



Louise Gomes de Lima

**Análise de Tratamentos Térmicos em um Aço 4340 pelo
Ruído Magnético de Barkhausen**

**João Pessoa - PB
Dezembro de 2023**



Louise Gomes de Lima

Análise de Tratamento Térmico em um Aço 4340 pelo Ruído Magnético de Barkhausen

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Edgard de Macedo Silva, Dr.

João Pessoa – PB, Dezembro de 2023
©Louise Gomes de Lima

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

L732a

Lima, Louise Gomes de.

Análise de tratamentos térmicos em um aço 4340 pelo Ruído Magnético de Barkhausen / Louise Gomes de Lima. – 2023.

66 f. : il.

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

Orientador: Prof. Dr. Edgard Macedo Silva.

1. Engenharia elétrica. 2. Ruído Magnético de Barkhausen (RMB). 3. Aço SAE 4340. 4. Anisotropia. 5. Dureza Rockwell C. I. Título.

CDU 537.8



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

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LOUISE GOMES DE LIMA

**ANÁLISE DE TRATAMENTO TÉRMICO EM UM AÇO 4340 PELO RUÍDO MAGNÉTICO DE
BARKHAUSEN**

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

Aprovado em 06 de dezembro de 2023

Membros da Banca Examinadora:

Dr. EDGARD DE MACEDO SILVA

IFPB – PPGEE

Dr. JEFERSON COSTA E SILVA

IFPB – PPGEE

Dr. ALFREDO GOMES NETO

IFPB – PPGEE

Dr. JOÃO PEREIRA LEITE

UFPB

Documento assinado eletronicamente por:

- **Edgard de Macedo Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/01/2024 20:30:07.
- **Jefferson Costa e Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/01/2024 22:23:58.
- **Alfredo Gomes Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/01/2024 22:42:46.
- **João Pereira Leite**, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 15/01/2024 18:23:49.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 23/11/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 500022
Verificador: d4b797d855
Código de Autenticação:



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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora de superfície	12
Figura 2.	Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora envolvente	13
Figura 3.	Mapa de anisotropia magnética usando o valor RMS nas amostras deformadas dos aços inoxidáveis AISI a) 409, b) 430 e c) 441A, para as diferentes porcentagens de deformação axial.	17
Figura 4.	Diagrama de equilíbrio ferro-carbono	22
Figura 5.	Curvas de têmpera em óleo e em água	23
Figura 6.	Macrografia de junta soldada de passe único	24
Figura 7.	Representação esquemática de distribuição de temperatura na ZTA	25
Figura 8.	Exemplificação da faixa de recozimento dos aços	27
Figura 9.	Microestrutura do aço AISE 1010 submetida a recozimento com aumento de 50x	28
Figura 10.	Temperaturas recomendadas, para aços carbono, para a austenitização para recozimento, normalização e têmpera	29
Figura 11.	Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento e normalização, superpostos à curva TRC de um aço	30
Figura 12.	Microestrutura de um aço AISE 1010, normalizado (resfriado ao ar) com aumento de 50x	30
Figura 13.	Microestrutura de um aço SAE 4340 submetido à têmpera com resfriamento em água	32
Figura 14.	Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenimento	32
Figura 15.	Microestruturas obtidas por microscopia eletrônica de varredura do aço SAE-1040 em condições de (a) recozimento, (b) resfriamento em óleo e (c) resfriamento em água	34
Figura 16.	Microestruturas obtidas por microscopia eletrônica do aço SAE-4340 em condições de (a) recozimento, (b) resfriamento em óleo e (c) resfriamento em água	35
Figura 17.	A influência de diferentes conteúdos de perlita (P) e ferrita (F) na velocidade do som no aço SAE-1040	36

Figura 18.	Influência das diferentes fases no aço SAE-4340 na velocidade do som	37
Figura 19.	Amplitudes do Ruído Magnético de Barkhausen. a) Amostra como recebida. b) Amostra resfriada em água. c) Amostra resfriada no ar. d) Amostra resfriada no óleo	39
Figura 20.	Variação das medidas de permeabilidade magnética relativa na amostra recebida e nas amostras em função do tipo de tratamento térmico aplicado	40
Figura 21.	Desenho das amostras do aço 4340 com suas numerações e tratamentos térmicos	42
Figura 22.	Representação esquemática dos ciclos térmicos e suas respectivas velocidades de resfriamento	43
Figura 23.	Bancada experimental para o ensaio de permeabilidade magnética: (1) Gerador de ondas; (2) Cabo blindado; (3) Bobina emissora; (4) Amostra; (5) Bobina receptora; (6) Gaiola de Faraday; (7) Osciloscópio; (8) Computador	44
Figura 24.	Bancada de testes	45
Figura 25.	Diagrama explicativo das etapas do estudo	46
Figura 26.	Amostra do aço SAE 4340 sem tratamento térmico (como recebida)	49
Figura 27.	Amostra do aço SAE 4340 recozida a 850°C e resfriada no forno	49
Figura 28.	Micrografia da amostra do aço SAE 4340 austenitizada a 1000°C e resfriada no forno	50
Figura 29.	Micrografia da amostra do aço SAE 4340 têmpera em água	51
Figura 30.	Variação de Dureza Rockwell C, em função das condições estudadas: CR (material como recebido), R 850 C (recozimento na temperatura de 850°C R 1000 C (recozimento a 1000°C), R 1000 CRA (têmpera a partir de 1000°C)	51
Figura 31.	Valores RMS para medição com 5 Hz de frequência e variadas amplitudes, nas condições de tratamento como recebida e resfriada em água	53
Figura 32.	Valores RMS para medição com 15 Hz de frequência e variadas amplitudes, nas condições de tratamento como recebida e resfriada em água	54

- Figura 33. Valores RMS para medição com 25 Hz de frequência e variadas 55
amplitudes, nas condições de tratamento como recebida e resfriada
em água
- Figura 34. Diferença percentual entre as medições das amostras “como recebida” 56
e “resfriada em água” para as frequências de 5 Hz e 15 Hz
- Figura 35. Amplitudes RMS das amostras do aço SAE 4340 sob diferentes 58
condições de resfriamento e rotacionadas a cada 45 graus
- Figura 36. Amplitudes RMS das amostras em 180 graus do aço SAE 4340 sob 59
diferentes condições de resfriamento

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das bobinas utilizadas no <i>probe</i>	425
Tabela 2. Resumo dos tratamentos térmicos aplicados nas amostras.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
GSCMat	Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais
RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
ZTA	Zonas Termicamente Afetadas
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL.....	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN (RMB)	11
2.2 APLICAÇÕES DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN.....	14
2.3 TRATAMENTO TÉRMICO DE AÇOS	21
2.3.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA) em uma junta soldada.....	24
2.3.2 Recozimento	26
2.3.3 Normalização	28
2.3.4 Têmpera e Revenimento.....	31
2.3.5 Estudos de tratamentos térmicos por métodos não destrutivos	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 MATERIAL ESTUDADO.....	41
3.2 A BANCADA DE TESTES.....	43
3.3 ENSAIO EXPERIMENTAL	45
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	47
3.5 ANÁLISE DA DUREZA DO MATERIAL	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ESTUDADO	48
4.2 DETERMINAÇÃO DA MELHOR REGIÃO DE TRABALHO	52
4.3 ESTUDO DO EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NA DIREÇÃO DE FÁCIL MAGNETIZAÇÃO.....	56
5. CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS	62

RESUMO

O Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é um ruído gerado a partir da interação entre o movimento das paredes dos domínios magnéticos e a microestrutura do material, e vem sendo empregado em ensaios eletromagnéticos não destrutivos para estudar variações microestruturais que afetam a permeabilidade do material. Neste trabalho, mudanças microestruturais devido a tratamentos térmicos são estudadas no aço SAE 4340. O RMB é medido em amostras submetidas aos diferentes tratamentos térmicos através de um ensaio em uma configuração onde a bobina emissora e receptora se localizam em superfícies opostas do material. Foram utilizados sinais senoidais com frequências de 5 Hz, 15 Hz e 25 Hz e amplitudes de 0,25 V a 9 V para detecção da anisotropia magnética do material, e seus resultados correlacionados com a análise de microscopia óptica e dureza Rockwell C. Os resultados mostraram que aplicação de ondas com frequência de 5Hz e amplitude de 5V apresentaram os melhores resultados, e essas ondas foram capazes de acompanhar a anisotropia microestrutural em relação aos tratamentos térmicos. Além disso, foi detectado que microestruturas de grãos grosseiros apresentaram maiores variações de anisotropia.

Palavras-chave: Ruído Magnético de Barkhausen, aço SAE 4340, anisotropia, dureza Rockwell C.

ABSTRACT

Magnetic Barkhausen Noise (MBN) is a noise generated from the interaction between the wall movement of the magnetic domains and the microstructure of the material, and has been used in non-destructive electromagnetic tests to study microstructural variations that affect the permeability of the material. In this work, microstructural changes due to heat treatments are studied in SAE 4340 steel. The RMB is measured in samples subjected to different heat treatments through a test in a configuration where the emitting and receiving coils are located on opposite surfaces of the material. Sinusoidal signals with frequencies of 5 Hz, 15 Hz and 25 Hz and amplitudes of 0.25 V to 9 V were used to detect the magnetic anisotropy of the material, and their results were correlated with optical microscopy analysis and Rockwell C hardness. The results show that the application of signals with a frequency of 5 Hz and 5 V amplitude presented the best results, and these waves were able to follow the microstructural anisotropy in relation to the thermal treatments. Furthermore, it was detected that coarse-grained microstructures showed greater variations in anisotropy.

Key words: Magnetic Barkhausen Noise, SAE 4340 steel, anisotropy, Rockwell C hardness.

1. INTRODUÇÃO

A imposição de ciclos térmicos, como processos de soldagem e tratamentos térmicos, leva a mudanças microestruturais e de permeabilidade magnética no material. Com isso, os ensaios eletromagnéticos se tornam atrativos na aplicação de ensaios não-destrutivos para detecção dessas mudanças. Dentre os ensaios eletromagnéticos, se destacam a medida de permeabilidade magnética na região de reversibilidade, o método de correntes parasitas, ensaios por susceptibilidade magnética e os ensaios baseados na análise do Ruído Magnético de Barkhausen (LINS e SILVA, 2015).

O Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é um ruído gerado a partir da interação entre o movimento das paredes dos domínios magnéticos e a microestrutura do material. As paredes, ao tentarem vencer os obstáculos na microestrutura, que são chamados de pontos de ancoragem, como discordâncias, precipitados, partículas de segunda fase, contornos de grãos, por exemplo, geram o Ruído Magnético de Barkhausen. Este ruído acontece devido a saltos abruptos da parede ao se desprender desses pontos de ancoragem (MELO, 2019).

A análise do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é utilizada em técnicas não destrutivas capazes de identificar características microestruturais do material, como o tamanho do grão, presença de defeitos, estado de tensões e o teor de carbono, e caracteriza as microestruturas de materiais ferromagnéticos em várias condições, como fadiga, tratamento térmico e tensão (KYPRIS, 2016) (GHANEI, 2014).

Uma vantagem dessa técnica é que a mesma permite analisar a microestrutura de materiais ferromagnéticos de forma não-destrutiva, além de analisar as propriedades de materiais sujeitos a diversos ensaios mecânicos. Este método permite, ainda, respostas simples e conversão de dados através de FFT (*Fast Fourier Transform*) (SAMIMI, 2016) (BLAŽEK, 2016).

O RMB é medido através de um ensaio em que se tem uma bobina emissora, a qual aplica o sinal que vai interagir com o material, e uma bobina receptora que detecta o sinal resultante dessa interação. As frequências mais utilizadas variam de 1Hz a 50Hz, de sinais frequentemente senoidais, e a configuração clássica de

posicionamento da bobina receptora é aquela em que esta é localizada na mesma superfície da bobina emissora, porém essa configuração não é capaz de detectar informações do volume do material ao longo da espessura (SAMIMI, 2016; BLAŽEK, 2016).

A imposição de ciclos térmicos, como o processo de soldagem, provoca Zonas Termicamente Afetadas (ZTA) no material, e, com isso, surge a necessidade de análise de uma maior profundidade dentro deste, ao longo da espessura, para detecção das ZTA. Tais ciclos de soldagem provocam tratamentos térmicos ao longo do material e, dado isso, é relevante a detecção inicial de tratamentos térmicos para aplicações na análise futura de juntas soldadas. Por isso, a necessidade de posicionamento da bobina receptora na superfície oposta para a possibilidade de analisar um volume maior do material (RONCHI *et al*, 2017).

O aço SAE 4340 é um aço comumente utilizado em trens de pouso de aeronaves, possui alta resistência e alta capacidade de endurecimento. Este, por apresentar cromo, níquel e molibdênio na sua composição, tem como consequência o aumento da sua temperabilidade, fazendo com que o endurecimento ocorra com velocidades de resfriamento mais lentas (EL RAYES, 2014).

No presente trabalho, amostras de aço SAE 4340 foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos e estudadas através da análise do Ruído Magnético de Barkhausen com a utilização de um ensaio, que é constituído por uma bobina receptora posicionada na superfície oposta do material, a fim de possibilitar a análise de um maior volume do material em profundidade e analisar a possibilidade de identificar a variação de tratamentos térmicos e o efeito da anisotropia microestrutural sobre os resultados.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a presença de tratamentos térmicos em um aço SAE 4340 através da análise do ruído magnético de Barkhausen, em uma configuração onde a bobina receptora é localizada na superfície oposta da emissora.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar a melhor condição de sinal para detecção de tratamento térmico em um aço 4340;
2. Analisar o efeito da temperatura de recozimento em um aço SAE 4340 pela análise do ruído magnético de Barkhausen;
3. Analisar o efeito da velocidade de resfriamento em tratamento térmico através do ensaio eletromagnético baseado no RMB em um aço SAE 4340;
4. Analisar o efeito da anisotropia magnética nas amostras do aço 4340 com diferentes tratamentos térmicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo encontra-se uma revisão bibliográfica dos conteúdos pertinentes ao presente trabalho, tais como o Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), o que são tratamentos térmicos e uma abordagem de trabalhos atuais que utilizam o RMB em suas análises.

2.1 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN (RMB)

Em meados de 1917, o engenheiro eletrônico alemão Heinrich Barkhausen descobriu o Efeito Barkhausen através de uma experiência de magnetização de uma barra de ferro. Nesse experimento, uma bobina é enrolada em uma amostra de ferro e conectada a um amplificador e a um alto falante, e em seguida, um campo magnético contínuo é inserido na amostra. Foi observado que o suave aumento contínuo no campo magnético aplicado a um material ferromagnético provocava pulsos audíveis no alto falante (CALDAS-MORGAN et al, 2012).

Antes de meados de 1950, o conceito de domínios e paredes de domínios ainda não havia sido estabelecido. Depois de estabelecido esses conceitos, ficou claro que os sinais ouvidos por Barkhausen eram em razão dos movimentos e das rotações das paredes de domínio (DELGADO JÚNIOR, 2010 apud ANTÔNIO, 2013). A maioria dos saltos de Barkhausen são produzidos pelo movimento irreversível de paredes de domínio de 180° e acontecem na região de maior inclinação da curva de magnetização (GRIJALBA, 2010; PADOVESE et al, 2012; HUALLPA, 2011 apud ANTÔNIO, 2013).

A análise do RMB é empregada em técnicas não destrutivas com a capacidade de identificar características microestruturais do material, tais como o tamanho dos grãos, presença de defeitos, estado de tensões e teor de carbono. Além disso, essa análise permite a caracterização das microestruturas de materiais ferromagnéticos em diversas condições, como fadiga, tratamento térmico e aplicação de tensões (KYPRIS, 2016) (GHANEI, 2014).

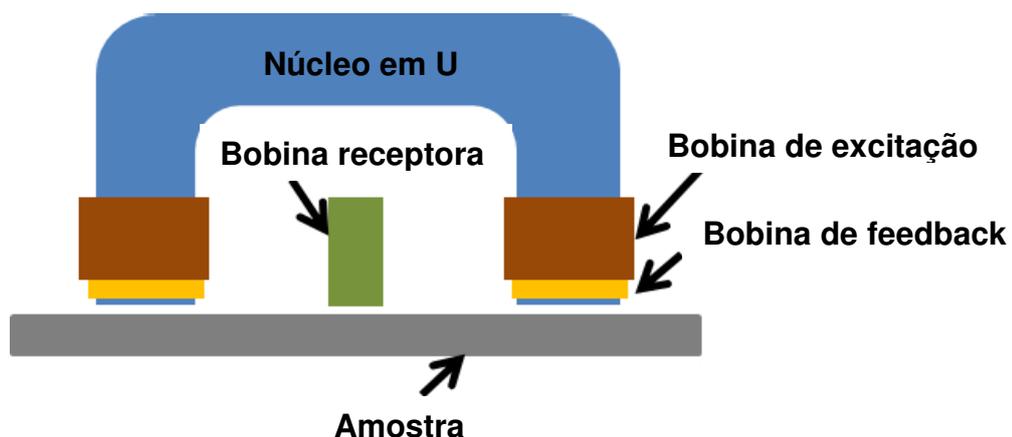
Geralmente, para captar as discontinuidades da densidade de fluxo, são utilizadas bobinas leitoras de indução como elementos sensores. Estas bobinas são constituídas por um enrolamento com grande número de voltas de fio de cobre. Por

sua simplicidade, elas constituem os sensores magnéticos mais antigos e conhecidos (CALDAS-MORGAN *et al*, 2012).

O Ruído Magnético de Barkhausen é gerado da interação entre o movimento das paredes dos domínios magnéticos e os pontos de ancoragem da microestrutura do material como: contornos de grãos, discordâncias, tensões residuais, impurezas e precipitados. Na Figura 1, é apresentada a configuração usual de medição do RMB. Esta é formada por uma bobina emissora que é responsável pela aplicação do sinal que irá interagir com a microestrutura do material. O ruído gerado do desprendimento das paredes dos domínios detectado dessa interação é captado numa bobina receptora, posicionada na mesma superfície da bobina receptora (SALEEM, 2020).

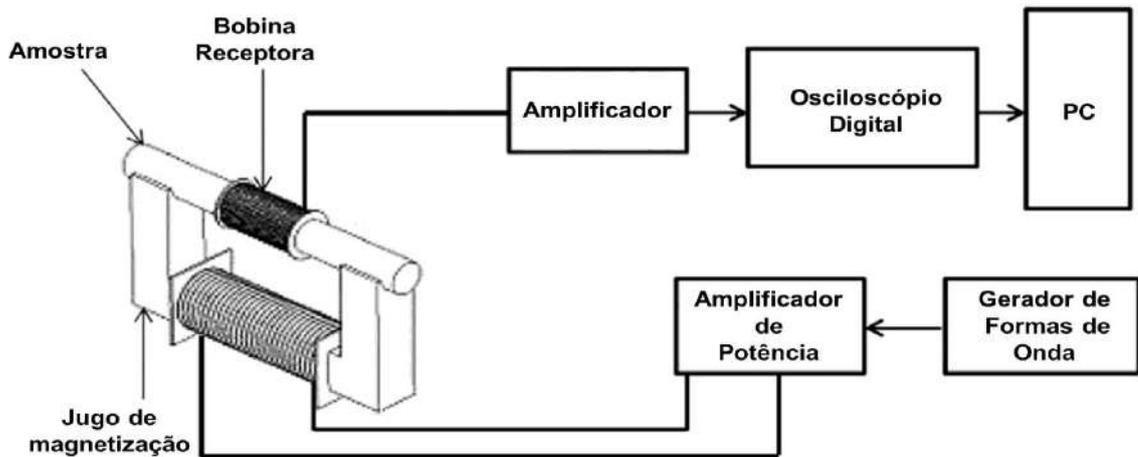
Existem dois tipos de técnicas de bobina receptora para medição do ruído de Barkhausen: a de superfície e a envolvente. A primeira técnica, conhecida como bobina receptora de superfície, possui um núcleo de ferrite, o qual age como um amplificador magnético de B, e seu eixo é posicionado perpendicularmente à superfície da amostra conforme a Figura 1. Na segunda técnica, a bobina denominada receptora envolvente é enrolada em torno da amostra (Figura 2). (CHUKWUCHEKWA, 2011; KAHROBAEE; HEJAZI, 2017; MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006; SAMIMI; KRAUSE; CLAPHAM, 2016; SALEEM, 2020).

Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora de superfície.



Fonte: Adaptado de SALEEM, 2020.

Figura 2. Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora envolvente.



Fonte: Adaptado de JARRIHI, 2015.

A bobina receptora capta a informação do material em forma de sinal. Contudo, para obter apenas o Ruído Magnético de Barkhausen do sinal de saída da bobina receptora, este deve ser filtrado usando um filtro analógico e/ou digital, no qual faz-se necessário uma escolha apropriada da frequência de corte dado que pretende-se suprimir o ruído indesejado do sinal da força eletromotriz (FEM) e simultaneamente preservar toda a informação útil do material, que vem na forma de ruído (PAL'A; BYDŽOVSKÝ, 2014).

Após a etapa da filtragem do sinal da bobina receptora, é necessário tratar os dados estocásticos RMB a fim de interpretá-lo. Os parâmetros mais usados incluem o valor da raiz média quadrática (RMS, do inglês *root-mean-square*), soma de amplitudes, espectro de potência, Kurtosis e energia do ruído de Barkhausen. Outros métodos em uso são a FFT, a média, desvio padrão, a altura do pico, *wavelet*, a posição e a largura dos perfis do RMB (GHANEI *et al*, 2014; MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006).

