



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS DE ALMEIDA CARDOSO ZAGO

**TÉCNICA DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA POR PARÂMETROS
MAGNÉTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO
MICROESTRUTURAL EM UM AÇO AISI 4140**

JOÃO PESSOA – PB

2019

LUCAS DE ALMEIDA CARDOSO ZAGO

**TÉCNICA DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA POR PARÂMETROS
MAGNÉTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO DA
MICROESTRUTURA EM UM AÇO 4140**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

JOÃO PESSOA – PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

218t Zago, Lucas de Almeida Cardoso.
Técnica de Análise não Destrutiva por Parâmetros
Magnéticos para Identificação da Variação
Microestrutural em um Aço AISI 4140 / Lucas de Almeida
Cardoso Zago. - João Pessoa, 2019.
62 f.

Orientação: Marcelo Rodrigues.
TCC (Especialização) - UFPB/de Tecnologia.

1. Ensaio Não Destrutivo (END); Aço SAE 4140. I.
Rodrigues, Marcelo. II. Título.

UFPB/BC

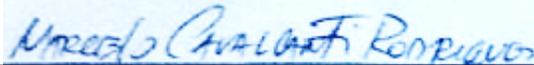
LUCAS DE ALMEIDA CARDOSO ZAGO

**TÉCNICA DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA POR PARÂMETROS
MAGNÉTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO
MICROESTRUTURA EM UM AÇO 4140**

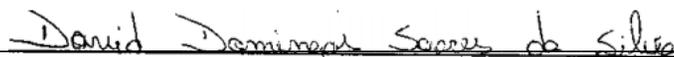
Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, tendo obtido a nota 10,0 (dez) conforme a apreciação da banca examinadora:

Aprovado em: 15 de Maio de 2019

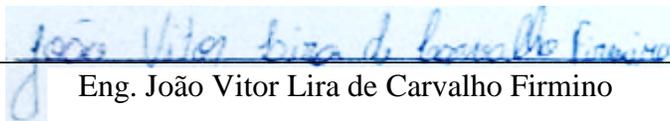
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues
Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB



Esp. David Domingos Soares da Silva



Eng. João Vitor Lira de Carvalho Firmino

Dedico este trabalho a minha mãe Carla por todo o amor e dedicação, a minha namorada Camila e meu irmão Matheus por todo o apoio e paciência, não só durante a elaboração deste trabalho, mas também durante toda a minha caminhada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo discernimento, paciência e coragem que me proporcionou para a realização deste trabalho diante de tantas dificuldades e obstáculos.

Ao Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues, por ter aceitado o convite em ser Orientador deste trabalho.

A minha Mãe Carla, Irmão Matheus e toda a família que sempre me apoiaram e me mantiveram são nos momentos de dificuldade.

A minha namorada Camila, que esteve sempre ao meu lado me apoiando, alegrando, e torcendo pelo meu sucesso.

Ao meu Pai Fernando, por todos os conselhos dados durante a minha jornada acadêmica.

A meus colegas de curso David Domingos, Hugo Pimentel, Ronald Silva, e Franklin Lacerda, que de alguma maneira me ajudaram e deram apoio para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Gabriel Camargo, Gabriella Bessa, e Inayara Bueno, que mesmo apesar do tempo e da distância estiveram sempre ao meu lado me apoiando.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho fosse realizado.

Somos o que repetidamente fazemos.
A excelência, portanto, não é
um feito, mas um hábito.
(Aristóteles)

RESUMO

Os Ensaios Não Destrutivos (END) correspondem a técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos, sem, no entanto, danificá-los, e podem ser executados nas fases de fabricação, construção, montagem e manutenção. Estes ensaios consistem em uma das principais ferramentas de controle de qualidade dos materiais e produtos. Têm aplicações nos setores petroquímico, químico, eletromecânico, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico, naval, entre outros. Neste contexto, com a finalidade de aperfeiçoar a velocidade e confiabilidade de análise amostrais de peças e equipamentos compostos pelo aço SAE 4140, que são fabricados em geral para aplicações em peças de máquinas demandam alta resistência mecânica, tais como bielas, virabrequins, juntas de direção, eixos, peças de bombas, tubulação de alta pressão, grandes engrenagens industriais, peças de máquinas-ferramenta, chaves e pregos, o presente trabalho propõe estudar as modificações microestruturais promovidas pelos tratamentos térmicos de têmpera e revenido por meio do uso de uma técnica de análise não destrutiva por parâmetros magnéticos. Ao final dos experimentos e de posse dos resultados foi possível concluir que a técnica utilizada conseguiu detectar as variações microestruturais ocasionadas pelos processos de tratamentos térmicos, possibilitando a comparação destes resultados com os resultados de dureza obtidos com o durômetro, e também a comparação do dispositivo utilizado com os convencionais.

Palavras-Chave: Ensaio Não Destrutivo (END); Aço SAE 4140; Tratamento Térmico; Parâmetros Magnéticos.

ABSTRACT

Non-destructive testing (NDT) corresponds to techniques used in the inspection of materials and equipment without, however, damaging them and can be used in the manufacturing, construction, assembly, and maintenance stages. These tests consist of one of the main tools of quality control of materials and products. They have applications in the petrochemical, chemical, electromechanical, aeronautical, aerospace, steel, naval, and other fields. In this context, in order to improve the speed and reliability of sample analysis of parts and equipment composed of SAE 4140 steel, which are generally fabricated for applications in high strength machine parts such as connecting rods, crankshafts, steering joints, axles, pump parts, high pressure piping, large industrial gears, machine tool parts, wrenches, and nails. This study proposes to analyze the microstructures modifications promoted by the thermal treatments of hardening and tempering by means of the use of a Non Destructive Test device through magnetic parameters. At the end of the experiments and in possession of all the results, it can be concluded that the used technique was able to detect the microstructural variations caused by the heat treatments operations, allowing the comparison between these results with the hardness results obtained with the durometer, and also the comparison between the used device with the conventional ones.

Keywords: Non-destructive testing (NDT). SAE 4140 steel. Heat Treatments. Magnetic Parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição Setorial do Consumo Aparente.....	19
Figura 2 – Curva TTT do Aço 1050.....	26
Figura 3 – Linhas de Fluxo Magnético Através de uma Área A.....	30
Figura 4 – Configuração dos dipolos atômicos de materiais diamagnéticos na presença (a) e na ausência (b) de um campo magnético indutor.....	32
Figura 5 – Configuração dos dipolos atômicos de materiais paramagnéticos na presença (a) e na ausência (b) de um campo magnético indutor.....	32
Figura 6 – Configuração dos dipolos atômicos de materiais ferromagnéticos na ausência de um campo magnético indutor.....	33
Figura 7 – Domínios magnéticos contíguos separados por uma interface.....	35
Figura 8 – Ciclo de Histerese esquemática para um material ferromagnético.....	36
Figura 9 – Valor RMSRMB x Campo de excitação.....	40
Figura 10 – Configuração experimental onde Hall observou pela primeira vez o aparecimento de uma voltagem transversal (VH) entre as bordas de um condutor retangular, submetido a um campo magnético (H).....	41
Figura 11 – Esquema de desvio das cargas provocado pela aplicação de um campo perpendicular ao fluxo magnético.....	41
Figura 12 – Forno convencional utilizado nos tratamentos térmicos.....	44
Figura 13 – Durômetro PANTEC RASNRS/RASNRB.....	45
Figura 14 – Microscópio Eletrônico Olympus BX41M – LED.....	46
Figura 15 – Eletroímã obtido a partir de placas de um transformador.....	47
Figura 16 – Ilustração de um sensor Hall.....	49
Figura 17 – Função de transferência típica de um sensor de saída analógica, modelo SS495A....	49
Figura 18 – Comportamento de dureza do Aço.....	51
Figura 19 – Microscopia óptica do acoo AISI 4140. (a) Amostra como recebida, (b) Amostra temperada, (c) Amostra revenida a 350 °C, (d) Amostra revenida a 450 °C. (M – Martensita; AR – Austenita Retida).....	52

Figura 20 – Curvas de tensão Hall e campo magnético residual das amostras nas diferentes condições de tratamento térmico.....53

Figura 21 – Correlação da curva de campo magnético com o comportamento de dureza nas diferentes condições de tratamento térmico.....54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de composição química do aço SAE 4140.....	22
Tabela 2 – Propriedades do aço 4140.....	23
Tabela 3 – Dureza média em HCR inspecionadas nas amostras do aço ABNT 5160 para duas temperaturas de austenitização (860 °C e 1000 °C + 860 °C) e diferentes temperaturas de revenido.....	28
Tabela 4 – Unidades das grandezas no Sistema Internacional (SI).....	30
Tabela 5 – Composição química do aço SAE 4140 utilizado no estudo.....	43
Tabela 6 – Processos pelos quais cada grupo de amostra foi submetido.....	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos

AISI – American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)

API – American Petroleum Institute (Instituto Americano de Petróleo)

ASTM – American Society for Testing and Materials (Associação Americana para Teste de Materiais)

CCC – Cúbico de Corpo Centrado

END – Ensaio não Destrutivo

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

LSR – Laboratório de Solidificação Rápida

MME – Ministério de Minas e Energia

SAE – Society of Automotive Engineers (Sociedade de Engenheiros Automotivos)

TCC – Tetragonal de Corpo Centrado

C – Carbono

Cr – Cromo

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

P – Fósforo

S – Enxofre

Si – Silício

pC – Porcentagem de Carbono

B – Indução Magnética

H – Campo Magnético

M – Magnetização

T_C – Temperatura de Curie

ϕ – Fluxo magnético

μ - Permeabilidade magnética

μ_i – Momento de dipolo magnético

χ – Susceptibilidade magnética

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 IMPORTÂNCIAS DO SETOR SIDERÚRGICO.....	18
2.2 AVALIAÇÃO DE QUALIDADE.....	19
2.3 AÇOS ESPECIAIS E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES.....	20
2.4 CARACTERÍSTICAS DO AÇO SAE 4140.....	22
2.5 INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	23
2.5.1 Têmpera	25
2.5.2 Revenido	27
2.6 FUNDAMENTOS DO MAGNETISMO.....	28
2.7 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	31
2.8 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS E FERRIMAGNÉTICOS.....	34
2.9 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	37
2.10 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR PARÂMETROS MAGNÉTICOS.....	38
2.11 CARACTERIZAÇÃO POR MEDIDAS DE TENSÃO HALL USANDO SENSORES DE EFEITO HALL.....	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 INFORMAÇÕES DO AÇO.....	43
3.2 CONFECCÃO DAS AMOSTRAS.....	43
3.3 EXECUÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	43
3.4 ENSAIOS DE DUREZA.....	44
3.5 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA.....	45
3.6 ENSAIO MAGNÉTICO.....	46
3.6.1 Sensor Utilizado e suas Características	48
3.6.2 Determinação do Campo Magnético	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51

4.1 DUREZA ROCKWELL C.....	51
4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	52
4.3 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA.....	53
CONCLUSÃO.....	55
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O aço SAE 4140 é um aço para beneficiamento com elevada temperabilidade, ligado ao cromo-níquel-molibdênio, utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. Ele Também possui elevada resistência à fadiga.

Este aço é aplicado em componentes para sistemas mecânicos, principalmente estruturais, onde se necessita uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções. Suas principais aplicações são; eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas e cilindros.

Tendo em vista que diversas peças produzidas com esse aço possuem aplicabilidades importantes, e que as análises amostrais de um lote, atualmente, não correspondem à análise de todos os componentes do mesmo, algumas das peças com defeitos de fabricação podem passar despercebidas, e provocar acidentes indesejáveis.

Levando em consideração suas futuras aplicações, o aço pode ser submetido a tratamentos térmicos para lhe sejam conferidas características pertinentes às funções a serem desempenhadas.

O tratamento térmico de têmpera consiste em aquecer o aço até uma temperatura acima da zona crítica (austenitização), mantê-lo nesta temperatura por certo tempo e em seguida resfria-lo bruscamente. A têmpera tem como objetivo geral endurecer e aumentar a resistência mecânica do aço para futuras aplicações, porém, estas não são as únicas propriedades alteradas devido a este processo, e essas alterações estão diretamente ligadas com a velocidade e o modo de resfriamento, que pode ser pelo uso do próprio ar, água, água com sal ou aditivos cáusticos, óleo ou soluções aquosas de polímeros, e de gases inertes, como nitrogênio, hélio e argônio.

Ao passar amostras submetidas ao tratamento térmico de tempera, e em seguida medir a sua dureza, notou-se uma semelhança comportamental com os resultados encontrados de campo magnético residual, encontrados com o uso do sensor Hall. O presente trabalho procura utilizar essa semelhança como base para provar que é possível correlacionar as variações microestruturais nesse material, com os resultados obtidos com a técnica de análise não destrutiva por parâmetros magnéticos, assegurando uma maior confiabilidade do produto.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudo do comportamento microestrutural do aço 4140, ao passar por tratamento térmico de têmpera e posterior análise pela comparação dos resultados encontrados com o sensor Hall e teste de dureza Rockwell C.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Submeter as amostras ao tratamento térmico de têmpera e revenido.
- b) Analisar os dados e resultados obtidos mediante microscopia óptica, teste de dureza e ensaios magnéticos (Sensor Hall).
- c) Estabelecer correlações dos resultados com a teoria encontrada em literaturas para validação da metodologia proposta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção serão abordados tópicos relacionados a aços e suas propriedades, tratamentos térmicos, fundamentos do magnetismo, e o uso de ensaios não destrutivos.

