B$  calculado sem a amostra. Uma relação completa com os valores de campo magnético e intensidade estudado por Cavalcante (2013) é apresentada no Anexo A.

### 3.3.2. Análise microestrutural do material

As amostras do aço SAE 4340 foram submetidas à análise metalográfica, para o estudo de suas microestruturas. Foi utilizado um Microscópio Óptico NIKON FX 35XD com câmera acoplada. As imagens obtidas foram capturadas por um *software* de aquisição de imagem acoplado a um computador. Foram realizados os procedimentos necessários para a preparação de cada amostra antes de se efetuar a análise no microscópio óptico, que foram lixamento – partindo das lixas de granulação maior (220, 320, 400) para a finalização com as de menor granulação (600), polimento com pasta (alumina 1 e 0,3 $\mu$ m) e ataque com reagente Nital (2%), para após se analisar as microestruturas obtidas decorrentes de cada tratamento.

### 3.3.3. Análise da dureza do material

Foi usado o ensaio de dureza Rockwell C e foram realizadas cinco medições para cada amostra tratada termicamente e a média foi tomada. Os dados foram agrupados em gráficos que objetivam demonstrar a diferença de dureza de cada amostra de acordo com o tratamento aplicado. Tais parâmetros visam validar e correlacionar a dureza com a microestrutura das amostras estudadas, aço SAE 4340 ambas com diâmetro de 25 mm e comprimentos de 5 mm cada.

Foi utilizado o durômetro do fabricante Panambra, modelo RASN-RBD digital para realização do ensaio de dureza Rockwell C onde se utilizou um penetrador de diamante com cone de 120°, e pré-carga de 150 Kgf, conforme Figura 29, foi efetuada cinco medições para cada tipo de amostra onde a média foi tomada com intervalo de confiança de 95%.

**Figura 29 – Durômetro RASN utilizado no ensaio.**



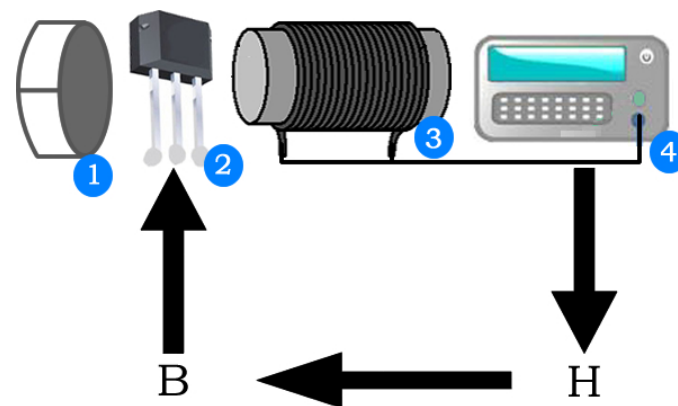
**Fonte: Própria**

### 3.3.4. Estudo do comportamento da permeabilidade magnética em função das microestruturas obtidas no material

As amostras de aço SAE 4340 com diâmetro de 25 mm e espessuras de 5 mm com diferentes microestruturas foram obtidas decorrentes da imposição dos tratamentos térmicos e foram submetidas à aplicação de valores de tensão de 5 V no solenoide que resultam em uma intensidade de campo magnético  $H$  de 8,2 Oe e densidade de fluxo magnético  $B$  de 196,24 G conforme cálculos descrito na Seção 3.3.1, onde a permeabilidade magnética calculada no presente trabalho foi a razão

entre a densidade de fluxo magnético medida no sensor após a colocação da amostra e a densidade de fluxo magnético sem a presença da amostra. As medições são realizadas no centro de cada amostra. Quinhentos sinais foram adquiridos de cada amostra e os valores de permeabilidade magnética foram obtidos com um intervalo de confiança de 95%. Esse procedimento pode ser melhor entendido a partir do esquema apresentado na Figura 30.

**Figura 30 - Esquema de posicionamento dos componentes da bancada para estudo da detecção do tratamento térmico no material: amostra (1), sensor Hall (2), solenoide (3) e fonte (4).**

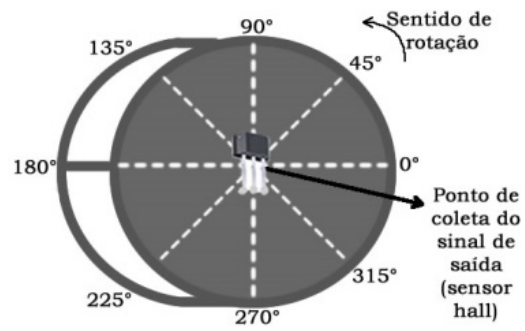


Fonte: Própria

### 3.3.5. Estudo do efeito da anisotropia do material

Três amostras do aço SAE-4340 identificadas como: amostra 0 (como recebida), amostra I (recozida a 850 °C) e amostra II (austenitização a 1000 °C e resfriada em óleo) foram submetidas à aplicação do valor de tensão de 5 V no solenoide conforme os mesmos procedimentos descritos na Seção 3.3.4 para obtenção da permeabilidade magnética e esses valores foram medidos com a rotação das peças. As amostras foram marcadas em uma de suas faces a partir do centro, onde foram divididas em 8 partes iguais com incrementos de 45 graus entre cada marcação. As medições foram realizadas exatamente a 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 e 360 graus. Isso possibilita uma análise da interferência que as medições com rotação da amostra causam no valor da permeabilidade magnética medido. O processo empregado nas amostras para aplicação do estudo da anisotropia pode ser melhor entendido a partir da Figura 31. Quinhentos sinais foram adquiridos de cada amostra e os valores de permeabilidade magnética foram obtidos com um intervalo de confiança de 95%.

