

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação do Mestrado

Ailson Cardoso Júnior

Influência do tratamento térmico de recozimento sobre as propriedades magnéticas
do aço GNO NO30-16 após o corte

Timóteo

Abril de 2024

Ailson Cardoso Júnior

Influência do tratamento térmico de recozimento sobre as propriedades magnéticas do aço GNO NO30-16 após o corte

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia de Materiais, na forma de Defesa na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonel Muniz Meireles

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Leandro Rocco

Timóteo

Abril de 2024

C268i Cardoso Júnior, Ailson.
Influência do tratamento térmico de recozimento sobre as propriedades magnéticas do aço GNO NO30-16 após o corte. / Ailson Cardoso Júnior. – 2024.
98 f. : il.
Orientador: Leonel Muniz Meireles.
Coorientador: Daniel Leandro Rocco.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Timóteo, 2024.
Bibliografia.

1. Aço elétrico (Propriedades magnéticas). 2. Aço (Tratamento térmico). 3. Materiais – Propriedades mecânicas. 4. Engenharia de Materiais. I. Meireles, Leonel Muniz II. Rocco, Daniel Leandro. III. Título.

CDU: 620.1-034.14



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 24 / 2024 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.036881/2024-53

Belo Horizonte-MG, 12 de agosto de 2024.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES
MAGNÉTICAS DO AÇO GNO NO30-16 APÓS O CORTE*

Autor: Ailson Cardoso Júnior

Orientador: Prof. Dr. Leonel Muniz Meireles

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 25 de abril de 2024 esta Dissertação:

Prof. Dr. Leonel Muniz Meireles (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Daniel Leandro Rocco (COORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Valmir Dias Luiz (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof. Dr. Jorge Luis Coleti (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Igor de Souza Lana Antoniazzi (EXAMINADOR EXTERNO)
University of Warsaw

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DFGTM (11.63.03)
Matrícula: 2647959

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1212397

(Assinado digitalmente em 12/08/2024 18:43)
LEONEL MUNIZ MEIRELES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DFGTM (11.63.03)
Matrícula: 1095529

(Assinado digitalmente em 12/08/2024 18:45)
VALMIR DIAS LUIZ
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1809797

(Assinado digitalmente em 14/08/2024 12:57)
IGOR DE SOUZA LANA ANTONIAZZI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.726-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **24**, ano: **2024**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de
emissão: **12/08/2024** e o código de verificação: **ef51dda421**

Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força e inspiração para concluir esta pesquisa.

Ao meu irmão Wilson Cardoso Neto (in memoriam) por sempre ter sido meu porto seguro, me dando forças e incentivo durante esta jornada.

A minha esposa Darla Cardoso, pelo seu companheirismo, apoio, carinho incondicional e vibração com as minhas vitórias. Ao meu filho Bernardo Wilson Cardoso por ter sido minha inspiração.

Ao Prof. Daniel Leandro Rocco que no momento difícil me deu a oportunidade e o apoio necessários na realização desta pesquisa.

Ao meu orientador Leonel Muniz Meireles pela dedicação e disponibilidade em sempre estar sanando minhas dúvidas e por sua orientação inteligente e esclarecedora.

E aos demais professores que contribuíram e influenciaram com seus exemplos para a concretização deste trabalho.

A agência financiadora FAPEMIG e ao CEFET-MG pelo acolhimento e ensinamentos transmitidos durante o mestrado.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

RESUMO

Com a crescente demanda mundial por energia elétrica, é muito importante a otimização de equipamentos elétricos e a utilização de materiais que melhorem a sua eficiência buscando-se um melhor aproveitamento energético e a consequente redução no consumo de energia. Diante desse cenário, os aços elétricos são materiais largamente utilizados na indústria, principalmente na construção de motores e transformadores, que são os principais responsáveis pelo funcionamento dos equipamentos elétricos, devido às suas boas propriedades magnéticas. No entanto, vale ressaltar que os aços elétricos, sejam de Grão Orientado (GO) ou de Grão Não Orientado (GNO), apresentam perdas energéticas, ainda que em menor escala que os demais tipos de aços, e que suas propriedades magnéticas dependem das diferentes condições adotadas para o processamento dos mesmos. Neste trabalho, foi realizado um estudo submetendo-se amostras de aço GNO laminado a frio ao corte mecânico e, posteriormente, a tratamentos térmicos de recozimento a 700 °C, 800 °C e 900 °C. Deste modo, considerando a influência do processamento mecânico sobre as propriedades magnéticas e estruturais de aços elétricos GNO, este trabalho investiga os efeitos do tratamento térmico em relação às perdas magnéticas por histerese, excesso e parasita, bem como nas propriedades mecânicas. Para tanto, foi aplicada no desenvolvimento deste projeto a análise da microestrutura das amostras de aços elétricos GNO através de ensaios de Microscopia Óptica, Microdureza e Microscopia eletrônica de varredura com auxílio da técnica EBSD. As propriedades magnéticas, como perdas magnéticas totais, permeabilidade e as componentes das perdas foram obtidas através de dados do ensaio magnético em chapa única. Os resultados de microscopia óptica revelam que o tratamento térmico não só influenciou nos tamanhos de grãos das amostras analisadas, mas também no alívio das tensões mecânicas dentro da rede cristalina. Na análise de microdureza, o material tratado à 900 °C apresentou valores superiores de dureza próxima a borda de corte do aço em relação aos dos aços tratados a 700 °C e 800 °C. Em relação às perdas magnéticas, o tratamento a 700 °C foi altamente eficaz e influenciou significativamente os componentes de perdas, sendo as perdas por excesso e histeréticas as mais impactadas pelo tratamento. A análise EBSD se mostrou eficiente ao apontar uma redução mais significativa na distorção dos grãos durante o tratamento térmico de

recozimento a 700 °C, corroborando com os resultados obtidos pelo ensaio magnético. Este estudo contribui para a compreensão do papel crucial do tratamento térmico no processamento de um aço GNO. A análise aprofundada dessas mudanças fornece informações valiosas para otimizar o comportamento mecânico e magnético do aço GNO em aplicações práticas.

Palavras-chave: aço elétrico; aço elétrico de grão não orientado; propriedades magnéticas; propriedades mecânicas; tratamento térmico.

ABSTRACT

Due to the worldwide rise in demand for electricity, the optimization of electrical equipment is of high importance, and so is the use of materials that provide better efficiency with the goal of better utilization of electricity and, consequently, reduction in its consumption. With this situation in mind, electrical steels are widely used in industry, specially on engines and converters, that carry the main responsibility for the operation of electrical equipment, given their magnetic properties. However, it is important to note that electrical steels, be they Grain-oriented or Non Grain-oriented, still present energy loss, though in smaller scale when compared to other types of steel. Also, their magnetic properties depend on the different conditions of their processing. For this research, samples of Cold rolled GNO underwent mechanical cutting followed by thermal treatment of 700 °C, 800 °C and 900 °C. By doing this, and considering the influence of the mechanical processing on magnetic and structural properties of electrical Grain-oriented steel, this paper investigates the effects of thermal treatment on magnetic losses due to hysteresis, excess and parasitic losses, as well as mechanical properties. With this goal in mind, microstructural analysis of samples of electrical Grain-oriented steel were made through test of Optical Microscopy, Microhardness and Electronic Microscopy scan with the aid of EBSD technique. The magnetic properties, such as total magnetic loss, permeability and loss components were obtained through single-plate magnetic test data. The results from optic microscopy reveal that the thermal treatment not Only influenced the size of the analyzed sample grains, but also the relief of the mechanical tensions within the crystal lattice. On the microhardness analysis, the material that was treated at 900 °C showed higher hardness close to the cut border when compared to steel treated at 700 °C or 800 °C. In regards to magnetic loss, the treatment at 700 °C was highly effective and significantly influenced the loss components, being that the loss by excess or hysteresis were the most impacted by the treatment. EBSD analysis proved to be efficient in showing a significant reduction in grain distortion throughout the thermal treatment at 700 °C, confirming results obtained by the magnetic test. This research contributes to the comprehension of the crucial role of thermal treatment on the processing of Grain-oriented steel. In-depth analysis of these variations provide

valuable information to optimize mechanical and magnetic behaviour of Grain-oriented steel and its practical applications.

Key words: electrical steel; grain-oriented electrical steel; magnetic Properties; mechanical Properties; Thermal treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático de (a) uma célula unitária com esferas rígidas na figura, (b) uma célula unitária com esferas reduzidas na figura e (c) um agregado de muitos átomos.	23
Figura 2 - (a) Modelo de Textura de Goss e (b) textura cúbica duplamente orientada.	24
Figura 3 - Curvas de magnetização de um monocristal de Fe-Si em 3 diferentes direções distintas.....	25
Figura 4 - Linhas de fluxo magnético através da área A imersa em um campo magnético.....	27
Figura 5 - Demonstração da Curvatura da parede do domínio sob a ação do campo magnético aplicado.	28
Figura 6 - Modificação da estrutura de domínios durante o processo de magnetização de um material ferromagnético. Passando pelo estágio (a) Desmagnetizado, (b) parcialmente magnetizado, (c) Rotação irreversível da magnetização dos domínios e à (d) Rotação e Saturação dos domínios.....	29
Figura 7 - (a) Comportamento de B (T ou Wb/m ²) em função de H (A/m). (b) Ciclo de Histerese para um material ferromagnético.	30
Figura 8 - Subdivisão da perda histerética nas componentes de baixa indução e alta indução.....	31
Figura 9 - Efeito das correntes de Foucault em (a) material maciço e (b) material laminado.....	32
Figura 10 - Comparativo das Perdas Totais e suas componentes histerética (P _h), parasita (P _p) e anômala (P _a) para seis diferentes aços elétricos.....	34
Figura 11 - Diagrama de fases ferro - carvão de ferro	35
Figura 12 - (a) o desenho esquemático do processo de punção; (b) a peça punçada e (c) o refugo.	39
Figura 13 - a) Distribuição das lâminas em uma guilhotina; b) Detalhe das lâminas durante o corte da chapa.	39
Figura 14 - Principais regiões da superfície de corte da lâmina por Guilhotina.....	40
Figura 15 - Micrografias do perfil de corte.....	41