2.1 IMPORTÂNCIAS DO SETOR SIDERÚRGICO

A metalurgia, especificamente, estuda os processos de extração, fabricação, fundição e tratamento dos metais e suas ligas. Dentre alguns dos produtos de destaque no setor metalúrgico tem-se o: alumínio, cobre, estanho, níquel, zinco e aço (MME, 2011).

O setor siderúrgico é conhecido como o setor da metalurgia do aço, ou ainda trata-se do ramo da metalurgia que está voltado ao tratamento de aços e ferros fundidos. O Brasil apresenta um dos menores custos operacionais do mundo em relação a sua indústria siderúrgica, pois possuem a disponibilidade e proximidade de grandes jazidas de minério de ferro, como também reduzidos custos com força de trabalho e energia (MME, 2011).

O segmento metalúrgico está presente na cadeia de valor de outras várias empresas. Inclusive, este segmento pode servir como verdadeiro colchão amortecedor de impactos da crise, ao reduzir os efeitos negativos desta em grandes empresas. Portanto, o segmento siderúrgico tem sua importância para a estabilidade econômica, e desta forma para situações de incertezas e de refluxo das atividades econômicas (LEITE, 2014).

Além da presença direta nos bens duráveis, o aço é imprescindível na construção das máquinas e equipamentos que tornam possível à humanidade gozar dos benefícios e facilidades oferecidos pelos bens de consumo modernos. A siderurgia se tornou tão importante que passou a servir de medida de referência do desenvolvimento das nações. Desde então, são consideradas fortes as nações dotadas de elevadas capacidades de produzir e/ou comercializar produtos siderúrgicos e seus insumos (MACHADO, 2006).

O aço, apesar da concorrência com outros materiais como plásticos, alumínio, outros metais, madeira e outros, permanece um material competitivo e dominante em muitas aplicações como, por exemplo: indústrias de base, tais como transportes, construção civil, construção naval, aviação, máquinas e equipamentos, mineração e indústrias ligadas à produção e transporte de energia, as quais dependem fortemente das propriedades características do aço; bens de consumo

duráveis, como automóveis e eletrodomésticos, objetos do uso cotidiano nas residências e escritórios. (EPE, 2009).

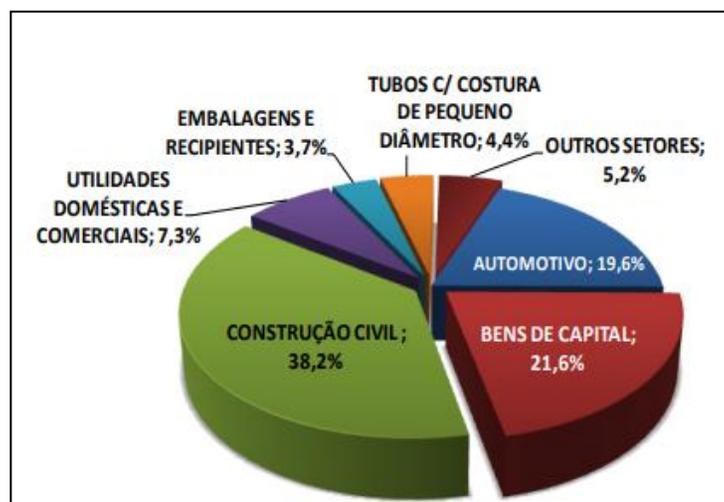


Figura 1: Distribuição Setorial do Consumo Aparente
Fonte: AÇO BRASIL (2019).

O setor siderúrgico tem uma grande importância no setor econômico brasileiro, no ano de 2017, o Brasil produziu 34,4 toneladas de aço bruto, exportou para mais de 100 países diferentes, alcançando a posição de 5º maior exportador líquido de aço e atingindo um saldo comercial de 5,8 bilhões de dólares. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019).

Em escala mundial, a indústria siderúrgica também representa uma importância expressiva em diversos países. De acordo com Worldsteel Association (2017), a produção mundial de aço bruto chegou a 1,62 bilhão de toneladas em 2015, com forte concentração da produção na Ásia, continente responsável por 68,6% da produção mundial naquele ano.

2.2 AVALIAÇÃO DE QUALIDADE

O conceito de avaliação da qualidade segundo a norma brasileira NBR ISO 9000, norma que regulamenta os fundamentos e o vocabulário do Sistema de Gestão da Qualidade, corresponde a “exame sistemático para determinar até que ponto uma entidade é capaz de atender os requisitos especificados”. Este conceito é abrangente, de forma a compreender a capacidade de um produto, de um processo, de uma pessoa, sistema, organização ou combinação destes, de atender os requisitos especificados.

Woodall e Montgomery (1999) afirmam que a qualidade é inversamente proporcional a variabilidade do processo, logo, a sua melhoria é dada através da redução da variabilidade de processos produtos. Seu controle é realizado então por meio de um conjunto de atividades planejadas e sistematizadas que objetivam avaliar o desempenho de processos e a conformidade de produtos e serviços com especificações e prover ações corretivas necessárias.

O ensaio de dureza é empregado amplamente em pesquisa e avaliação de materiais para controle de qualidade por ser um método menos oneroso e relativamente mais rápido para quantificação de propriedades mecânicas de materiais (LETA et al. 2004).

Entretanto, os resultados do ensaio estão sujeitos a incertezas de alguns parâmetros como: a força aplicada, as dimensões e geometria do penetrador, o tempo de aplicação de carga e a habilidade do operador. (PODCHIBIAKIN, D. et al, 2003).

O comportamento mecânico de cada material pode interferir na seleção de carga e tempo de endentação nos testes de microdureza (POWERS; SAKAGUCHI, 2006).

Craig e Powers (2004) acrescentam ainda que a seleção de parâmetros incorretos para cada material pode alterar as propriedades mecânicas durante o teste e levar a resultados que não correspondem com a realidade.

2.3 AÇOS ESPECIAIS E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES

De maneira geral, o aço pode ser definido como uma liga metálica composta principalmente de ferro e de pequenas quantidades de carbono, normalmente entre 0,008% a 2,14% pC. Os ferros fundidos também são ligas ferro-carbono, que, no entanto diferem-se dos aços por terem em sua estrutura uma maior quantidade de carbono, que compreende entre 2,14 e 6,7% pC. Além disso, os aços são agrupados em função de seu teor de carbono, como aços de alto, médio e baixo carbono, e ainda temos outras designações como aços-liga, aços-ferramentas e diversos aços especiais que vêm sendo desenvolvidos para as mais diversas aplicações. (CALLISTER, 2008).

De acordo Chiaverini (2012) Aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor, os aços comerciais não são ligas binárias: de fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação.

A microestrutura dos aços consiste em um arranjo espacial de agregados cristalinos de diferentes fases. O tamanho, a forma, a distribuição, a composição e a estrutura cristalina dessas fases controlam essencialmente as propriedades finais de qualquer aço, incluindo dureza, resistência, ductibilidade, resistência ao impacto e resistência à deformação (TOTTEN, 2006).

Eles constituem um grupo dos mais importantes materiais utilizados na indústria e engenharia. As propriedades mecânicas do aço-carbono sem adição de elementos secundários e na maioria das vezes sem algum tipo de tratamento é suficiente para atender a maioria das aplicações. Além de ter baixo custo no mercado (KINA, 2011).

Como o ferro apresenta alotropia, uma infinidade de ligas, com características e comportamentos completamente diferenciados, podem ser obtidas em função dos tratamentos térmicos e dos efeitos provocados pela adição de quantidades diferenciadas e por novos elementos de liga (SILVA, 2006).

Os aços liga contêm vários elementos adicionados em pequenas quantidades para melhorar a resistência do material, sua capacidade de ser endurecido, resistência à temperatura, resistência à corrosão e outras propriedades. O cromo pode ser adicionado para melhorar resistência, ductibilidade, tenacidade, resistência ao desgaste e capacidade de ser endurecido. O molibdênio, utilizado em combinação com o cromo, acrescenta dureza, reduz fragilidade e aumenta a tenacidade. Muitos outros elementos de liga podem ser adicionados em combinações variadas para alcançar propriedades específicas (NORTON, 2013).

Os aços da família SAE/AISI 41XX são usados em aplicações de engenharia na condição “temperado e revenido” ou “normalizado, temperado e revenido”, este último quando é necessário assegurar elevados níveis de tenacidade. Os aços baixa liga dessa família, especialmente o 4130 e o 4140, estão entre os aços mais usados na indústria do petróleo em aplicações de alta resistência. Esses aços se apresentam em destaque do ponto de vista de utilização porque são facilmente tratados termicamente para os níveis de resistência requeridos pelos códigos API (American Petroleum Institute), são relativamente baratos e bastante disponíveis no mercado. (DUFOUR, 2002).

Dentre os aços da família 41XX, os aços AISI 4140 apresentam teores mais elevados de carbono e manganês, o que aumenta bastante sua temperabilidade dificultando as operações de conformação e soldagem (Lima, 2006). Entretanto, a adição de Cr e Mo nessas ligas melhoram a capacidade dessas serem tratadas termicamente (CALLISTER, 2008).

2.4 CARACTERÍSTICAS DO AÇO AISI 4140

Estes aços SAE 4140 são ligados ao Cromo (~1%) e ao Molibdênio (~0,2%). São comumente usados na condição temperada e revenida e atingem alta resistência mecânica à temperatura ambiente variando de 590 a 940 MPa. São amplamente utilizados na indústria em componentes pressurizados, os quais requerem tensão limite de escoamento entre 410 MPa e 965 MPa (LIMA, 2006).

De acordo com Chiaverini (2012) este aço é conhecido como aço cromo-molibdênio, e é classificado como aço ligado para beneficiamento. Seus principais elementos são:

- I) Carbono – É o principal elemento de liga no aço. Pode-se dizer que a principal propriedade conferida ao aço pelo carbono é a dureza;
- II) Cromo – O cromo favorece a formação de carbonetos em um aço. Assim, aumenta a dureza e a resistência à tração do aço em média (8 a 10 kgf/mm²) para a adição de 1% de Cr, mas diminui a resistência ao impacto;
- III) Molibdênio – É elemento formador de carbonetos. Aumenta a resistência a quente e, em presença do níquel e do cromo, aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento. Dificulta o forjamento, melhora a temperabilidade, a resistência à fadiga e propriedades magnéticas. Exerce notável influência nas propriedades da solda. Em aços rápidos, aumenta a tenacidade, mantendo as propriedades de dureza a quente e retenção de corte. Nos aços rápidos substitui o tungstênio para a formação de carbonetos, na proporção de 1% de molibdênio para 2% de tungstênio.

As tabelas 1 e 2 apresentam as faixas de composição química e propriedades mecânicas do SAE 4140, respectivamente.

<i>Elemento</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
<i>% Massa</i>	0,38 – 0,43	0,75 – 1,00	0,035	0,04	0,15 – 0,35	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25

Tabela 1 – Faixa de composição química do aço SAE 4140.

Fonte: ASM HANDBOOK, 2002.

<i>Propriedades (Temperatura ambiente)</i>		Tratamento Térmico
Densidade ($10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$)	7,7 – 8,03	-
Coefficiente de Poisson	0,27 – 0,3	-
Módulo de Young (GPa)	190 – 210	-
Resistência à tensão (MPa)	1020,4	Normalizado a 870 °C
Tensão de escoamento (MPa)	655	Normalizado a 870 °C
Alongamento (%)	17,7	Normalizado a 870 °C
Redução de Área (%)	46,8	Normalizado a 870 °C
Dureza (HB)	197	Temperado a 815 °C
Resistência a Impacto (J)	54,5	Temperado a 815 °C

Tabela 2 - Propriedades do aço 4140.

Fonte: ASM HANDBOOK, 2002.

O mesmo possui uma temperabilidade média, e é bastante utilizado na fabricação de peças para a indústria de petróleo, automotiva, siderúrgica e de bens de capital, onde se deseja uma boa combinação de resistência mecânica e resistência à fratura (DUFOUR, 2002).

O aço SAE 4140 é utilizado em aplicações que requeiram uma combinação de dureza moderada e uma boa resistência e tenacidade, mas em que as condições de serviço sejam moderadamente severas. Ele pode ser encontrado nos formatos de barra, vergalhão, peças forjadas, chapas, placas, tiras e peças fundidas. É usado para muitas peças de máquinas de alta resistência (algumas delas nitretadas), tais como bielas, virabrequins, juntas de direção, eixos, peças de bombas, tubulação de alta pressão, grandes engrenagens industriais, flanges, peças de máquinas-ferramenta, chaves e pregos. (ASM HANDBOOK, 2002).