Os ensaios eletromagnéticos baseados nas análises do Ruído Magnético de Barkhausen ainda não têm uma padronização, pois o sinal captado depende do estado de tensão, heterogeneidade microestrutural, campo de magnetização produzido pelas bobinas de magnetização, geometria do núcleo, acoplamento sonda-espécime e espaçamento entre as pontas do núcleo da amostra. As medições de RMB só serão consistentes e comparáveis nos casos em que a distribuição de

magnetização é alcançada de forma semelhante em cada medição, e o controle de densidade de fluxo do circuito é um meio eficaz para atingir esse objetivo (PRABHU GAUNKAR *et al* (PRABHU GAUNKAR, N., KYPRIS, O., NIEBEDIM, I.C., JILES, D.C, 2014).

2.2 APLICAÇÕES DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

Ensaio eletromagnéticos baseados no ruído magnético de Barkhausen têm sido utilizados para caracterização de tratamento térmicos. A seguir é possível identificar alguns estudos realizados acerca desse tema.

Deng (2018) realizou estudo em um aço carbono SAE 1045. Estes foram tratados nas temperaturas de 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C por uma hora. Os valores de dureza das amostras tratadas foram correlacionados com os de medidas de amplitude RMS e observou-se que à medida que a dureza aumenta, ocorre a redução dos valores de RMS devido à presença do constituinte martensita ser uma estrutura fina e dificultar o movimento das paredes dos domínios magnéticos (DENG, 2018).

O aço 1070 foi estudado através do uso do RMB para detectar tensões aplicadas em suas superfícies. O perfil de tensão gerado em uma amostra desse aço submetida a um teste de flexão de três pontos foi analisado. A influência do tipo de bobina de captação, velocidade de varredura, campo magnético aplicado e banda de frequência analisados na eficácia da técnica foram estudados. Os resultados mostraram que a técnica pode ser usada para detectar perfis de tensões e que sua eficácia depende do tipo de bobina e campo magnético aplicado, mas não da velocidade de varredura. Para as condições em que os testes foram realizados, o fator de maior influência nos resultados foi o tipo de bobina utilizada. As diferentes bobinas podem ser vistas na Tabela 1 (GRIJALBA *et al*, 2018).

Tabela 1. Características das bobinas utilizadas no *probe*.

Bobina	Nº de voltas	Espessura Ø (mm)	Diâmetro (mm)
A	1250	7	5
B	2000	14	4
C	2500	10	5

Fonte: Adaptado de GRIJALBA *et al*, 2018.

Supermartensítico é uma nova classe de aços inoxidáveis utilizados como tubos sem costura e peças forjadas na produção *offshore* de petróleo e gás. As propriedades mecânicas finais do aço são ajustadas por tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. O efeito da temperatura de revenimento foi estudado nesse aço. As amostras foram tratadas nas temperaturas de 500°C, 570°C, 620°C e 640°C. Medidas de amplitude RMS foram correlacionadas com a quantidade do constituinte paramagnético austenita gerado durante os tratamentos. Observou-se que a fragilização é somente detectada para essa classe de material quando a quantidade de austenita é pequena, pois o paramagnetismo reduz os valores de RMS a ponto de não ser possível analisar o efeito (TAVARES, 2019).

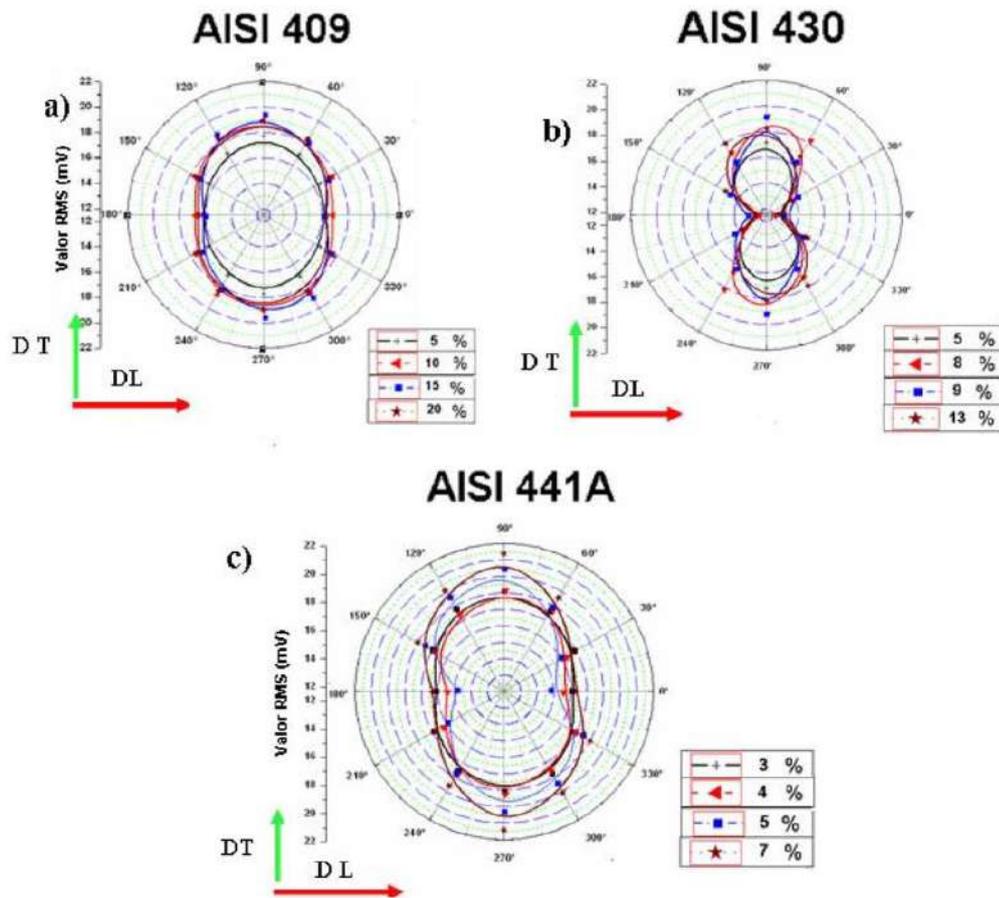
O Ruído Magnético de Barkhausen tem sido aplicado para monitoramento de juntas soldadas. No estudo de SERNA *et al* (2015), a variação da microestrutura em juntas soldadas de aço carbono foi monitorada pelo Ruído Magnético de Barkhausen (RMB). As amostras foram soldadas pelo processo de eletrodo revestido no qual foram aplicadas tanto um passo quanto dois. A microdureza e a microestrutura também foram caracterizadas. O sinal RMB foi medido e analisado por meio de diversos parâmetros no domínio da frequência e do tempo. Além disso, mapas das superfícies de aço soldadas foram plotados. A variação dos parâmetros do RMB foi correlacionada com os de microdureza e microestrutura. Os resultados permitiram identificar uma zona afetada pelo calor (ZTA) da junta soldada usando os sinais RMB.

H. Kwun (1984) investigou a dependência da amplitude do ruído de Barkhausen em função da tensão e do ângulo entre a tensão e direções de magnetização em amostras de aço SAE 4340. O objetivo da investigação foi estabelecer uma melhor relação entre o efeito Barkhausen e a tensão. O ruído de Barkhausen foi medido em

função da tensão e do ângulo entre o eixo de tensão e a direção do campo magnético aplicado. As tensões foram aplicadas ao corpo de prova, de flexão de quatro pontos ao longo do seu eixo. As deformações resultantes foram monitoradas usando um medidor de deformação localizado em um lado do corpo de prova. Quando a tensão foi aplicada, a amplitude do ruído de Barkhausen tornou-se anisotrópica e dependente do ângulo entre a tensão e o campo magnético aplicado. Sob compressão, observou-se exatamente o comportamento oposto ao sob tensão. A partir dos resultados desta investigação, obteve-se uma evidência experimental que indica uma dependência direta da amplitude do ruído de Barkhausen com a deformação normal à direção do campo magnético aplicado (KWUN, 1984).

Astudillo *et al* (2018) utilizaram o RMB para estudar a anisotropia magnética induzida pelo processo de laminação e deformação em ensaios de tração uniaxial com diferentes porcentagens de deformação em chapas de aço inoxidável ferrítico. Os materiais testados foram os aços inoxidáveis AISI 409, 430 e 441A, laminados a frio e recozidos. As amostras foram submetidas a quatro fases de deformação (chamadas de D1 a D4) e o campo magnético excitante foi obtido com uma corrente senoidal de 10 Hz produzida por um gerador de funções, amplificado com um amplificador de potência. A bobina sensora RMB foi colocada no centro do *yoke*. Em todos os ensaios de tração observou-se que à medida que a deformação aumentava, a anisotropia aumentava, obtendo-se o eixo maior do gráfico coincidindo com a direção da deformação (Figura 3) (ASTUDILLO, 2018).

Figura 3. Mapa de anisotropia magnética usando o valor RMS nas amostras deformadas dos aços inoxidáveis AISI a) 409, b) 430 e c) 441A, para as diferentes porcentagens de deformação axial.



Fonte: Astudillo et al (2018)

Kypris (2016) mostrou como um modelo paramétrico para o espectro de frequência das emissões de Barkhausen pode ser usado para detectar variações de tensões ao longo da profundidade em materiais ferromagnéticos. O modelo sugere que em amostras em massa o espectro de frequência de Barkhausen pode ser expresso por uma função multi-exponencial com dependência da tensão e da profundidade. Uma aplicação prática deste método de espectroscopia é a avaliação não destrutiva dos perfis de profundidade da tensão residual nos componentes aeroespaciais, ajudando assim a evitar falhas catastróficas (KYPRIS, 2016).

Lewis *et al* (2017) utilizou o aço elétrico não orientado (NOES), muito comumente utilizado na otimização da eficiência dos motores de tração elétrica no desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos elétricos como objeto de estudo. Uma forma popular de estudo de materiais é o punctionamento mecânico do material, mas esta introduz tensões plásticas e deformações que prejudicam as propriedades

magnéticas do material, resultando em aumento na perda de potência. Isso impacta particularmente nas áreas estreitas, como os dentes do motor. Foi então criado um sistema para medir propriedades magnéticas locais de anéis puncionados de aço elétrico. Esse sistema consiste na magnetização de corrente alternada controlada por um computador, National Instruments DAQ PCI 6120, amplificador de potência e transformador de isolamento. Foram medidos campos magnéticos locais, perda de potência, densidade de fluxo e permeabilidade em anéis de aço elétrico perfurados, variando o diâmetro interno e mantendo o externo constante. As medições foram realizadas a 1,5 T e 50 Hz, mas para aplicações de alta frequência, como os motores de tração de veículos híbridos, valores de 1,0 T e 400 Hz são mais comuns (LEWIS *et al*, 2017).

Lewis *et al* (2017) verificou que o aumento do teor de silício dificultou a progressão de discordâncias recém-criadas para o interior da amostra, resultando em uma zona de degradação mais nítida. O aço elétrico de 3,2% de silício com espessura de 0,35 mm apresentou uma mudança acentuada na permeabilidade, estendendo-se por cerca de $2,5 \pm 0,5$ mm a partir da borda. A redução do teor de silício resulta em uma diminuição mais gradual na permeabilidade ao longo de uma distância maior.

No trabalho mencionado, diferentemente de outros trabalhos que examinam apenas as bordas cortadas, olhar para toda a largura da amostra mostrou uma queda da permeabilidade no centro das amostras de silício 3,2%, atribuída à mudança na natureza do estresse residual, o que não foi observado nas amostras de silício 2,4%. Isso permitiu a obtenção de perfis mais precisos das propriedades magnéticas em toda a amostra, com o objetivo de melhorar as previsões de perda de potência para motores elétricos.

Por fim, os resultados mostraram que o perfil de densidade de fluxo é afetado pela presença de estresse residual e anisotropia do material. A variação na permeabilidade ao longo da largura da amostra sugere que fatores locais e distantes da borda influenciam a magnetização. O estudo destaca a necessidade de validar e comparar perfis de propriedades magnéticas, essenciais para o projeto otimizado de máquinas elétricas.

Nebair *et al* (2022) realizou um estudo que teve como foco a avaliação da morfologia da martensita e da fração de volume no aço X70 de fase dupla (DP),

utilizando a técnica de Ruído Magnético de Barkhausen (RMB). Os aços DP são importantes na família de aços de alta resistência de baixa liga (HSLA), compreendendo microestruturas de ferrita (dúctil e macia) e martensita (quebradiça e dura). Para obter diversas morfologias de martensita e avaliar sua fração de volume, morfologia e dureza, diferentes tratamentos térmicos na faixa de temperatura de 740°C a 820°C por 30 minutos foram realizados nas amostras: têmpera intermediária (TI), têmpera direta (TD) e têmpera por etapas (TE).

Após a realização desses tratamentos térmicos, as diferentes microestruturas obtidas afetaram a fração de volume de martensita e a dureza do material. O tratamento térmico por têmpera em água resultou em martensita distribuída em matriz de ferrita dúctil, enquanto o tratamento por têmpera em forno resultou em morfologia de banda com distribuição não uniforme das fases (NEBAIR *et al*, 2022).

Para as medições de RMB, Nebair *et al* utilizaram um campo magnético senoidal de 40 Hz e 70 A/cm de amplitude aplicado perpendicularmente à superfície da amostra. Os sinais foram amplificados e filtrados, funcionando nas frequências de 2 a 24 kHz para avaliar o ruído magnético de Barkhausen (RMB). Foram medidas todas as amostras tratadas a uma temperatura intercrítica de acordo com os tratamentos TI, TD e TE. Os sinais de RMB dependem do tamanho do salto das paredes de Bloch durante o movimento do domínio de Weiss e do campo de excitação magnética necessário para separar as paredes de Bloch dos pontos de ancoragem. Os resultados indicaram que o RMB é mais alto no tratamento TE com um campo de excitação magnética H_c mais baixo. A microestrutura com morfologia em faixas apresenta RMB mais alto devido ao aumento no tamanho do salto das paredes de Bloch. Além disso, o campo de excitação magnética necessário para separar as paredes de Bloch dos pontos de ancoragem diminuiu significativamente.

Os sinais do ruído magnético de Barkhausen diminuem com o aumento da temperatura intercrítica devido ao aumento da fração volumétrica de martensita e do número de obstáculos. Nebair *et al* identificou que a relação entre ruído de Barkhausen e H_c é semelhante para cada tratamento, mostrando que à medida que os obstáculos diminuem, o RMB diminui, e a fração de volume de martensita e H_c aumentam. Esses resultados fornecem informações sobre a morfologia da martensita nas fases. Além disso, também foi identificado que o RMB diminui com o aumento da

dureza, devido à relação entre o movimento das paredes e a fração de martensita. O tamanho do salto das paredes de Bloch afeta a dureza, e há correlação entre o campo coercitivo e propriedades mecânicas. O aumento da martensita aumenta a dureza magnética e mecânica, devido aos pontos de ancoragem no movimento das paredes de Bloch.

Em 2022, Astudillo *et al* investigaram a transformação de fase austenita-martensita no aço AISI 304 por meio de medidas do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) durante testes uniaxiais de tração. A direção da deformação do espécime (0° e 90°) influenciou significativamente a quantidade de martensita produzida (ASTUDILLO *et al*, 2022).

O referido trabalho identificou que a caracterização microestrutural da condição “como recebida” indicou a presença dos elementos Fe, Cr e Ni. O aumento da deformação levou ao aumento da martensita e dureza, principalmente em espécimes cortados na direção de laminação (0°) e deformados axialmente (90°). A presença de martensita, identificada com ferrideltímetro, também foi notada em espécimes não deformados. Na caracterização magnética, a ciclagem histerética foi realizada antes e após a deformação, mostrando que a coercividade diminuiu com o aumento da deformação, especialmente em amostras cortadas perpendicularmente à direção de laminação (90°). A análise de espectro de potência de Fourier revelou vários picos para diferentes frequências em amostras 0° , os quais diminuíram e desapareceram com o aumento da carga. Em amostras 90° , observou-se um único pico e pequenas oscilações.

Por fim, o trabalho de Astudillo *et al* mostrou, na análise dos sinais RMS do RMB, um aumento progressivo com a deformação e, conseqüentemente, com o aumento da fração volumétrica da martensita. Sendo assim, o estudo destacou a influência da direção de deformação na formação de martensita e dureza no aço AISI 304, além de demonstrar a viabilidade do uso do RMB como método não destrutivo e confiável para detectar mudanças microestruturais, assim como monitorar a transformação de fase durante processos de deformação.

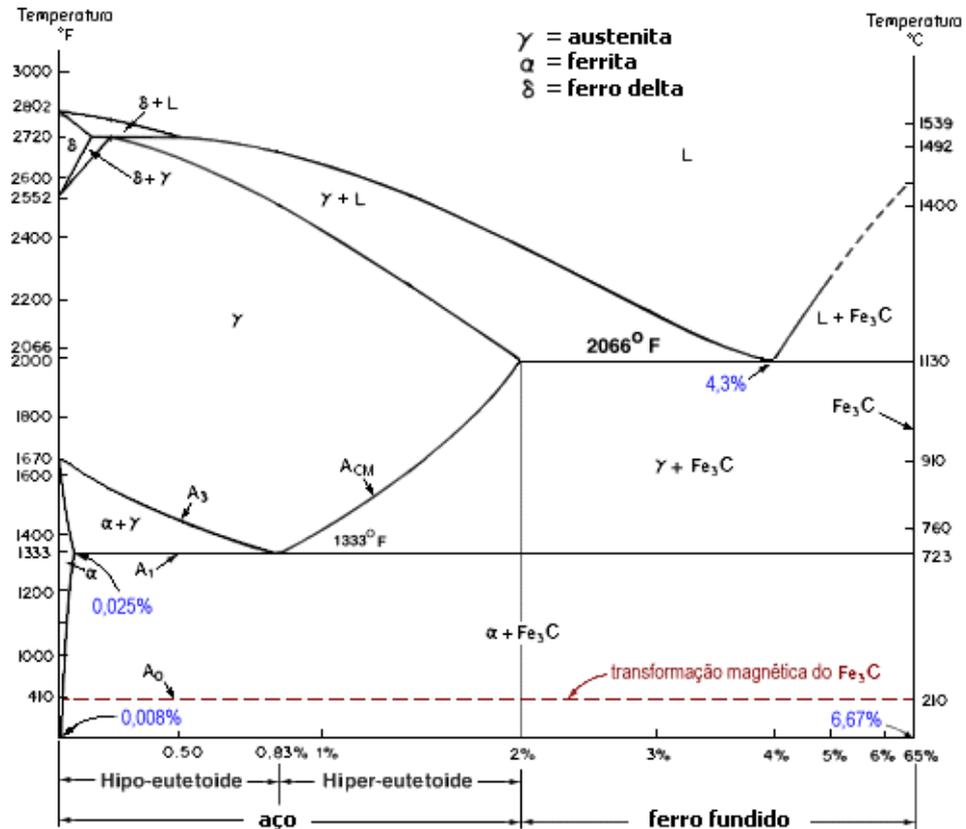
2.3 TRATAMENTO TÉRMICO DE AÇOS

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, a que são submetidos os aços, e tem como objetivo alterar as suas propriedades ou conferir determinadas características (CHIAVERINI, 1996). O uso de tratamentos térmicos tem finalidade de controlar ou acompanhar as diferentes constituintes que podem se formar na microestrutura do aço, assim como a morfologia e o tamanho de grão (ANAZAWA, 2012). Esses fatores que se alteram de acordo com o tratamento térmico interferem diretamente nas propriedades mecânicas finais do material.

Existem basicamente três tipos de resfriamento mais comuns, sendo eles a água, o óleo e o ar, e além desses, o ambiente de forno e outros meios líquidos. A água produz o resfriamento mais severo, seguida pelo óleo, o ar, e por fim, o interior do forno (CALLISTER, 2002; CHIAVERINI, 1996). O resfriamento determina efetivamente a estrutura e as propriedades finais dos aços. A depender da velocidade de resfriamento, pode-se obter desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza, até a martensita que é o constituinte mais duro resultante dos tratamentos térmicos. Outros fatores como composição do aço e dimensões das peças também influenciam no resultado do tratamento térmico (CHIAVERINI, 1996).

Na Figura 4 é apresentado o diagrama de equilíbrio ferro-carbono. Este é dividido em duas regiões: de 0,008% até 2,1% de carbono, tem-se os aços, e acima deste, até 6,7% de carbono, o ferro fundido. Na região correspondente dos aços, durante o resfriamento ocorre a solidificação do líquido no constituinte denominado de austenita. Esta é responsável por todas as transformações na região dos aços, ou seja, os constituintes na temperatura ambiente são fruto de transformação da austenita. Para aços abaixo de 0,77% de carbono tem-se os constituintes ferrita e perlita, com 0,77% de carbono, a perlita, e para teores entre 0,77% e 2,1% de carbono, a cementita mais perlita.

Figura 4. Diagrama de equilíbrio ferro-carbono



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2002.