Figura 16 - Comparação das Curvas de histerese das amostras “corte + TT” e “TT + corte”	43
Figura 17 - Equipamento de Microscopia Óptica da marca ZEISS.	44
Figura 18 - Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Carl Zeiss.	45
Figura 19 - Esquema simplificado do quadro Epstein formado por quatro bobinas de excitação em série conectadas à fonte de alimentação e quatro bobinas de medição.	47
Figura 20 - Representação esquemática do sistema SST	48
Figura 21 - Representação esquemática do ângulo obtido pelo penetrador piramidal de base quadrada de diamante.....	49
Figura 22 - Representação esquemática das medidas das diagonais “d1” e “d2” fornecidas pela máquina de ensaio Vickers.	49
Figura 23 - Representação esquemática da distância mínima entre as indentações de ensaio e a aresta da amostra para o ensaio de dureza Vickers.....	50
Figura 24 – Amostras da chapa de aço embutidas: (a) seção e (b) superfície.	52
Figura 25 - Representação Esquemática do Procedimento Experimental do Projeto.	54
Figura 26 - (a) forno MTI Corp (b) computador utilizado para gerenciar o software Furnace Monitoring.	56
Figura 27 - Representação esquemática do sistema de tratamento térmico.	56
Figura 28 - Representação esquemática da curva de tratamento térmico.	57
Figura 29 - Microscópio Óptico da marca Fortel utilizado para caracterização microestrutural das amostras.	58
Figura 30 - Messtechnik modelo MPG100 com balança acoplada utilizado nas medições de perdas magnéticas.....	59
Figura 31 - ilustração das chapas de aço com dimensões de (a) 30 x 200 mm (b) 15 x 200 mm (c) 7,5 x 200 mm.....	60
Figura 32 - Micrografia do aço NO30-16 em seu estado de entrega, ampliação de 10x.	63
Figura 33 - Fotomicrografia do aço GNO NO30-16 tratado à 700 °C, ampliação de 4X.....	64
Figura 34 - Fotomicrografia do aço GNO NO30-16 tratado à 800 °C, ampliação de 4X.....	64

Figura 35 - Fotomicrografia do aço GNO NO30-16 tratado à 900 °C, ampliação de 4X.....	65
Figura 36 - Resultado da medição da área média dos grãos.....	66
Figura 37 - Resultado da medição da largura média de grão.....	67
Figura 38 - Corpo de prova (a) antes e (b) após ser submetido ao ensaio mecânico de microdureza Vickers.....	68
Figura 39 - Perfil de microdureza do aço NO30-16 para o tratamento térmico à 700 °C.	69
Figura 40 - Perfil de microdureza do aço NO30-16 para o tratamento térmico à 800 °C.	69
Figura 41 - Perfil de microdureza do aço NO30-16 para o tratamento térmico à 900 °C.	70
Figura 42 - Comparativo dos perfis de microdureza do aço NO30-16 sem tratamento térmico e tratado termicamente à 700 °C, 800 °C e 900 °C.	71
Figura 43 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 20 Hz.	72
Figura 44 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 30 Hz.	73
Figura 45 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 50 Hz.	73
Figura 46 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 60 Hz.	74
Figura 47 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1 T e frequência de 400 Hz.	74
Figura 48 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 20 Hz.	75

Figura 49 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 30 Hz.....	76
Figura 50 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 50 Hz.	76
Figura 51 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 60 Hz.....	77
Figura 52 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1 T e frequência de 400 Hz.....	77
Figura 53 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 400 Hz.....	78
Figura 54 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 30 Hz.....	79
Figura 55 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 50 Hz.....	79
Figura 56 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 60 Hz.....	80
Figura 57 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 60 Hz.....	80
Figura 58 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a perda magnética total do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1 T.....	82
Figura 59 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a perda magnética total do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1 T.....	82
Figura 60 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a perda magnética total do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1 T.....	83

Figura 61 - Resultado da contribuição de cada perda para a perda total em função da frequência para lâminas com 2 cortes (7,5 mm).	84
Figura 62 - Resultado da contribuição de cada perda para a perda total em função da frequência para lâminas sem cortes (30 mm).	85
Figura 63 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a permeabilidade relativa do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T.	86
Figura 64 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a permeabilidade relativa do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T.	87
Figura 65 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a permeabilidade relativa do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T.	87
Figura 66 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO no estado de entrega, antes do corte.....	88
Figura 67 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO após o corte e sem tratamento térmico.....	89
Figura 68 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO após tratamento térmico à 700 °C.	89
Figura 69 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO após tratamento térmico à 800 °C.	90
Figura 70 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO após tratamento térmico à 900 °C.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeito dos diferentes tipos de corte e tratamento térmico nas propriedades magnéticas das amostras de um aço GNO E230.	42
Tabela 2 - Composição Química do aço GNO NO30-16.....	51
Tabela 3 - Identificação das amostras e respectivas condições de análise	60
Tabela 4 - Parâmetros de medida para ensaio Single Sheet.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
EBSD	<i>Electron Backscatter Diffraction</i>
EE	Estado de Entrega
GO	Grão orientado
GNO	Grão não-orientado
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Óptico
SST	<i>Single Sheet Tester</i>
TR	Tratamento Térmico de Recozimento
TT	Tratamento Térmico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo Geral	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3.1 Aços Elétricos	22
3.2.2 Tipos de Perdas Magnéticas	27
3.3 Tratamento térmico de recozimento	35
3.3.1 Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades magnéticas do aço	36
3.4 Ensaios Microscópicos	43
3.4.1 Microscopia Óptica	43
3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	44
3.5 Ensaios Magnéticos	46
3.5 Ensaios Mecânicos	48
3.5.1 Dureza/Microdureza Vickers	48
4.1 Material	51
4.1.1 Amostras	51
4.1.1.1 Corte	52
4.1.1.2 Embutimento	52
4.1.1.3 Lixamento e Polimento	53
4.1.1.5 Limpeza	53
4.1.1.6 Ataque Químico	53
4.2 Métodos	54
4.2.1 Tratamento Térmico	55

4.2.2 Microscopia Óptica	57
4.2.4 Medições de Perdas Magnéticas (Brockhaus).....	59
4.2.5 Separação das perdas magnéticas.....	61
4.2.6 Permeabilidade	62
4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (Técnica EBSD)	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1 Microestrutura e Tamanho de Grão.....	63
5.2 Ensaio de Microdureza Vickers	68
5.3 Caracterização Magnética	72
5.3.1 Perda Magnética Total.....	81
5.3.2 Separação das perdas magnéticas.....	84
5.3.3 Permeabilidade	86
5.4 Análise da textura cristalográfica via EBSD.....	88
6 CONCLUSÃO	92
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda mundial por energia elétrica, torna-se necessária a adoção de medidas que visam o desenvolvimento de tecnologias que permitam a otimização dos níveis de eficiência dos recursos energéticos. Nesse contexto, máquinas e equipamentos elétricos, principalmente no setor industrial, desempenham um papel fundamental no aumento da quantidade de energia elétrica consumida atualmente.

No cenário sustentável e econômico, uma alternativa para um melhor aproveitamento energético nos motores elétricos, que são os principais responsáveis pelo funcionamento dessas máquinas e equipamentos, é a utilização dos aços elétricos, também conhecidos como aços siliciosos, que são materiais com boas propriedades magnéticas, aplicados na produção, transmissão e utilização da energia elétrica.

Os aços elétricos são caracterizados por se tratar de materiais de fácil magnetização que não tem como objetivos serem bons condutores de eletricidade, mas sim bons condutores do fluxo magnético, que circula no interior do material. O termo “aço elétrico” abrange tanto os aços baixo carbono utilizados para fins eletromagnéticos quanto os aços silícios, que se diferem dos aços ao carbono por terem uma maior porcentagem de silício, conferindo ao material melhores propriedades magnéticas. Materiais metálicos como o aço elétrico são classificados como material ferromagnético, ou seja, quando submetidos a um campo magnético externo, seus domínios magnéticos tendem a se orientarem na direção de aplicação desse campo, produzindo uma resposta, conhecida como indução magnética e ainda que na ausência de um campo externo, apresentam magnetizações grandes e permanentes (LANDGRAF, 2002; BOTELHO, 2012; CALISTER, 2020; GUIMARAES, 2009).

A seleção dos aços elétricos para aplicação na indústria é realizada de acordo com suas principais propriedades: fácil magnetização e pequena retenção de magnetização residual. No entanto, estes ainda apresentam perdas de energia por dissipação de calor, conhecidas como perdas magnéticas. Visando alcançar um rendimento energético ideal, faz-se necessário maximizar a permeabilidade do material, desta forma é preciso reduzir as perdas energéticas associadas à excitação

em corrente alternada a partir do aumento do campo magnético externamente aplicado (CARDOSO, 2005).

Devido à sua boa eficiência energética, os aços elétricos de grão não orientado (GNO) são alternativas econômicas para a indústria siderúrgica e elétrica, sua constante aplicação baseia-se em suas propriedades magnéticas eficientes e características microestruturais. Atualmente, visando minimizar perdas magnéticas no produto, o aço GNO tornou-se um instrumento largamente utilizado na busca por economia elétrica, representando a maior porcentagem de participação na fabricação de bens elétricos, em motores e máquinas elétricas (MONTEIRO, 2015).

Em seu trabalho intitulado “Microestrutura e Propriedades Magnéticas”, Landgraf (2014) cita que cerca de 10 milhões de toneladas de aço eram consumidos anualmente, naquela data, para fins de explorar suas propriedades magnéticas. Contudo, Landgraf (2002), já havia alertado para uma possível mudança no mercado de eletrodomésticos, pois, pressionados pelos governos, os fabricantes passariam a buscar pela redução do consumo de energia elétrica, que levaria a utilização de aços com menores perdas magnéticas, a fim de aumentar a eficiência energética de seus motores.