2.5 INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Com o passar dos anos, a então era do aço chegou e bons resultados foram obtidos com seu uso: estruturas mais leves, mais possibilidades de ligas, aumentando assim a versatilidade do material. Através do bom uso do aço, o tratamento térmico é realizado com o objetivo de aperfeiçoar as características físicas e mecânicas do material para tal finalidade (RÍOS, AMARAL E SOUZA, 2016).

Os requisitos referentes à aplicação de determinado material impõem condições quanto às suas propriedades mecânicas, físicas e tecnológicas. Estas propriedades podem ser determinadas no projeto da liga, trabalhando com a sua composição química, ou podem ser obtidas adequando-se materiais existentes, através de processos como tratamentos térmicos e deformação plástica (FREITAS, 2010).

De acordo com Chiaverini (2012), tratamento térmico corresponde a um ciclo de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidades de aquecimento e resfriamento com o objetivo de atribuir determinadas características e provocando modificações em suas microestruturas sem que haja mudanças na forma do produto.

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos de acordo com Callister (2008) são os seguintes:

- a) Remoção de tensões residuais decorrentes de processos mecânicos de conformação ou térmicos;
- b) Refino da microestrutura;
- c) Aumento ou diminuição da dureza;
- d) Aumento da resistência mecânica;
- e) Melhoria da ductilidade;
- f) Melhoria da usinabilidade;
- g) Melhoria da resistência ao desgaste;
- h) Melhoria da resistência à corrosão;
- i) Melhoria da resistência à fluência;
- j) Modificação de propriedades elétricas e magnéticas;
- k) Remoção de gases após operações de recobrimento por meio de processos galvânicos

Segundo Vlack (1994), as alterações observadas em um material, ocasionadas por um tratamento térmico, estão associadas a fenômenos microestruturais, tais como: recuperação, recristalização, transformações de fase, formação de precipitados, controle ou refino de grão, entre outros. Portanto, existe uma grande diversidade de microestruturas que podem ser produzidas através de tratamentos térmicos, em virtude de sua relação com as propriedades,

permitindo a escolha de determinadas combinações, como garantia do desempenho do material em uma determinada aplicação.

Os tratamentos térmicos englobam uma ampla faixa de temperatura de aquecimento e arrefecimento, além de diversas taxas de resfriamento. Os mais frequentemente utilizados no meio industrial são a normalização, o recozimento, a têmpera e o revenimento (SILVA e MEI, 2010).

Para a realização destes tratamentos deve-se ter conhecimento dos diagramas de equilíbrio das ligas metálicas, além da influência da velocidade de resfriamento sobre as transformações estruturais (CHIAVERINI, 2012).

Ainda conforme Chiaverini, os tratamentos térmicos mais comumente aplicados aos aços são os de têmpera e de revenimento. Nestes procedimentos, as alterações estruturais dentro da microestrutura contribuem para a melhoria das propriedades mecânicas. A têmpera e o revenido são operações de tratamento térmicos aplicados principalmente nas ligas ferrosas e têm por objetivo produzir uma estrutura que permite ao material submetido a essas operações adquirir dureza e resistência mecânica compatíveis com as condições de sua utilização

Para realizar um tratamento térmico devem-se levar em conta alguns fatores de grande influência no resultado final. Considerando o tratamento térmico um ciclo de tempo/temperatura, leva-se em consideração o aquecimento, o tempo de permanência à temperatura, o meio e velocidade de resfriamento e a atmosfera do recinto de aquecimento (COLPAERT, 2008).

2.5.1 Têmpera

De acordo com Chiaverini (2012), a têmpera é o mais importante dos tratamentos térmicos para área da construção mecânica. As amostras são aquecidas em uma temperatura já pré-determinada e o resfriamento é muito rápido e são feitos geralmente em meios líquidos, onde as peças são mergulhadas depois de aquecidas. Todos esses processos culminam em modificações estruturais intensas que resultam em um grande aumento da dureza, da resistência ao desgaste, e da resistência a tração.

Para Colpaert (2008), o processo de têmpera consiste em aquecer o aço até a temperatura adequada para se obter uma microestrutura austenítica, manter a peça neste patamar de temperatura por um determinado tempo e em seguida resfriar esta em um meio que proporcione

uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas, obtendo então a estrutura metaestável martensítica.

Segundo Porter *et al* (2009), a têmpera em aços é um tratamento térmico no qual o principal processo é a formação de uma microestrutura de não equilíbrio durante a aceleração do resfriamento, com transição da fase austenítica, estável em alta temperatura, em martensita. Esta transformação ocorre sob um resfriamento rápido do aço desde uma temperatura acima de A_1 (temperatura eutetóide), como mostra a figura 2, e com isso evita-se a decomposição por difusão da austenita em uma microestrutura de duas fases, cementita e ferrita, a qual se diferencia bastante da austenita inicial pela composição química.

Este tratamento térmico é de grande importância, porque é por intermédio dele, acompanhado pelo revenido, que se obtém as estruturas e as propriedades que permitem o emprego do aço em peças que necessitam de maior dureza (CHIAVERINI, 2012).

A formação da martensita está diretamente relacionada a: Temperatura inicial de transformação da martensita (M_s), onde “s” significa start, e a temperatura que finaliza a formação da martensita (M_f), onde “f” significa finish (figura 2). O carbono é o elemento de liga que tem a maior influência sobre a temperatura M_s , que é a principal responsável pela morfologia da martensita nos aços (KRAUSS, 2005).

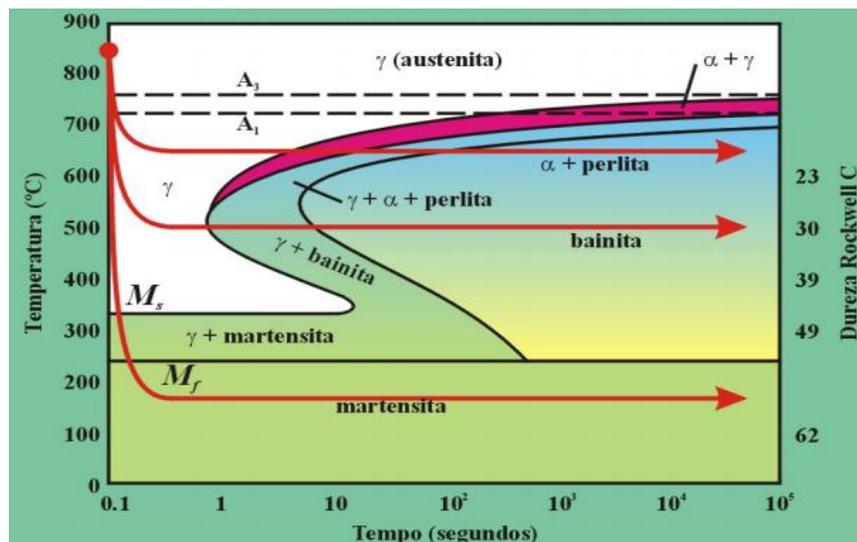


Figura 2: Curva TTT do aço 1050.
Fonte: ASKELAND E WRIGHT (2002).

A microestrutura formada depende da velocidade de resfriamento a qual o aço for submetido, a partir da temperatura de austenitização. Para que a martensita se forme a curva de resfriamento deve pelo menos tangenciar o cotovelo do diagrama TTT, de modo a evitar que a austenita se transforme nos produtos de transformação macios, tais como a ferrita e perlita. A taxa com que a peça é resfriada depende do meio à qual é resfriado, estes podem ser: água, salmoura, óleo contendo uma variedade de aditivos, solução aquosa de polímeros, ou ar (CHIAVERINI, 2012).

Os principais parâmetros da têmpera, como também de todos os outros tratamentos térmicos, são a temperatura de aquecimento, o tempo de exposição e a velocidade de resfriamento. A temperatura de aquecimento e o tempo de exposição determinam a ocorrência ou não das modificações de fases necessárias, enquanto a velocidade de resfriamento, inversamente, deve garantir que sejam evitadas tais transformações, bem como a formação de uma estrutura metaestável, fase martensítica para o aço (NOVIKOV, 1994).

2.5.2 Revenido

De acordo com Chiaverini (2012), o revenimento é aplicado nos aços já temperados, logo após a têmpera, são aquecidos novamente desta vez em temperaturas inferiores à da zona crítica, resultando em modificação estrutural obtida na têmpera. O revenimento melhora a ductibilidade, reduzindo os valores de dureza e resistência a tração, ao mesmo tempo em que as tensões internas são aliviadas ou eliminadas.

Segundo Monteiro (2013) revenimento é o Tratamento Térmico efetuado sobre um produto temperado, com a finalidade de obter modificações que lhe confirmam as características de emprego desejadas.

A martensita produzida pela têmpera é muito frágil para uso comercial, sendo esta microestrutura caracterizada pelas altas tensões residuais internas. O revenido faz o reaquecimento desse material, permitindo que o reticulado instável TCC se transforme no CCC estável diminuindo essas tensões e produzindo uma estrutura nova chamada martensita revenida (DIAS, 2010).

Quanto maior a temperatura e o tempo de revenido, menor será a dureza e a resistência, e maior a ductibilidade e tenacidade. (Marder, 1984). Esta afirmativa é ilustrada na tabela 3.

Temperatura de Revenido (°C).	Dureza (HCR) com Temperatura de austenitização 860 °C.	Dureza (HCR) com Temperatura de austenitização 1000 °C + 860 °C.
420	48	45
460	46	44
500	44	41
540	41	37
580	35	35
620	32	32

Tabela 3: Dureza média em HCR inspecionadas nas amostras do aço ABNT 5160 para duas temperaturas de austenitização (860 °C e 1000 °C + 860 °C) e diferentes temperaturas de revenido.

Fonte: VATAVUK ET AL; 2000.

Os microconstituintes da martensita revenida são: martensita, austenita retida e carbonetos. A microestrutura da martensita revenida consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente dispersas, cerradas no interior de uma matriz contínua de ferrita (KRAUSS, 1999).

2.6 FUNDAMENTOS DO MAGNETISMO

De acordo com Rodrigues (2013), o comportamento magnético dos materiais em um campo externo é determinado por seus momentos de dipolo magnéticos (μ_i) e pela interação entre eles. A origem dos momentos magnéticos está relacionada com o momento angular dos elétrons que, por sua vez, é gerado pelo movimento orbital do elétron em torno do núcleo atômico e o spin.

Para Cullity *et al.* (2009), a grandeza que representa o estado magnético de um dado material é o vetor magnetização M , que é definido como sendo o momento de dipolo magnético por unidade de volume como mostra a equação 1, correspondendo ao somatório de todos os pontos i nos quais existe dipolos magnéticos μ_i , no interior de um volume v . Este parâmetro volumétrico é considerado suficientemente grande para que se tenha uma boa média macroscópica, no entanto pequeno, quando comparado ao tamanho da amostra para que o vetor M seja representativo da propriedade magnética local.

$$M = \frac{1}{v} \sum \mu i \quad (1)$$

Em certos materiais magnéticos, observa-se empiricamente que a magnetização é proporcional ao campo aplicado, como mostra a equação 2.

$$M = \chi H \quad (2)$$

Sendo χ a susceptibilidade magnética, característica de cada material, e H o campo magnético externo aplicado. A susceptibilidade é simplesmente uma medida quantitativa da resposta de um material a um campo magnético aplicado, e assim, a partir do comportamento da susceptibilidade, inferimos como um sistema reage a um campo magnético aplicado. (COUTRIM, 2015).

A indução magnética (ou campo induzido), indicado por B , representa a magnitude do campo de uma substância sujeita à ação do campo H . O campo induzido e o campo magnético se relacionam de acordo com a equação 3.

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

O parâmetro μ é chamado de permeabilidade magnética, e é uma propriedade específica do meio. A indução magnética, B em um material é proveniente do campo aplicado e da magnetização (AMORIM, 2015), resultando na equação 4.

$$B = \mu.H + \mu.M \text{ ou } B = \mu.(1 + \chi).H \quad (4)$$

Na tabela 4 a seguir, são mostradas as grandezas e suas unidades no sistema internacional (SI).

Grandeza	Símbolo	SI
<i>Indução Magnética</i>	B	Tesla (T) = Wb.m ⁻²
<i>Intensidade do Campo Magnético</i>	H	A.m ⁻¹
<i>Magnetização</i>	M	A.m ⁻¹
<i>Permeabilidade</i>	μ	N.A ⁻²
<i>Susceptibilidade</i>	X	Adimensional

Tabela 4: Unidades das grandezas no Sistema Internacional (SI).
Fonte: REZENDE, 2004.

Para B uniforme e numa superfície plana o fluxo magnético total φ perpendicular à superfície pode ser escrito de acordo com a equação 5:

$$\varphi = BA \quad (5)$$

Onde φ corresponde ao fluxo magnético total [Wb], e A é a área da seção transversal às linhas de fluxo [m²].

Quando as linhas de indução magnéticas não são perpendiculares a área A , como mostra a figura 2, a equação 6 fica:

$$\varphi = B.A.\cos(\alpha) \quad (6)$$

Onde α é o ângulo entre a perpendicular à área A e a direção de B (BACK, 2018).