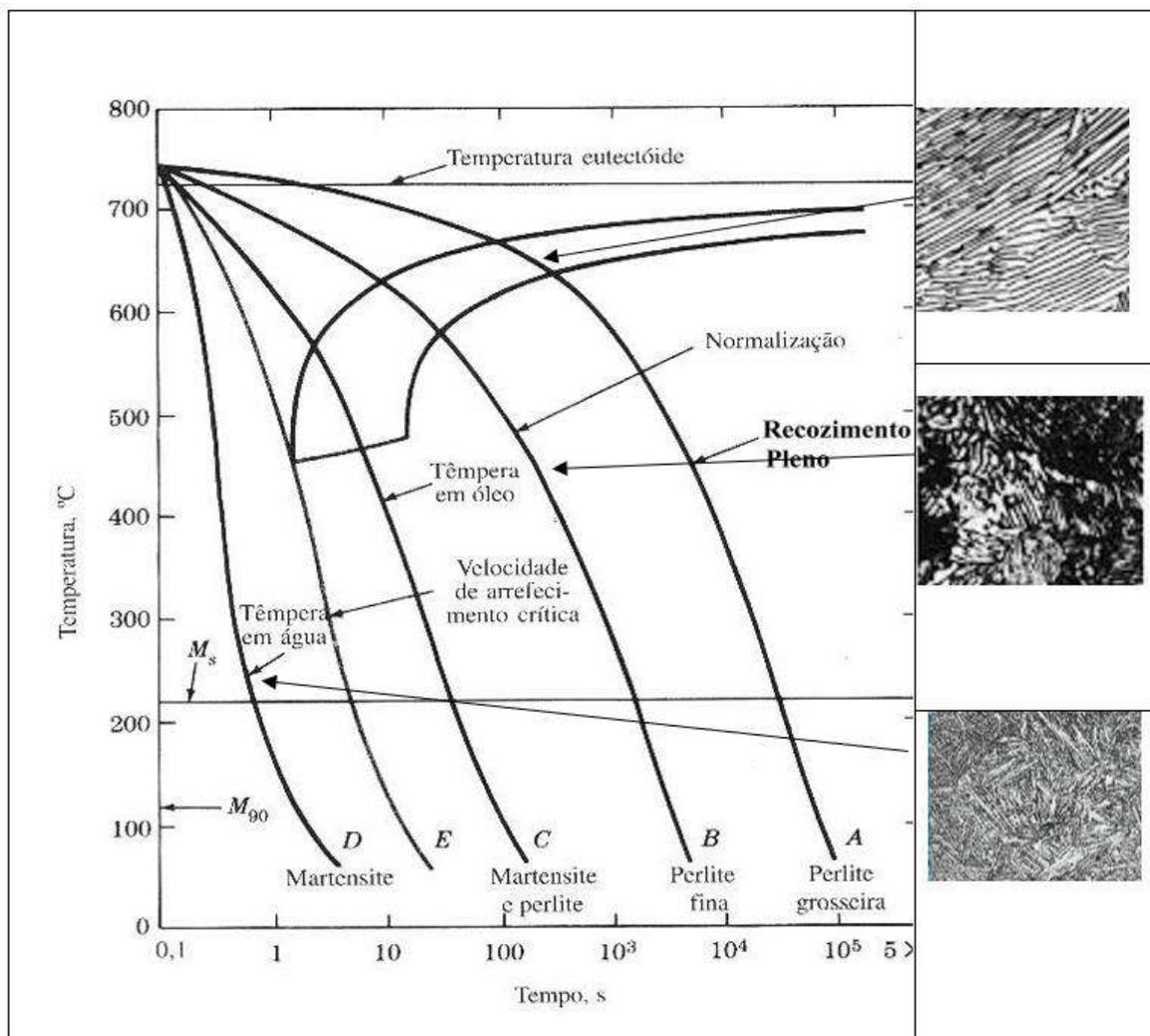
A realização de tratamentos térmicos por resfriamento contínuo consiste no aquecimento dos aços até a região austenita, e a partir desta, aplicação de diferentes velocidades de resfriamento. A austenita, para um aço com 0,77% de carbono, tende a se transformar durante o resfriamento em perlita. A austenita, que é o ferro com estrutura CFC, ao resfriar, se transforma no ferro alfa CCC, e o carbono do aço se combina com parte do ferro e forma o constituinte cementita, que é o Fe₃C. A perlita é um constituinte formado por duas fases, ferro alfa e cementita. A Figura 4 mostra as transformações durante o resfriamento contínuo para um aço com 0,77% de carbono. Nesta são apresentadas as microestruturas obtidas durante diferentes tratamentos.

Na Figura 5 tem-se que o recozimento pleno, que é obtido por resfriamento lento dentro do forno para o aço eutetóide, tem como objetivo obter perlita grossa. Isso se deve ao resfriamento lento dar tempo da estrutura perlita formar lamelas mais grossas. Contudo, com resfriamento ao ar, ocorre a formação da perlita fina e o tratamento de normalização. A microestrutura mais fina da normalização aumenta a

dureza em relação ao material recozido. Na Figura 5 as curvas denominadas de Pi e Pf correspondem a de início e final de formação de perlita. Assim, a austenita, durante o resfriamento, se transforma em perlita ao passar por estas curvas.

Pode-se observar na Figura 5 curvas de têmpera em óleo e em água. Esse tratamento tem como objetivo o aumento de dureza pela formação da martensita. A primeira forma martensita e perlita, e a segunda somente martensita. A martensita é o constituinte do aço formada a partir da austenita, que por ser aplicado um resfriamento rápido, não dá tempo do carbono sair da austenita e ir formar a cementita, ou seja, ao ficar aprisionado na austenita e esta tentar se transformar em ferrita, ocorre a formação de uma estrutura que não é cúbica, e sim com um lado maior e com forma tetragonal, que é a martensita. Esta é o constituinte de maior dureza dos aços carbono comuns.

Figura 5. Curvas de têmpera em óleo e em água



Fonte: CALLISTER, 2002.

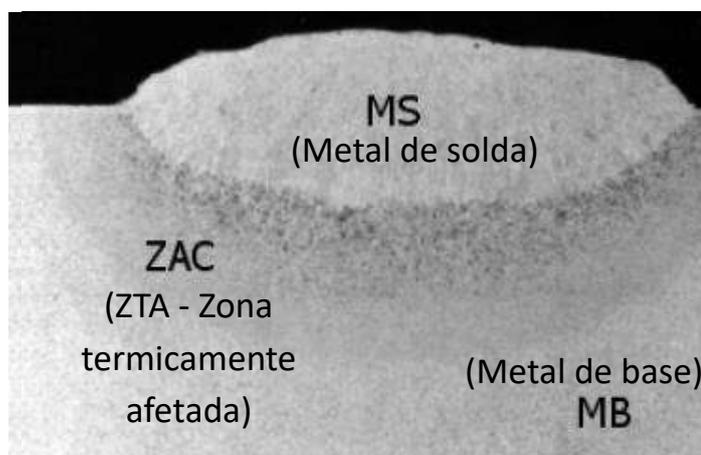
Existe uma relação específica entre as propriedades mecânicas de uma liga de aço e a taxa de resfriamento. Como resultado de um tratamento térmico, uma liga pode “endurecer” pela formação de martensita. Esse endurecimento diz respeito ao aumento da resistência mecânica do material (CALLISTER, 2002).

2.3.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA) em uma junta soldada.

É relevante ressaltar que os tratamentos térmicos nem sempre são aplicados de maneira intencional. Em algumas situações, durante o processo de fabricação, peças metálicas passam por tratamentos térmicos, sujeitas a ciclos de aquecimento ou resfriamento que decorrem desses procedimentos. Esses ciclos têm o potencial de comprometer as propriedades das peças. Um exemplo desse cenário é evidenciado na operação de soldagem de estruturas de aço. Nesse processo, quando aquecidas a temperaturas elevadas e então resfriadas a partir dessas altas temperaturas, tais estruturas podem experimentar modificações em suas microestruturas, levando à redução da tenacidade da estrutura como um todo (TSCHIPTSCHIN, 2020).

A ZTA corresponde à região do metal de base que pela sua adjacência com a zona fundida, sofreu alterações microestruturais em decorrência do calor gerado durante o processo de soldagem. A Figura 6 mostra a macrografia de uma junta soldada (metal de solda, ZTA e metal base) para as situações de único passe (SANT’ANNA, 2006).

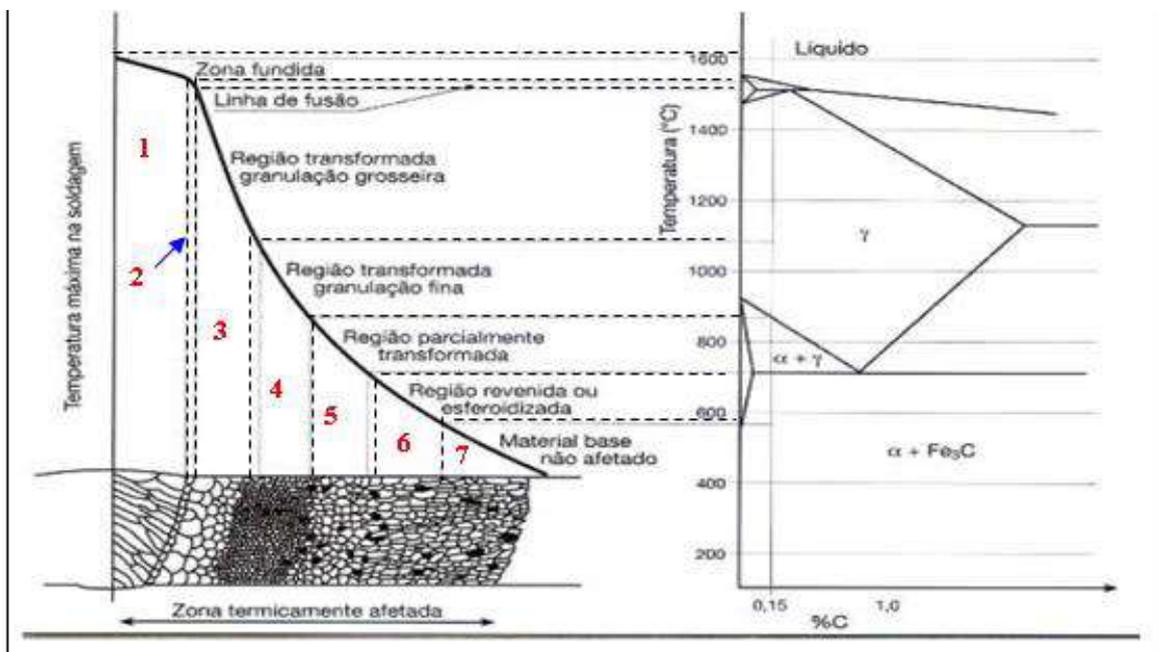
Figura 6. Macrografia de junta soldada de passe único.



Fonte: SANT’ANNA, 2006.

A Figura 7 relaciona as influências da distribuição de temperatura máxima de soldagem no diagrama de transformação de fases com os possíveis efeitos provenientes a partir do gradiente de resfriamento na microestrutura da ZTA. Na Figura 7, a região 1 corresponde à zona fundida pela solda. À medida que se distancia da solda, ou seja, passa-se da região 1 para a 7, tem-se a mudança de microestrutura da ZTA causada pelas diferentes taxas de resfriamento. Cada região pode ser associada a uma imposição de tratamento térmico na solda.

Figura 7. Representação esquemática de distribuição de temperatura na ZTA.



Fonte: (Rodrigues, 2010).

De acordo com COLPAERT (2008), o método mais frequente para modificar as propriedades mecânicas, físicas e até químicas dos aços consiste na aplicação de tratamentos térmicos. Esse procedimento é caracterizado pelo conjunto de operações que envolvem o aquecimento e o resfriamento do material, levando em consideração parâmetros como temperatura, atmosfera, período de tempo, taxa de resfriamento, entre outros elementos. Entretanto, é importante salientar que a busca pelo aprimoramento de determinada propriedade frequentemente pode resultar na diminuição de outra, por exemplo, ao elevar a dureza de um material, é comum observar uma redução subsequente da tenacidade.

No âmbito industrial, os procedimentos mais empregados são o recozimento, a normalização e a têmpera seguida de revenimento. O processo de recozimento é

frequentemente utilizado com o objetivo de alcançar uma estrutura mais mole, com menor resistência, ou seja, menor dureza e maior tenacidade, além de possibilitar um alívio de tensões. A normalização propicia um refinamento do grão, garantindo uma maior homogeneidade nas propriedades do material e maior tenacidade. Por sua vez, a prática predominante na indústria é a têmpera, que visa aumentar a resistência mecânica do aço. O endurecimento ocorre devido à formação da martensita, causado por um resfriamento rápido. Contudo, esse mecanismo pode gerar um elevado número de tensões internas e imperfeições na microestrutura. Conseqüentemente, torna-se necessário outro tipo de tratamento, o alívio de tensões, também conhecido como revenimento. Esse processo é aplicado após a têmpera e busca aumentar a ductilidade por meio da formação de martensita revenida (COLPAERT, 2008).

A seguir são apresentados detalhadamente os principais tratamentos térmicos empregados nos aços.

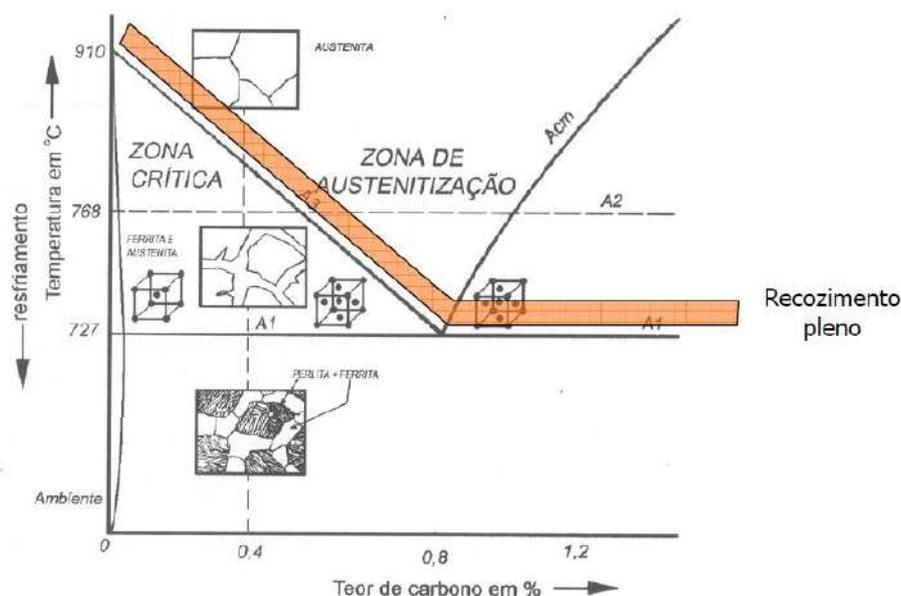
2.3.2 Recozimento

O tratamento térmico de recozimento, por vezes denominado recozimento pleno, consiste no aquecimento do aço até acima ou dentro da zona crítica (temperatura situada entre 727 °C e 910 °C) a depender do teor de carbono do aço (Figura 7). Este tem como propósito restituir ao material as propriedades alteradas por um tratamento mecânico ou térmico que possa ter sido anteriormente aplicado ao mesmo, promovendo assim a eliminação de tensões internas e a ductilidade ou tenacidade do material, o que resulta na diminuição da sua dureza (favorecendo a usinabilidade dependendo da peça em análise). Além disso, esse processo contribui para o refinamento da estrutura do grão e possibilita modificações nas propriedades elétricas e magnéticas do material (COLPAERT, 2008).

A Figura 8 delinea, na tonalidade laranja, a região na qual o tratamento de recozimento pode ser executado, uma condição que está sujeita à composição específica do aço. No contexto dos aços contendo teores de carbono inferiores a 0,8%, esse tratamento é realizado a uma temperatura cerca de 50 °C acima da zona crítica. Por sua vez, nos aços que possuem teores de carbono superiores a 0,8%, o

procedimento é realizado a uma temperatura situada aproximadamente 50 °C acima do limite inferior da zona crítica, como mencionado por TSCHIPTSCHIN (2020).

Figura 8. Exemplificação da faixa de recozimento dos aços.

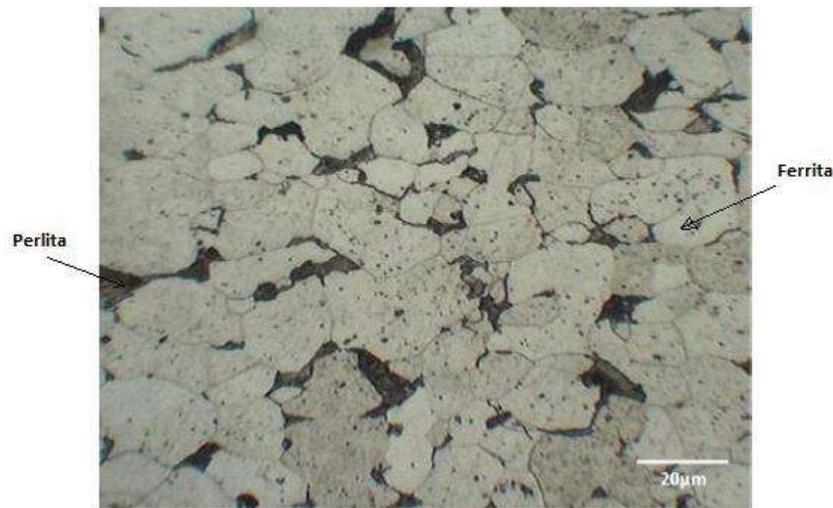


Fonte: TSCHIPTSCHIN, 2020.

Na realização do tratamento de recozimento, diversos aspectos merecem atenção. Um exemplo é a temperatura empregada durante o processo, uma vez que a composição química de cada material determina uma faixa de temperatura mais apropriada para alcançar o recozimento pleno. No caso de aços hipoeutetóides, essa temperatura geralmente é estabelecida entre 20 °C e 50 °C acima do limite superior da zona crítica. No contexto do estudo em questão, envolvendo o aço 4340 com teor de carbono de 0,40%, a temperatura de 850 °C foi selecionada conforme consta na metodologia. Um outro fator de considerável relevância é o intervalo de tempo pelo qual a peça permanece na temperatura de patamar. Esse intervalo deve ser suficiente para permitir a formação e uniformização da austenita. Independentemente do cenário, é essencial garantir que o centro da peça também alcance a temperatura de patamar (COLPAERT, 2008).

Na Figura 9, pode-se observar um exemplo da microestrutura obtida por microscópio óptico do aço AISE 1010 submetido ao tratamento térmico de recozimento. Nela é possível observar duas estruturas: a região clara é formada por ferrita, e a região escura é formada por perlitita.

Figura 9. Microestrutura do aço AISE 1010 submetida a recozimento com aumento de 50x.



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

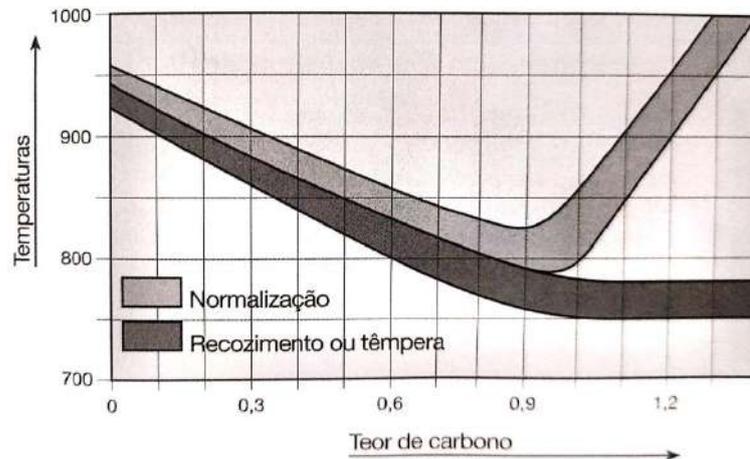
Cullity (2009) observou que o recozimento provoca o aumento do tamanho do grão, reduz a quantidade de contornos e diminui o bloqueio dos movimentos dos domínios magnéticos e, por consequência, aumenta a permeabilidade magnética. O recozimento é responsável também por obter um material com menores perdas por histerese do que o material em condição deformada (CULLITY, 2009). Quanto maior o tempo de recozimento, maior a permeabilidade magnética. Essas informações são relevantes, pois tais alterações são esperadas no estudo da permeabilidade magnética de acordo com o tratamento aplicado ao aço (MARTINEZ *et al*, 2006).

2.3.3 Normalização

A normalização é um tratamento térmico que tem como objetivo refinar a estrutura do grão e aprimorar a distribuição microestrutural do material, tornando-o mais homogêneo. Também é indicado 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).

Na Figura 10, estão destacadas as temperaturas apropriadas para aços de carbono, e essas também são válidas para aços com baixo teor de elementos de liga. Nela, é possível identificar a temperatura ideal para aplicação da normalização, e essa faixa varia conforme a quantidade de carbono presente no aço.

Figura 10. Temperaturas recomendadas, para aços carbono, para a austenitização para recozimento, normalização e têmpera.