Devido à problemática supracitada e a crescente demanda por aços elétricos, faz-se necessário a busca pela otimização do desempenho eletromagnético nesses materiais com o objetivo de desenvolver alternativas de maior eficiência energética dos motores elétricos. Portanto, o presente trabalho pretende propor uma alternativa de tratamento térmico de recozimento como forma de recuperar as propriedades magnéticas e estruturais de aços elétricos GNO após o corte. Além disso, será feita a investigação, caracterização e análise de cada fenômeno de perda - histerese, parasita ou excesso – nas perdas totais do GNO em função de cada temperatura de recozimento – 700 °C, 800 °C e 900 °C - e das frequências (Hz) de trabalho utilizadas no processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O trabalho busca encontrar um tratamento térmico de recozimento final favorável ao desempenho magnético em chapas de aço silício, no qual possa-se obter uma perda magnética minimizada. O objetivo desta pesquisa é caracterizar amostras de aço GNO quanto ao tamanho do grão, perfil de microdureza e propriedades magnéticas antes e após o recozimento final. É também objetivo desta pesquisa observar e comparar as propriedades estruturais e magnéticas das amostras tratadas termicamente.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar, através do ensaio magnético de chapa única, a influência da temperatura máxima dos tratamentos térmicos de recozimento sobre as propriedades magnéticas das amostras.
- Estimar, com base na teoria da separação das perdas magnéticas, qual (ou quais) parcelas das perdas dependem de forma mais acentuada dos processos aplicados.
- Averiguar a evolução da microestrutura, por meio das análises de microscopia óptica e micro dureza Vickers, das amostras de aço GNO laminado a frio antes e após o recozimento final.
- Comparar as propriedades magnéticas do aço GNO, com o auxílio do *Single Sheet*, antes e após as chapas desse material serem submetidas a ciclos de tratamento térmico, em função de cada temperatura - 700, 800, 900 °C - de recozimento aplicada no processo.
- Determinar, utilizando-se a microscopia de eletro varredura através da técnica de difração de elétrons retroespehados (EBSD), a evolução da textura cristalográfica das amostras de aço GNO laminado a frio antes e após o recozimento final.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços Elétricos

Segundo Assis *et al.*, (2011) os aços elétricos interessam a dois segmentos econômicos no Brasil, a siderurgia e a indústria de eletricidade. Dentre os mais variados tipos de aços disponíveis no mercado, estes se destacam por serem materiais magneticamente macios, ou seja, de fácil magnetização. (LANDGRAF *et al.*, 2002).

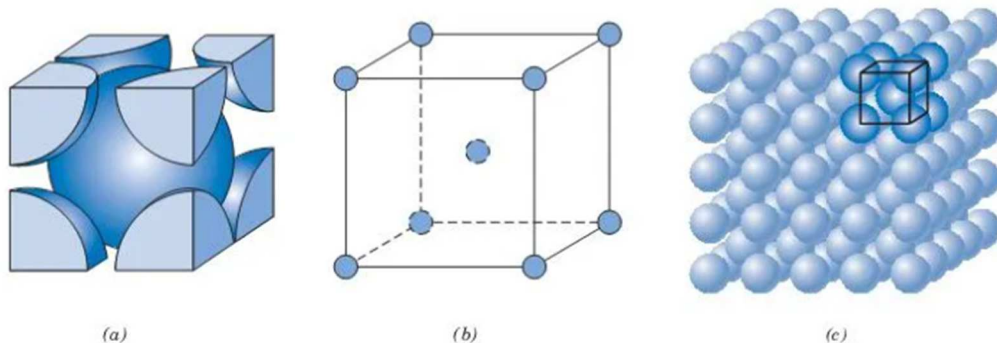
Aços elétricos são ligas de aço carbono contendo aproximadamente 3,5% de silício em sua composição química. Chuen (1980) defende a ideia que os estudos antigos (Séc. XX) comprovaram que a resistividade do ferro aumentava com a presença do silício nas ligas de Fe-Si. De acordo com Hou (1996, *apud* ARAÚJO *et al.*, 2019) a adição de Silício nas ligas aço carbono diminuem a ocorrência correntes parasitas induzidas (categoria de perda magnética) dentro do material condutor quando sujeito a um campo magnético e aumentam a resistividade do mesmo. De acordo com Souza (2013), apesar de o aumento do teor de silício melhorar as características magnéticas dos aços elétricos, este por sua vez, provoca o aumento da dureza e queda de ductilidade do material, além disso, é possível também observar o aumento nos limites de resistência elétrica e de escoamento à medida em que se aumenta o teor de silício, dificultando sua trabalhabilidade a frio, o que provoca uma considerável redução no rendimento dos processos.

A ampla utilização dos aços elétricos atribui-se ao fato desses materiais terem a capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético aplicado, essa propriedade conhecida como alta permeabilidade magnética é o que possibilita a existência de máquinas elétricas como motores, transformadores, geradores, entre outros. Tais máquinas elétricas, por sua vez, dependem da alta permeabilidade magnética e de baixas perdas magnéticas, em função da dissipação de energia associada à excitação em corrente alternada, para garantir um melhor rendimento energético (LANDGRAF, 2002).

3.2 Textura Cristalográfica

Em nível microscópico, todos os metais sob condições normais de solidificação são integralmente compostos por micro cristais, formando uma estrutura cristalina a partir da repetição desse arranjo. No caso das ligas de ferro, aqui incluem-se os aços elétricos GNO, no interior de cada cristal os átomos estão organizados num empacotamento tridimensional constituído por arranjos cúbicos com $1/8$ de átomo em cada vértice e um átomo central, que juntos formam cristais irregulares chamados grãos. As arestas de milhões desses cubos, também chamados de células, alinham-se paralelamente, de maneira que cada uma das 3 arestas dos cubos de um determinado cristal está orientada em determinada direção do espaço. Pode-se observar respectivamente as configurações de uma célula unitária com esferas rígidas na figura 1 (a), esferas reduzidas na figura 1 (b) e um agregado com vários átomos na figura 1 (c) (CALLISTER, 2002).

Figura 1 - Desenho esquemático de (a) uma célula unitária com esferas rígidas na figura, (b) uma célula unitária com esferas reduzidas na figura e (c) um agregado de muitos átomos.

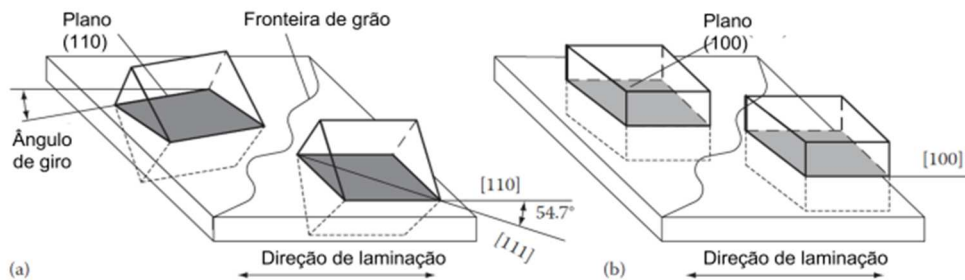


Fonte: (CALLISTER, 2002).

Os aços elétricos são divididos em duas classes a partir da textura do material produzido: aços elétricos de grão orientado (GO) e aços elétricos de grão não orientado (GNO). Os aços GO apresentam uma condição na qual a distribuição de orientações dos seus grãos não é aleatória, tal condição é denominada orientação preferencial ou textura cristalográfica. Produzido de maneira a induzir uma forte textura cristalográfica do tipo (110) [001], conhecida como textura de GOSS, figura 2 (a), o aço GO é caracterizado por possuir excelentes propriedades magnéticas, mas apenas em uma direção, devido a quase todos os cristais que compõem a chapa

terem seus planos (110) paralelos à direção longitudinal da superfície da chapa (BOTELHO, 2012; LANDGRAF, 2002).

Figura 2 - (a) Modelo de Textura de Goss e (b) textura cúbica duplamente orientada.



Fonte: Adaptado (TUMANSKI, 1928).

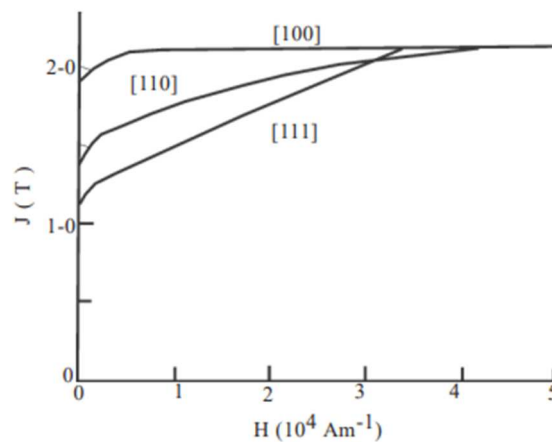
Em função de suas excelentes propriedades magnéticas na direção da laminação da chapa, o aço GO torna-se adequado para o uso em núcleos estáticos, sendo utilizado preferencialmente em transformadores cujo fluxo magnético transita em um único sistema de plano e direção (SANTOS, 2005).

Por outro lado, os aços GNO são utilizados em motores elétricos, onde o fluxo elétrico é constantemente alternado. Nestes aços, a textura é denominada de fibra, a qual caracteriza-se por possuir uma família de componentes ao invés de um único componente, uniformizando a magnetização do ferro a qualquer direção cristalográfica. Os aços GNO apresentam uma textura pronunciada e valores de propriedades magnéticas semelhantes em todas as direções do plano da chapa. O GNO é amplamente explorado em aplicações cuja condição isotrópica de propriedades no plano da chapa é um fator crítico, nesse aspecto pode-se destacar os motores elétricos e os transformadores pequenos, onde o fluxo magnético muda constantemente de direção (BOTELHO, 2012; LANDGRAF, 2002; NA; FLATAU, 2012).