**Figura 31 - Esquema de posicionamento do sensor para medições do efeito da anisotropia com aplicação do campo induzido.**



**Fonte: Própria**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

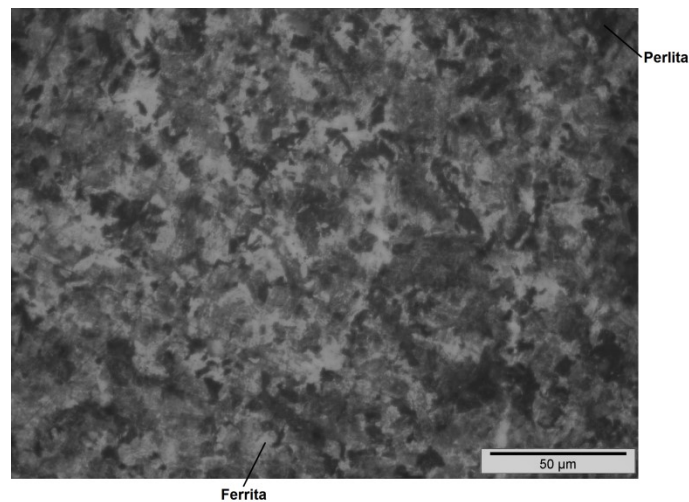
Iniciando com o processo de análise microestrutural objetiva-se identificar as microestruturas de cada amostra. Essas respectivas microestruturas visam confirmar se os tratamentos aplicados atingiram seus objetivos. Na sequência, é aplicado o ensaio de dureza Rockwell C que já é consolidado para validação dos tratamentos térmicos aplicados. Em seguida, um ensaio eletromagnético é aplicado para detecção das diferenças microestruturais nos tratamentos térmicos, em função da mudança da permeabilidade magnética. Por fim, um estudo é realizado para analisar a existência de anisotropia magnética no material.

### 4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Mudanças de microestruturas em materiais, devido a ciclos térmicos empregados em processos de fabricação como soldagem levam a mudança na permeabilidade dos materiais (TSCHIPTSCHIN, 2020). Ensaio eletromagnéticos não destrutivos vêm sendo empregados para acompanhar essas variações (EL RAYES *et al.*, 2014) (CAVALCANTE, 2008) (GÜR e ÇAM, 2007) (GÜR e TUNCER, 2005) (SILVA *et al.*, 2016b) (TAVARES *et al.*, 2019) (KALELI e GÜR, 2020). Nas Figuras 32 a 36 são apresentadas as microestruturas resultantes dos tratamentos empregados no presente estudo e na Figura 37 os seus respectivos valores de dureza. Uma amostra do aço 4340 como recebida foi comparada com tratamentos de recozimento nas temperaturas de 850 °C e 1000 °C, para analisar o efeito da temperatura nas mudanças de permeabilidade do material. Além disso, o efeito da velocidade de resfriamento nessas medidas também foi estudado pela aplicação de diferentes velocidades de resfriamentos a partir de 1000 °C, sendo uma resfriada em óleo e outra em água.

A Figura 32 mostra a micrografia óptica da amostra como recebida, nela é possível identificar a presença dos constituintes ferrita (região clara) + perlita (região escura) na forma de grãos equiaxiais. Esses constituintes são típicos de aços SAE 4340 (BARROS *et al.* 2015). A dureza Rockweel C obtida para esta condição foi de 30 HRC.

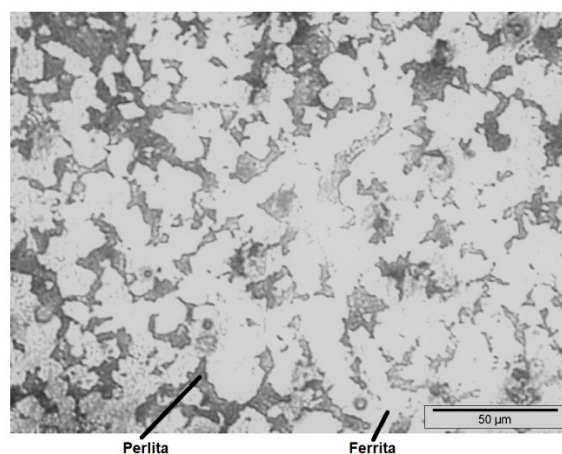
**Figura 32 – Micrografia óptica da amostra como recebida (200x).**



**Fonte: Própria**

Na Figura 33 é apresentada a micrografia óptica da amostra após tratamento de recozimento a 850 °C, e quando comparada com a amostra como recebida percebe-se um aumento das regiões claras que são ferromagnéticas. Esses resultados também foram observadas por Ferreira *et al.* (2016) e El Rayes *et al.* (2014) e estão de acordo com Colpaert (2008). A dureza obtida para esta condição foi de 20 HRC. Esta redução, em relação à condição como recebida, se deve ao fato de a dureza de uma ferrita ser de 90 HB e a de uma perlita de 250 HB, ou seja, o aumento das regiões claras leva a redução da dureza média da amostra.