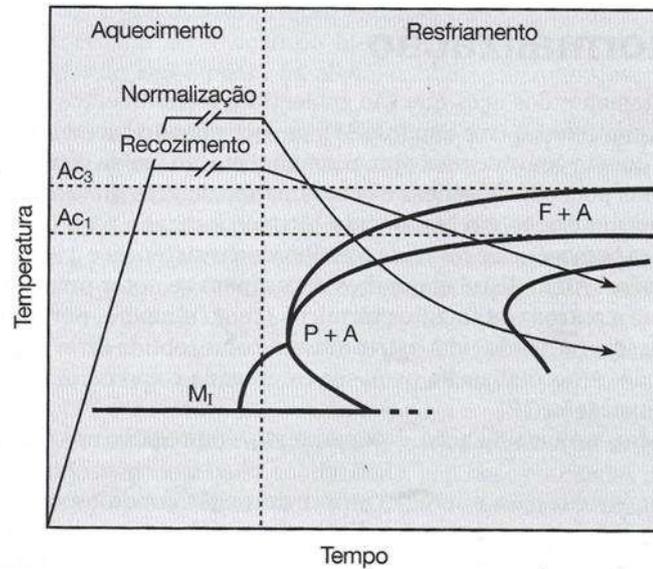
Fonte: COLPAERT, 2008.

Essa técnica é utilizada para homogeneizar a microestrutura de peças que foram fundidas ou forjadas. Também é aplicada em peças que passaram por processos de tratamento incorretos ou desvios de tratamento térmico. O objetivo é conseguir uma microestrutura homogênea e refinada, com a intenção de obter propriedades mecânicas finais melhores. Isso é especialmente importante em aços usados na construção e em situações em que a aplicação de têmpera e revenimento não são viáveis do ponto de vista econômico (COLPAERT, 2008).

O ciclo térmico de normalização é composto pelo processo de aquecimento para austenitização completa, seguido pelo resfriamento ao ar. Na Figura 11, é possível ver tanto o processo de normalização e recozimento, ambos com o mesmo objetivo de alcançar o mínimo de dureza. No entanto, a normalização gera uma estrutura de grãos mais fina que o recozimento, porque passa menos tempo em temperaturas elevadas. O recozimento resulta em uma mistura de ferrita e perlita grosseira, enquanto a normalização proporciona ferrita e perlita fina (COLPAERT, 2008).

Na mesma figura, é mostrado o ciclo térmico superposto à curva de Transformação por Resfriamento Contínuo (TRC). Essas curvas foram desenvolvidas para melhor representar a situação real do processo, considerando o tempo e a temperatura, e têm a capacidade de prever a microestrutura e a dureza conforme o método de resfriamento empregado.

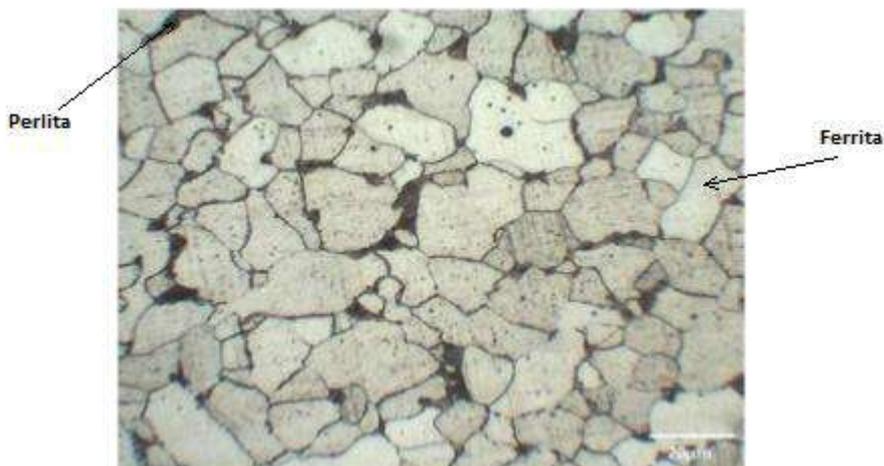
Figura 11. Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento e normalização, superpostos à curva TRC de um aço.



Fonte: COLPAERT, 2008

Na Figura 12, está representado um exemplo de microestrutura obtida após o tratamento de normalização (resfriado ao ar) para o aço AISE 1010, obtida através de microscopia óptica no laboratório de pesquisa GSCMat. Nela, é possível observar grãos de ferrita (este em maior quantidade) e perlita finas distribuídos de forma homogênea.

Figura 12. Microestrutura de um aço AISE 1010, normalizado (resfriado ao ar) com aumento de 50x.



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

Materiais com alta temperabilidade, como o aço 4340, são fornecidos no estado normalizado. A adição de elementos de ligas retarda as transformações. Para aços

4340, além de ferro e carbono, possuem na sua composição Ni, Cr e Mo. Materiais com essa composição, mesmo que resfrie lentamente, não é possível obter-se a perlita grossa, característica do recozimento, e obtém-se a ferrita fina que advém da normalização.

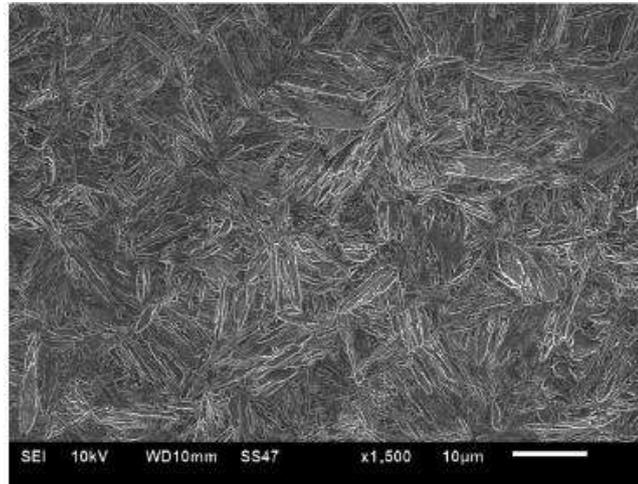
2.3.4 Têmpera e Revenimento

O termo "têmpera" é empregado para indicar um tratamento cujo propósito é obter o máximo de dureza com a formação da martensita (ABNT NBR NM 136, 1997). O processo de têmpera consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica (austenitização), resultando na formação de uma microestrutura austenítica, manutenção dessa condição térmica por um intervalo de tempo determinado e, posteriormente, promove-se o resfriamento do material. Tal resfriamento é realizado com a finalidade de promover a formação da martensita, uma estrutura caracterizada por sua alta dureza e fragilidade, com reticulado tetragonal compacto (TSCHIPTSCHIN, 2020). Este tratamento visa alcançar a máxima dureza por meio da formação da martensita. É relevante destacar que a escolha do método de resfriamento depende da capacidade de endurecimento intrínseca de cada material.

Diversos fatores contribuem para a determinação da profundidade de endurecimento e da distribuição de dureza ao longo da seção de uma peça após o processo de têmpera. Esses elementos englobam a temperabilidade do aço, as dimensões e geometria da peça, a temperatura de austenitização e o meio utilizado no processo de têmpera (COLPAERT, 2008).

Na Figura 13, pode-se identificar a microestrutura obtida por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do aço SAE 4340. A amostra foi submetida ao tratamento de têmpera sendo resfriada em água. A sua estrutura é notavelmente composta de 100% de martensita com ripas relativamente curtas.

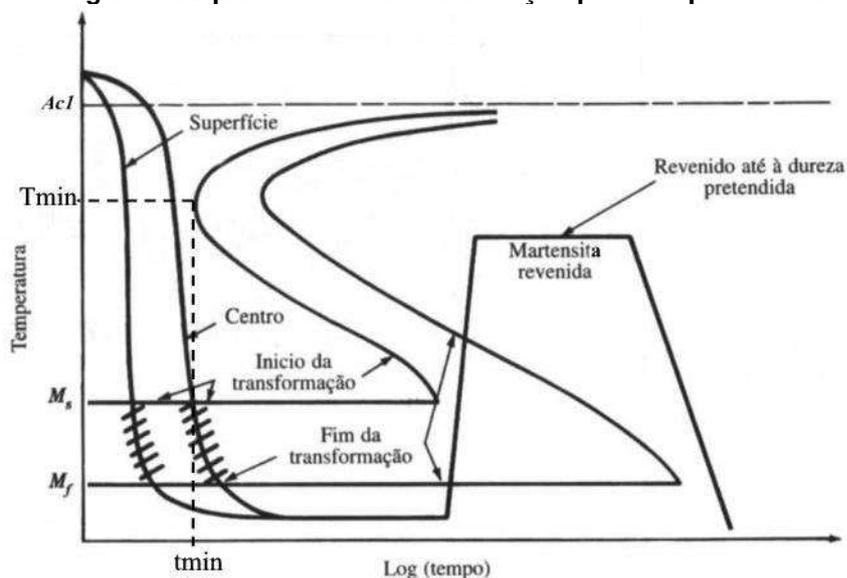
Figura 13. Microestrutura de um aço SAE 4340 submetido à têmpera com resfriamento em água.



Fonte: EL RAYES, 2014.

As microestruturas martensíticas, as quais são formadas após o processo de têmpera, apresentam, de maneira geral, níveis elevados de tensões residuais e possuem uma ductilidade e tenacidade muito baixas, o que limita sua utilização em grande parte das aplicações. Dessa forma, torna-se necessária a realização de um tratamento térmico subsequente, conhecido como revenimento. Esse processo provoca alterações na microestrutura, ao mesmo tempo em que alivia as tensões originadas durante a formação da martensita, possibilitando, assim, a adequação das peças para fins de utilização (COLPAERT, 2008). A Figura 14 exemplifica tais procedimentos.

Figura 14. Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenimento.



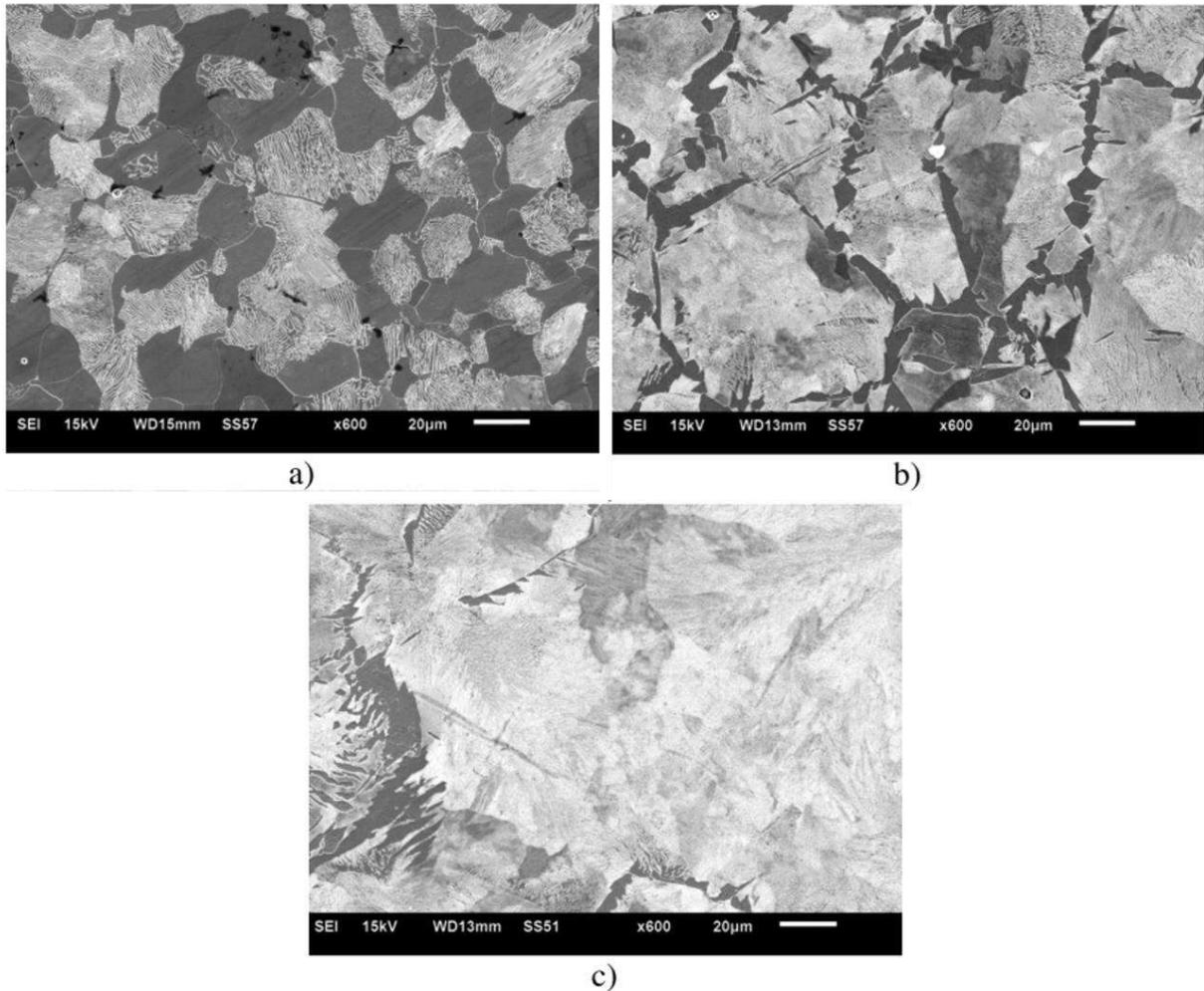
Fonte: VILAR, 1981.

2.3.5 Estudos de tratamentos térmicos por métodos não destrutivos

El Rayes *et al* (2014) correlacionaram resultados de caracterização microestrutural e ensaios mecânicos com velocidade ultrassônica e atenuação sonora dos aços SAE-1040 e SAE-4340. Ambos os tipos foram submetidos a três tipos de tratamento térmico; o primeiro foi recozimento a 850°C, o segundo foi austenitização a 1000°C seguida de resfriamento em óleo e o terceiro foi austenitização semelhante com resfriamento em 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 grão. Além disso, esperava-se que os tipos de tratamento térmico escolhidos resultassem em diferentes fases que deveriam afetar significativamente as características microestruturais, mecânicas e ultrassônicas.

Dentre os resultados obtidos, o autor coletou imagens microscópicas dos três diferentes tipos de tratamento aplicados no aço SAE-1040. A Figura 15-a mostra a microestrutura recozida que contém colônias de perlita (em cor clara) numa matriz de ferrita (cor escura). A perlita constitui 46% da fração de volume e a ferrita, 54% e tamanho de grão de cerca de 18 μm . A microestrutura de resfriamento em óleo, Figura 15-b, também foi composta de perlita e ferrita, resultantes da transformação da austenita, após o resfriamento. Composta de cerca de 80% de perlita e 20% de ferrita, e tamanho de grão por volta de 31,1 μm . A amostra resfriada em água (Figura 15-c) teve sua microestrutura similar à obtida no resfriamento à óleo no que diz respeito à perlita e ferrita, contudo, com volumes de 92% e 8% respectivamente, com tamanho de grão por volta de 54,5 μm . A maior diferença na microestrutura resultante dos três tratamentos foi o conteúdo e tamanho de fases perlita e ferrita, assim como o espaço interlamelar.

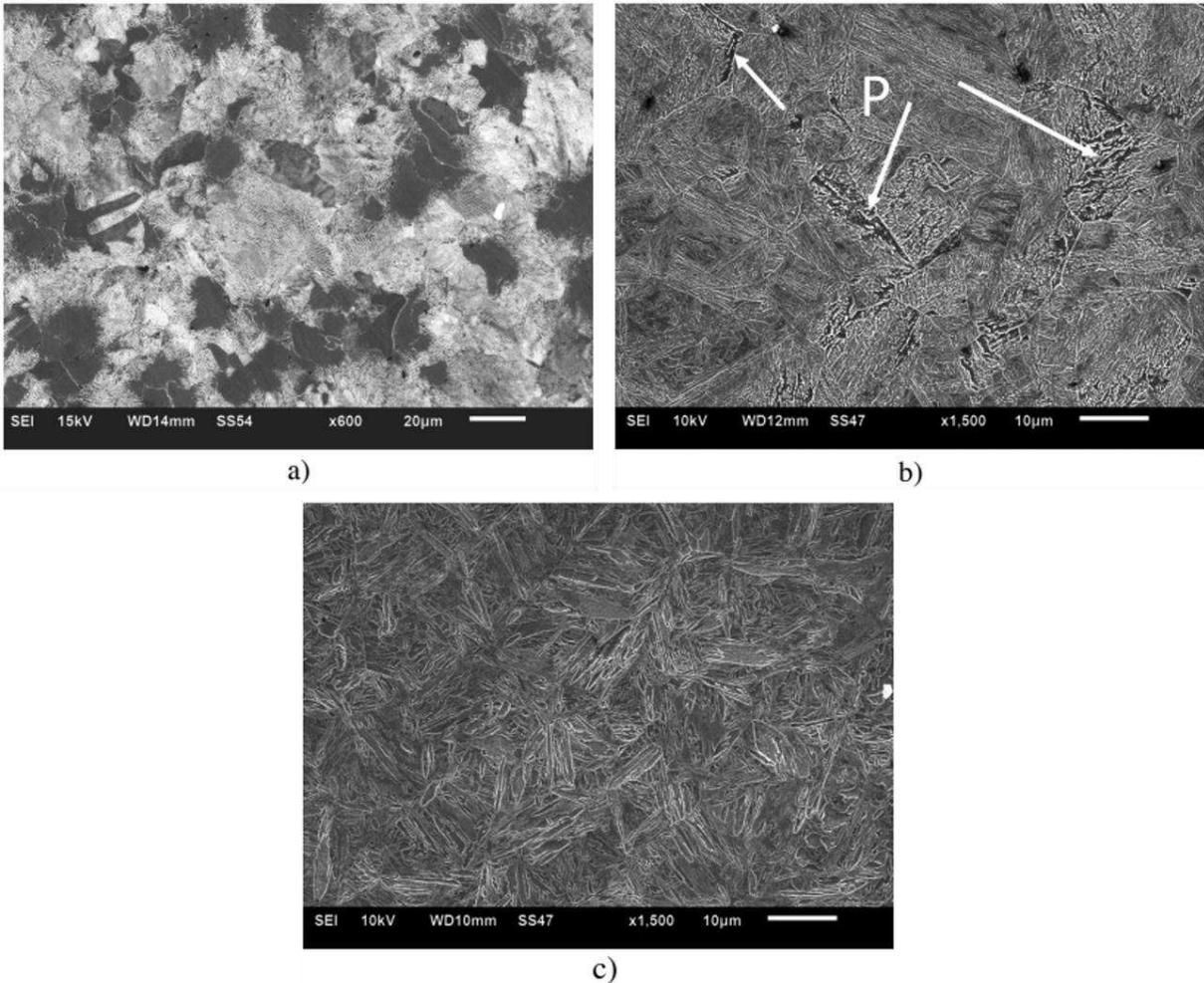
Figura 15. Microestruturas obtidas por microscopia eletrônica de varredura do aço SAE-1040 em condições de (a) recozimento, (b) resfriamento em óleo e (c) resfriamento em água.



Fonte: El Rayes *et al*, 2014.

As Figuras 16-a até 16-c mostram as microestruturas recozidas, resfriadas em óleo e água, respectivamente, do aço SAE-4340 obtidas em microscópio. A estrutura recozida foi composta por grãos de 58,9% de perlita (cor clara) em uma matriz de 41% de ferrita (cor escura), com tamanho de grão de cerca de 11,6 μm (Figura 16-a). A estrutura resfriada a óleo, Fig. 15-b, é composta por longas ripas de martensita (claras) coexistindo com uma subestrutura de poucas placas de martensita (regiões escuras marcadas com P). A microestrutura resfriada em água é composta de 100% de martensita com ripas relativamente curtas como na Fig. 15-c.

Figura 16. Microestruturas obtidas por microscopia eletrônica do aço SAE-4340 em condições de (a) recozimento, (b) resfriamento em óleo e (c) resfriamento em água.

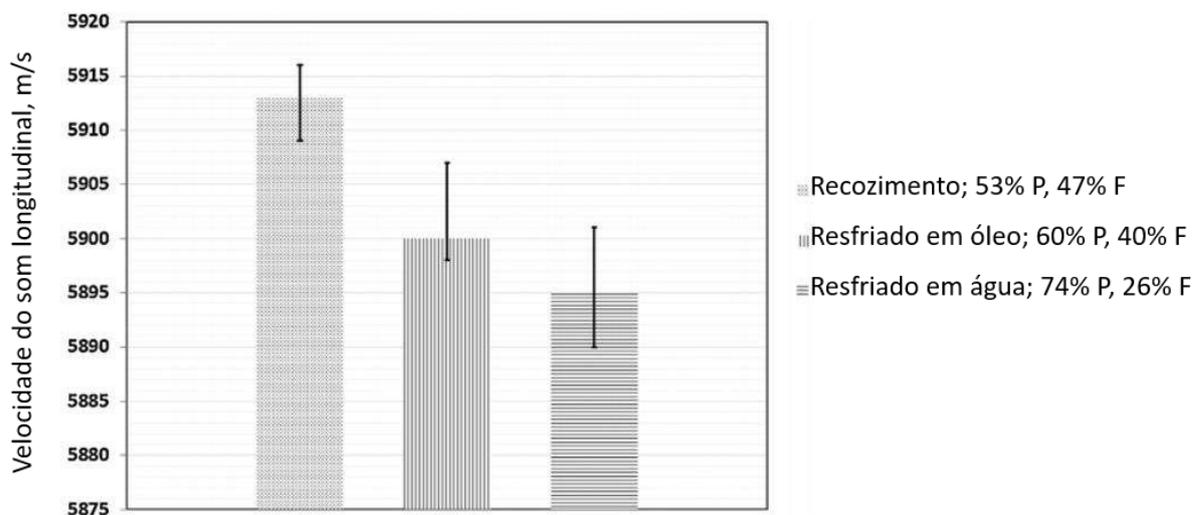


Fonte: El Rayes *et al*, 2014.