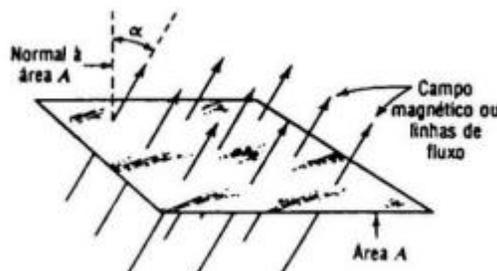


Figura 3: Linhas de fluxo magnético através e uma área A.
Fonte: CULLITY, 2009.

Segundo Bastos (1992), a permeabilidade μ de um meio, expressa intrinsecamente sua capacidade de se mostrar mais ou menos suscetível à passagem de fluxo magnético.

Os materiais podem apresentar uma maior ou menor resistência a indução magnética. A permeabilidade magnética (μ) representa a facilidade de passagem de um fluxo magnético através de um determinado material. Essa permeabilidade é maior em materiais ferromagnéticos (NASCIMENTO, 2011).

2.7 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS

De acordo com Cullity *et al* (2009), Todas as substâncias sejam elas: sólidas, líquidas ou gasosas, mostram alguma característica magnética, em todas as temperaturas. Portanto, o magnetismo é uma propriedade básica de qualquer material, cuja natureza é de origem elétrica.

Por definição, materiais magnéticos são aqueles que podem ser magnetizados com a aplicação de um campo magnético. Quando um material magnético é exposto a um campo magnético externamente aplicado de intensidade H, este se magnetiza e gera ao seu redor um campo magnético muito maior em relação ao campo anteriormente aplicado, no caso de materiais ferromagnéticos. (CULLITY, 1972).

As propriedades magnéticas de um material são determinadas pelas interações que ocorrem entre um campo magnético externo e os momentos de dipolo magnético dos átomos constituintes. O momento líquido de um átomo é resultante da soma das contribuições dos momentos magnéticos de cada um dos elétrons, incluindo o cancelamento dos momentos de spin e orbital dos pares eletrônicos (CAHN, HAASEN E KRAMER, 1994).

Os materiais, em sua grande maioria, possuem magnetismo reduzido e, somente quando estão na presença de um campo magnético externo se pode classificá-los quanto aos tipos de interação e alinhamento entre os seus momentos de dipolo magnéticos. De acordo com a resposta que apresentam diante da aplicação de um campo magnético externo, os materiais são classificados em cinco tipos principais: Diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos (CULLITY, 1972; JILES, 1991; JAKUBOVICS, 1994).

De acordo com Callister (2008), o diamagnetismo é um efeito magnético apresentado por materiais (ex. água, vidro, plástico, compostos orgânicos) que não possuem dipolos magnéticos permanentes individuais em seus átomos (figura 2a). Ele é a forma mais fraca de magnetismo

induzido em um material, caracterizado por uma pequena magnitude do momento magnético induzido, e em sentido oposto ao campo aplicado.

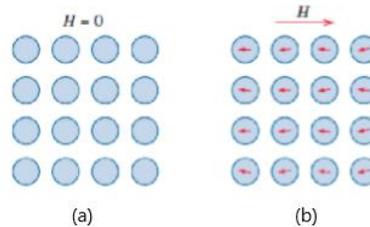


Figura 4: Configuração dos dipolos atômicos de materiais diamagnéticos (a) na ausência e (b) na presença de um campo magnético indutor.

Fonte: CALLISTER, 2008.

O diamagnetismo é uma propriedade presente em todo tipo de material; porém, devido a sua baixa magnitude, este pode ser facilmente sobreposto por outro efeito magnético, como pelo paramagnetismo, por exemplo (EVANS e HELLER, 2003).

Já os materiais paramagnéticos são caracterizados por não demonstrarem magnetização espontânea. Os dipolos magnéticos individuais possuem orientações aleatórias (figura 3a), tendo como resultado um momento magnético total nulo. No entanto, estes dipolos são facilmente afetados pela temperatura e a ação de campos magnéticos externos (CULLITY et al., 2009).

De acordo com Martins (2008), as substâncias paramagnéticas exibem um momento magnético resultante não nulo devido à existência de um número ímpar de elétrons nos seus átomos constituintes. São os elétrons não emparelhados que dão origem ao paramagnetismo. A existência de momentos atômicos mesmo na ausência de um campo magnético indutor é o fator que diferencia o paramagnetismo do diamagnetismo.

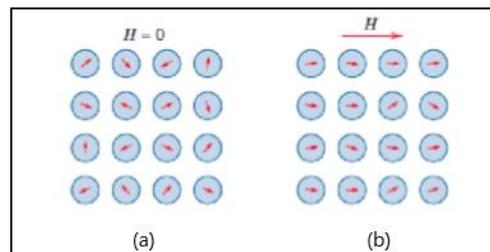


Figura 5: Configuração dos dipolos atômicos de materiais paramagnéticos (a) na ausência e (b) na presença de um campo magnético indutor.

Fonte: CALLISTER, 2008.

Segundo Hayt e Buck (2013) alguns exemplos de substâncias paramagnéticas são o potássio, o oxigênio, elementos raros e alguns de seus sais, como cloreto de érbio, óxido de ítrio.

As substâncias ferromagnéticas são caracterizadas por possuírem magnetização espontânea, em virtude de seus dipolos magnéticos disporem da mesma orientação originada pelo acoplamento spin-órbita dos elétrons desemparelhados, que os fazem se alinharem entre si, mesmo na ausência de um campo externo (CHINNASAMY, 2003). A figura 6 mostra como se comportam os dipolos magnéticos dos materiais ferromagnéticos depois de passarem por um processo de magnetização e posterior retirada deste campo magnético indutor H .

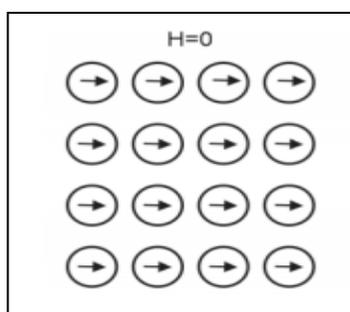


Figura 6: Configuração dos dipolos atômicos de materiais ferromagnéticos na ausência de um campo magnético indutor.

Fonte: CALLISTER, 2008.

Os materiais ferromagnéticos apresentam alta magnetização à temperatura ambiente, quando submetidos a um campo magnético externo. Assim como os materiais paramagnéticos, os ferromagnéticos apresentam momentos de dipolo magnético resultantes não nulos e muito superiores à unidade (ARAÚJO, 2009).

Se a temperatura de um material ferromagnético exceder uma temperatura crítica, denominada de temperatura de Curie (T_C), a agitação térmica quebra o alinhamento dos momentos de dipolo magnético dos átomos, tornando assim o material paramagnético (HALLIDAY, 2016).

Pierre de Curie (1859 – 1906) descobriu que a magnetização espontânea desaparece a partir de uma temperatura crítica. Que corresponde a temperatura na qual um material ferromagnético ou ferrimagnético perde a sua magnetização. A esta se deu o nome de temperatura de Curie, T_C (CULLITY et al., 2009).

De acordo com Spaldin (2010), os materiais ferrimagnéticos são aqueles que possuem íons distintos que se orientam de forma antiparalela e desigual e, como os íons têm momentos magnéticos diferentes, a magnetização não é nula.

Os materiais ferrimagnéticos dependem da temperatura de Curie, na qual abaixo de T_C apresentam magnetização espontânea e acima T_C o material comporta-se como paramagnético (BUSCHOW e DE BOER 2003).

Nos materiais antiferromagnéticos, a interação de troca entre os átomos vizinhos força os momentos magnéticos a assumirem orientações antiparalelas e, conseqüentemente, geram uma magnetização resultante muito pequena e/ou até nula (BUSCHOW, et al., 2003).

2.8 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS E FERRIMAGNÉTICOS

Materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos podem existir, tanto no estado magnetizado quanto desmagnetizado, e isto se deve a orientação (alinhamento) dos momentos magnéticos atômicos ou moleculares no material (FARIA e LIMA, 2005).

Como a magnetização tem origem na estrutura eletrônica dos materiais, é correto afirmar que existem interações com a estrutura cristalina. A energia que está associada à direção no processo de magnetização recebe o nome de anisotropia. O somatório destas energias é definido como energia de anisotropia total K (SMIT E WIJN, 1959).

Para Amorim (2015), a anisotropia magnética é o fenômeno que implica na orientação preferencial da magnetização espontânea ao longo de certas direções características, para cada material (ferromagnético ou ferrimagnético). A anisotropia magnética pode estar relacionada com os eixos cristalográficos da amostra (anisotropia magnetocristalina), com a sua forma geométrica (anisotropia de forma), com tensões (anisotropia magnetoelástica) ou outros fatores que alteram as propriedades da amostra.

Segundo comentários de Almeida (2003), magnetizar um material significa alinhar os seus domínios, sendo este processo não linear, pois quanto mais domínios estiverem alinhados, torna-se mais difícil alinhar novos domínios. Já quando os domínios estiverem alinhados, e nenhum incremento de magnetização for possível, significa que o material terá atingido o seu estado de “saturação”. Conforme este mesmo autor, o processo de desmagnetização também é

não linear, e, dependendo do material, mais ou menos domínios podem ficar alinhados após a remoção do campo externo. A quantidade desses domínios alinhados é responsável pelo denominado “magnetismo residual”.

De acordo com Xue *et al* (2003), a natureza sempre busca estados em que a energia seja a menor possível. Nos materiais ferromagnéticos, isto é capaz levar ao surgimento de domínios magnéticos.

Materiais ferromagnéticos ou ferrimagnéticos, que se encontram a uma temperatura de Curie (T_c), são compostos por regiões de pequeno volume onde existe um alinhamento mútuo de todos os momentos magnéticos na mesma direção. Estas regiões são denominadas de domínios e cada domínio está magnetizado até a sua magnetização de saturação. Tais domínios são separados dos domínios adjacentes por uma interface (CALLISTER, 2008), como mostra a figura 7.

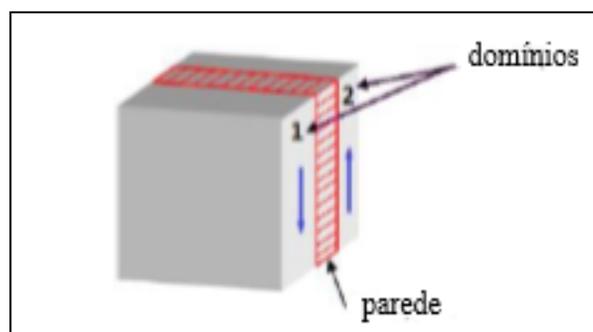


Figura 7: Domínios magnéticos contíguos separados por uma interface.
Fonte: CULLITY, 2009

A histerese magnética é responsável pelo atraso entre a densidade de fluxo magnético B e a intensidade do campo magnético H aplicado no material ferromagnético. O fenômeno histerese é causado, porque ao cessar-se o campo magnético aplicado, nem todos os domínios ficam desorientados como a princípio, para que eles percam a orientação é necessário aplicar energia (HAYT e BUCK, 2013; ORTIZ e MENDES, 2011).

Na figura 8 mais abaixo é mostrada a curva de histerese. Para Blundell (2001), o estudo de sua forma e tamanho revelam as perdas de energia magnética por unidade de volume em ciclo de magnetização-desmagnetização, manifestada em forma de calor gerada na amostra capaz de elevar sua temperatura. Nesse contexto, os materiais ferromagnéticos ou ferrimagnéticos são

classificados como magnéticos duros ou moles, devido à dificuldade ou facilidade de magnetização-desmagnetização.

O início da curva de magnetização, ou curva de histerese acontece com uma magnetização nula a campo nulo. O primeiro ramo é chamado de curva de magnetização inicial, começando com uma inclinação que define a susceptibilidade inicial, χ_0 , e atingindo a magnetização de saturação, M_s . A partir da saturação, à medida que o campo H é reduzido pela reversão da direção do campo, a curva não retorna seguindo seu trajeto original. Produz-se então um efeito de histerese, onde a magnetização M se defasa em relação ao campo H que é aplicado, ou diminui a uma taxa mais baixa. No campo H de zero, existe uma magnetização residual, M_r que é chamado de remanência, ou densidade do fluxo remanescente ou residual; o material permanece magnetizado na ausência de um campo H externo. Para reduzir a magnetização no interior da amostra até zero, um campo H de magnitude $-H_c$ deve ser aplicado em uma direção oposta á do campo original; H_c é chamado de coercividade, ou algumas vezes de força coercitiva. Com a continuação do campo aplicado nessa direção inversa, a saturação é finalmente atingida no sentido oposto. Uma segunda inversão do campo até o ponto de saturação inicial completa o ciclo simétrico da histerese produzindo tanto uma remanência negativa, $-B_r$, como uma coercividade positiva, H_c (CALLISTER, 2008).