**Figura 33 – Micrografia óptica da amostra recozida a 850 °C (200x).**



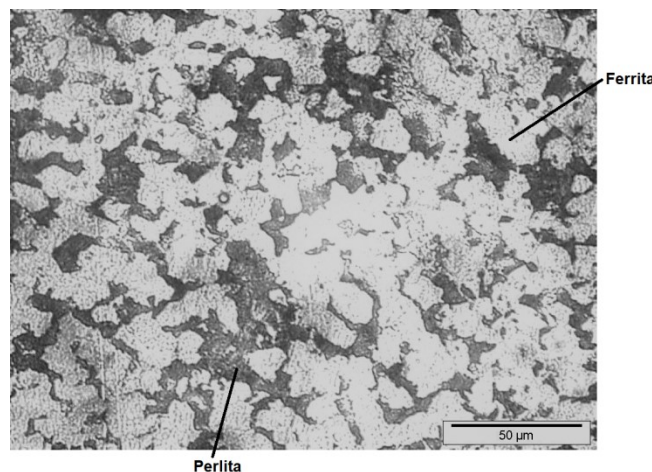
**Fonte: Própria**

Para ampliar a faixa de tratamentos aplicados nas amostras e observar o comportamento da microestrutura, também foi efetuado o tratamento de

austenitização a 1000 °C com posterior resfriamento ao forno (recozimento). A diferença desse tratamento é que se eleva a temperatura da amostra até acima da zona crítica (zona de austenitização) conforme explicado na Seção 2.4. Quando se aquece um aço 4340 a estrutura perlita se decompõe ao chegar na zona crítica e se transforma em austenita. Esta zona possui duas fases: a ferrita que ainda não se decompôs e a austenita proveniente da perlita. Acima da zona crítica se tem apenas a fase austenita, pois a ferrita se decompõe no final da zona crítica. Durante o resfriamento o processo é o inverso, ou seja, forma-se ferrita nos contornos da austenita na zona crítica e a austenita que sobra vira perlita, de modo, que na temperatura ambiente resulta novamente a formação de ferrita e perlita (TSCHIPTSCHIN, 2020) (COLPAERT, 2008).

A Figura 34 apresenta a micrografia óptica da amostra recozida a 1000 °C, nela é possível observar uma estrutura homogênea com a presença de grãos de perlita (região escura) e ferrita (região clara). O que se observa é uma estrutura muito próxima da recozida a 850 °C conforme apresentado na Figura 33, mas com uma quantidade de perlita maior (região escura) que se encontra em maior percentual. Contudo, a dureza nesta condição passou para 30 HRC, a mesma da condição como recebida. Este ganho de dureza está relacionado com o aumento da quantidade de fase perlita que possui maior dureza do que a ferrita (EL RAYES *et al.*, 2014).

**Figura 34 – Micrografia óptica da amostra resfriada ao forno (recozimento a 1000 °C e 200x).**



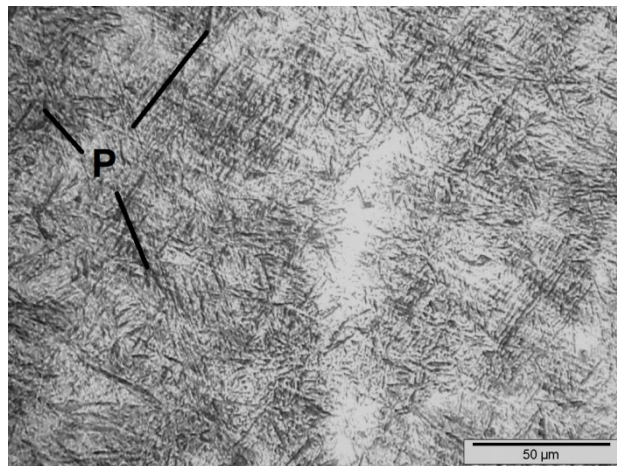
**Fonte: Própria**

O tratamento anterior e os dois a seguir foram realizados para analisar o efeito da velocidade de resfriamento a partir da temperatura de 1000 °C. Três

velocidades de resfriamentos foram comparadas: no forno (mais lento), em óleo (intermediário) e na água (mais rápido).

A amostra resfriada com óleo, Figura 35, é composta por longas ripas de martensita (escura) coexistindo com uma subestrutura de poucas placas de martensita (regiões marcadas com P - escuro), que normalmente consiste de finas ripas aos pares, como referidas no Manual de Metais da ASM (*American Society for Metals*). Essa característica surge da velocidade de resfriamento mais lenta do meio óleo, quando comparada com a água (EL RAYES *et al.*, 2014). A formação da martensita observada para esse tratamento também foi apresentada por Barros *et al.* (2015) e El Rayes *et al.* (2014). A dureza obtida neste tratamento foi de 52 HRC. A estrutura martensita é o constituinte de maior dureza dos aços comuns e forma-se diretamente da austenita e possui uma estrutura fina que dificulta o deslizamento de planos atômicos e o movimento dos domínios magnéticos (CALLISTER, 2002) (CULLITY, 2009) (PRAXEDES, 2012).