Os resultados mostraram, ainda, que a dureza dos materiais aumentou quando o tratamento térmico de ambos os tipos de aço mudou de recozimento para resfriamento em óleo e para resfriamento em água. No aço SAE 1040, a dureza cresceu devido ao aumento de conteúdo de perlita (fase dura) em relação à ferrita (fase mole). Similarmente, no aço 4340, a dureza aumentou devido à mudança nas fases microestruturais sendo perlita + ferrita obtidas do recozimento, formação de martensita em lento e rápido resfriamentos através dos resfriamentos em óleo e água, respectivamente. A suavidade da martensita resfriada em óleo, em comparação com a resfriada em água, é devido a que o resfriamento em óleo leva a uma menor extensão de distorção da rede, tensões residuais e densidade de discordâncias, conforme Gür and Tuncer (2004).

Ainda dentre os resultados, o autor verificou que as medidas de velocidade ultrassônicas de ondas longitudinais foram sensíveis às variações microestruturais no aço SAE-1040, conforme Figura 17. Isso acontece devido à porcentagem de fases de perlita e ferrita dentro de toda a estrutura, bem como o espaçamento interlamelar entre as fases de ferrita e Fe_3C dentro do grão de perlita. A velocidade se torna menor quando o conteúdo de ferrita é reduzido, assim como quando o espaço interlamelar é menor comparado à perlita grosseira. Isso acontece devido ao fato de que a fase ferrita tem menor resistência às ondas ultrassônicas e, conseqüentemente, tem baixa velocidade do som. Foi detectada uma relação inversa existente entre o conteúdo de perlita e a velocidade do som.

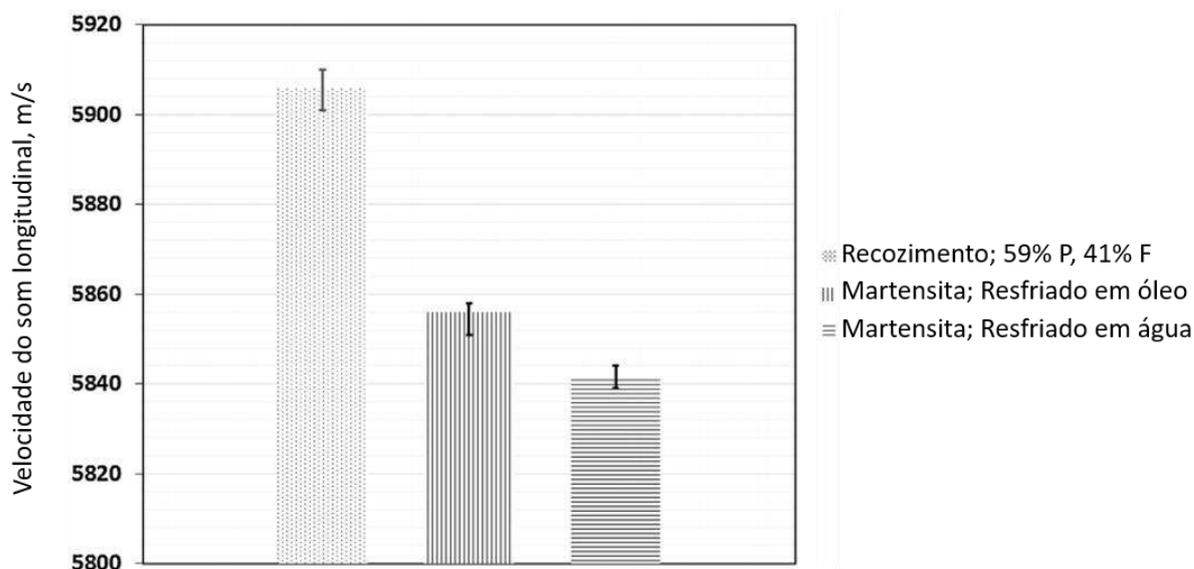
Figura 17. A influência de diferentes conteúdos de perlita (P) e ferrita (F) na velocidade do som no aço SAE-1040.



Fonte: Adaptado de El Rayes *et al*, 2014.

Quantidade semelhante de ferrita e perlita foi obtida após o recozimento de SAE-4340, enquanto o resfriamento em óleo e água resultou em martensita. No aço SAE-4340, quando houve uma mudança no tratamento térmico de recozimento para resfriamento a óleo e a água, causou uma redução na velocidade do som, conforme Figura 18. A razão para essa redução é devido à mudança na microestrutura de perlita para martensita. Esta transformação leva a altas distorções da rede cristalina devido ao aumento de volume durante a transformação austenita-martensita, resultando em grande quantidade de tensões internas/tensões residuais. Portanto, pode-se afirmar que a martensita é a fase com densidade de discordâncias muito alta e aleatoriedade máxima, conforme relatado por Papadakis (1964) e Gür e Çam (2007).

Figura 18. Influência das diferentes fases no aço SAE-4340 na velocidade do som.



Fonte: Adaptado de El Rayes *et al*, 2014.

Correa *et al* (2016) apresentaram resultados da caracterização dos efeitos de ciclos térmicos em tensões residuais devido a transformações de fase no aço API 5L X80. Tensões residuais são tensões restantes no material após remover forças externas. As tensões residuais são causadas por regiões com deformações internas. Estes se originam de processos de fabricação e montagem em serviço. Como forma de medir essas tensões residuais, os métodos de Ruído Magnético de Barkhausen e Ultrassom são técnicas não-destrutivas e fáceis de aplicar em campo, além de que esses métodos são uma ferramenta em potencial para medições industriais de tensões residuais e outros parâmetros microestruturais. Em seu trabalho, Correa *et al* utilizaram amostras de aço API 5L X80 expostas a diversas condições de tratamentos térmicos, consistindo em recozimento com resfriamento em água, ar e óleo, obtendo, assim, diferentes microestruturas e diferentes níveis de tensões residuais. Algumas amostras foram mantidas na condição como recebida. As amostras foram submetidas a 930°C por 50 minutos com resfriamento em água, óleo e ar utilizando um forno mufla. Após o tratamento térmico de recozimento, as amostras receberam tratamento de alívio de tensões na temperatura de 580°C por 2 horas, seguido de resfriamento em forno.

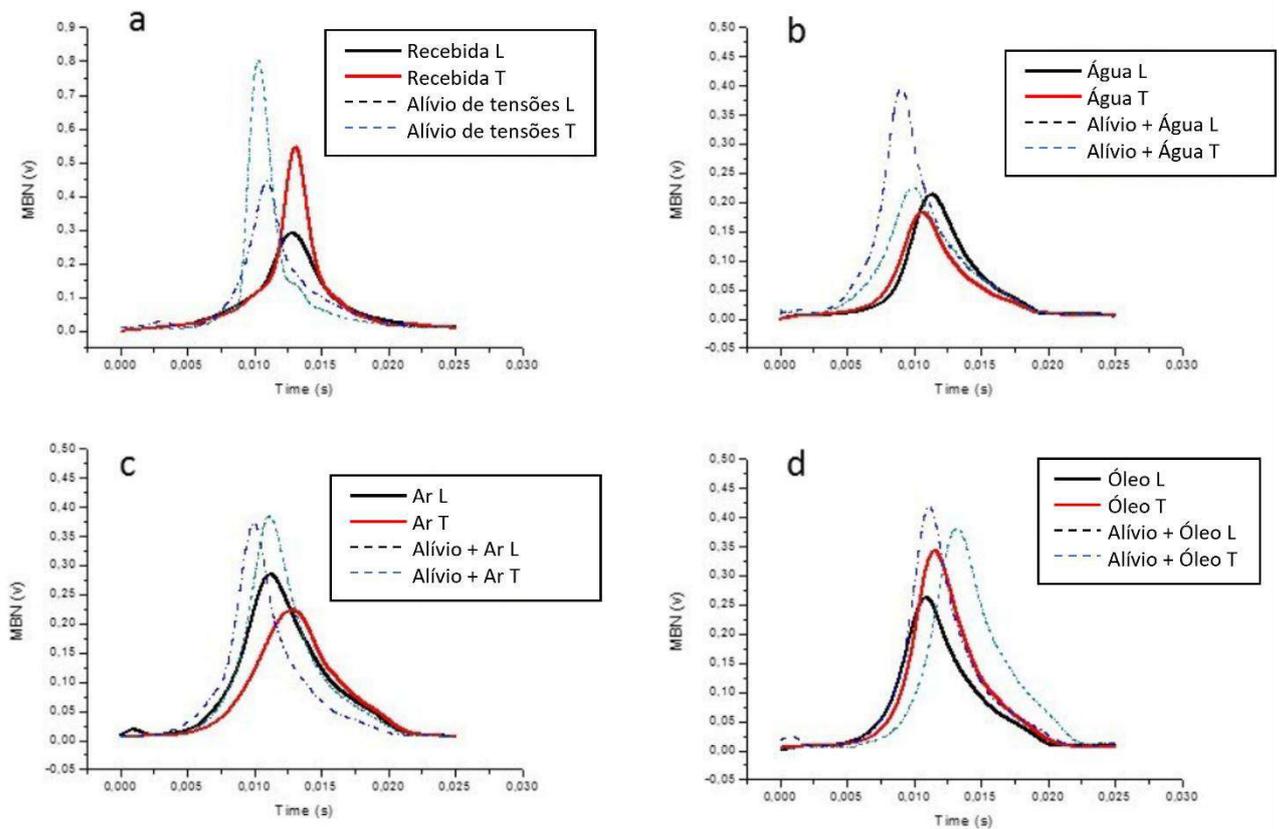
As tensões residuais foram, então, medidas por Ruído Magnético de Barkhausen com o equipamento Barktech, que consiste em um sistema composto por um conjunto excitador-sensor (sonda), condicionador de sinal e aquisição e

processamento de dados. Os parâmetros foram semelhantes em todas as amostras com frequência de excitação de 10 Hz (CORREA *et al*, 2016).

A amplitude e o valor RMS do Ruído Magnético de Barkhausen foram apresentados em volts (V) e foram obtidos a partir do sentido longitudinal (L) e transversal (T) para o sentido de laminação. As amostras foram analisadas sob as seguintes condições: como recebida, resfriada em água, ar e óleo e todas com e sem tratamento térmico para alívio de tensões. Para as condições como recebida, resfriado em água e ar, o RMB foi maior após o alívio de tensões, conforme Figuras 19a, 19b e 19c. Para a condição como recebida, a direção transversal mostrou maior sinal Barkhausen, conforme Figura 19a. Esse comportamento difere da situação de resfriamento em água, onde os valores foram próximos em ambas as direções, conforme Figura 19b. Para a amostra resfriada em óleo, Figura 19d, é possível notar que o início do sinal de RMB para as condições analisadas foi bem próximo e, como observado nas outras amostras, os valores de RMB foram maiores após o alívio de tensões (CORREA *et al*, 2016).

Os resultados do estudo de Correa *et al* (2016) mostraram que as amostras que sofreram alívio de tensões tiveram maiores valores de RMB, devido à redução de barreiras ao movimento dos domínios magnéticos. Os menores valores de RMB em resfriamento em água e óleo são devido à presença de martensita e bainita. A martensita é um microconstituente altamente deformado e muito fino, com alta densidade de discordâncias e grande quantidade de interfaces. Assim, o movimento das paredes do domínio se torna difícil e a reversão da magnetização ocorre pela rotação do domínio, o que gera baixíssimo ruído.

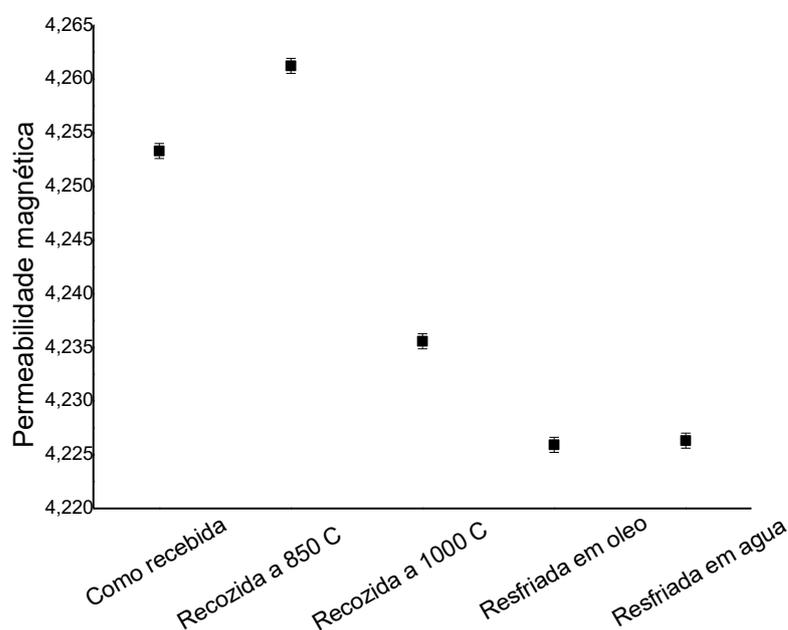
Figura 39. Amplitudes do Ruído Magnético de Barkhausen. a) Amostra como recebida. b) Amostra resfriada em água. c) Amostra resfriada no ar. d) Amostra resfriada no óleo.



Fonte: Correa *et al*, 2016.

Medidas de permeabilidade magnética através de sensor de efeito Hall têm sido aplicadas para determinação de variação de microestrutura em aços 4340 submetidos a diferentes tratamentos térmicos. Na Figura 20 são mostrados resultados em função de diferentes tratamentos térmicos aplicados. A partir da Figura 20, pode-se observar um aumento nos valores de permeabilidade magnética para a amostra recozida a 850°C em comparação com a amostra recebida e é seguido por um decaimento devido aos tratamentos aplicados a ela, que são a austenitização a 1000°C seguido de resfriamento ao forno, óleo e água (LIMA, 2021).

Figura 4. Variação das medidas de permeabilidade magnética relativa na amostra recebida e nas amostras em função do tipo de tratamento térmico aplicado.



Fonte: Adaptado de LIMA, 2021.

A amostra como recebida ao ser recozida a uma temperatura de 850 °C, que está na temperatura intercrítica, leva a um aumento na quantidade de fase ferrita, que é ferromagnética e aumenta a permeabilidade magnética relativa. No entanto, no recozimento a 1000 °C com resfriamento em forno teve seus valores de permeabilidade reduzidos em relação ao tratamento na temperatura de 850 °C. Esta diferença se dá pelo aumento na quantidade de perlita no aço e redução da quantidade de fase ferromagnética ferrita. A perlita é formada por duas fases ferromagnéticas, ferrita e cementita na forma de estrutura lamelar, que dificultam o movimento das paredes dos domínios magnéticos e confere à perlita um comportamento paramagnético, reduzindo, portanto, a permeabilidade magnética relativa do material (LIMA, 2021).

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 os meios de resfriamento ao óleo e a água. Ambos os tratamentos apresentam a formação da estrutura martensita que corresponde ao de maior dureza dos aços comuns. Esta microestrutura fina dificulta o movimento dos domínios magnéticos e reduz a permeabilidade (LIMA, 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas como foram obtidas as amostras para o ensaio experimental, e quais tratamentos térmicos e resfriamentos pelos quais passaram. Em seguida, são apresentados os elementos que compõem a bancada experimental e o detalhamento do estudo, como frequências e amplitudes utilizadas no ensaio.

3.1 MATERIAL ESTUDADO

As amostras utilizadas no presente trabalho são compostas pelo aço SAE 4340 (Cr-Ni-Mo) dividido em quatro partes iguais de 5 mm de espessura cada, e fornecidas na forma de vergalhão laminado com 25 mm de diâmetro. Foram cortadas à serra com lubrificante para evitar o sobreaquecimento. O tratamento desse material foi realizado no laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais (GSCMat), durante o trabalho de dissertação de LIMA (2021) para realização de estudo na região de reversibilidade magnética. A escolha desse material foi dada com base na sua importância em aplicações industriais, nas quais ele é caracterizado principalmente pela durabilidade, e por isso é usado em trens de pouso de aeronaves, engrenagens e eixos de transmissão de potência, por exemplo.

Foram realizados, nas amostras, diferentes tipos de tratamentos térmicos em um forno elétrico de resistência. O primeiro deles, conhecido como recozimento pleno, foi o recozimento a 850 °C por 30 minutos, seguido de resfriamento no forno. O segundo tratamento foi a austenitização a 1000 °C por 30 minutos, seguida de resfriamento no forno. O terceiro e último tratamento, conhecido como têmpera, foi a austenitização a 1000 °C por 30 minutos, seguida de resfriamento em água. Uma das amostras foi analisada como recebida do processo de fabricação, ou seja, não foi submetida a nenhum tratamento térmico. Foram realizadas marcações nas laterais e faces das amostras para garantir pontos de referência que permitissem correlacioná-las durante e após as medições.

Na Tabela 2 pode ser observado um resumo dos tratamentos térmicos que foram aplicados nas amostras do aço SAE 4340, pertencentes ao acervo do laboratório de pesquisa GSCMat.

Tabela 2. Resumo dos tratamentos térmicos aplicados nas amostras.

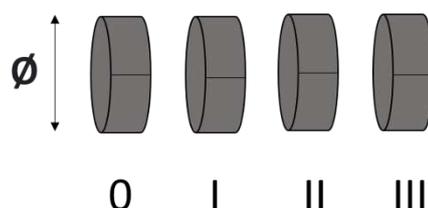
Tipo de amostra	Nº da amostra	Tratamento aplicado	Tempo de tratamento (min)
	0	Como recebida	---
	I	Recozimento a 850 °C e resfriado no forno	30
Aço SAE 4340 (Ø 25 mm x 5 mm)	II	Austenitização a 1000 °C e resfriado no forno	30
	III	Austenitização a 1000 °C e resfriado em água (têmpera)	30

Fonte: Do autor.

Para melhor entendimento das dimensões das amostras e seus tratamentos térmicos, pode-se observar na Figura 21 um resumo de cada situação.

Figura 21. Desenho das amostras do aço 4340 com suas numerações e tratamentos térmicos

Amostras Ø 25 mm x 5 mm



0 – Como recebida

I – Recozimento a 850 °C e resfriado no forno

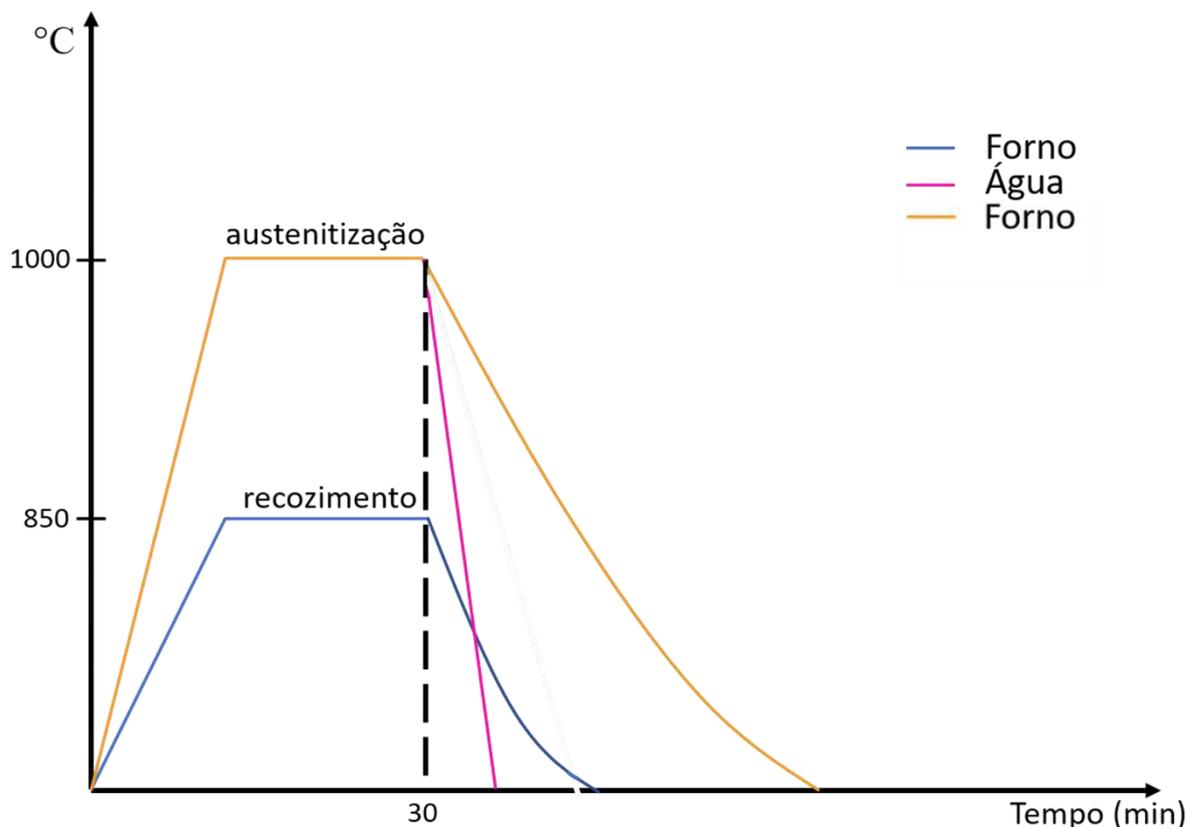
II – Austenitização a 1000 °C e resfriada no forno

III – Austenitização a 1000 °C e resfriada em água (têmpera)

Fonte: Do autor.