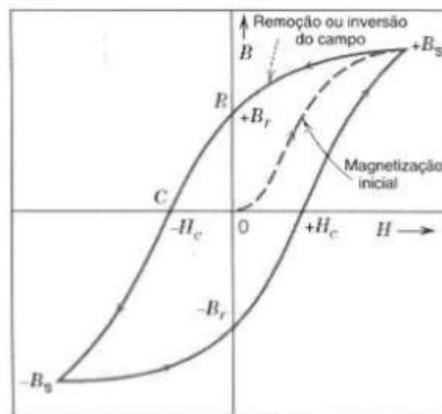


Figura 8: Ciclo de histerese esquemática para um material ferromagnético.
Fonte: Callister, 2008.

Analisando a curva de histerese é possível classificar o material quanto a sua dureza magnética, isto é, se o material é magnético duro ou mole, segundo a sua capacidade de

polarização e despolarização quando submetido a um campo. Os materiais magnéticos duros são aqueles que apresentam largas curvas de histerese, com altos valores de magnetização remanente e coercividade. Tais materiais podem ser aplicados em dispositivos de memória magnética como disquetes, HD de computadores e tarja de cartões bancários. Já os materiais magnéticos moles possuem curvas de histerese estreitas e baixos valores de magnetização remanente e coercividade, o que é caracterizado por uma fácil polarização e despolarização, podendo ser usados em dispositivos que precisam trabalhar com altas frequências como aparelhos de comunicação, radares, chip de computadores, entre outros (GOMES FILHO, 2009).

2.9 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Na indústria mecânica, é muito comum a necessidade de se inspecionar máquinas e peças durante o seu período de vida útil. Nesses casos, não será possível a destruição da peça ou do componente a ser testado, uma vez que depois de inspecionado ele deverá ser recolocado no sistema de origem. A nucleação de trincas de fadiga ou imperfeições internas em produtos acabados poderá comprometer o sucesso do componente em operação. Recorre-se então aos ensaios não destrutivos dos materiais, que permitem analisar a peça obtendo-se informações tanto quantitativas, como qualitativas sobre a integridade de um componente mecânico, permitindo assim ao profissional encarregado garantir sua substituição antes que tal componente falhe em operação (GARCIA et al., 2012).

Estes ensaios são utilizados para avaliar a presença de descontinuidades que possam afetar a integridade de materiais em serviço. Por não afetar o funcionamento normal das peças nem as danificar, estes tipos de ensaios são considerados não destrutivos. Os END são uma das principais ferramentas do controle de qualidade de materiais e produtos, contribuindo para garantir a qualidade, reduzir os custos e aumentar a confiabilidade das operações de inspeção. São utilizados na fabricação, montagem, inspeção em serviço e manutenção, sendo largamente aplicados em juntas soldadas, peças fundidas, peças forjadas, peças laminadas, peças de plásticos, estruturas de concreto, entre outros, nos setores petróleo/petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, ferroviário, naval, eletromecânico e automotivo (MARQUES E FERREIRA JUNIOR, 2006).

De acordo com Pereda (2010), os END incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas.

De acordo com a Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos e Inspeção (ABENDI, 2012) as principais técnicas de END são: Correntes Parasitas; Emissão Acústica; Radiografia, Radioscopia e Gramagrafia; Ensaio Visual; Estanqueidade; Líquido Penetrante; Partículas Magnéticas; Ultrassom e Termografia.

O presente trabalho utiliza técnicas de END por parâmetros magnéticos para a caracterização de materiais, que serão mais detalhadamente explicados nos tópicos a seguir.

2.10 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR PARÂMETROS MAGNÉTICOS

De acordo com Maravilha (2012), o uso do fluxo magnético em ensaios não destrutivos torna o ensaio mais simples e rápido e ainda torna possível se detectar discontinuidades superficiais e subsuperficiais. Por mais que só possa ser utilizado em materiais e/ou equipamentos ferromagnéticos, o ensaio é muito produtivo, pois grande parte dos materiais das indústrias atualmente são, de fato, ferromagnéticos. Além de haver várias maneiras de utilizar-se o fluxo dentro do ensaio, tornando-o extremamente flexível.

Um bom exemplo de END que tem como princípio básico o magnetismo é o teste denominado como correntes parasitas, ou correntes de Foucault, ou ainda correntes de Eddy. Este ensaio, além de ser aplicado na detecção de discontinuidades, possibilita também a determinação de algumas características físicas, tais como medição de espessura de camadas, condutibilidade elétrica, permeabilidade magnética (PEREIRA, 2007).

De acordo com Fialho (2015), a técnica de ensaio por correntes parasitas consiste na criação e aplicação de um campo magnético gerado por uma bobina alimentada por uma fonte elétrica alternada. Essa bobina, quando aproximada de uma amostra de material ferromagnético qualquer, gera nesta uma corrente elétrica chamada de parasita. Essa corrente sofre perturbações quando encontra alguma discontinuidade, seja uma trinca, uma porosidade, uma deformação ou uma mudança microestrutural, criando uma interferência no fluxo magnético gerado, e, por

consequente, na impedância da bobina. Essa impedância é medida e seus valores são comparados para diferentes situações estudadas.

Na pesquisa desenvolvida por Camerini (2012), foi utilizada a técnica de inspeção por correntes parasitas para identificar a quantidade de fase sigma na microestrutura de diferentes amostras, com quantidades diferentes de fase em sua composição do aço inoxidável duplex. Os transdutores utilizados obtiveram sucesso em diferenciar as amostras com diferentes porcentagens de fase sigma em sua composição.

Dahia *et al.* (2015) obteve sucesso em seus estudos demonstrando a possibilidade do uso das correntes de Eddy para a caracterização de tensões em materiais magnéticos.

O ruído Barkhausen é uma técnica não destrutiva muito utilizada para caracterizar a microestrutura de um material ferromagnético. O ensaio permite nítida identificação de cada microestrutura, uma vez que o aspecto do sinal relativo a cada microestrutura é distinto (GÜR; ÇAM, 2006; CAPÓ - SÁNCHEZ *et al.*, 2004).

Essa relação entre o ruído e a microestrutura pode ser observada na Figura 9, na qual a curva exibe o sinal relativo a quatro constituintes. A curva ‘a’ representa a martensita, ‘b’ martensita revenida, ‘c’ perlita fina e ferrita, já ‘d’ está associado a perlita grosseira e ferrita. (GÜR; ÇAM, 2006).

A amplitude das curvas exibidas na Figura 9 está relacionada à magnitude do salto Barkhausen, e exibe a seguinte ordem de intensidade (menor para a maior): martensita, martensita revenida, perlita fina e ferrita, seguida da perlita grosseira e ferrita. O campo magnético relacionado à amplitude é uma grandeza necessária ao movimento de parede a partir de um sítio de ancoramento.

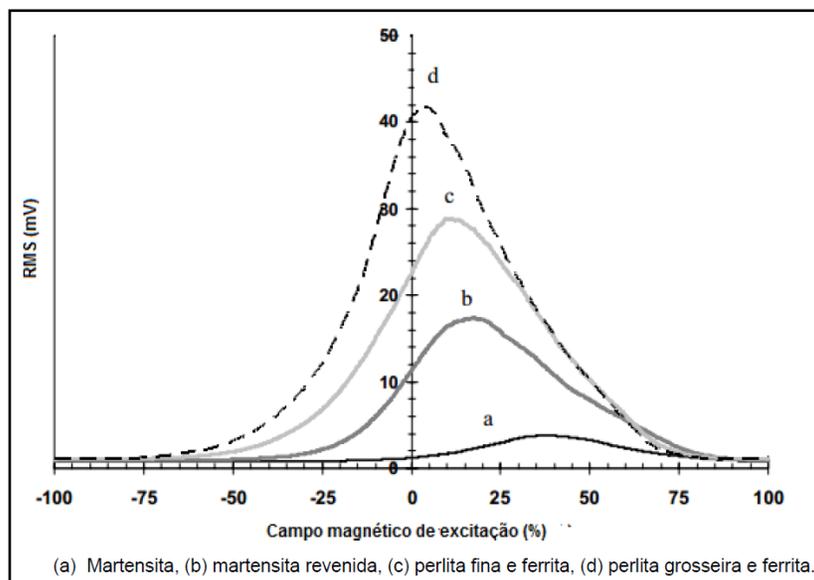


Figura 9: Valor RMSRMB x Campo de excitação.

Fonte: GÜR; ÇAM, 2006.

2.11 CARACTERIZAÇÃO POR MEDIDAS DE TENSÃO HALL USANDO SENSORES DE EFEITO HALL

O efeito Hall, descoberto por Edwin Herbert Hall em 1879, já é conhecido por mais de cem anos, mas só foi colocado à utilização perceptível nas últimas três décadas com o advento da microeletrônica. O efeito Hall é utilizado na indústria em uma ampla variedade de aplicações de sensoriamento, podendo ser encontrado em tacômetros, switches, medidores: de posição, inclinação, nível, pressão, espessura, corrente, tensão, potência, frequência e campo magnético. Também podem ser encontrados na indústria de aviação, utilizados em avaliações não destrutivas, detectando trincas em materiais (KOSMAS, 2005).

Em 1879, Edwin H. Hall descobriu que quando um condutor conduzindo uma corrente elétrica for colocado sob a ação de um campo magnético perpendicular, há o aparecimento de uma voltagem numa direção ao plano que contém a corrente e o campo magnético aplicado. Utilizando um aparato experimental, como o esquematizado na figura 10, Hall (1879) observou o aparecimento de uma diferença de potencial (V_H) entre as bordas de um condutor retangular, praticamente bidimensional, submetido a um campo magnético (H). A partir de então, V_H passou a ser chamada de voltagem Hall ou voltagem transversal e a sua observação conhecida como efeito Hall.

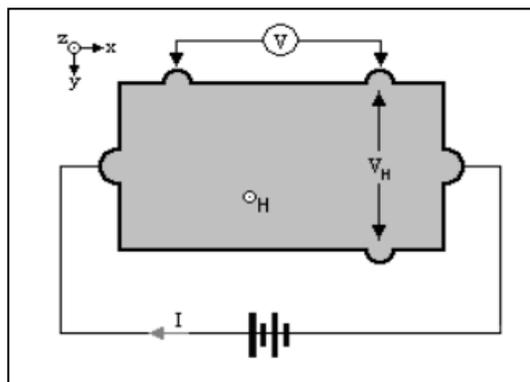


Figura 10: Configuração experimental onde Hall observou pela primeira vez o aparecimento de uma voltagem transversal (V_H) entre as bordas de um condutor retangular, submetido a um campo magnético (H).

Fonte: Hall (1879).

De acordo com Cavalcante (2013), Este efeito ocorre devido a cargas elétricas tenderem a desviar-se de sua trajetória por causa da força de Lorentz. Desta forma cria-se um acúmulo de cargas nas superfícies laterais do condutor produzindo uma diferença de potencial. O excesso de cargas positivas e negativas funciona como um capacitor de placas paralelas, com um campo elétrico conhecido como campo Hall ou tensão Hall. A figura 11 mostra de maneira mais evidente o desvio sofrido pelas cargas devido a força de Lorentz.

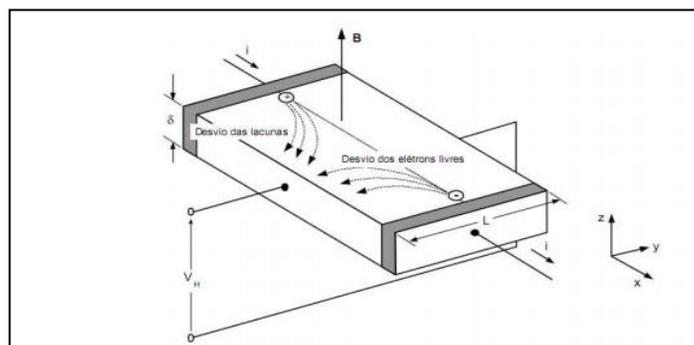


Figura 11: Esquema de desvio das cargas provocado pela aplicação de um campo perpendicular ao fluxo magnético.

Fonte: Baranauskas, (1989).

Sensores Hall têm sido utilizados para detecção do tamanho e da posição de trincas em materiais. Sendo sensíveis também à detecção de falhas superficiais em materiais metálicos, principalmente sob excitação de corrente alternada (BI e JILES, 1998). Estes sensores, utilizados

juntamente com uma unidade adequada de processamento de sinal, podem ser aplicados em situações que requeiram inspeção rápida e de boa qualidade (KOSMAS *et al.*, 2005).

Em seus estudos, Cavalcante et al. (2008) demonstra a possibilidade de se utilizar valores de tensão Hall associadas a redes neurais artificiais para determinação das microestruturas de amostras de um aço 1045 tratado termicamente. O estudo mostra que sensor Hall é sensível a mudança microestrutural.

Outras pesquisas conseguiram estabelecer uma relação entre a interação da microestrutura do material e a densidade de fluxo magnético gerado na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos. O campo magnético induzido no material sofre alterações devido às variações microestruturais. Esse campo é detectado por um sensor de efeito Hall (LEITE, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão expostas informações a respeito das amostras utilizadas, assim como os processos de preparo e de análise pelos quais elas passaram.

3.1 INFORMAÇÕES DO AÇO

Os componentes utilizados como corpos de prova foram construídos a partir de uma barra redonda do aço baixa liga AISI 4140 com 19,05 milímetros de diâmetro. Esta barra foi adquirida da empresa Metanaço – Metais e Aços LTDA, localizada em Recife, Pernambuco.