**Figura 35 – Micrografia óptica da amostra resfriada com óleo (500x).**



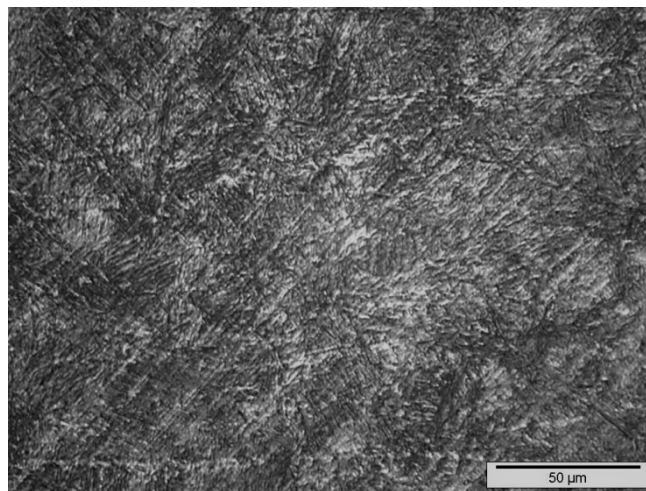
**Fonte: Própria**

Na Figura 36 é possível observar que a micrografia da amostra resfriada com água é composta de 100% de martensita com ripas relativamente curtas. Esse resultado se mostrou dentro do esperado, pois a característica do meio utilizado para o processo de têmpera nessa amostra (água) e a alta temperabilidade do aço em estudo (SAE-4340) fazem com que a austenita se transforme em martensita sem que ocorra formação de ferrita e perlita, resultados semelhantes foram encontrados por Gur e Tuncer (2005 e 2007) e El Rayes *et al.* (2014). A dureza obtida com o resfriamento em água foi de 63 HRC.



Os tratamentos que utilizam a água e óleo como meio de resfriamento (têmpera) demonstraram os maiores valores de dureza, e também estão de acordo com a literatura onde se verifica que a dureza aumentou devido à mudança nas fases microestruturais sendo a austenita, transformada em martensita nas taxas de resfriamento lenta e rápida obtidas do óleo e da água, respectivamente. A diferença de dureza da amostra resfriada com óleo em comparação com a amostra resfriada com água deve-se ao fato de que o resfriamento mais lento ao óleo leva a menor distorção na rede cristalina, menores tensões residuais e menores densidades de discordâncias, conforme observado por Gür e Tuncer (2004). Já a amostra que foi resfriada no forno após austenitização, teve seu valor de dureza próximo das amostras como recebida e acompanha a definição do recozimento que “apaga” as estruturas resultantes de tratamentos térmicos ou mecânicos anteriormente sofridos conforme relatado por Colpaert (2008).

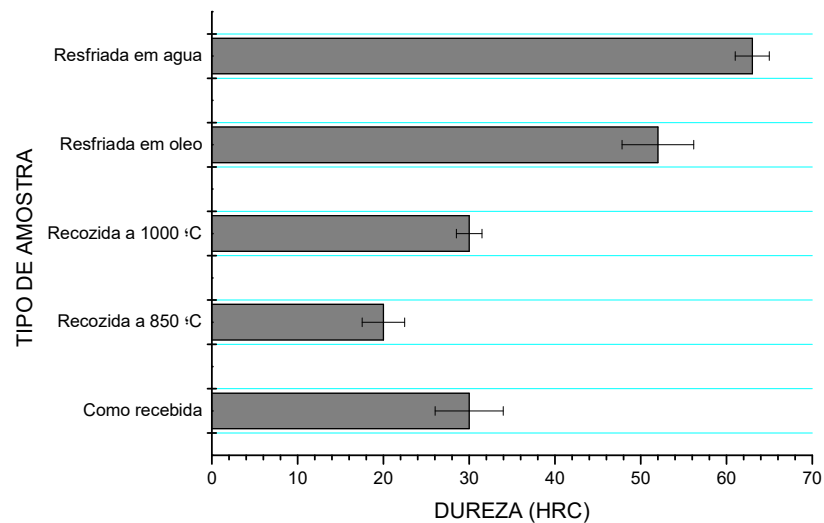
**Figura 36 – Micrografia óptica da amostra resfriada com água (100% de martensita/500x).**



**Fonte: Própria**

O objetivo do estudo da dureza nas amostras foi verificar se após a imposição dos tratamentos térmicos, se obteve estruturas características de cada tratamento de acordo com o meio de resfriamento e temperatura aplicada para o aço estudado. Os tratamentos tiveram os resultados de dureza compatíveis com os mesmos. A Figura 37 apresenta a variação das durezas com os tratamentos térmicos empregados.