De acordo com CULLITY (1972) o eixo de magnetização espontânea nos cristais de Fe- α é o $\langle 001 \rangle$, tornando mais fácil magnetizá-lo na direção $\langle 100 \rangle$ do que em qualquer outra direção, em contrapartida a pior direção para a magnetização é a $\langle 111 \rangle$. A figura 3 demonstra curvas de magnetização para as direções $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$

e $\langle 111 \rangle$, evidenciando que na direção $\langle 100 \rangle$ atinge-se a magnetização de saturação com campos muito baixos, por outro lado nas direções $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$ exigem-se campos muito mais altos para se chegar à saturação.

Figura 3 - Curvas de magnetização de um monocristal de Fe-Si em 3 diferentes direções distintas.



Fonte: Adaptado (CULLITY, 1976).

Ainda que os aços GNO magnetizem-se em todas as direções do plano da chapa, é sabido que esta nomenclatura é equivocada, visto que em conformidade com a anisotropia de propriedades magnéticas em função das diferentes direções cristalográficas, o ideal seria dispor de chapas com todos os grãos com planos $\{100\}$, paralelos à superfície da chapa e direções $\langle 100 \rangle$ presentes em todas as direções no plano da chapa. Todavia, atualmente não há um processo que produza aços GNO na textura ideal, fazendo com que, muitas vezes exibam um componente Goss pronunciado, para que haja pelo menos uma direção de fácil magnetização paralela à superfície da lâmina (LANDGRAF, 2002).

3.2.1 Permeabilidade e Perda Magnética dos Aços Elétricos

Embora os equipamentos elétricos possuam alta eficiência, a cada vez que são magnetizados e desmagnetizados ocorrem perdas energéticas em forma de calor (Efeito Joule), denominadas perdas magnéticas, que representam uma fatia considerável das perdas totais dos aços GNO. Dessa forma, o estudo das propriedades magnéticas é de suma importância para esse grupo de materiais, uma vez que estas estão diretamente relacionadas com as perdas magnéticas e, conseqüentemente, com o consumo de energia elétrica nos equipamentos nos quais os aços elétricos são aplicados.

A permeabilidade magnética, propriedade essencial dos aços elétricos, é uma constante de proporcionalidade que resulta da relação entre o campo magnético (H) e o campo induzido (B). Para ligas ferromagnéticas, caso dos aços elétricos, define-se como a facilidade que um determinado meio oferece ao estabelecimento de um campo magnético, ou seja, é a capacidade de amplificação do campo magnético aplicado ou a facilidade que o material oferece ao fluxo das linhas de força magnéticas. (BASTOS, 1996). Em termos matemáticos, a permeabilidade magnética (μ) é a relação entre o valor da indução magnética " B " e a intensidade do campo magnético " H " que a originou, seguindo a equação 1 abaixo:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1)$$

A indução magnética indicada por B corresponde a medida da magnitude da intensidade do campo no interior de uma substância (CALLISTER, 2020).

As perdas magnéticas são o critério mais importante dos aços elétricos, uma vez que a variação do fluxo magnético nesse meio condutor produz algumas correntes indesejáveis, que acabam por provocar perdas de energia nos equipamentos nos quais é utilizado. Tais perdas, segundo o modelo fenomenológico proposto por Bertotti, podem ser por histerese, por correntes induzidas ou parasíticas clássicas (devido a correntes de Foucault) e perdas anômalas ou por excesso, estas serão detalhadas na seção 3.2.2 (MEURER, 2005).

O valor das perdas magnéticas dos aços elétricos também está relacionado a características eletromagnéticas, tais como indução máxima e frequência de excitação; de características físicas da amostra, como espessura e direção de corte

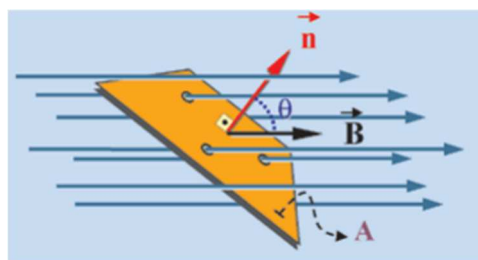
da amostra em relação à direção de laminação, resistividade elétrica e densidade; além disso, características estruturais como tamanho e textura do grão também são levadas em consideração (BOHN *et al.*, 2004).

O efeito da composição sobre as perdas dos aços elétricos é de suma importância, visto que os grupos de aços elétricos GNO se diferem basicamente quanto ao teor de silício, alumínio e fósforo. A adição do silício, por exemplo, aumenta a resistividade elétrica e diminui a anisotropia do aço GNO, em contrapartida, diminui a indução do material e o deixa quebradiço, o que pode inviabilizar sua aplicação para processos que exijam laminação do aço (BOHN *et al.*, 2004).

3.2.2 Tipos de Perdas Magnéticas

A magnetização é um fenômeno reversível, o estudo realizado por Landgraf (2002) apontou que o processo cíclico de magnetização e desmagnetização obtido com corrente alternada na frequência de 60Hz leva à ocorrência de dissipação de energia, essa energia perdida é proporcional à histerese. Além disso, durante o funcionamento de um equipamento composto com lâminas de aços GNO, a passagem de fluxo magnético, representada na figura 4, produz correntes indesejáveis causando perdas energéticas por correntes induzidas ou parasíticas clássicas (devido a correntes de Foucault). O componente de perdas anômalas ou por excesso é o que falta para completar o valor medido empiricamente para as perdas magnéticas totais (PRINCEPE, 2008).

Figura 4 - Linhas de fluxo magnético através da área A imersa em um campo magnético.

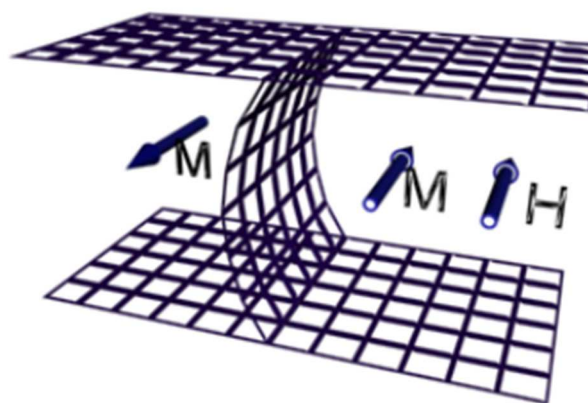


Fonte: (PRINCEPE, 2008)

No decorrer da operação de uma máquina elétrica o campo magnético e os domínios magnéticos do material mudam de direção e sentido. De acordo com Oliveira Júnior (2014), as perdas histeréticas estão associadas com a energia necessária para deslocar as paredes dos domínios magnéticos, essa movimentação das paredes somada a rotação dos domínios a cada troca de orientação para que se alinhem no sentido do campo magnético aplicado, dissipa certa quantidade de energia na forma de calor (LANDGRAF, 2002).

O deslocamento das paredes do domínio acontece quando é aplicado um campo de baixa intensidade ocasionando o aumento do volume dos domínios e até mesmo a flexão das paredes quando estas se ancoram em possíveis defeitos na rede cristalina do material. Vale ressaltar que, o arqueamento da parede do domínio é reversível, quando o campo magnético aplicado é reduzido a zero, as paredes do domínio tendem a se endireitar, recuperando a configuração original do domínio. Para melhor entendimento deste fenômeno a figura 5 demonstra o efeito da ação do campo magnético aplicado às paredes do domínio, onde “M” representa a direção de magnetização e “H” representa a direção do campo aplicado (PULNIKOV, 2004).

Figura 5 - Demonstração da Curvatura da parede do domínio sob a ação do campo magnético aplicado.



Fonte: (PULNIKOV, 2004).

Já a rotação dos domínios ocorre quando há aplicação de campos moderados, como pode ser observado na figura 6 (a) os momentos atômicos inicialmente desalinhados com o campo 6 (b) superam a energia de anisotropia, 6 (c) rotacionam primeiramente

para uma direção de fácil magnetização e posteriormente quando o campo aplicado é intenso, os momentos magnéticos 6 (d) alinham-se a paralelamente à direção do plano atingindo a rotação reversível e a saturação (JILES, 1991).

Figura 6 - Modificação da estrutura de domínios durante o processo de magnetização de um material ferromagnético. Passando pelo estágio (a) Desmagnetizado, (b) parcialmente magnetizado, (c) Rotação irreversível da magnetização dos domínios e à (d) Rotação e Saturação dos domínios.

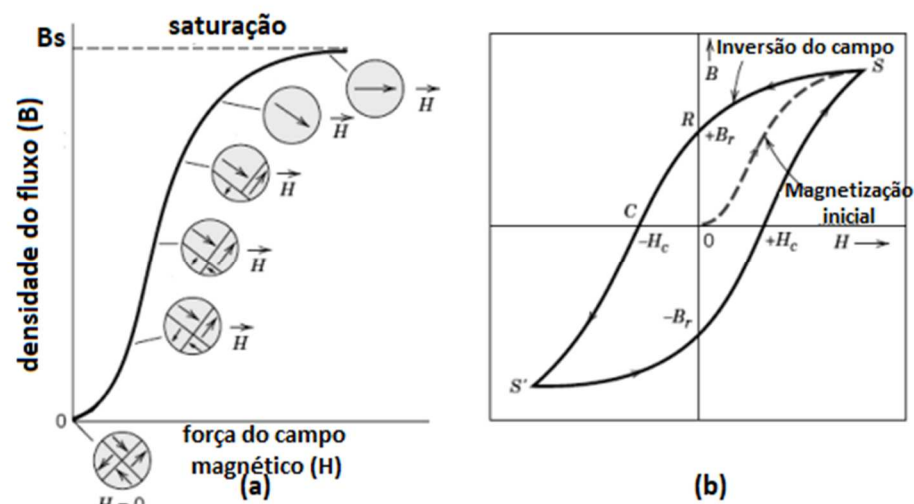


Fonte: Adaptado (JILES, 1991).