A tabela abaixo mostra a composição do aço utilizado encontrado em seu relatório de compra, entregue pela empresa.

Elemento	C	Mn	P (máx)	S (máx)	Si	Cr	Mo
Faixa	0,38 – 0,43	0,75 – 1,00	0,03	0,04	0,15 – 0,35	0,08 – 1,10	0,15 – 0,25
Composição	0,40	0,89	0,012	0,001	0,240	0,920	0,160

Tabela 5 – Composição química do aço SAE 4140 utilizado no estudo.

Fonte: Próprio autor.

3.2 CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a confecção dos corpos de prova, a barra passou pelo processo de usinagem denominado de eletroerosão para a realização dos cortes longitudinais, pertencente à Oficina Mecânica, vinculada ao Departamento de Engenharia Mecânica do CAMPUS I da UFPB. As amostras ficaram com oito milímetros de espessura e foram posteriormente divididas em quatro grupos, dos quais três passarão por tratamentos térmicos.

3.3 EXECUÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

As amostras foram separadas em quatro grupos com quatro amostras em cada. Três dos quatro grupos de amostras passaram pelo tratamento térmico de têmpera a 850 °C, permanecendo

no forno convencional modelo EDG 3P- S (figura 12), por aproximadamente 45 minutos. Após esse tempo, as amostras foram retiradas e submetidas ao resfriamento por têmpera em  leo.



Figura 12: Forno convencional utilizado nos tratamentos t mricos.
Fonte: Próprio autor, 2019.

Dos três grupos que passaram pela tempera, dois deles passaram posteriormente pelo tratamento de revenido, um a 350 e outro a 450  C. A tabela abaixo mostra os grupos de amostras e os respectivos processos pelos quais passaram.

Grupo	Têmpera a 850 �C	Revenido a 350 �C	Revenido a 450 �C
A1 (Como Recebido)			
A2	X		
A3	X	X	
A4	X		X

Tabela 6: Processos pelos quais cada grupo de amostra foi submetido.
Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.4 ENSAIO DE DUREZA

Foi utilizado para os ensaios de dureza um durômetro da marca PANTEC modelo RASN RS/ RASN RB (figura 13), esse equipamento pertence ao laboratório de Solidifica o Rápida

(LSR). Para o ensaio, definiu-se como pré-carga o valor de 10 Kgf, carga de 150 Kgf e o tempo de aplicação desta foi de cerca de vinte segundos. Foram medidos três valores de dureza para cada corpo de prova. A partir desses valores, foi possível calcular a dureza média e o erro padrão.



Figura 13: Durômetro PANTEC RASNRS/RASNRB.

Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.5 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Antes de levar os corpos de prova para análise no microscópio, estes passaram por um processo de lixamento com lixas variando de 200 a 1500 *mesh*, polimento com pasta de diamante variando de 6 a 0,25 μm , e por fim atacados quimicamente com Nital 3% por 7 segundos.

Ao final destes processos de preparo, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico da marca Olympus modelo BX41M - LED (figura 14), localizado no laboratório de materiais metálicos para análise de suas microestruturas.



Figura 14: Microscópio Eletrônico Olympus BX41M – LED.
Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.6 ENSAIO MAGNÉTICO

Os ensaios magnéticos foram realizados no laboratório de Materiais metálicos da UFPB, utilizando uma configuração experimental, onde um transformador de dimensões 80.6 mm de comprimento, 96.5 mm de largura e 16 mm de espessura foi desmontado e dele foram retiradas todas as placas com formatos de “E” e “I”. Estas placas, constituídas de ferrite, foram usinadas e remontadas de maneira que formassem uma estrutura na forma de “C” utilizada para a construção de um eletroímã.

Segundo Moretto (1989), é possível observar que para promover a existência de campos uniformes, o posicionamento dos pólos deve ser frontal fazendo com que as linhas de campo se desloquem do pólo norte para o pólo sul de forma paralela.

O bloco de ferrite com formato de “C” foi enrolado com fios de cobre formando uma bobina, na qual seria aplicada uma corrente para geração do campo magnético. A obtenção de campos magnéticos lineares e aproximadamente constantes em toda a faixa de análise dos

materiais é algo bastante necessário e varia de acordo com as propriedades dos materiais analisados.

Na figura 15 é possível observar o eletroímã desenvolvido a partir das placas de um transformador.

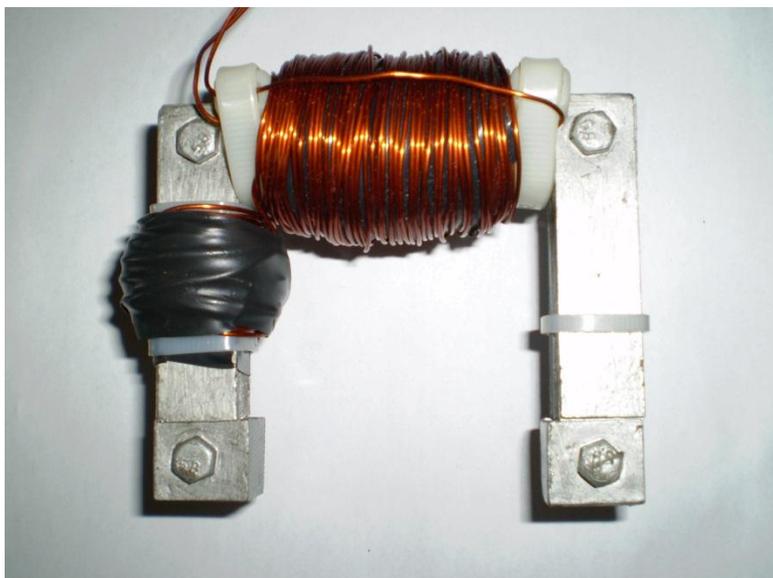


Figura 15: Eletroímã obtido a partir de placas de um transformador.
Fonte: Próprio Autor, 2019.

Os quatro parafusos utilizados para a fixação das placas de ferrite possuem outra função importante, a de sustentação do corpo do eletroímã.

Foram feitos dois bobinados com o mesmo fio de cobre com o objetivo de garantir uma quantidade de linhas de fluxo mais concentradas por todo o circuito magnético.

O comprimento da abertura do eletroímã tem medida suficientemente adequada para posicionar o sensor e a amostra de maneira alinhada.

Os cálculos utilizados para o projeto do eletroímã levaram em conta as equações utilizadas para circuitos magnéticos. A abertura utilizada para posicionamento da amostra foi considerada como o vácuo, pois a permeabilidade magnética de ambos os meios é praticamente a mesma. Entretanto, é possível observar variações no campo magnético do circuito quando se colocam diferentes amostras metálicas. Isto acontece porque cada material metálico apresenta uma permeabilidade desde ligeiramente maior que o vácuo (Paramagnéticos e Antiferrimagnéticos) até muitas vezes maior (Ferromagnético e Ferrimagnético).

Com essas características foi possível obter um eletroímã capaz de atender a produção do campo magnético requerido bem como a geometria necessária para realização dos ensaios magnéticos nas amostras.

Cada amostra foi colocada em uma das extremidades do eletroímã, enquanto que o mesmo permaneceu ligado a uma fonte de alimentação durante 1 minuto com 5 V e 5 A. Após esse tempo, a amostra foi retirada e então medido o campo magnético residual, haja visto que o campo magnético gerado pelo eletroímã foi forte o suficiente para magnetizar as amostras.

3.6.1 Sensor utilizado e suas características

Diante de diversas opções diferentes de sensores de efeito Hall existentes no mercado, foi selecionado um modelo com as seguintes especificações: Sensor SS495A fabricado pela *Allegro Microsystems*. O fato principal para a escolha deste sensor foi o baixo custo, em torno de cinco reais e a boa compatibilidade de suas características elétricas com os equipamentos existentes em laboratórios acadêmicos.

Dentre muitas aplicações solicitadas para os sensores de efeito Hall, pode-se destacá-los como sensores de deslocamento, de posicionamento angular e medidores de corrente, tendo para isso uma necessidade de alta precisão em um conjunto montado em um pequeno pacote. Os sensores lineares de efeito Hall são desenvolvidos para atingir todos estes objetivos. Estes circuitos integrados geram uma tensão de saída proporcional ao campo magnético aplicado. Eles apresentam uma tensão de saída que equivale a 50% da tensão de alimentação quando não estão em presença de campos magnéticos.

O sensor SS495A possui uma sensibilidade de 3.125 mV/G. Outra característica importante está no fato deste dispositivo operar entre temperaturas de -40 °C até 150 °C. Possui as mesmas características, montadas em um dispositivo (pacote) único, com três pinos em linha, conforme ilustrado na Figura 16.

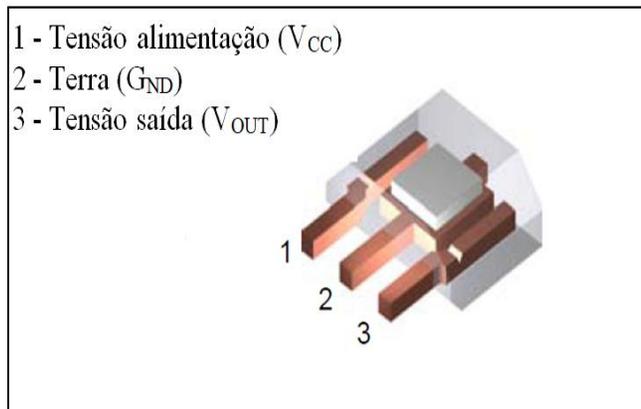


Figura 16: Ilustração de um sensor Hall.

Fonte: adaptado de ALLEGRO, 2004.

3.6.2 Determinação do campo magnético

O campo magnético H foi determinado a partir das medidas de tensão Hall obtidas nos ensaios. Para isso, uma expressão matemática foi utilizada para relacionar o campo magnético com os valores de tensão Hall, a partir de especificações técnicas do fabricante. A Figura 17 apresenta curvas de função de transferência típica de um sensor Hall de saída analógica. A função de transferência expressa a relação entre um campo magnético de entrada (em Gauss) e uma tensão de saída (em Volts).

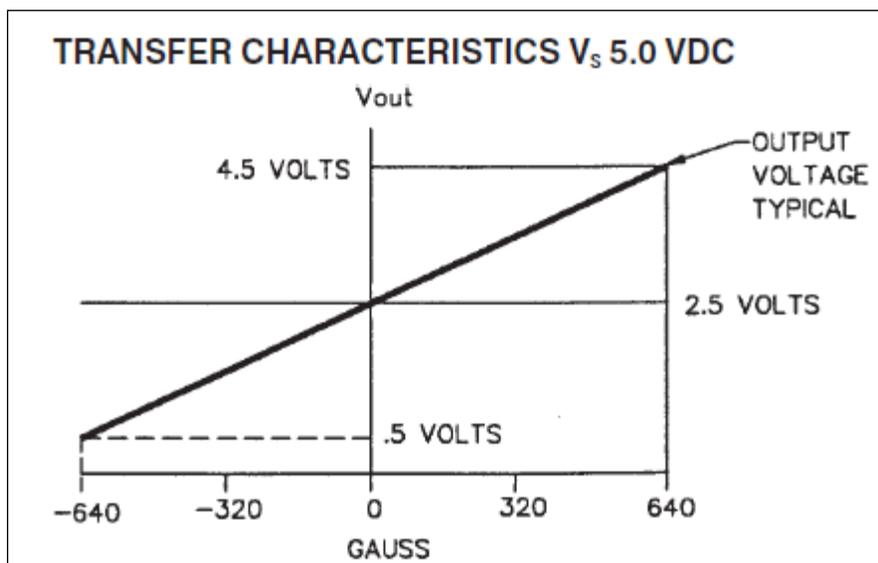


Figura 17: Função de transferência típica de um sensor de saída analógica, modelo SS495A.

Fonte: adaptado de ALLEGRO, 2004.

Verificando a função de transferência típico do sensor utilizado nesse trabalho (figura 16), a inclinação desse gráfico corresponde a sua sensibilidade, uma vez que relaciona os parâmetros de influência e os de resposta do sensor.

Dessa forma, tendo de posse o *data sheet* do sensor utilizado e portanto do pleno conhecimento do seu comportamento gráfico na região linear, percebe-se uma equação de reta a ser determinada, onde a tangente do ângulo de inclinação da reta é o seu coeficiente angular.

Partindo do princípio que o valor máximo de resposta do sensor Hall é de 2,5 V quando esse é alimentado com uma tensão de 5 V, tem-se portanto a relação mostrada na equação 7.

$$(5-V_h) / (H_{m\acute{a}x}-H) = S_s \quad (7)$$

Isolando o termo H da expressão acima, encontramos a equação 8.

$$H = H_{m\acute{a}x} - ((5-V_h) / S_s) \quad (8)$$

Onde, V_h é a tensão de saída, em Volts; S_s é a sensibilidade de saída do sensor, em mVolts/Gauss, $H_{m\acute{a}x}$ é o campo magnético máximo de resposta para um determinado V_h máximo de saída do sensor e H o campo magnético aplicado, em Gauss.