**Figura 37 – Valores de dureza Rockwell C obtidos para cada amostra em função dos tratamentos aplicados.**



**Fonte: Própria**

## 4.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA EM FUNÇÃO DA MICROESTRUTURA DOS TRATAMENTOS

Na Figura 38 é apresentada a variação das medidas de permeabilidade magnética em função do tratamento aplicado nas amostras ou da ausência de tratamento para o caso da amostra como recebida. Nota-se da análise da mesma, uma subida nos valores de permeabilidade magnética para a amostra recozida na temperatura de 850 °C em comparação a amostra como recebida, seguido de um decaimento em função do tratamento que lhe foi aplicado, sendo austenitização a 1000 °C seguido de resfriamento ao forno, óleo e água.

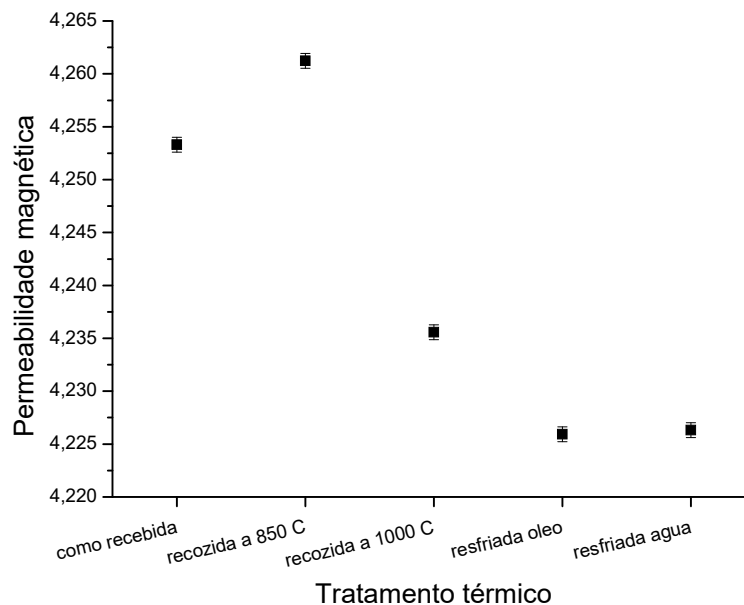
O recozimento na temperatura de 850 °C eleva o valor de permeabilidade da amostra como recebida pelo aumento da quantidade de fase ferrita. Esta é ferromagnética e o aumento leva ao crescimento dos valores de permeabilidade.

O recozimento na temperatura de 1000 °C com resfriamento em forno teve seus valores de permeabilidade reduzidos em relação ao tratamento na temperatura de 850 °C. Esta diferença se deve a redução da quantidade da fase ferromagnética ferrita e aumento da perlita. Esta última possui uma estrutura formada por lamelas alternadas de ferrita e cementita que dificultam o movimento das paredes dos

domínios magnéticos e levam a redução dos valores de permeabilidade do material. Com a utilização do método de interceptação linear de Heyn foi verificado que a microestrutura recozida a 850 °C apresentava 36% de perlita e 64% de ferrita, já a microestrutura recozida a 1000 °C apresentava um valor de 41,5% de perlita e 58,5% de ferrita na sua composição, todas as medidas foram realizadas com um intervalo de confiança de 95% (ASTM E-112, 2010). A presença dessas fases também foi observada por El Rayes *et al.* (2014) e Barros *et al.* (2015) que estudaram o mesmo tipo de aço.

O estudo da aplicação de meios de resfriamento com velocidades diferentes a partir da temperatura de 1000 °C mostrou a redução dos valores de permeabilidade para um patamar para os meios ao óleo e a água. Ambos os tratamentos apresentam a formação da estrutura martensita que corresponde a de maior dureza dos aços comuns. Esta microestrutura fina dificulta o movimento dos domínios magnéticos e reduz a permeabilidade.

**Figura 38 - Variação das medidas de permeabilidade magnética em função do tratamento empregado na amostra como recebida, recozida (850 °C), resfriada no forno (recozida a 1000 °C), resfriada em óleo e resfriada em água.**



**Fonte: Própria**

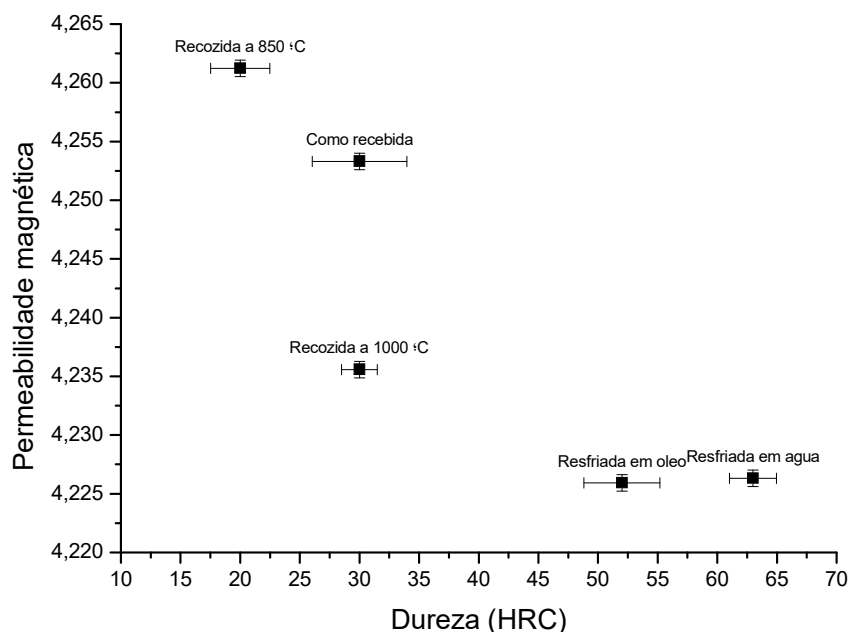
Um fato observado foi que a formação da martensita observada nas amostras resfriadas em óleo e água não foi diferenciada pelo estudo da permeabilidade magnética, os valores de permeabilidade se mostraram praticamente iguais (4,22)