Conforme ilustrado na figura 6, os níveis de magnetização de um material ferromagnético aumentam até atingir o nível de saturação devido ao alinhamento de domínios e ao chegar nesse nível uma quantidade de energia é acumulada. A partir desse ponto de saturação, o aumento da intensidade do campo externo não fornece nenhuma alteração considerável nos níveis de magnetização do material. Ao reduzir a intensidade do campo magnético aplicado, os níveis de magnetização induzidos no aço elétrico diminuem, todavia, a linha da curva descendente não retorna sobre a linha ascendente, a área interna da figura formada pelas linhas ascendente e descendente apontam a dissipação de energia, histerese (CALLISTER, 2020).

A figura 7 (a) representa as estruturas esquemáticas de domínio em vários pontos ao longo da curva B (fluxo magnético) em função de H (campo magnético). Inicialmente, os momentos dos domínios constituintes estão orientados aleatoriamente. À medida que um campo externo (H) é aplicado, os domínios que estão praticamente alinhados mudam de forma e de tamanho de acordo com o movimento dos contornos. Esse processo continua até o momento em que a amostra se torne um único domínio em função do aumento da força do campo. A figura 7 (b), demonstra o ciclo de histerese para um material ferromagnético, onde a partir do ponto de saturação, dado em S, à medida que o campo H é reduzido pela reversão da direção do campo e a curva não retorna pelo mesmo trajeto, é produzido um efeito de histerese, onde o fluxo do campo B se defasa em relação ao campo H (CALLISTER, 2020).

Figura 7 - (a) Comportamento de B (T ou Wb/m²) em função de H (A/m). (b) Ciclo de Histerese para um material ferromagnético.



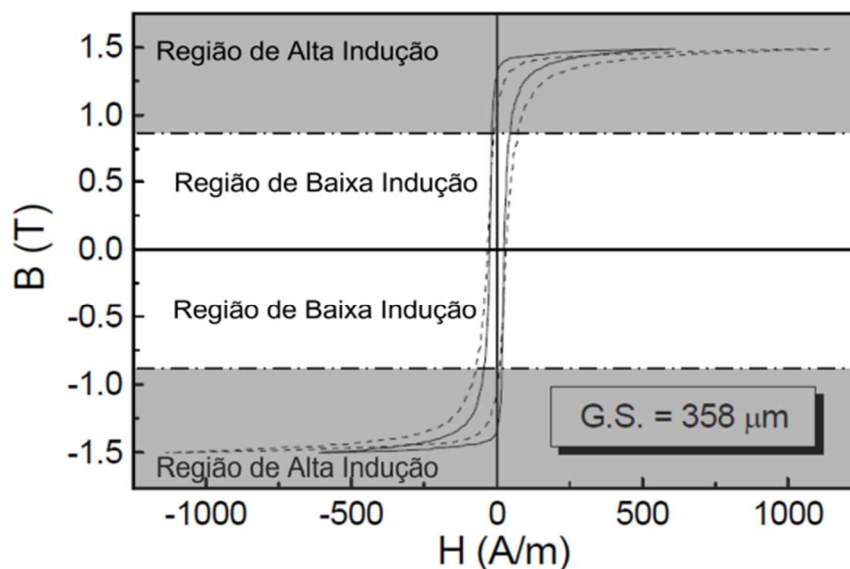
Fonte: Adaptado (CALLISTER, 2012)

As perdas magnéticas podem ser mensuradas, em conformidade com a norma brasileira NBR 5161:1977, a partir da divisão da área do interior da curva de histerese pela densidade, resultando na energia mensurada por ciclo em unidades de J/m³. É importante ressaltar, que em condições quase estáticas a área da histerese é menor do que quando determinada em frequências mais altas, isso se justifica ao fato da energia dissipada em condição quase estática estar diretamente ligada às mudanças

bruscas de magnetização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977; LANDGRAF; CAMPOS; LEICHT, 2008).

LANDGRAF *et al.* (1999), sugerem que as perdas totais podem ser separadas em duas componentes: perdas em baixa indução, relacionada aos processos de magnetização que ocorrem em $B < B_{Pmáx} \sim 0.8$ T e perdas em alta indução, associada apenas à rotação de magnetização. Para melhor entendimento, a figura 8 apresenta uma curva de indução mostrando as duas regiões de induções descritas.

Figura 8 - Subdivisão da perda histerética nas componentes de baixa indução e alta indução.



Fonte: (LANDGRAF, 2002).

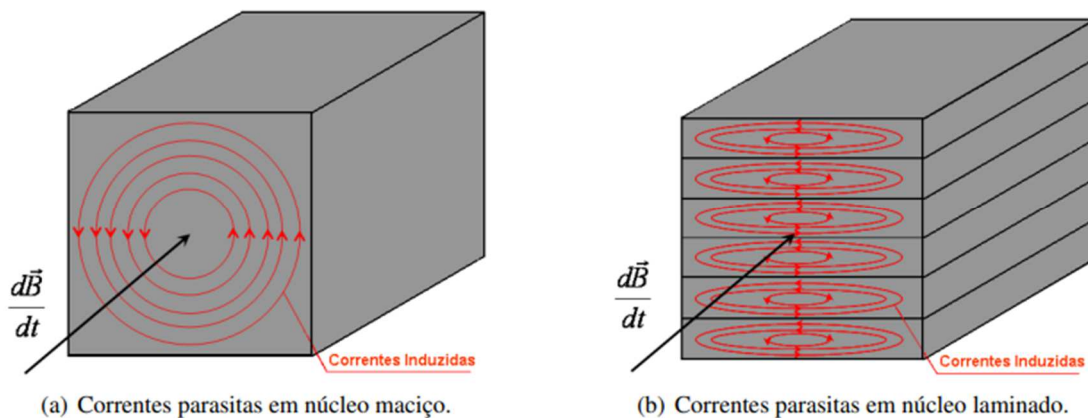
As perdas por correntes de Foucault, também conhecidas por perdas por correntes induzidas ou parasíticas clássicas, ocorrem em decorrência do surgimento de correntes elétricas no núcleo ferromagnético quando este é percorrido por um fluxo variável no tempo (Lei de Faraday). Este tipo de corrente aumenta as perdas magnéticas ao provocar a dissipação de energia por efeito Joule à medida em que transita em um meio condutor (NEGRI, 2011).

De acordo com Batistela (2001), ao analisar a seção transversal de um material ferromagnético, pode-se perceber que a tendência é que esse material apresente a

formação de anéis de correntes induzidas perpendiculares à direção do fluxo. Para dificultar a formação das correntes parasíticas, opta-se pela otimização da forma da lâmina, através da laminação do material ferromagnético, além de incluir substâncias, como por exemplo a inserção de silício ao ferro, que conferem maior resistividade elétrica ao material, e, conseqüentemente, diminuem a densidade da corrente.

O fenômeno descrito por Batistela (2001) pode ser observado no comparativo da figura 9 (a) que ilustra o efeito da corrente de Foucault em um núcleo ferromagnético maciço, enquanto a figura 9 (b) demonstra o mesmo efeito em um núcleo laminado, ambas com um campo magnético variante no tempo atravessando perpendicularmente a sua seção transversal.

Figura 9 - Efeito das correntes de Foucault em (a) material maciço e (b) material laminado.



Fonte: (ANJOS, 2010)

Sob forte influência da composição química e espessura do material, as perdas por correntes de Foucault são reduzidas à proporção em que se diminui a espessura da lâmina, devido ao aumento da dificuldade para a formação dos anéis de corrente. A equação 2 permite calcular o valor médio das perdas magnéticas por correntes parasíticas (P_p) em W/kg para uma lâmina retangular.

$$P_p = \frac{(\pi B f e)^2}{6 d \rho} \quad (2)$$

Onde P_p é a perda por corrente parasítica (W/Kg), B é a indução máxima do ensaio (T), f é a frequência (Hz), e é a espessura da lâmina (mm), d é a densidade do material (kg/m³) e ρ é a resistividade elétrica ($\mu\Omega\text{m}$). Vale mencionar que, a aplicabilidade dessa equação para o cálculo de perdas parasíticas limita-se a frequências não muito elevadas, abaixo de 500Hz (CARDOSO, 2010).

Por fim, as perdas anômalas, também chamadas de perdas por excesso, são as perdas resultantes da diferença entre a perda total e a soma das parcelas de perdas por histerese e correntes parasíticas, sua presença atribui-se ao atrito decorrente da movimentação das paredes de domínio durante a magnetização (BOHN *et al.*, 2004).

Segundo Meurer (2014), as perdas anômalas possuem difícil mensuração prática, uma vez que são afetadas por coeficientes como tamanho do grão, condutividade elétrica, campo coercitivo, entre outros coeficientes empíricos. A evidência dessa relação é fornecida em alguns estudos, de acordo com Shimanaka *et al.* (1982, *apud* SANTOS, 2017), o aumento do tamanho de grão provoca uma contínua redução das perdas histeréticas ao passo que as perdas anômalas crescem, havendo uma limitação para o crescimento do grão ótimo em torno de 100 μm e 150 μm .

De acordo com Bertotti (1988), a teoria da separação das componentes das perdas magnéticas total pode ser calculada pela soma das três parcelas de perdas magnéticas citadas anteriormente (histerese, correntes de Foucault e anômalas), através da equação 3:

$$P_t = P_h + P_p + P_e \quad (3)$$

Onde P_h , P_p e P_e representam as perdas por histerese, parasita ou clássica e a perda por excesso ou anômala, respectivamente, resultando na perda total (P_t) de determinado material magnético na condição analisada.