O gráfico da Figura 22 ilustra os diferentes ciclos térmicos, dentre os quais as amostras do aço SAE 4340 foram submetidas, que são os tratamentos de recozimento e austenitização. O comportamento dos aços durante o tratamento térmico varia de acordo com as temperaturas de aquecimento e resfriamento, do tempo de permanência nestas temperaturas, das velocidades de aquecimento e resfriamento, assim como o tipo da atmosfera no seu aquecimento (DA MAIA, FUTAMI e OLIVEIRA, 2019). Essas variações de tratamentos aplicados nas amostras tiveram como objetivo obter diferentes microestruturas homogêneas.

Figura 22. Representação esquemática dos ciclos térmicos e suas respectivas velocidades de resfriamento.



Fonte: Do autor

3.2 A BANCADA DE TESTES

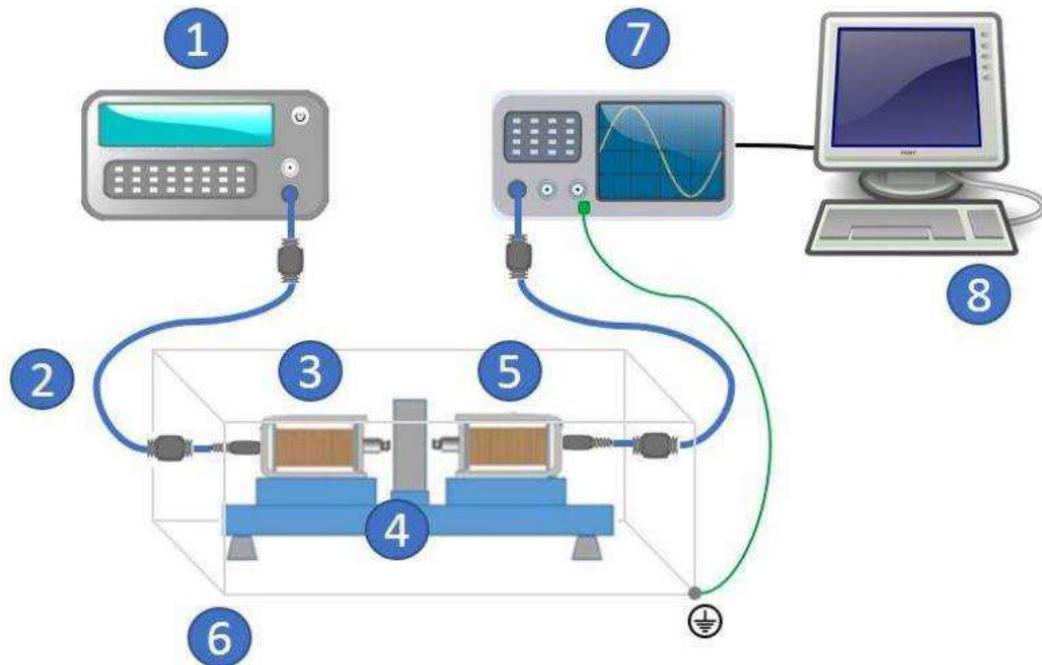
Para o desenvolvimento da análise, foi utilizada uma bancada experimental constituída por dois módulos: módulo de emissão e módulo de aquisição. O módulo de emissão é composto por um gerador de função Minipa MFG-4205B e uma bobina emissora. O gerador de função transmite para a bobina emissora uma onda de formato senoidal. A bobina emissora tem por função impor um campo magnético na amostra do aço SAE 4340.

O módulo de aquisição é constituído por uma bobina receptora, um osciloscópio e um computador. Esta bobina foi posicionada no lado oposto da peça com a finalidade de detectar o campo induzido gerado pela bobina emissora, e assim transmitir o sinal a um osciloscópio (*Agilent Technologies*, modelo DSO-X 2012A). Os dados são capturados com o auxílio de um *pendrive* conectado ao osciloscópio que posteriormente foi acoplado a um computador, o qual tratou os dados no programa

denominado “Análise Barkhausen”, este desenvolvido no laboratório de pesquisa GSCMat.

As bobinas utilizadas são idênticas e têm 19,5 mm de comprimento, 6000 espiras de fios de cobre esmaltado nº 38, envoltas sobre um núcleo de aço AISI 4140. E por fim, foi utilizada uma gaiola de Faraday e cabos blindados a fim de diminuir a interferência de sinais provenientes do meio. A configuração dessa bancada pode ser melhor compreendida na Figura 23.

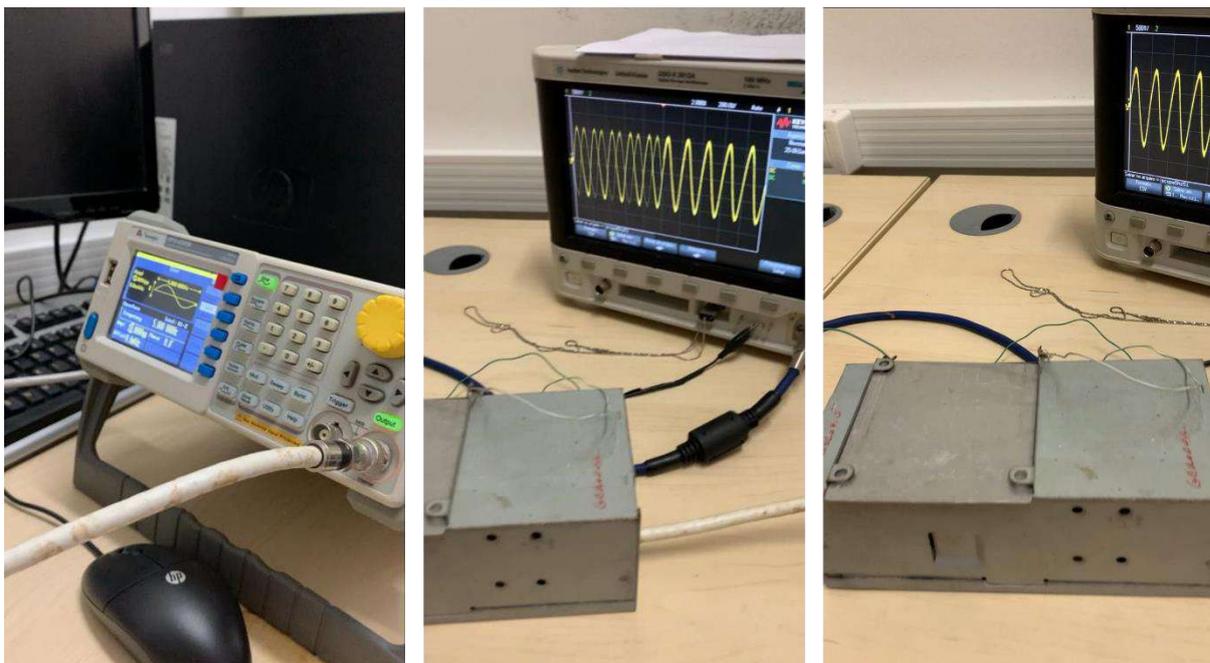
Figura 23. Bancada experimental para o ensaio de permeabilidade magnética: (1) Gerador de ondas; (2) Cabo blindado; (3) Bobina emissora; (4) Amostra; (5) Bobina receptora; (6) Gaiola de Faraday; (7) Osciloscópio; (8) Computador.



Fonte: Do autor.

Na Figura 24, pode ser vista a bancada utilizada para realizar as medições do estudo.

Figura 24. Bancada de testes.



Fonte: Do autor.

3.3 ENSAIO EXPERIMENTAL

O objetivo do trabalho foi estudar o ruído gerado pela interação entre intensidade de campo magnético, produzido por uma onda eletromagnética, e o aço SAE 4340 submetido a diferentes tratamentos térmicos, e assim acompanhar a variação de microestrutura a partir da análise do ruído de Barkhausen.

Na bancada de teste, o aço 4340 é posicionado entre a bobina emissora e a bobina receptora. A bobina emissora de aplicação de onda é responsável pela magnetização do material. A onda emitida passa pelo material e transmite à bobina receptora um sinal que traz informações da interação da onda aplicada com o material estudado.

Os ensaios foram divididos em duas etapas: a primeira etapa consistiu em determinar a melhor amplitude e frequência de medição entre a condição “como recebida” e a “austenitizada na temperatura de 1000°C e resfriada em água”. Na segunda etapa, a melhor condição de medição foi aplicada em todos os tratamentos térmicos apresentados.

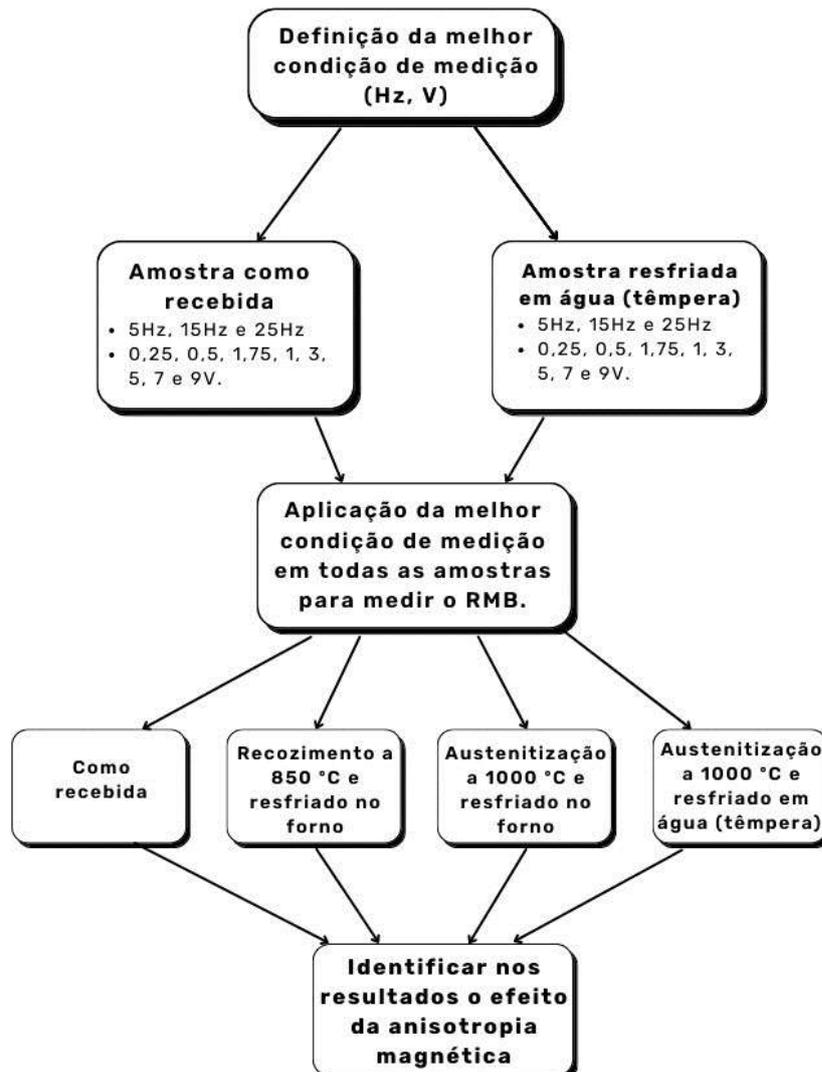
Na primeira etapa, foram aplicadas na bobina emissora as frequências de 5 Hz, 15 Hz e 25 Hz nas amplitudes de 0,25 V, 0,5 V, 0,75 V, 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V nas

duas amostras. A leitura da bobina receptora foi configurada para capturar 10.000 pontos em um segundo. Além disso, foi feito um corte de frequência em 1000 Hz via software, funcionando como um filtro passa-altas, com a finalidade de reduzir ruídos menores que 1000 Hz e melhorar a precisão das medições.

Em seguida, determinou-se qual a melhor condição de medição em frequência e amplitude, e na segunda etapa, essa condição foi utilizada para medir todas as amostras restantes. Por fim, estas foram rotacionadas em faixas de 45 graus e medidas, para assim também estudar e determinar a anisotropia magnética do material.

Para melhor visualização das etapas do estudo, pode ser observado na Figura 25 um diagrama explicativo.

Figura 25. Diagrama explicativo das etapas do estudo



Fonte: Do autor.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

As amostras submetidas aos diferentes tratamentos térmicos foram adquiridas do acervo do laboratório GSCMat. Para a realização deste estudo, foram analisadas em laboratório por um microscópio óptico, de marca Nikon, que possui sistema de aquisição de imagem acoplada. Para a aquisição das imagens, foi necessária a submissão das amostras à etapa de metalografia, onde foram lixadas com lixas de 220, 320, 400 e 600 e depois polidas com alumina de 1 μm e 0,3 μm , seguidas de ataque químico com o reagente de nital 2%.

3.5 ANÁLISE DA DUREZA DO MATERIAL

Foi usado o ensaio de dureza Rockwell C e os resultados foram agrupados em gráficos que objetivaram 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 do aço SAE 4340, todas com diâmetro de 25 mm e comprimentos de 5 mm cada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção está dividida em caracterização do material estudado, determinação do melhor sinal para estudo e análise do efeito da microestrutura obtidas nos diferentes tratamentos e a do material como recebido, rotacionando as amostras em passos de 45° e, por fim, na direção de fácil magnetização do material.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ESTUDADO

O estudo deste trabalho foi realizado com amostras de aço SAE 4340 em diferentes condições de tratamento, sendo elas: como recebida (sem tratamento térmico), recozida a 850 °C e resfriada no forno, austenitizada a 1000°C e resfriada no forno e austenitizada a 1000°C e resfriada em água. As Figuras 26 a 27 ilustram o comportamento da sua microestrutura, obtidas através de microscópio óptico.

A Figura 26 mostra o material como recebido. Nesta, nota-se uma microestrutura fina de ferrita e perlita. O aço SAE 4340 possui alta capacidade de endurecimento (Temperabilidade) devido à adição dos elementos de liga Cr, Ni e Mo que facilitam a obtenção de constituintes de maior dureza. Este material é fornecido na condição normalizado, que se caracteriza por uma microestrutura fina de ferrita e perlita. Isto se deve à sua alta temperabilidade, que não permite ser fornecida na condição de recozimento, pois possui ferrita e perlita grosseira, que é característica dos aços com pouca adição de elementos de liga (COLPAERTE, 2008, EL RAYES *et. al.*, 2014). Nesta condição o material apresentou uma dureza de $34,3 \pm 0,14$ HRC. O método de dureza Rockwell C foi escolhido por ser adequado a materiais de alta temperabilidade e submetidos a tratamentos térmicos (COLPAERTE, 2008).

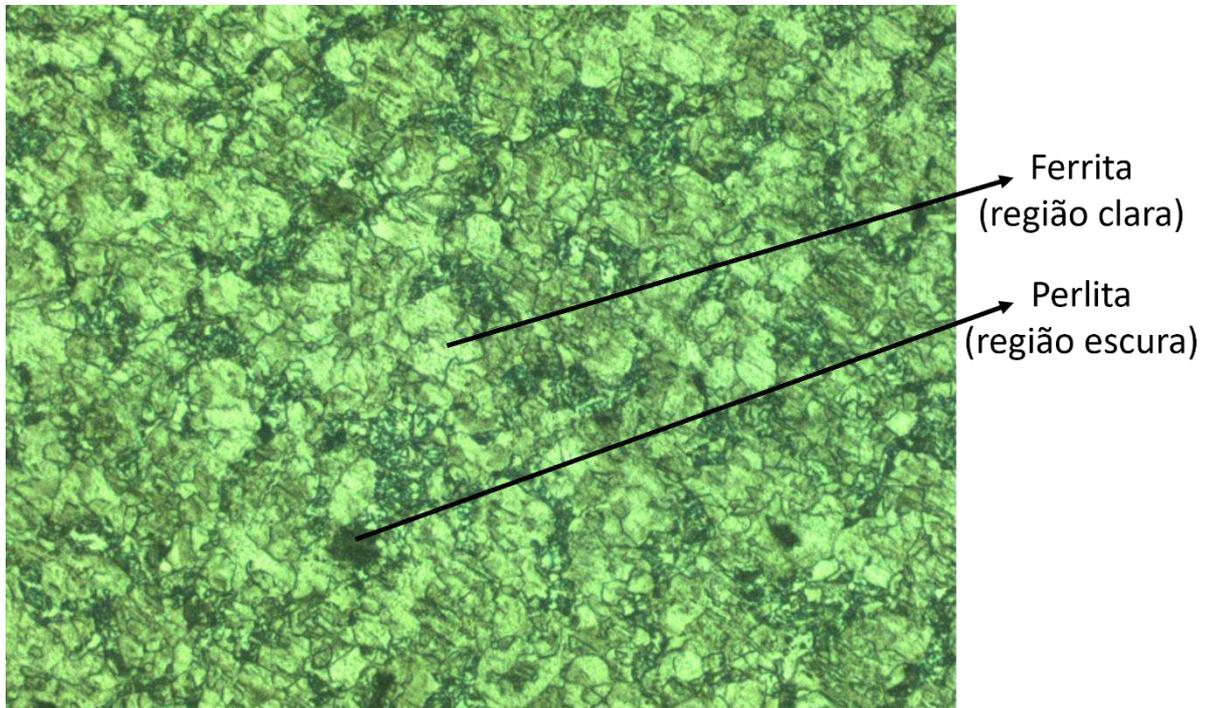
A Figura 27 mostra a condição de recozimento a 850°C e resfriada no forno. Na Figura 27 percebe-se uma microestrutura com grãos de ferrita maiores em relação à amostra como recebida. Isso acontece porque o resfriamento no forno é considerado um resfriamento lento, e assim os grãos conseguem crescer e apresentar na microestrutura a perlita e ferrita mais bem definidas. Nesta condição, a dureza do material reduziu para $24,6 \pm 0,13$ HRC. Isto se deve ao aumento dos grãos de ferrita, que possui dureza de 90 HB, enquanto que uma perlita possui dureza de 250 HB (COLPAERTE, 2008).

Figura 26. Amostra do aço SAE 4340 sem tratamento térmico (como recebida) (aumento de 200x).



Fonte: Do autor.

Figura 27. Amostra do aço SAE 4340 recozida a 850°C e resfriada no forno (aumento de 200x).

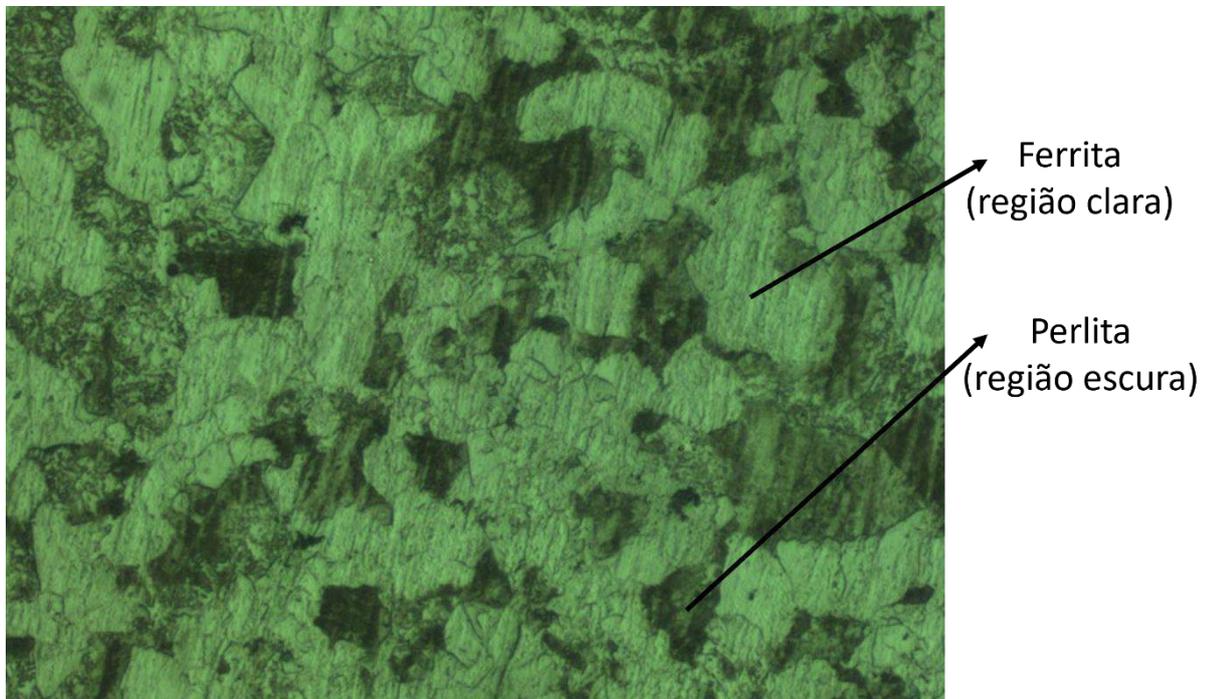


Fonte: Do autor.