aplicando-se a margem de erro. A microestrutura obtida pelo processo de têmpera foi detectada, porém o meio de resfriamento utilizado não foi possível ser identificado pela análise da permeabilidade magnética, já com a micrografia e ensaio de dureza foi possível diferenciar o meio utilizado, pois os resultados se mostraram distintos.

### 4.3 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE DUREZA X PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Os resultados obtidos do ensaio de dureza, por ser um ensaio já consolidado no mercado, ajudam na validação da bancada experimental no ensaio de permeabilidade magnética, pois os valores apresentados nos ensaios apresentam uma relação inversa com o ensaio de dureza, na medida em que o aumento da dureza provoca uma diminuição da permeabilidade magnética. Essa correlação pode ser observada na Figura 39 que relaciona essas variáveis.

**Figura 39 – Correlação entre dureza x permeabilidade magnética para as amostras do aço SAE-4340.**



**Fonte: Própria**

Ao analisar a Figura 39 é possível visualizar essa relação inversa entre a dureza e permeabilidade magnética, nela é possível verificar que a amostra que foi

submetida à têmpera por resfriamento em água apresentou o maior valor de dureza (63 HRC) e o menor valor de permeabilidade magnética (4,2263). Partindo para a outra extremidade da mesma figura, se observa que a amostra submetida ao tratamento de recozimento a 850 °C apresentou os menores valores de dureza (20 HRC) e os maiores valores de permeabilidade magnética (4,26123).

#### 4.4 ESTUDO DA ANISOTROPIA MAGNÉTICA DO MATERIAL

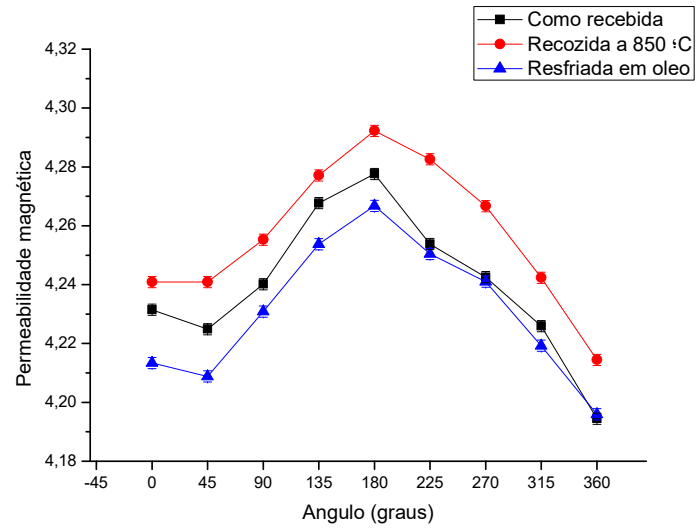
A pesquisa aqui analisada estudou a anisotropia magnética de amostras de um aço SAE 4340 como recebido (laminado), recozido a 850 °C e resfriado em óleo, mostrando que as propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos sofrem interferência da microestrutura e das condições de tensões provenientes de deformação plástica. Isso é causado pelos processos convencionais de manufaturas, que levam ao comportamento anisotrópico dessas propriedades, conforme observado por Landgraf *et al.*, (2003).

O procedimento para o estudo da anisotropia magnética consistiu na medição no centro das três diferentes amostras sob análise, sendo as amostras giradas de 0 a 360 graus. O comportamento obtido da permeabilidade magnética em função do ângulo de rotação das amostras pode ser observado na Figura 40. A intensidade de campo magnético  $H$  foi mantida constante (8,2 Oersted).

A Figura 40 mostra a variação da permeabilidade magnética em função do ângulo de rotação para as amostras como recebida, recozida a 850 °C e resfriada em óleo. Nota-se que as três mantêm o mesmo comportamento. Isto indica a existência de uma anisotropia magnética no material como recebido, devido ao processo de fabricação e que a imposição dos tratamentos realizados não modificam este comportamento.

As três condições da Figura 40 indicam um valor máximo para a permeabilidade magnética para o ângulo de 180 graus, ou seja, na direção de 0 a 180 graus, que corresponde ao diâmetro das amostras circulares, existe uma direção de fácil magnetização no sentido do ângulo de 180 graus. Silva *et al.* (2016a) observaram resultados similares ao estudarem a anisotropia em aços SAE 1045, devido ao processo de fabricação.