A descrição matemática da equação da perda total em W/kg pode ser escrita como conforme a Equação 4:

$$P_t = C_h \cdot f + C_p \cdot f^2 + C_e \cdot f^{1,5} \quad (4)$$

Em que C_h é a constante de perda histerética, C_p é a constate de perda parasita e C_e é a constante de perda por excesso, a frequência é representada por f (Hz).

Dentre os coeficientes, o valor que pode ser calculado teoricamente é o coeficiente de perda parasita (C_p), expresso pela Equação 5:

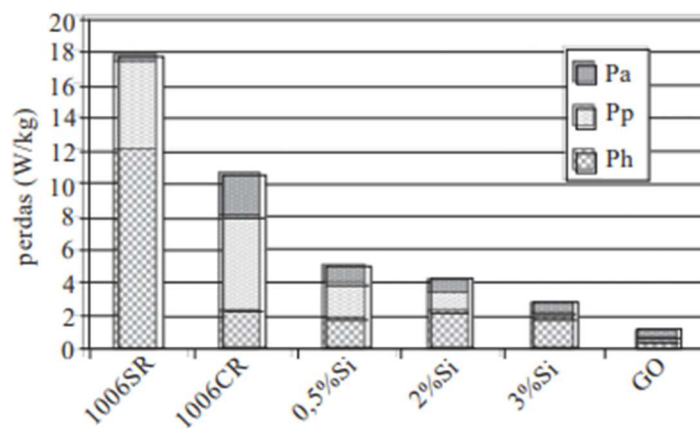
$$C_p = \frac{\pi^2 \cdot d^2 \cdot B^2 \cdot \theta}{6 \cdot \rho} \quad (5)$$

Onde d (m) é a espessura do material, B (T) é a indução magnética, θ ($\Omega \cdot m$) é a condutividade elétrica e ρ (kg/m^3) é a densidade do material.

Em contrapartida, as constantes das perdas por histerese (C_h) e por excesso (C_e) são determinados através de modelos numéricos.

Devido a importância do rendimento energético das máquinas elétricas as perdas magnéticas constituem o principal parâmetro técnico de seleção e controle desses materiais, para avaliar tais impactos LANDGRAF (2002) compara os valores das perdas magnéticas totais em 6 diferentes aços. A figura 10 ilustra os resultados obtidos, os quais demonstraram que o recozimento bem como a adição de silício reduziu as perdas totais. O aço ABNT 1006 sem recozimento (SR) tem perdas de 18 W/kg. Ao passo que o aço ABNT 1006 com recozimento (CR) possui perdas de 10 W/kg. Já os aços com 0.5%, 2% e 3% de Si possuem respectivamente perdas na ordem de 4,2 W/kg, 4 W/kg e 3,5 W/kg respectivamente.

Figura 10 - Comparativo das Perdas Totais e suas componentes histerética (P_h), parasita (P_p) e anômala (P_a) para seis diferentes aços elétricos.



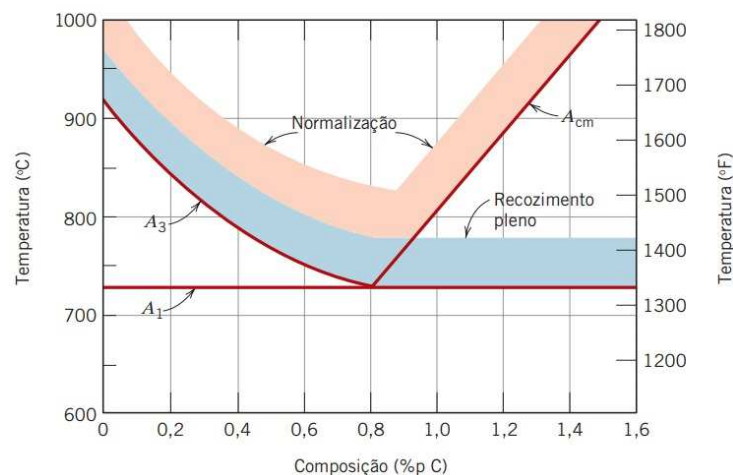
Fonte: (LANDGRAF, 2002).

3.3 Tratamento térmico de recozimento

O tratamento térmico consiste em ciclos de aquecimento e de resfriamento com parâmetros controlados que são executados com o objetivo de alterar suas propriedades em função da modificação da microestrutura de um material. Um dos tipos de tratamentos térmicos mais usados para aços elétricos é o recozimento, que visa melhorar as propriedades magnéticas, reduzir as perdas histeréticas e levar ao aumento da permeabilidade (CASTRO, 2015).

Durante o tratamento térmico de recozimento as chapas de aço são expostas a temperaturas elevadas por um período e em seguida resfriadas lentamente. Este processo de recozimento consiste em três etapas: Aquecimento até a temperatura desejada, manutenção ou encharque do material nessa temperatura acompanhado por resfriamento, geralmente, até a temperatura ambiente. A figura 11 apresenta o diagrama de fases indicando as faixas de temperatura do tratamento térmico para aços comuns ao carbono (CALLISTER, 2002).

Figura 11 - Diagrama de fases ferro - carbeto de ferro



Fonte: (CALLISTER, 2002).

O tratamento térmico ocorre de forma contínua, fazendo com que o aço passe sequencialmente por cada uma das etapas. De acordo com Negri (2011) os principais fatores que influenciam o ciclo de tratamento térmico são: tempo e temperatura, que

afetam diretamente no alívio das tensões; atmosfera, caso algum efeito químico seja desejado; velocidade de aquecimento, que deve ser a maior possível para aumentar a produtividade do forno e garantir a homogeneidade do crescimento de grão; e a velocidade de resfriamento, que evita a formação de precipitados de carbono e favorece o alívio de tensões do material final.

A principal função do recozimento em aços totalmente processados, alvo deste estudo, é proporcionar um “alívio de tensões”, que consiste em eliminar os danos em nível de grão (encruamento) que as operações de corte introduzem nas lâminas do estator durante o processamento das chapas de aço e estampagem (GEBLER, 2000). De acordo com Landgraf *et al.* (1997) através do recozimento pode-se obter uma redução em torno de 10% nas perdas magnéticas e um aumento de até 50% na permeabilidade magnética do aço. Para Emura *et al.* (2000) o recozimento é capaz de recuperar as propriedades magnéticas do aço GNO degradado após deformação plástica em função do corte, além de minimizar a formação de óxidos superficiais e nitretos aumentando o grau de inclusões do aço GNO e favorecendo suas propriedades magnéticas.

3.3.1 Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades magnéticas do aço

A utilização dos aços elétricos para aplicações eletromagnéticas exige que estes aços tenham boas características de conformação mecânica, baixa perda por histerese, baixa perda por correntes parasitas e alta permeabilidade magnética, por este motivo visa-se o tratamento térmico no aço elétrico, uma vez que este altera sua microestrutura principalmente na região de deformação, tamanho de grão e tensões internas, provocando mudanças significativas nas suas propriedades magnéticas (TOLEDO, 2007; LONDERO, 2022).

Conforme descrito abaixo, a família de aços GNO pode ser classificada em três grupos de aços elétricos (LANDGRAF, 2002):

- totalmente processados (com adição de silício): são aços fornecidos pela usina prontos para estampagem, com tratamento térmico e baixo percentual de carbono;
- semiprocessados (com ou sem silício): são aços comprados por empresas que ainda irão realizar o processo metalúrgico de tratamento térmico do material. Nesse aspecto, esses aços são preparados para ter um maior crescimento de grão com eliminação de tensões residuais e percentuais de carbono;
- aços ABNT 1006/1008 (com 0,06 a 0,08% de Carbono): aços muito utilizados devido a seu baixo custo, mas que não são especificamente produzidos para fins eletromagnéticos. Pode-se efetuar posteriormente processos de recozimento a fim de melhorar as propriedades magnéticas e reduzir os teores de carbono abaixo de 0,03% (YONAMINE; LANDGRAF; FALLEIROS, 2003).

O tratamento térmico realizado pelo consumidor de aços elétricos semiprocessados consiste em aquecer e resfriar um aço, com parâmetros controlados, e tem por objetivo melhorar as propriedades magnéticas, reduzindo perdas magnéticas e elevando a permeabilidade do aço em função do alívio de tensões e da modificação de sua microestrutura através do crescimento de grão. Para os aços totalmente processados, o tratamento térmico tem como objetivo principal aliviar as tensões oriundas do processo de corte e estampagem, não influenciando significativamente suas propriedades magnéticas (NEGRI, 2011).

Londero (2022) traçou um comparativo sobre o efeito do tratamento térmico na aplicação de aços elétricos totalmente processados e semiprocessados. As amostras foram aquecidas à temperatura máxima de 820 °C. O estudo apontou que o tratamento térmico altera significativamente o tamanho de grão dos aços semiprocessados, ocasionando alterações mais expressivas nas suas propriedades do que nos aços totalmente processados que não são tão afetados. Magneticamente. O tratamento térmico implicou a redução nas perdas e a área da histerese magnética dos aços semiprocessados, aumentando sua permeabilidade de forma significativa, ao passo que o aço totalmente processado teve mudanças menos perceptíveis. Os resultados mostraram ainda, após o tratamento térmico as perdas magnéticas reduziram em média de 60% para os aços semiprocessado e apenas 7% para os aços totalmente processados.