A fim de analisar o efeito da temperatura, as amostras como recebidas foram aquecidas na temperatura de 1000 °C e submetidas ao mesmo resfriamento, ou seja,

ao forno. Este tratamento térmico pode ser chamado de austenitização a 1000°C e resfriamento no forno. Na Figura 28, tem-se uma micrografia do aço 4340, que apresenta grãos ainda maiores e mais definidos de ferrita (região clara) e perlita (região escura). No tratamento térmico de austenitização a 1000°C e resfriamento no forno, o aquecimento a uma maior temperatura faz com que o tempo de permanência a alta temperatura produza mais perlita e aumente a dureza do material, que passa a ser $32,6 \pm 0,58$ HRC (EL RAYES *et. al.*, 2014).

Figura 28. Micrografia da amostra do aço SAE 4340 austenitizada a 1000°C e resfriada no forno (aumento de 200x).



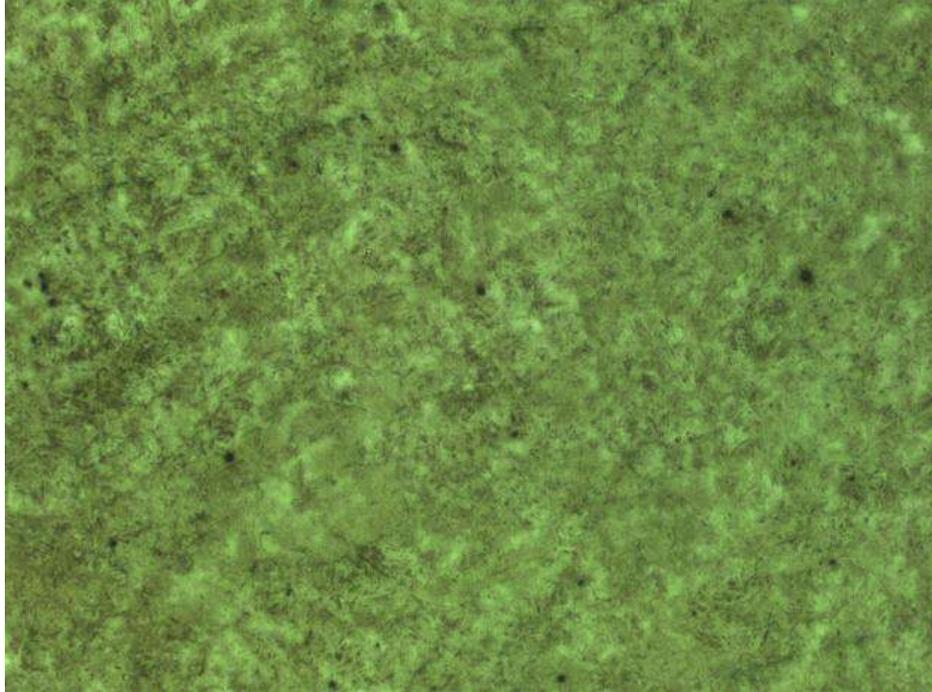
Fonte: Do autor.

A Figura 29 mostra a microestrutura da condição de aquecimento a 1000°C e resfriamento em água (têmpera em água). Esta condição foi aplicada para analisar o efeito da velocidade de resfriamento a partir da temperatura de aquecimento. A Figura 29 mostra a microestrutura resultante do tratamento de têmpera, que tem como objetivo obter o máxima de dureza com a formação do constituinte martensita. Nesta condição, tem-se a martensita, que é a microestrutura mais fina entre as estudadas. A dureza nesta condição foi medida como $63,9 \pm 0,3$ HRC.

As durezas obtidas dos tratamentos empregados, bem como do material como recebido, são apresentados na Figura 30. Estas serão empregadas para análise dos

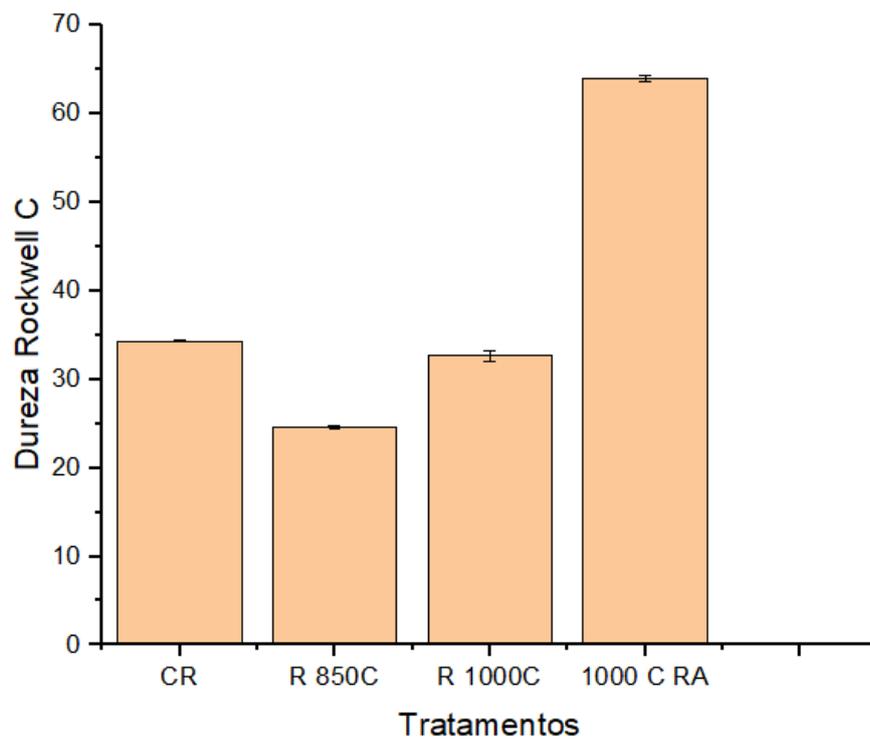
resultados obtidos pelo ensaio eletromagnético aplicado e correlacionados com a presença do ruído magnético de Barkhausen.

Figura 29. Micrografia da amostra do aço SAE 4340 têmpera em água (aumento de 200x).



Fonte: Do autor.

Figura 30. Variação de Dureza Rockwell C, em função das condições estudadas: CR (material como recebido), R 850 C (recozimento na temperatura de 850 °C), R 1000 C (recozimento a 1000 °C), R 1000 CRA (têmpera a partir de 1000 °C).



Fonte: Do autor.

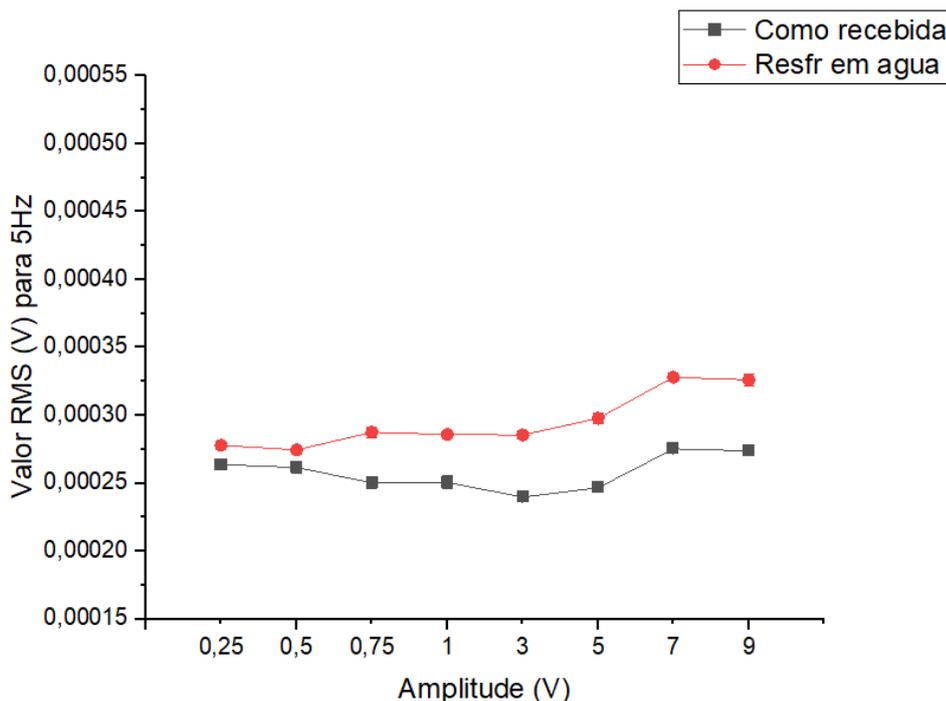
Pode-se observar na Figura 30 uma redução dos valores de dureza da condição como recebida e a tratada a 850 °C, seguida de um aumento ao tratar-se a 1000°C e resfriada em forno e, por último, a obtenção do máximo de dureza com o resfriamento em água.

4.2 DETERMINAÇÃO DA MELHOR REGIÃO DE TRABALHO

Na primeira etapa de medição, amostras em duas diferentes condições, sendo uma como recebida e outra resfriada em água, do aço SAE 4340, foram submetidas a ondas senoidais de frequências e amplitudes diversas. Foram realizadas as medições nas frequências de 5 Hz, 15 Hz e 25 Hz e amplitudes de 0,25V, 0,5V, 1,75V, 1V, 3V, 5V, 7V e 9V de amplitude.

Na Figura 31, é possível identificar o resultado das medições realizadas nas amostras como recebida e resfriada em água, no ângulo de rotação 0°, com aplicação de onda emissora de 5 Hz de frequência e as variadas amplitudes de estudo. Da mesma forma, a Figura 32 ilustra o resultado das medições na frequência de 15 Hz de frequência, assim como na Figura 33 tem-se o resultado das medições na frequência de 25 Hz, ambas também em função das amplitudes estudadas.

Figura 31. Valores RMS para medição com 5 Hz de frequência e variadas amplitudes, nas condições de tratamento como recebida e resfriada em água.



Fonte: Do autor.

A Figura 31 mostra que as medidas de RMS para as amostras resfriadas em água tiveram maiores valores em relação à condição como recebida. A têmpera em água aumentou os valores de dureza de 34,3 HRC para 63,9 HRC, devido à formação do constituinte martensita, que por possuir uma estrutura mais fina, geram maior quantidade de ruído à medida que as paredes dos domínios magnéticos tentam vencer os obstáculos gerados pela microestrutura.

Nota-se também na Figura 31 que, à medida que aumentamos a amplitude da onda emissora, ocorre um aumento na diferença entre as duas condições. O aumento da amplitude resulta em um maior fluxo de linhas de campo magnético que levam a uma maior interação entre o movimento das paredes e a microestrutura, de modo a gerar uma maior quantidade de ruído. Todavia, os valores da diferença entre as duas condições parecem estabilizar a partir da amplitude de 7 V.

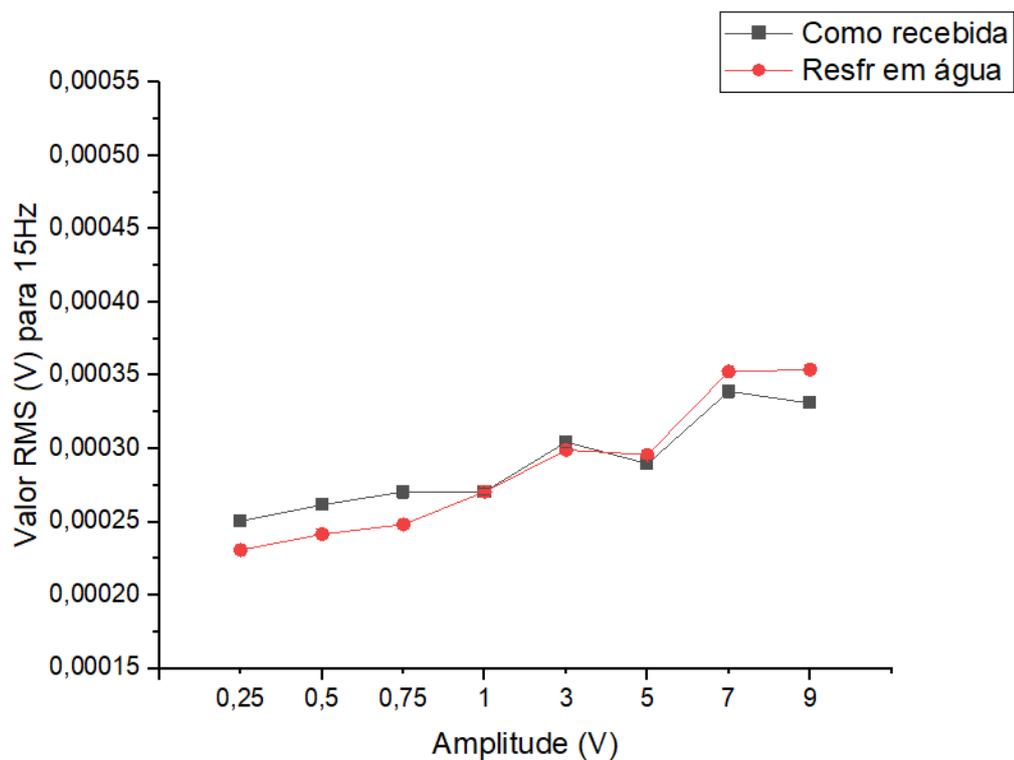
A microestrutura da amostra como recebida é formada por dois constituintes: a ferrita e a perlita. A primeira é ferromagnética, e a segunda, apesar de ser formada por dois constituintes ferromagnéticos, a sua estrutura lamelar dificulta o movimento dos domínios magnéticos e por isso apresenta o ferromagnetismo reduzido, o que reduz o RMS em relação ao material temperado. Valores de amplitudes até 0,5 V, na Figura 31, mostram a proximidade das medidas de RMS das duas condições, o que acontece possivelmente devido ao menor fluxo magnético reduzir o ruído na condição “temperada” e aumentar a contribuição do ferromagnetismo do constituinte ferrita na condição “como recebida”.

A Figura 32 ilustra a variação de RMS em função da amplitude da onda emissora, para a frequência de 15 Hz. Nota-se um aumento dos valores de RMS com o aumento da amplitude da onda emissora, sendo que, para amplitudes até 0,75 V as medidas de RMS para a condição “como recebida” foram superiores a da “resfriada em água”. Todavia, a partir de 1 V apresentam valores similares até 3 V, com inversão de comportamento para amplitude acima de 5 V.

A Figura 32 indica que para valores até 3 V o fluxo magnético não é suficiente para gerar ruído magnético de Barkhausen para que a condição como “temperada” (ou resfriada em água, de microestrutura mais fina) supere aos valores de RMS da condição “como recebida”. Nesta condição, o fluxo magnético é suficiente para destacar o efeito do constituinte ferrita, que é ferromagnética, assim os valores de RMS passam a ser superiores devido a amplificação do fluxo magnético da ferrita.

Pode-se notar também na Figura 32 que, para valores de amplitudes a partir de 5 V, o aumento do fluxo magnético leva à produção de ruído magnético de Barkhausen suficiente para a interação entre o movimento das paredes dos domínios magnético e a microestrutura fina, e isto leva à inversão de comportamento, ou seja, as medidas de RMS da condição “temperada” superam em valor às do material “como recebido”.

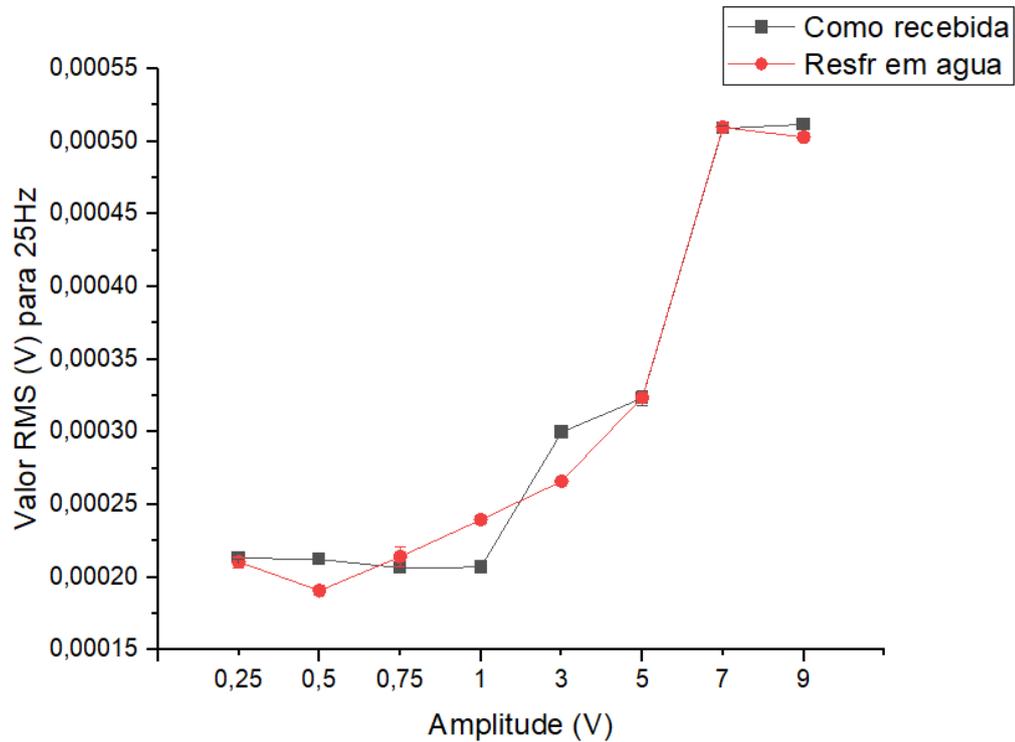
Figura 32. Valores RMS para medição com 15 Hz de frequência e variadas amplitudes, nas condições de tratamento como recebida e resfriada em água.



Fonte: Do autor.

A variação das medidas de RMS em função da amplitude da onda emissora para a frequência de 25 Hz e as condições “como recebida” e “resfriada em água” são apresentadas na Figura 33. Pode-se observar comportamento similar entre as duas condições, com sobreposições para 0,25 V, 0,75 V, 5 V, 7 V e 9 V e variações para 0,5 V, 1 V e 3 V. Apesar das variações, a aplicação de ondas com frequência de 25 Hz gera uma quantidade de ruído grande o suficiente a ponto de perder-se a capacidade de diferenciar as duas condições.

Figura 33. Valores RMS (V) para medição com 25 Hz de frequência e variadas amplitudes (V), nas condições de tratamento como recebida e resfriada em água.



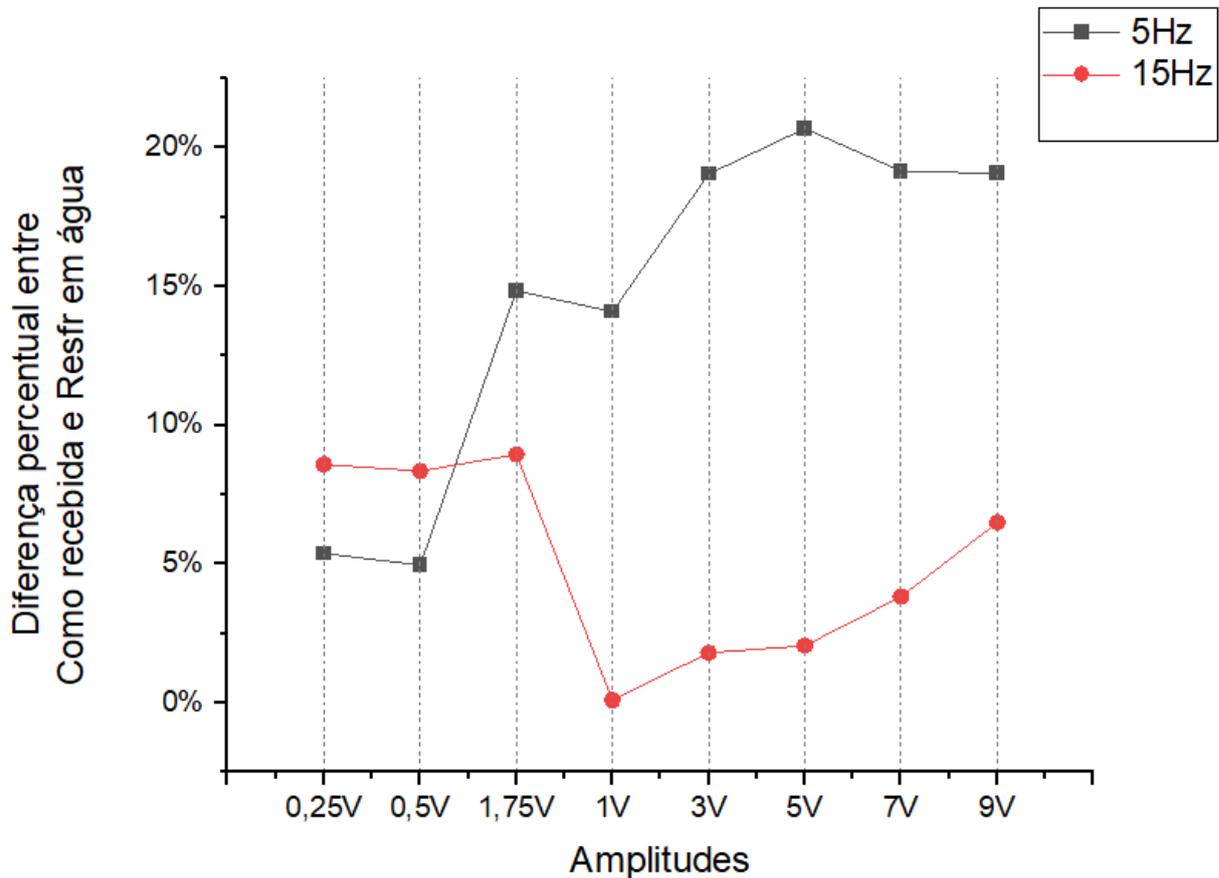
Fonte: Do autor.