**Figura 40 - Variação da permeabilidade magnética de cada amostra com seu respectivo tratamento térmico, após as mesmas serem rotacionadas de 45 em 45 graus.**



**Fonte: Própria**

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou a detecção de tratamentos térmicos em amostras de um aço SAE 4340 através de medidas de permeabilidade magnética, determinadas na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos, bem como a anisotropia presente no material, chegando às seguintes considerações:

- i. O ensaio eletromagnético mostrou ser capaz de diferenciar os diferentes tratamentos térmicos aplicados em um aço SAE 4340.
- ii. As medidas mostram serem sensíveis ao aumento da fase ferromagnética ferrita entre a condição como recebida e recozida.
- iii. As medidas de permeabilidade magnéticas realizadas na amostra resfriada no forno (recozida a 1000 °C) mostram que os resultados foram inferiores aos da condição recozida a 850 °C, esta diferença se deve a redução da quantidade da fase ferromagnética ferrita e aumento da perlita, fato esse validado pela micrografia óptica e ensaio de dureza.
- iv. As condições resfriadas ao óleo e água tiveram os menores valores de permeabilidade magnética, isto se deve a formação de uma microestrutura fina denominada martensita, formada em materiais de alta temperabilidade.
- v. O ensaio eletromagnético foi capaz de observar anisotropia magnética proveniente do processo de fabricação do material e obteve a direção de fácil magnetização das amostras. Mostrou que esta independe do tratamento aplicado.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- i. Aplicar a técnica em amostras de mesmo material (aço SAE 4340), porém com diferentes espessuras;
- ii. Aplicar a técnica em amostras com geometrias diferentes; e
- iii. Aplicar a técnica em amostras de material recolhido em aplicações práticas como engrenagens ou trens de pouso de aeronaves, e efetuar a catalogação de acordo com os dados obtidos de permeabilidade magnética x dureza x análise microestrutural, podendo classificar tais amostras e contribuir para o campo da manutenção preditiva.

## **PUBLICAÇÕES ACEITAS EM EVENTOS**

MOMAG 2020 – 19º SBMO: Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º CBMAG: Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo.

- i. Artigo 172 - Detecção de Tratamentos Térmicos e Anisotropia Magnética em um Aço SAE 4340 através de um Ensaio Eletromagnético; e
- ii. Artigo 184 - Detection of the Sigma Phase in a Duplex Stainless Steel Through Measurements of Magnetic Permeability.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI - Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção. **NA001: Qualificação e Certificação de Pessoas em Ensaio Não Destrutivos. Verificação das Propriedades.** São Paulo: ABENDI, 2012.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 136: Tratamentos térmicos dos aços – terminologia e definições.** São Paulo: ABNT, 1997.

AÇOSPORTE - Comercial de aços Ltda. **Catálogo do fabricante Aço 4340.** Disponível em: <http://www.acosporte.com.br/aco-sae-4340>. Acesso em: 15 mar. 2020.

ANDRADE, A. L. S. S. **Ensaio Eletromagnético não Destrutivo para Detecção de Anisotropia.** 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal da Paraíba (IFPB), João Pessoa-PB, 2016.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM E 112-10: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.** 26 f., 2010.

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

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

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 5 ed. Rio de Janeiro: LCT, 2002.

CARDOSO, A. S. M. **Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo – USP, 2011.

CAVALCANTE, A. F.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; SILVA, E. M.; SANTOS, N. C.; SILVA, A. A. Study of the Application of a Hall Sensor and an Artificial Neural Network for Recognition of Different Types of Thermal Treatment by Which an SAE 1045 Steel was Subjected. **Iberian Latin American Congress on Computation Methods in Engineering (XXIX CILANCE)**, Maceio, Alagoas, Brazil, Nov. 2008.

CAVALCANTE, D. C. M. **Estudo da Interação das Linhas de Campo sobre uma Amostra de Aço SAE 1020 Por Meio de Medidas de Tensão Hall.** 2013. 89 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, 2013.

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

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. John Wiley & Sons, 2009.

DA COSTA, A. L. V.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**, 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

DA MAIA, B. I.; FUTAMI, A. H.; OLIVEIRA, M. A. Um guia para padronização do processo de tratamento térmico em fornos contínuos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 14, n. 2, p. 67-77, 2019.

EL RAYES, M. M.; EL-DANAF, E. A.; ALMAJID, A. A. Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE-1040 and 4340 steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 216, p. 188–198, 2014.

FERREIRA, A. G. P.; SANTOS, R. L.; IGREJA, S. A. A.; GONÇALVES, NASCIMENTO, F. A.; SOARES, L. S.; E. J. F. Caracterização Microestrutural e Mecânica de um Aço Baixo Teor de Carbono Tratado em Meios Diversos de Resfriamento. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Natal-RN, Brasil. Nov. 2016.

GDD, metais. **GDD 4340 catálogo do fabricante**. Disponível em: <https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-4340.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

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

GÜR, C. H.; TUNCER, B. O. Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement. **Materials Characterization**, v. 55, p. 160– 166, 2005.