Segundo o *data sheet*, o sensor SS495A apresenta uma sensibilidade de 3.125 mV/G e uma tensão Hall (V_h) de 4,5 Volts para um campo magnético máximo de 640 Gauss. Nesse sentido, pretende-se trabalhar a partir dessa referência, logo de posse de todos os dados do sensor, a equação mostrada anteriormente passa por uma correção, resultando na equação 9.

$$H = 640 - ((4,5-V_h) / 0,003125) \quad (9)$$

Analisando a equação acima, percebe-se que para cada valor de tensão Hall de saída, têm-se, portanto um valor de campo magnético aplicado correspondente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DUREZA ROCKWELL C

Sabe-se que a velocidade de resfriamento é um parâmetro determinante no tratamento térmico de têmpera, no qual o aço é submetido a um rápido resfriamento após a austenização, proporcionando um aumento da dureza e na resistência do aço. A temperatura também é outro fator que pode determinar as propriedades mecânicas do aço, sendo um parâmetro importante para o tratamento térmico de revenido. Com o intuito de levantar o comportamento da dureza após o aço ter sido submetido aos tratamentos térmicos supracitados acima, foi realizado então o ensaio de dureza Rockwell C. Nesse contexto, a Figura 18 mostra o comportamento de dureza.

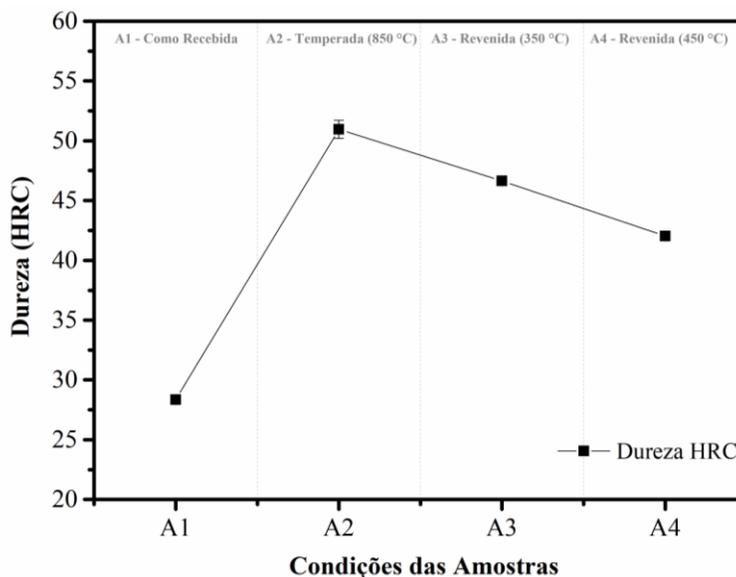


Figura 18: Comportamento da dureza do aço.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 18 apresenta medidas de Dureza Rockwell C, para diferentes condições de tratamento térmico. Observa-se que a dureza da amostra temperada é aproximadamente 51 HRC 54,90 % maior que da amostra como recebida. De acordo com Freitas (2010) esses valores sofrem uma queda contínua com aumento da temperatura de revenido, devido a uma transformação gradual da martensita em fases estáveis; ferrita e cementita, o que influencia as propriedades mecânicas do aço.

4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

Na Figura 19 (a-d) são exibidas as imagens (MO) do material temperado e revenido (nas duas condições de revenimento). De maneira geral, verifica-se a ocorrência de martensita revenida nas peças, que parece tornar-se mais difusa (mais martensita se transformando nas fases mais estáveis, ferrita e cementita) à medida que a temperatura de revenimento aumenta. Fato que tem como consequência a diminuição da dureza e aumento da ductilidade.

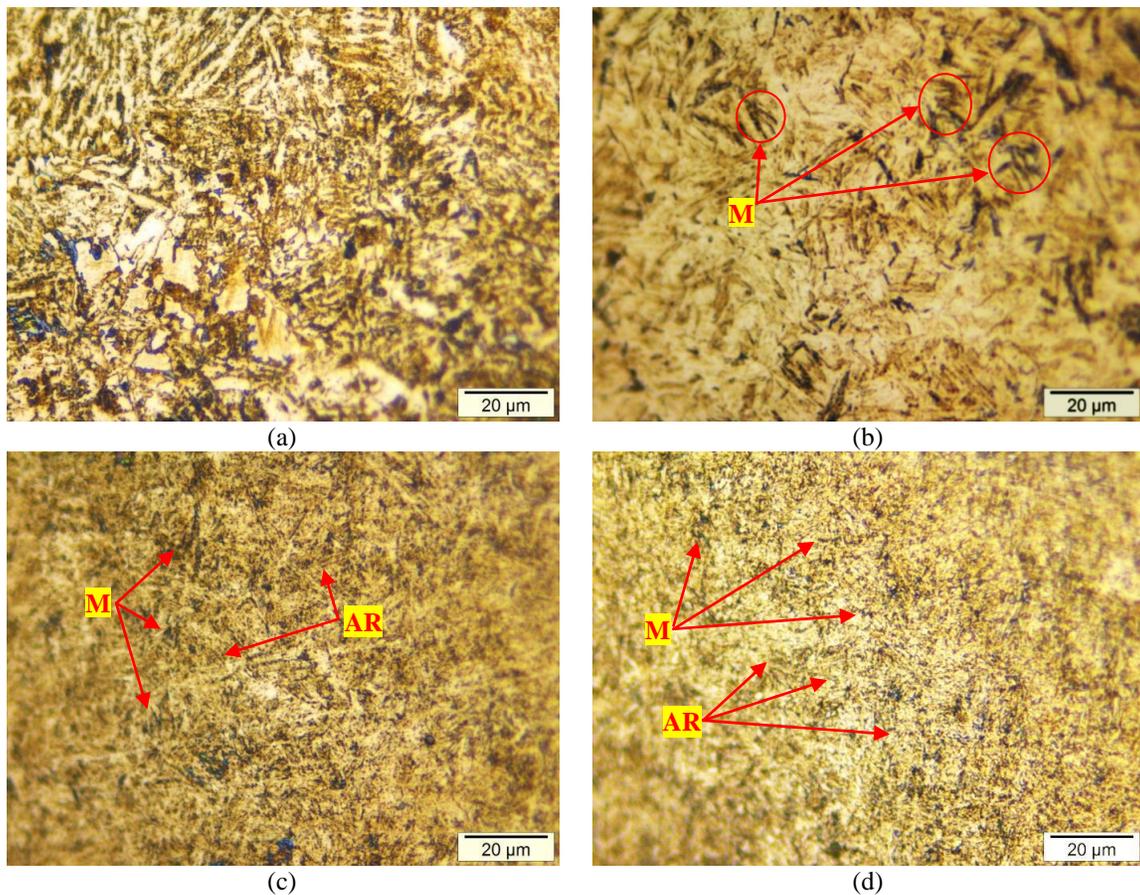


Figura 19: Microscopia óptica do aço AISI 4140. (a) Amostra como recebida, (b) Amostra temperada, (c) Amostra revenida a 350 °C, (d) Amostra revenida a 450 °C. (M – Martensita; AR – Austenita Retida).
Fonte: Próprio autor.

Percebe-se nitidamente a diferença entre as microestruturas observadas na Figura 19 (a) (composta essencialmente por ferrita e cementita) e aquela observada na Figura 19 (c-d) (martensita revenida) fruto do resfriamento brusco da austenita durante o tratamento térmico de têmpera que não permite que ocorra os mecanismos da difusão e formação de ferrita e cementita.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

O propósito desta abordagem é acompanhar a evolução experimental do trabalho, a partir das curvas de tensão Hall e campo magnético residual obtidas nos ensaios, os quais foram realizados com amostras na condição inicial e nas diferentes condições de tratamento de térmico.

A Figura 20 mostra os resultados de tensão Hall e de campo magnético residual. Vale ressaltar que para o levantamento da curva de campo magnético residual foi utilizada a equação 10. Por outro lado a Figura 21 mostra a correlação da curva de campo magnético residual com o comportamento de dureza nas diferentes condições de tratamento térmico.

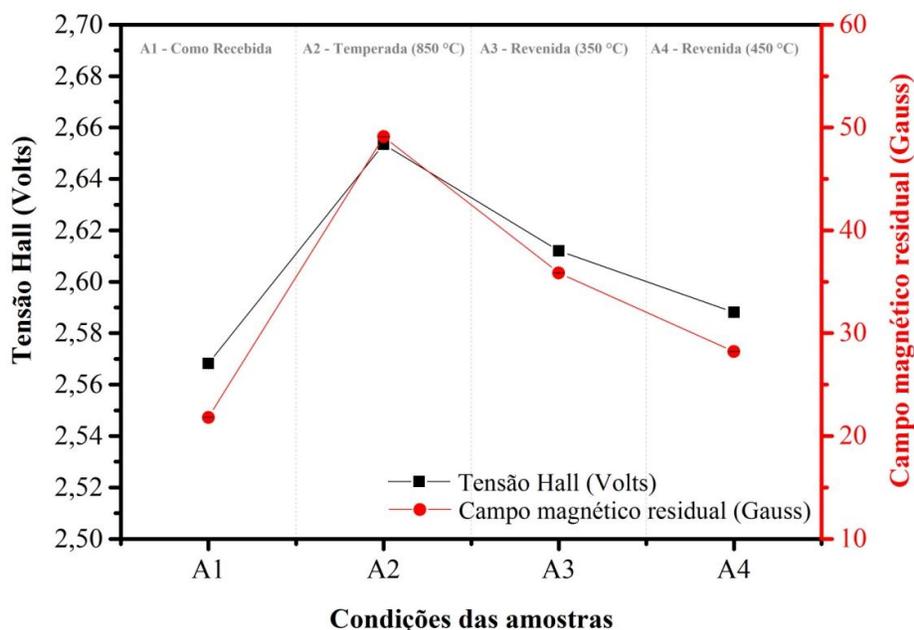


Figura 20: Curvas de tensão Hall e campo magnético residual das amostras nas diferentes condições de tratamento térmico.

Fonte: Próprio autor.

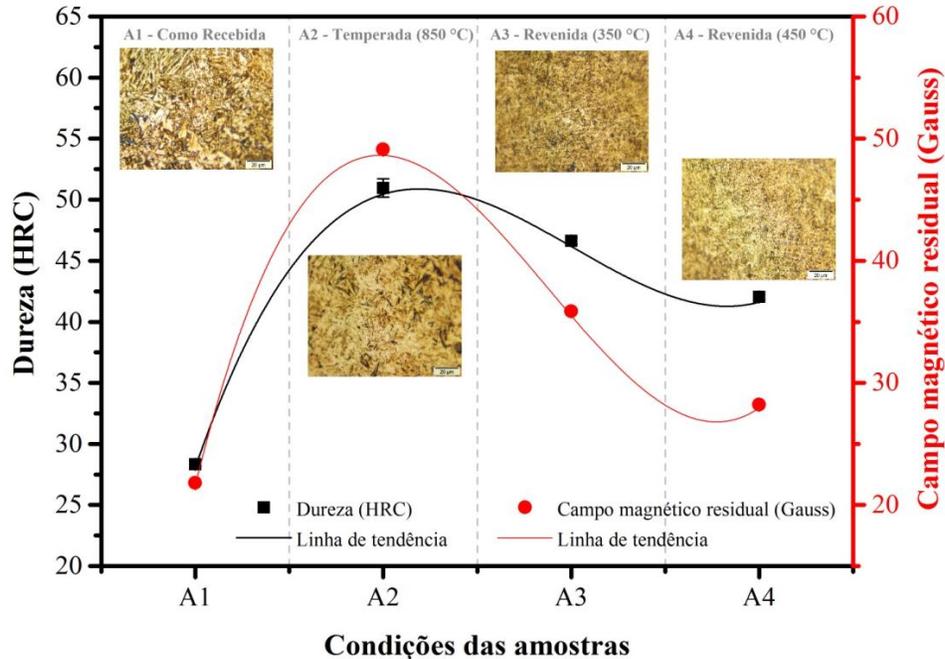


Figura 21: Correlação da curva de campo magnético residual com o comportamento de dureza nas diferentes condições de tratamento térmico.

Fonte: Próprio autor.

Como pode perceber por meio das Figuras 20 e 21 o ensaio magnético realizado mostrou-se sensível as variações microestruturais. O valor do campo magnético residual, relativo a amostra temperada (maior fração volumétrica da fase martensítica), é o maior entre as amostras analisadas. O tamanho médio dos domínios magnéticos, nessa condição, é menor em virtude do menor tamanho das agulhas de martensita. Em contrapartida, a alta densidade de discordâncias na martensita dificulta o movimento de parede, sendo necessário um alto campo magnético para promover o crescimento do domínio (GÜR; ÇAM, 2006).

Levando-se em conta que o campo magnético residual foi gerado por uma aplicação de um campo magnético aplicado alto o suficiente para magnetizar a amostra, e sendo essa amostra temperada considerada um material ferromagneticamente duro, ou seja, difícil de magnetizar, mas uma vez magnetizado é difícil de perder esse campo magnético, isso justifica o fato dessa amostra apresentar um valor de campo magnético residual maior do que todas as outras amostras.