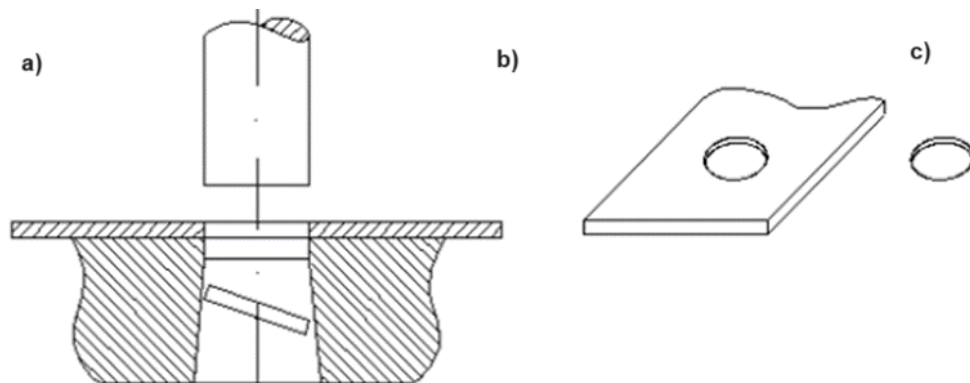
3.4 Métodos de Corte

A utilização das lâminas de aços elétricos nas máquinas elétricas é realizada recortando-as no perfil do circuito magnético desejado. Operações em que grandes prensas cortam as chapas em lâminas menores de desenhos definidos são chamadas de estampagem. No entanto, as ferramentas deixam resíduos microscópicos nas laterais ao realizar o corte, indicando que a lâmina foi cortada por um objeto afiado, tais resíduos são chamados de rebarbas (MEURER, 2005).

O processo de conformação dos aços elétricos envolve diversas etapas de laminação para fornecer um produto em formato plano, com espessura entre 0,5 mm e 0,25 mm, a partir de uma chapa ou banda. A laminação, ou corte, pode ser realizada por diferentes meios: puncionamento, guilhotina e laser, são alguns métodos largamente utilizados. No entanto, com o corte, observa-se que geralmente as perdas magnéticas aumentam, enquanto a permeabilidade do aço diminui (EMURA *et al.*, 2000; MARQUES, 2015).

Puncionamento e guilhotina são técnicas semelhantes e espera-se que a degradação sobre o material também seja equivalente. O puncionamento baseia-se na obtenção de figuras geométricas por meio de punção e matriz através de impacto, é a técnica de corte mais utilizada para a produção de máquinas elétricas devido à velocidade de fabricação no caso de produção em larga escala. O furo produzido pela punção induz deformação plástica no material que modifica a textura cristalográfica do aço e degrada suas propriedades magnéticas. A figura 12 mostra (a) o desenho esquemático do processo de puncionamento, (b) a peça puncionada e (c) o refugo (SALVADOR, 2016).

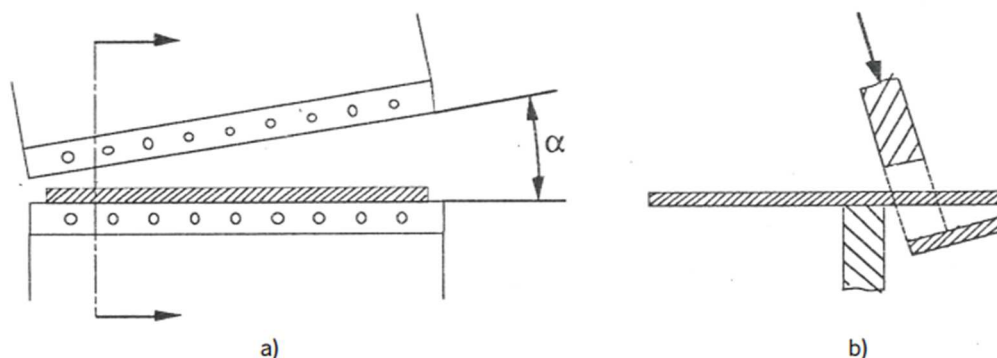
Figura 12 - (a) o desenho esquemático do processo de puncionamento; (b) a peça puncionada e (c) o refugo.



Fonte: (BENAZZI JUNIOR; CAVERSAN, 2012).

Já as Guilhotinas são máquinas que dispõem de uma lâmina estática que suporta a chapa metálica e uma lâmina móvel, de forma que o ângulo ($\angle$), entre as lâminas se mantém constante ao longo de todo o curso, como representado na figura 13. A guilhotina funciona primeiro fixando o material e em seguida com a lâmina em movimento, normalmente a superior, a chapa é penetrada por ambas as lâminas para cisalhar o material até que este atinja o ponto de resistência ao cisalhamento, a partir desse ponto o material rompe por fratura e a chapa é separada. A guilhotina não permite cortar um perfil curvo, portanto não é utilizada para a construção de máquinas, todavia o corte em guilhotina é o método mais econômico para a obtenção de formatos retos (MARQUES, 2015).

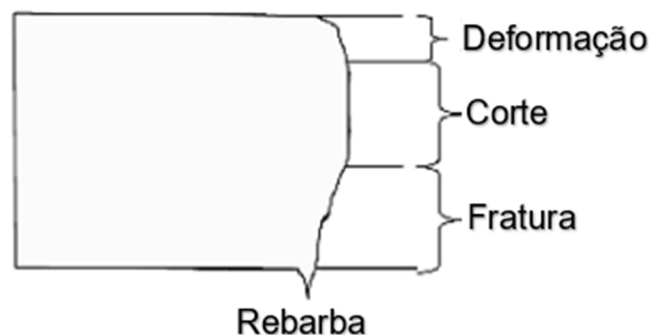
Figura 13 - a) Distribuição das lâminas em uma guilhotina; b) Detalhe das lâminas durante o corte da chapa.



Fonte: (MARQUES, 2015).

O processo de corte da lâmina pela guilhotina é dividido em três etapas: deformação plástica, corte e ruptura, conforme ilustrado na superfície lateral de uma lâmina cortada, na figura 14. No início da estampagem, durante o contato entre a ferramenta de corte e o aço, ocorre a deformação plástica. Neste momento, ocorre um empenamento da chapa seguido do escorregamento da mesma sobre a superfície da ferramenta de corte, resultando no corte inicial. Se a aresta da matriz estiver afiada, a fratura do material se inicia na mesma, caso contrário, a fratura começa a alguma distância das arestas, resultando na formação de rebarbas que são a extensão da deformação plástica do material como forma de dissipar a energia absorvida pela carga (MEURER, 2005).

Figura 14 - Principais regiões da superfície de corte da lâmina por Guilhotina.



Fonte: (MARQUES, 2015)

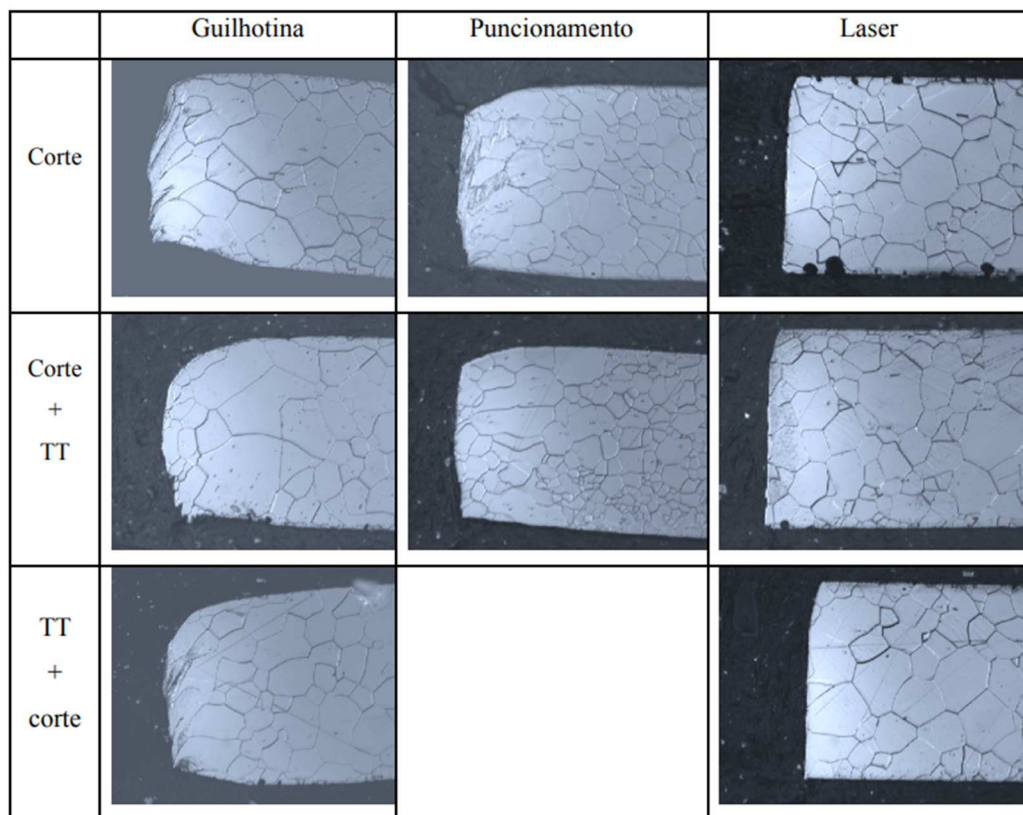
Por fim, o corte a laser utiliza um dispositivo de emissão de energia para focar um fluxo de fótons em uma pequena área até derreter o metal e depois retirar o material fundido da área de corte. Por ser mais lenta do que perfurar, é frequentemente usada para construir protótipos ou para produção em lotes pequenos. Essa técnica é tipicamente controlada por computador e permite cortes de alta precisão e qualidade. Durante o corte a laser não são produzidas a tensão de corte, nem a rebarba, em contrapartida o alto gradiente de temperatura gerado para atingir o ponto de fusão do metal provoca tensões que implicam mudanças microestruturais e podem afetar as propriedades magnéticas do aço (SALVADOR, 2016).

Emura *et al.* (2000), submeteram amostras de um aço de grão não orientado E230, com 2% de Silício aos três tipos de corte mais comuns (guilhotina, punção a frio e laser) cujo resultado encontra-se na figura 15. Através dos estudos realizados,

verificou-se significativa quantidade de deformação plástica causada pela guilhotina, apresentando grande deformação tanto do perfil como dos grãos, ao passo que no corte a laser praticamente não há deformações.