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

HONEYWELL DIVISION. **Linear Hall-Effect Sensor ICs, datasheet**. USA: 2018.

KALELI, T; GÜR, C. H. Determination of surface residual stresses in carburised AISI 8620 steel by the magnetic Barkhausen noise method. **The British Institute of Non-Destructive Testing**, v. 62, n. 7, p. 416-421, 2020.

LANDGRAF, F. J. G.; YONAMINE, E. T. M.; CUNHA, M. A. Modelling the angular dependence of magnetic properties of a fully processed non-oriented electrical steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, p. 254-255, 2003.

LEITE, J. P. **Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material**. 2014. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa – PB, 2014.

MARTINEZ, G. A. *et al.* Use of magnetic techniques for characterization of the microstructure evolution during the annealing of low carbon steels. **ECNDT**, 2006.

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

PARDAL, J. M.; TAVARES, S. S. M.; FONSECA, M. P. C.; SILVA, M. R.; FERREIRA, M. L. R. Study of Deleterious Phase Precipitation Under Continuous Cooling of Superduplex Stainless Steel UNS S32750. **Mater. Sci. Technol**, v. 28, n. 3, p. 295–302, 2012.

PRASAD, R., KUMAR, S. Study of the influence of deformation and thermal treatment on the ultrasonic behaviour of steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 42, p. 51-59, 1994.

PRAXEDES, T. O. **Sistema Experimental para Realização de Ensaios Não Destrutivos Magnéticos e Sua Aplicação na Avaliação da Degradação Microestrutural Do Aço A516 Grau 60**. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza – CE, 2012.

SANCHEZ, J. C.; BENITEZ, J. P.; PADOVESE, L. R. Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise. **NDT E Int.**, v. 40, p. 168–172, 2007.

SERNA-GIRALDO, C. P. **Avaliação de juntas soldadas de aços carbono através do ruído magnético de Barkhausen**. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo – SP, 2007.

SILVA, E. M. Ensaio não destrutivo baseado na interação de linhas de campo magnético e microestrutura para determinação da anisotropia magnética. **MOMAG: 16º SBMO – Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 11º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**, 2014.

SILVA, E. M.; LEITE, J. P.; FRANÇA NETO, F. A.; LEITE, J. P.; FIALHO, W. M. L.; ALBUQUERQUE, V. H. C. ; TAVARES, J. M. R. S. Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel.

**Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 3, p. 1106–1111, 2016b. doi:10.1520/JTE20130313. ISSN 0090-3973

SILVA, E. M.; PAULA, A. M. R.; LEITE, J. P.; LEITE, J. P.; ANDRADE, L. S. S.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J. M. R. S. Detection of the Magnetic Easy Direction in Steels Using Induced Magnetic Fields. **Metals - Open Access Metallurgy Journal**, v. 6, n. 12, p. 317, 2016a.

TARTAGLIA, J. M.; LAZZARI, K. A.; HUI, G. P.; HAYRYNEN, K. L. A comparison of mechanical properties and hydrogen embrittlement resistance of austempered vs quenched and tempered 4340 steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 39, n. 3, p. 559 –576, 2008.

TAVARES, S. S. M.; NORIS, L. F.; PARDAL, J. M.; DA SILVA M. R. Temper embrittlement of supermartensitic stainless steel and non-destructive inspection by magnetic Barkhausen noise. **Engineering Failure Analysis**, v. 100, p. 322 – 328, 2019.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Tratamento Térmico de Aços**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - USP, 2020. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO%20T%C3%89RMICO%20DE%20A%C3%87OS.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2020.

VILAR, R. Têmpera Martensítica. *In*: SEABRA, A. V.; LOUREIRO, A. P. (coord.). **Curso Tratamento Térmico dos Aços**. Lisboa: Ordem dos Engenheiros, v. 2, 1981.

WLODARSKI, Z. Analytical description of magnetization curves. **Elsevier Physica B**, v. 373, n. 2, p. 323-327, 2006.

## ANEXO A - CAMPO MAGNÉTICO EM RELAÇÃO A INTENSIDADE

Na Tabela abaixo se encontra a relação campo magnético e intensidade estudado por Cavalcante (2013).

Tabela - Campo magnético em relação a intensidade (CAVALCANTE, 2013).

Corrente elétrica (Ampere)	Campo magnético (Gauss)	Intensidade de campo magnético (Oersted)	Margem de erro (%)
0,034	112,0	4,522	0,88685
0,041	137,6	5,453	0,70319
0,048	156,8	6,384	0,75856
0,055	179,2	7,315	0,5278
0,062	198,4	8,246	0,70299
<b>0,069</b>	<b>217,6</b>	<b>9,177</b>	<b>0,71420</b>
0,076	233,6	10,108	0,70428
0,083	256,0	11,039	0,77068
0,090	275,2	11,970	0,67414
0,097	317,2	12,901	0,66208
0,104	320,0	13,832	0,74122
0,111	342,4	14,763	0,52458
0,118	358,4	15,694	0,69413
0,125	374,4	16,625	0,63454
0,132	387,2	17,556	0,73521
0,139	406,4	18,487	0,66294