Já na martensita revenida a estrutura magnética se torna mais grosseira, sendo o tamanho médio dos domínios aumentado. Deste modo, a resistência à movimentação das paredes se torna menor. Logo, para as condições de revenido as amostras apresentam campo magnético residual menor que a condição temperada.

CONCLUSÃO

O estudo proposto consistiu na avaliação da técnica de análise não destrutiva por parâmetros magnéticos para identificação da variação microestrutural em um aço AISI 4140. Dos resultados obtidos pode-se concluir que a técnica apresenta resultados satisfatórios, uma vez que foi capaz de medir as variações microestruturais causadas devido aos diferentes tipos de tratamento térmicos.

Comparando-se a técnica desenvolvida neste trabalho com os métodos já consolidados, pode-se observar uma gama de qualidades que evidenciam que o mesmo pode vir a ser utilizado como uma nova técnica de avaliação e inspeção de propriedades microestruturais de materiais, podendo ser aplicado em várias áreas, como siderúrgica, aeronáutica, naval, nuclear, automobilística, entre outras.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Como sugestão para melhoria contínua desse trabalho, levantar as curvas de histerese das amostras analisadas o que irá corroborar com os resultados magnéticos obtidos nesse trabalho, bem como realizar o ensaio de Difração de raios X com o intuito de verificar se haverá influencia nos espectros de DRX em detrimento dos tratamentos térmicos realizados;
- b) Implementação do dispositivo/técnica para a determinação do eixo de fácil magnetização de aços para fins elétricos;
- c) Aplicar o método desenvolvido para acompanhamento das fases fragilizantes dos aços inoxidáveis duplex SAF 2205;
- d) Avaliação da qualidade de uma junta soldada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC., **Datasheetcatalog, Massachusets – USA**, 2004. Disponível em: < <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/>> Acesso em: 20 Abr. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **NA-001: Qualificação e Certificação de Pessoas em Ensaio Não Destrutivos**. São Paulo: ABENDI, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 9000: Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulário**. Rio de Janeiro, p. 32. 2015.

AMORIM, Bruno Ferreira. **Síntese e caracterizações estrutural e magnética das ferritas de cobalto - manganês ($\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ E $\text{Co}_{1,2}\text{Fe}_{1,8-x}\text{Mn}_x\text{O}_4$)**. 2015. 123 f. Tese (Doutorado em Física) - Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

ARAÚJO, Jefferson Ferraz Damasceno Félix. **Construção de um magnetômetro Hall para caracterização de partículas magnéticas utilizadas em ensaios imunológicos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Física) - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Rio, Rio de Janeiro, 2009.

ASKELAND, D. R.; PRADEEP P. F.; WENDELIN J. W. **The science and engineering of materials**. 6th ed: Cengage Learning, 2010.

ASM – METALS HANDBOOK – (2002). **ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. 10ª Edição. Ed: ASM International.

BACK, Jaime André. **Estudo das propriedades eletromagnéticas de um composto magnético macio (smc) para aplicações em motores de indução**. 2018. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2018.

BARANAUSKAS, V. **Técnicas instrumentais de caracterização de semicondutores**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1989.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**. 3 ed. Florianópolis: Editora Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

Bi, Y. JILES, D.C.; Dependence of magnetic properties on crack size in steels. **IEEE, Transactions on Magnetics**. v. 34, issue 4, p. 2021–2223, 1998.

BLUNDELL, S. **Magnetism in Condensed Matter**. New York: Oxford University Press, 2001.

BUSCHOW, K. H. J. DE BOER F. R. **Physics of Magnetism and Magnetic Materials**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2003.

CALLISTER JR, W.D; in: SOARES, S.M.S. (trad.), **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAMERINI, Cesar Giron. **Desenvolvimento de sondas de correntes parasitas para detecção e quantificação de fase sigma em aço inoxidável duplex**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CAVALCANTE, Daniel Cesar de Macedo. **Estudo da Interação das linhas de campo sobre uma amostra de aço SAE 1020 por meio de medidas de tensão hall**. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

CAVALCANTE FILHO, A. F.; GADELHA NETO, O. S.; BORGES, F. F ; SANTOS, N. C. ; SILVA, E. M. Utilização de sensor de efeito Hall para caracterização de microestruturas. **In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Salvador-BA. CONEM, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de metalurgia, materiais e mineração, 2012.

CHINNASAMY C. N.; SENOUE M.; JEYADEVAN B.; PERALES-PEREZ O.; SHINODA K.; TOHJI K. Synthesis of size-controlled cobalt ferrite particles with high coercivity and squareness ratio. **Journal of Colloid and Interface Science**, New York, v. 263, issue 1, p. 80-83, 2003.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2008.

COUTRIM, Leandro Tolentino. **Propriedades estruturais, eletrônicas e magnéticas dos óxidos La₂-xCaxCoIrO₆**. 77 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

CRAIG. R. G; POWERS J. M. **Materiais Dentários Restauradores**. 11 ed. Tradução: Cimara Fortes Ferreira. Santos, 2004.

CULLITY, B. D. GRAHAM, D. C. **Introduction to Magnetic Materials**. 2th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009

CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**. Addison-Wesley Publishing Company. USA, 1972.

DAHIA, Abla; BERTHELOT, Eric; LE BIHAN, Yann; DAMIEL Laurent. A Model-based method for the characterisation of stress in magnetic materials using eddy current non-destructive evaluation. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 48, n. 19, p. 195002 - 198011, 2015.

DIAS, Vinicius Waechter. **Estudo comparativo entre processos de revenimento**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 2010.

DUFOUR, J.D. **An Introduction to Metallurgy**. 4th ed. Houston: Cooper Cameron Corporation, 2002.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Caracterização da energia no setor siderúrgico**. Ministério de Minas e Energia – Brasil, 2009.

EVANS, M. E.; HELLER, F. **Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics**. USA: Academic Press, 2003

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. **Introdução ao Magnetismo dos Materiais**. 1 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

FIALHO, Walter Macêdo Lins. **Ensaio não destrutivo baseado em medidas de campo magnético para acompanhamento da formação da fase sigma em um aço inoxidável**

duplex. 2015. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

FREITAS, Wanderlei Ferreira de. **Avaliação das propriedades mecânicas e resistência à fadiga do aço aisi 4140 submetido a diferentes valores de temperatura de revenimento**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GOMES FILHO, Alberto. Correia. **Síntese, caracterização e propriedades magnéticas de ferritas de Ni-Zn obtidas por reação de combustão**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

GÜR, C. H.; ÇAM, I. Comparison of magnetic barkhausen noise and sound velocity measurements for characterization of steel microstructure. **Materials Characterization**, v.58, 5ed., p.447 – 454, 2006.

HALL, E. H. On a new action of the magnetic on electric current. **American Journal of Mathematics**. v. 2, p. 287 - 292, 1879.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2016.

HAYT, Jr. W. H. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2013.

Instituto Aço Brasil. **Dados do Setor**. Disponível em: <www.acobrasil.org.br>. Acesso em: 15.fev.2019.

JAKUBOVICS, J. P. **Magnetism and magnetic materials**. 2th ed. London: The Institute of Materials, 1994.

JILES, D. **Introduction to magnetism and magnetic materials**. London: Chappman & Hall, 1991.

KINA, Aline Yae. **Inibidores de corrosão para sistemas de aço carbono submetidos a meios de alta salinidade e presença de CO₂**. 2011. 96 f. Dissertação (Mestrado em Metalúrgica e de Materiais) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

KOSMAS, K.; SARGENTIS, C.; TSAMAKIS, D.; HRISTOFOROU, E. Nondestructive Evaluation of Magnetic Metallic Materials Using Hall Sensors. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 161, p. 359–362, 2005.

KRAUSS, G., (1999), Martensite in steel: strength and structure. **Materials Science and Engineering**. v. 273 - 275, p. 40–57, 1999.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure and Performance**. 2th ed. Materials Park: ASM International. 2015.

LANFREDI, A.; PRADOS, E. F. **Tópicos Experimentais em Materiais**. Roteiro de laboratório; Dureza e Tratamento térmico. Universidade Federal do ABC, 2015.

LETA, F. R.; MENDES, V. B., MELLO, J. C. S. Medição de indentações de dureza com algoritmos de visão computacional e técnicas de decisão com incertezas. **ENGEVISTA**, v. 6, n. 2, p. 15 – 35, 2004

LIMA, F. B. **Microestrutura e Tenacidade de Aços Baixa Liga Tipo 41XX** – Uma abordagem quantitativa. 2006. 188f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.

LEITE, João Pereira. **Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material**. 2014. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2014.

LEITE, Roberto Rodrigues. **Mecanismo para superação das barreiras na implantação da produção mais limpa em pequenas e médias empresas**: estudo de múltiplos casos no setor metalúrgico. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2014.

MACHADO, M. L. P. **Siderurgia da matéria-prima ao aço laminado**. Vitória: Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado do Espírito Santo - Coordenadoria de Metalurgia e Materiais, 2006.

MACHADO, M. L. P.; SOBRINHO, V.P.F.M.; ARRIVABENE, L.F. **Siderurgia para não siderurgistas**. Material Didático. Vitória: CEFET-ES, 2003.

MARAVILHA, P. H. V. Análise da dispersão do fluxo magnético em ensaios não destrutivos. **Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 2, n. 1, p. 287-291, 2012.

MARDER, A. R., GOLDSTEIN, J.I. **Phase Transformations in Ferrous Alloys Structure: Property Relationships in Ferrous transformation Products**. AIME, 1984.

MARQUES, V. P; FERREIRA JUNIOR, S. Ensaio não destrutivo. Belo Horizonte, Novembro 2006, 96p.

Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1865251/Anuario_Sector_Metalurgico_2011_base_2010.pdf/a27e2c66-9d93-43b1-ae4c-4b105786f0fc>. Acesso em 12 fev. 2019.

MONTEIRO, D. F. **Seleção e Especificação de Materiais Metálicos para Construção Mecânica**: Do cálculo mecânico ao tratamento térmico. 1 ed. São José do Rio Preto: Editora Raízes do Brasil, 2013.

MORETTO, V. P. **Elettricidade e Eletromagnetismo**. ed. Ática, 3a ed, 1989.

NASCIMENTO JR. G. C. **Máquinas Elétricas**: Teoria e Ensaio. 4 ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2011.

NOVIKOV, I. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Rio de Janeiro: Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**: Uma abordagem integrada. 4 ed, Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.

ORTIZ, J. L. R.; MENDES, F. B. R. **Apostila de Máquinas 1**. Pato Branco: UTFPR, 2011.

- PEREDA, Ana Isabel Castillo. **Automação de Diagnóstico para Ensaios não Destrutivos Magnéticos**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- PEREIRA, Paulo Apicelo de Souza. **Estudo preliminar da aplicação da técnica de correntes parasitas visando a inspeção submersa de elementos combustíveis**. 2007. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- PODCHIBIAKIN D. et al. **Comparación de diferentes métodos de medición de la impronta de la imagen de microdurómetros**. Jornadas Sam Conamet Simposio Materia 2003 1979-82.
- PORTER, D. A.; EAETERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. **Phase Transformations in Metals and Alloys**. 3th ed. Boca Ratom: CRC Press, 2009.
- POWERS J. M., SAKAGUSHI R. L. *Craig`s Restorative Dental Materials*. 12th ed. Saint Louis, Missouri. Mosby Elsevier, 2006.
- REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. 4 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.
- RIOS, C, T.; AMARAL, M. P. do.; SOUZA, E. S. **influência de tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4140**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 22. 2016, Natal. Anais. Natal, Rn: Cbecimat, 2016. p. 5797 - 5808.
- RODRIGUES, Ádila Priscilla Gomes. **Síntese e Caracterização de Ferritas de Níquel dopadas com Cobalto e Efeito da Substituição nas suas Propriedades Magnéticas**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R. **Aços e Ligas Especiais**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.
- SILVA, A.P. **Estudo da transformação da austenita retida induzida por deformação, em um aço AISI 4340 com estrutura multifásica**. 2006. 125 F. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.
- SMIT, J.; WJIN, H. P. J. **Ferrites: Physical Properties of Ferrimagnetic Oxides in Relation to their Technical Applications**. New York: Wiley, 1959.
- SPALDIN, N. A. **Magnetic materials: Fundamentals and applications**. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- TOTTEN G. E.; MACKENZIE D. S. **Analytical Characterization of Aluminum, Steel, and Superalloys**. New York: CRC Press, 2006.
- WOODALL, W. H.; MONTGOMERY, D. C. Research Issues and Ideas in Statistical Process Control. **Journal of Quality Technology**, v. 31, p. 376–386, 1999.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel Statistical Yearbook 2016**. Disponível em <www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html> Acesso em 16.fev.2019.
- VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

Kuan-Hong Xue, Gu-Ping Pan, Ming-Hu Pan, Mu Lu, Guang-Hou Wang. Magnetic behaviour of arrays of nickel nanowires with small diameter. **Superlattices and Microstructures**. v 33, p 119–129, 2003.