Foi realizado um cálculo para determinar a maior diferença percentual entre as medições das amostras “como recebida” e “resfriada em água para os sinais de frequência de 5 Hz e 15 Hz, de acordo com a Fórmula 1.

$$Diferença\ percentual\ (\%) = \frac{mod(Como\ recebida - Resfriada\ em\ água)}{Como\ recebida} \quad (1)$$

A diferença percentual de cada medição em cada amplitude e frequência distinta foi registrada, e ilustrada na Figura 34. Nesta figura, é possível identificar a diferença percentual entre as medições feitas nas amostras “como recebida” e “resfriada em água” para os sinais com frequências de 5 Hz e 15 Hz. Com esses dados, percebeu-se que a condição de 5 Hz e 5 V apresentou a maior diferença em módulo entre as duas condições. Esta condição foi escolhida para a análise do efeito da microestrutura formada durante os tratamentos sobre a direção de fácil magnetização do material estudado. Este estudo é apresentado na próxima seção.

Figura 34. Diferença percentual entre as medições das amostras “como recebida” e “resfriada em água” para as frequências de 5 Hz e 15 Hz.



Fonte: Do autor.

4.3 ESTUDO DO EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NA DIREÇÃO DE FÁCIL MAGNETIZAÇÃO

Nesta etapa, todas as amostras do aço SAE 4340 sob as diferentes condições de tratamento térmico foram submetidas a uma onda senoidal de 5 Hz de frequência e 5 V de amplitude, e um osciloscópio foi utilizado para a aquisição dos dados. A Figura 35 apresenta os resultados desse estudo para cada condição de estudo: sem tratamento (como recebida), amostras austenitizadas a 1000°C e resfriadas em água e no forno, e recozida a 850°C e resfriada no forno. Além disso, as amostras foram rotacionadas e medidas a cada 45 graus para análise de anisotropia no material.

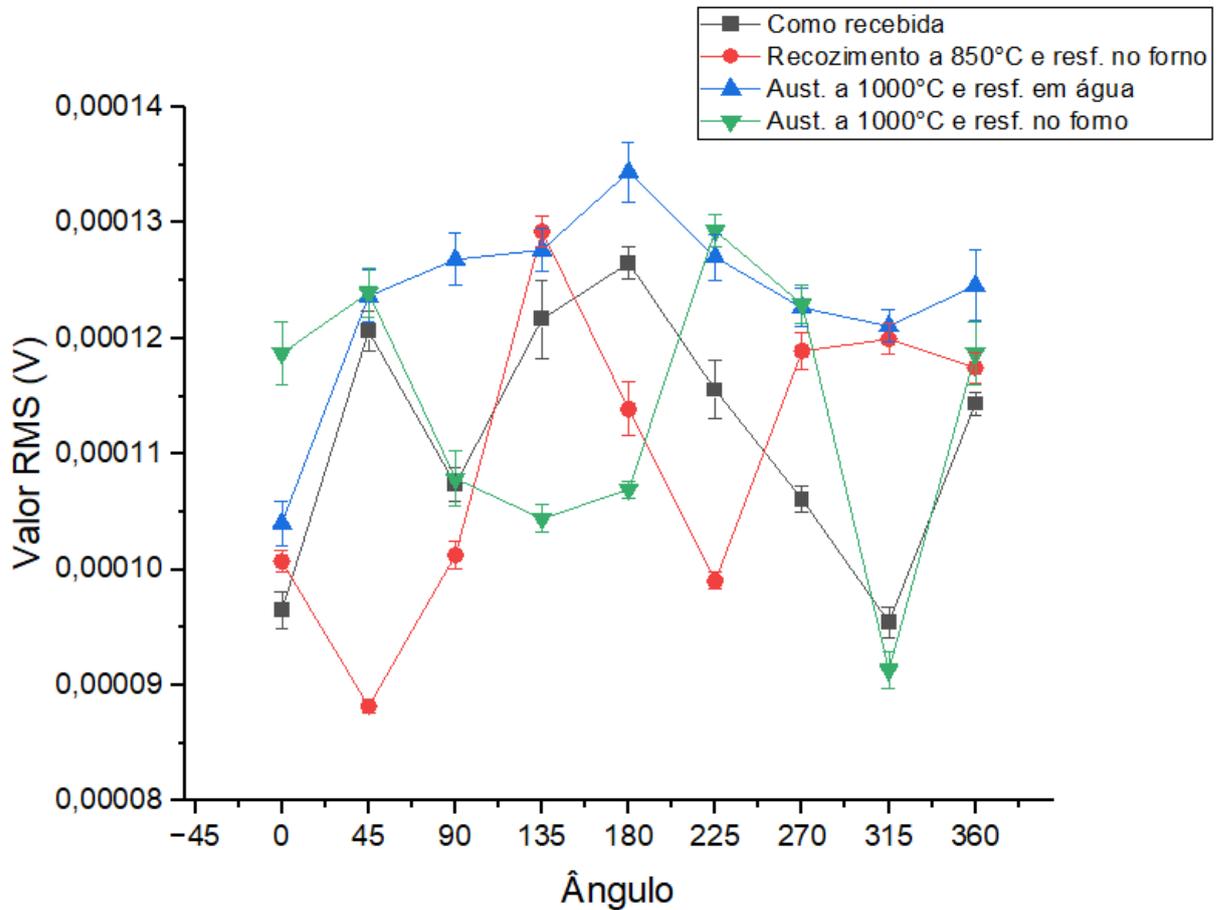
Observando a Figura 35, nota-se a variação do RMS em função do ângulo de rotação. Isto indica a presença de anisotropia magnética nas condições estudadas. Ao observar a condição “resfriada em água”, a qual apresenta a microestrutura mais fina e uniforme, percebe-se a direção de fácil magnetização coincidente com a direção de deformação do material. Resultado semelhante foi observado em estudo realizado

através de análise de permeabilidade magnética na região de reversibilidade magnética no mesmo aço estudado (LIMA, 2021).

Ao analisar a condição “como recebida” na Figura 35, tem-se a presença da mesma direção de fácil magnetização, em relação à condição “resfriada em água”, ou seja, o ângulo de 180° . A microestrutura da condição inicial, apesar de ser fina, deixa de ser homogênea devido à presença de dois constituintes, a ferrita e a perlita. A primeira é ferromagnética e a segunda, apesar de ser formada por duas fases ferromagnéticas, tem baixa permeabilidade devido a sua estrutura lamelar, que dificulta o movimento dos domínios magnéticos (SILVA, 2016). Esta redução na homogeneidade parece afetar as medidas quando se utiliza o fluxo magnético alternado. Ao aplicar fluxo contínuo, no entanto, o comportamento da condição “como recebida” apresenta o mesmo comportamento do material resfriado em água. Isso acontece porque o fluxo magnético contínuo, quando comparado ao fluxo magnético alternado, permite que as linhas de campo passem pela região de maior permeabilidade sem haver muita dispersão, aumentando assim a precisão (LIMA, 2021).

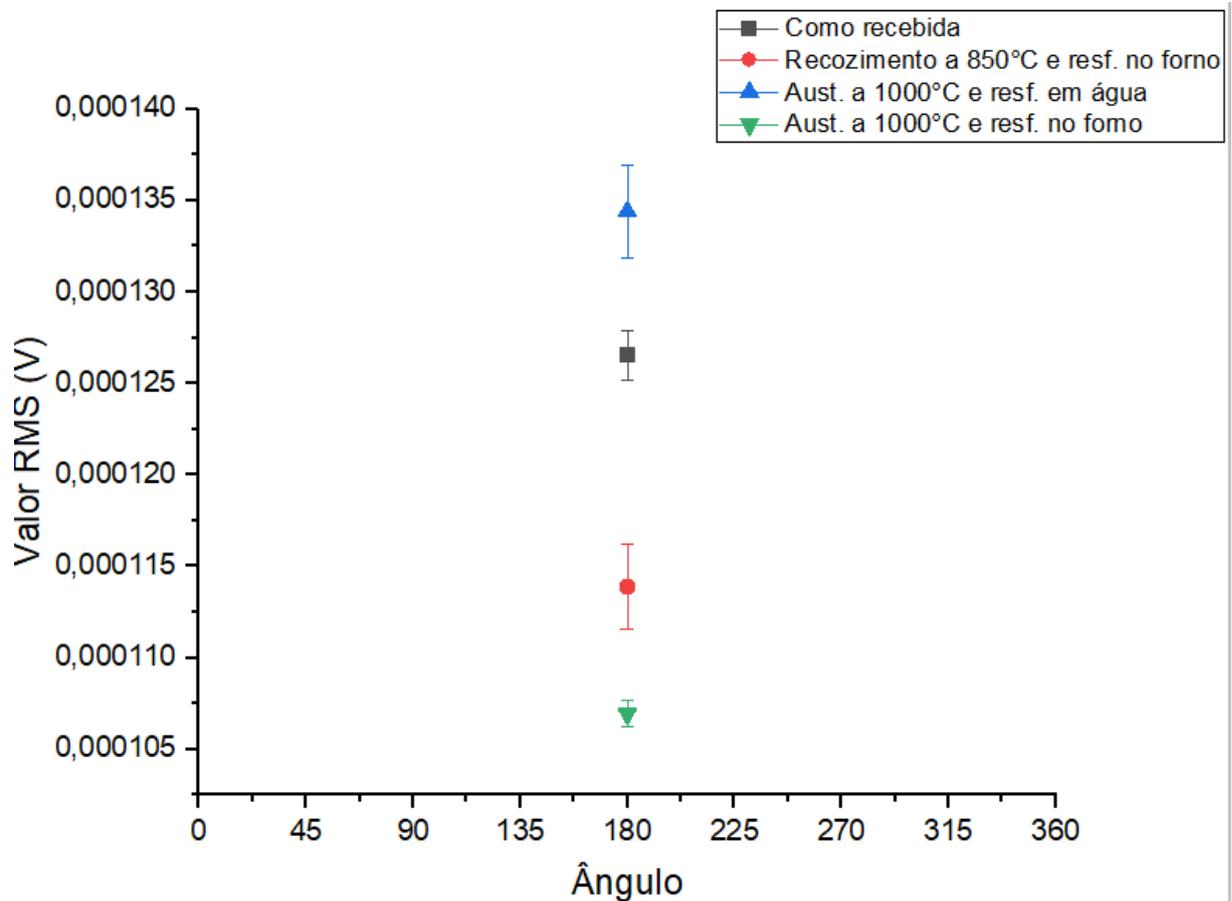
A Figura 35 mostra que as medidas do RMS para as amostras “recozida a 850°C ” e “austenitizada a 1000°C e resfriada no forno” apresentam direção de fácil magnetização para os ângulos de 135° e 225° , respectivamente. Mudanças na direção de fácil magnetização, em aços laminados, têm sido observadas na literatura em estudos realizados com aços 1040, através da análise de permeabilidade na região de fácil magnetização (SILVA *et al.*, 2016). Todavia, no presente trabalho, tem-se variação de RMS em função do ângulo de rotação, que dificulta uma melhor análise dessas duas condições. Isto indica que a utilização de fluxo alternado pode dificultar as medidas quando as microestruturas se tornam mais grosseiras nessas duas condições, pois microestruturas mais finas e uniformes são mais fáceis de serem estudadas.

Figura 35. Amplitudes RMS das amostras do aço SAE 4340 sob diferentes condições de resfriamento e rotacionadas a cada 45 graus.



A Figura 36 mostra a variação de RMS na direção de deformação do material, em função das condições estudadas. Nota-se uma redução dos valores de RMS à medida que os tratamentos resultam em microestruturas mais grosseiras e menos homogêneas. Estruturas mais homogêneas produzem menos barreiras para gerarem ruído magnético de Barkhausen. Este efeito tem sido observado em (TAVARES, 2019).

Figura 36. Amplitudes RMS das amostras em 180 graus do aço SAE 4340 sob diferentes condições de resfriamento.



Fonte: Do autor.

O presente trabalho fez um estudo da detecção de tratamentos térmicos em um aço SAE 4340 através da análise do ruído magnético de Barkhausen. Observou-se que as melhores condições são obtidas com a frequência de 5 Hz variando de 0,75 V até 9 V, sendo a melhor condição obtida com 5 V. Além disso, foi observado que é possível obter a direção de fácil magnetização para tratamentos que apresentem uma maior homogeneidade da microestrutura.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como finalidade estudar o comportamento do aço SAE 4340 submetido a diversas condições de tratamento térmico, utilizando o RMB para realizar tal análise. Um sinal eletromagnético é emitido através de uma bobina emissora, atravessando o material estudado, e realizando aquisição através de uma bobina receptora.

Após o estudo, foi possível identificar alguns aspectos:

- O ensaio eletromagnético baseado no RMB com bobina receptora posicionada no lado oposto da emissora foi capaz de detectar diferença entre os tratamentos térmicos estudados;
- A melhor condição de sinais, entre as estudadas, para o estudo do efeito de tratamento térmico em um aço SAE 4340, foi a utilização de onda senoidais com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V;
- As medidas de RMS para aplicação de ondas de 5 Hz mostrou maiores valores para a condição “resfriada em água”, que possui microestrutura mais fina, e com isso geram maiores valores de ruído magnético de Barkhausen;
- A aplicação de ondas com frequências de 15 Hz e 25 Hz aumentam a interação do movimento das paredes dos domínios com a microestrutura do material. A maior interação para essas frequências reduz a capacidade de diferenciar o efeito das microestruturas geradas nos tratamentos estudados;
- O ensaio eletromagnético utilizado foi capaz de detectar a anisotropia magnética devido ao efeito da aplicação dos tratamentos térmicos. Contudo, os melhores resultados foram obtidos com microestruturas mais finas e uniformes;
- Medidas realizadas na direção de deformação do material são capazes de diferenciar os diferentes tratamentos térmicos e apresentam maiores valores de RMS para microestruturas mais finas, e menores para as mais grosseiras, indicando o aumento do ruído magnético de Barkhausen para condição “resfriada em água”.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicação do ensaio para aços 1040 para verificar o efeito da adição de elementos de liga comparando com um aço carbono comum;
- Aplicar o ensaio eletromagnético para aços com diferentes quantidades de ferrita e perlita, para avaliar a contribuição de cada constituinte;
- Aplicar o ensaio em aços de grãos orientados utilizados em transformadores para analisar efeitos de anisotropia magnética;
- Realizar estudos com frequências inferiores a 5 Hz, de modo a verificar até que valores podem ser aplicadas frequências menores.

REFERÊNCIAS

ANAZAWA, R. M. *et al.* Caracterização microestrutural e mecânica dos aços 4340 e 300M após tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. *In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO*, 6., 2012, Atibaia. Disponível em: <https://docplayer.com.br/35619618-Caracterizacao-microestrutural-e-mecanica-dos-acos-4340-e-300m-apos-tratamentos-termicos-isotermicos-e-intercriticos.html>. Acesso em: 18 ago. 2022.

ANTÔNIO, P. P. C. *et al.* Ruído magnético de Barkhausen em aços alta resistência baixa liga, IF ao titânio e C-Mn levemente deformados plasticamente. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 7., 2013, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2013. Trabalho 0432/2013. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2013/PDFS/COBEF2013-0432.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2022.

ASTUDILLO, N. R. M. *et al.* Ruido magnético Barkhausen para el estudio de la anisotropía magnética en aceros inoxidables. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, 24, 2, mar. 2018. ISSN 1517-7076 artigo e-12118.

ASTUDILLO, N. R. M. *et al.* Study of martensite induced by deformation with Magnetic Barkhausen Noise technique. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 556, p. 169454, ago. 2022.

BLAŽEK, D. *et al.* Extraction of Barkhausen noise from the measured raw signal in high frequency regimes. **Measurement**, República Tcheca, v. 94, p. 456-463, dez. 2016.

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

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002. 589 p.

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

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

CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. ed. Estados Unidos: Wiley - IEEE Press, 2009. 544 p.

DENG, Y.; LI, Z.; CHEN, J. The effects of the structure characteristics on Magnetic Barkhausen noise in commercial steels. **J. Magn. Magn. Mater.**, China, v. 451, p. 276-282, abr. 2018.

DE SOUZA, M. F.; SERRÃO, L. F.; PARDAL, J. M. Tempering influence on residual stresses and mechanical properties of AISI 4340 steel. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, Niteroi, p. 1123-1134, nov. 2021.

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**, Arábia Saudita, v. 216, p. 188-198, 2014.

FERREIRA, A. G. P., *et al.* 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.

GHANEI, S. *et al.* Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by magnetic Barkhausen noise technique. **Materials Science & Engineering A**, Iran, v. 607, p. 253-260, 2014.

GRIJALBA, F. A. F.; PADOVESE, L. R. Non-destructive scanning for applied stress by the continuous magnetic Barkhausen noise method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. São Paulo, Brasil, v. 446, p. 231-238, jan. 2018.

KYPRIS, O.; NLEBEDIM, I. C.; JILES, D. C. Measuring stress variation with depth using Barkhausen signals. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 407, p. 377-395, jun. 2016.

LEWIS, N. J. *et al.* Development and application of measurement techniques for evaluating localised magnetic properties in electrical steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 452, p. 495-501, nov. 2017.

LIMA, A. F. P. **Detecção de tratamentos térmicos e anisotropia magnética em um aço SAE 4340 através de medidas de permeabilidade magnética**. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

LINS, R. S. A. T.; SILVA, E. M. Metodologia de um ensaio não destrutivo, baseado em medidas de tensão Hall, para determinação de descontinuidades em aços ao carbono. **Revista Principia**, João Pessoa, Paraíba, v. 26, p. 100-105, 2015.

NEBAIR, H. *et al.* Martensite morphology and volume fraction evaluation of dual-phase X70 steel using magnetic Barkhausen noise technique. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 555, p. 168397, ago. 2022.

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

MARTINEZ, A. G.; GURRUCHAGA, K.; ARIZTI, F. Use of magnetic techniques for characterization of the microstructure evolution during the annealing of low carbon steels. **ECNDT**, Espanha, 2006.

PAL'A, J.; BYDŽOVSKÝ, J. Comparison of classical and two-stage methods of Barkhausen noise measurement. **Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 29, 2014.

PEREZ-BENITEZ, J. A. *et al.* Analysis of the influence of some magnetizing parameters on magnetic Barkhausen noise using a microscopic model. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 347, p. 51-60, 2013.

CORREA R. S. *et al.* Characterization of residual stresses and microstructural by technique of magnetic Barkhausen noise of API 5L X80 steel heat treatment. **Materials Science Forum**, Suíça, v. 869, p. 556-561, 2016.

ROCHI, A. *et al.* Diferenças nas propriedades mecânicas das zonas termicamente afetadas (ZTA) em chapas de aço-carbono ASTM A36, soldadas com corrente contínua e com corrente pulsada. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 9., 2017, Joinville. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2017. DOI 10.26678/ABCM.COBEP2017.COF2017-0513. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319992752_Diferencas_nas_propriedades_mecanicas_das_zonas_termicamente_afetadas_ZTA_em_chapas_de_aço-carbono_ASTM_A36_soldadas_com_corrente_continua_e_com_corrente_pulsada. Acesso em: 20 set. 2022.

SALEEM, A. *et al.* Magnetic Barkhausen noise measurements to assess temper embrittlement in HY-80 steels. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 56, p. 1-8, mar. 2020.

SAMIMI, A. A.; KRAUSE, T. W.; CLAPHAM, L. Multi-parameter evaluation of magnetic Barkhausen noise in carbon steel. **Journal of Nondestructive Evaluation.**, v. 35, p. 40, jun. 2016.

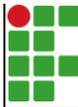
SANT'ANNA, P. C. **Influência de tratamentos térmicos intercríticos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço API 5L X65**. 2006. 168p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2006.

SERNA-GIRALDO, C. P.; PADOVESE, L. R. Monitoring of carbon steels welded joints by magnetic Barkhausen noise. **Ingeniare Revista Chilena de Ingeniería**, Arica, Chile, v. 23, n. 3, p. 413-420, set. 2015.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Tratamento Térmico de Aços**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, EPUSP, 2020. Disponível em:

<https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-santa-cecilia/engenharia-mecanica/tratamento-termico-de-acos/18219009>. Acesso em: 25 jun. 2020. Acesso em: 20 abr. 2023.

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

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

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Dissertação de Mestrado

Assunto:	Dissertação de Mestrado
Assinado por:	Louise Lima
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Louise Gomes de Lima, DISCENTE (20211630011) DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 16/01/2024 23:22:05.

Este documento foi armazenado no SUAP em 16/01/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1053645

Código de Autenticação: 45faecdef8