Em relação às propriedades magnéticas, o estudo supracitado indicou que o corte a laser provoca um aumento nas perdas magnéticas, além disso as amostras cortadas a laser apresentam maior cisalhamento em relação à amostra cortada por guilhotina, contrariando estudos anteriores que indicam que o corte a laser seria o menos danoso. No entanto pode se atribuir os resultados das presentes amostras a fatores como a potência e tipo de laser utilizados no corte. Em relação à permeabilidade, o corte por guilhotina provoca maior deterioração, já o corte por puncionamento forneceu os menores valores de perdas, e estas foram ainda mais reduzidas com um tratamento térmico (TT) posterior ao corte, aumentando consideravelmente a permeabilidade.

Figura 15 - Micrografias do perfil de corte



Fonte: (EMURA *et al.*, 2000).

Como pode-se observar na tabela 1, extraída do trabalho publicado por Emura *et al.* (2000), as amostras cortadas por guilhotina e a laser apresentaram os maiores valores de perdas por histerese (W/kg) e perdas totais (W/kg), a amostra cortada a laser apresentou ainda o maior índice de perda por correntes de Foucault (W/kg), em função do efeito da frequência. Em relação ao tratamento térmico a tabela 1 aponta para uma redução das perdas totais e da perda histerética e maior permeabilidade (T.m/A). Nas amostras tratadas termicamente após o corte (corte + TT). As amostras cortadas por puncionamento tiveram o melhor desempenho (12% de redução nas perdas e 32% de aumento da permeabilidade). A perda histerética concentrou grande parte da redução das perdas, provavelmente devido a recuperação dos grãos deformados e a relaxação das tensões residuais com o tratamento térmico.

Tabela 1 - Efeito dos diferentes tipos de corte e tratamento térmico nas propriedades magnéticas das amostras de um aço GNO E230.

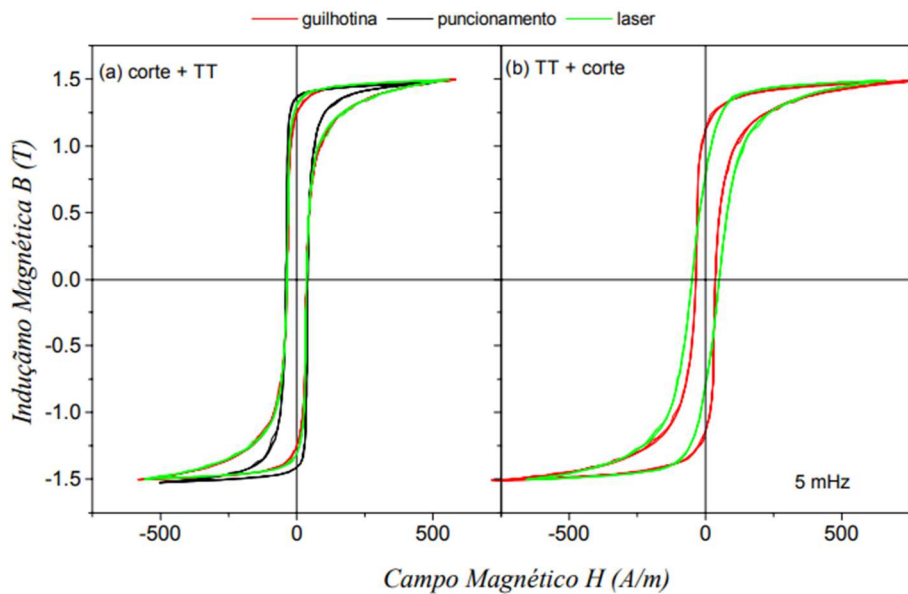
	Guilhotina				Puncionamento				Laser			
	P _{tot}	P _h	P _p	μ ₁₅	P _{tot}	P _h	P _p	μ ₁₅	P _{tot}	P _h	P _p	μ ₁₅
Corte	4,59	2,88	1,71	1470	4,44 4,41*	2,66 2,66*	1,78 1,75*	1640 1577*	4,64	2,81	1,83	1697
Corte + TT	4,36	2,57	1,79	2162	3,88*	2,28	1,60	2340*	4,55	2,65	1,90	2024
TT + Corte	4,53	2,75	1,78	1678	-	-	-	-	4,92	2,96	1,96	1780

Fonte: Adaptado: (EMURA *et al.*, 2000).

* bobina de 0,47 mm

O estudo de Emura *et al.* (2000) constatou ainda que as curvas de histerese das amostras “corte+ TT” apresentaram maior quadratura, com maior indução remanescente, e as diferenças devido ao corte se reduzem após o tratamento térmico como pode ser observado na figura 16 (a). Por outro lado, a figura 16 (b) evidencia que o corte provoca um “cisalhamento” da curva de histerese nas amostras “TT + corte” para as amostras cortadas por guilhotina e a laser, resultando em maiores perdas magnéticas e permeabilidade menores em relação às amostras “corte + TT”.

Figura 16 - Comparação das Curvas de histerese das amostras “corte + TT” e “TT + corte”.



Fonte: Adaptado (EMURA et al., 2000).

3.4 Ensaios Microscópicos

3.4.1 Microscopia Óptica

Entre as propostas apresentadas para se realizar o corte mecânico dos aços GNO, o que tem se mostrado mais promissor é o puncionamento, utilizado para se obter a conformação de materiais metálicos planos, a fim de lhe conferir a forma e a precisão desejada, sem a presença de defeitos superficiais no produto final. Contudo, o método de corte por puncionamento mostra-se pouco desbravado, uma vez que existem poucos pesquisadores que partiram para tal linha de trabalho.

A microscopia óptica (MO) é a técnica mais comum de observação da microestrutura dos aços e ferros fundidos. Para este tipo de análise é empregada luz visível, a qual incide sobre a amostra, passam por lente e são refletidas real ou virtualmente até o observador. A resolução fornecida pela microscopia com luz visível corresponde a ordem do micrômetro, e possibilita um aumento de cerca 1000 vezes o tamanho da amostra, com profundidade de campo semelhante. Em comparação com microscópios mais modernos, capazes de fornecer aumentos superiores, o microscópio óptico

possui facilidade de operação a custos menores, características que o tornam comum em qualquer laboratório de microscopia (MANNHEIMER, 2002).

As imagens geradas pelo microscópio óptico evidenciam os constituintes e a estrutura dos metais e suas ligas devido as diferenças de orientação cristalográfica nas várias regiões da microestrutura. A análise microestrutural, por sua vez, permite identificar de forma qualitativa tamanhos de grão, presença de defeitos ou transformações microestruturais quando o material é submetido a tratamentos térmicos, termo-químicos e termo-mecânicos. A Figura 17 ilustra um modelo de equipamento de microscopia óptica da marca ZEISS (FILHO; PANTANO, 2010).

Figura 17 - Equipamento de Microscopia Óptica da marca ZEISS.



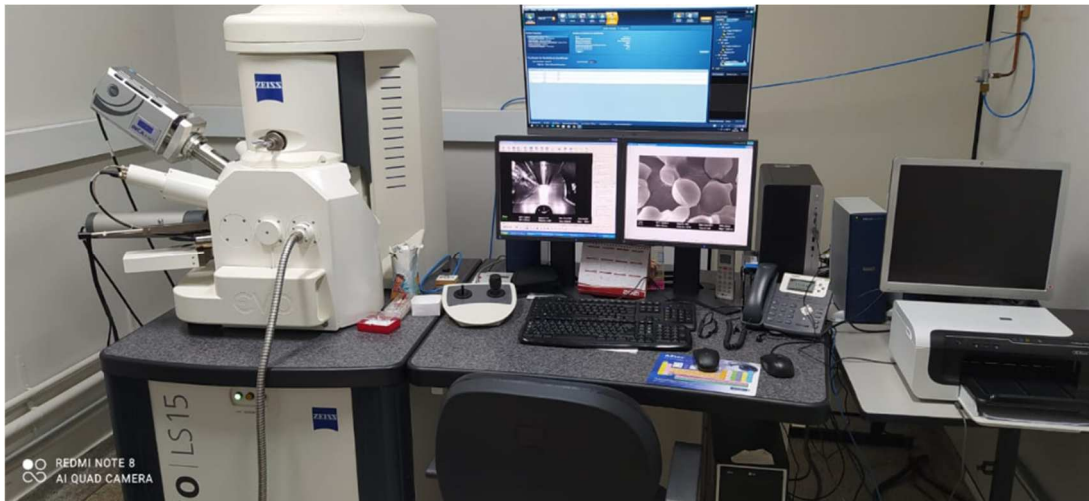
Fonte: (ALMEIDA, 2018).

3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), indicado na figura 18, permite a visualização da superfície de amostras volumosas com um mínimo de preparação das amostras. Devido a fácil visualização e interpretação das imagens, cujo poder de resolução proporciona aumentos da ordem de 10 a 150.000 vezes, o MEV é amplamente utilizado para obtenção de imagens de superfícies polidas ou rugosas,

com grande profundidade de campo e alta resolução, embora sua principal aplicação seja no exame de superfícies rugosas (MANNHEIMER, 2002).

Figura 18 - Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Carl Zeiss.



Fonte: (UNESP, 2024).

As imagens em alta ampliação e a caracterização por EBSD (Electron BackScattering Diffraction) foram obtidas utilizando um MEV. Esta técnica consiste na identificação do padrão de difração de elétrons retro espalhados em determinada região da amostra, ao utilizar esse método pode-se dizer que a análise será relacionada somente à superfície da amostra, visto que os padrões de difração de elétrons estão relacionados somente aos átomos das primeiras camadas atômicas da superfície do material (STEVENS, 2008).

O MEV além de gerar imagens com elevada profundidade de foco, aspecto tridimensional, fornece informações sobre a natureza química do material, permite a identificação da estrutura, da morfologia, dos elementos químicos e da topografia da superfície da amostra. Além disso, a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química são fatores que também contribuem para o amplo uso do MEV (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

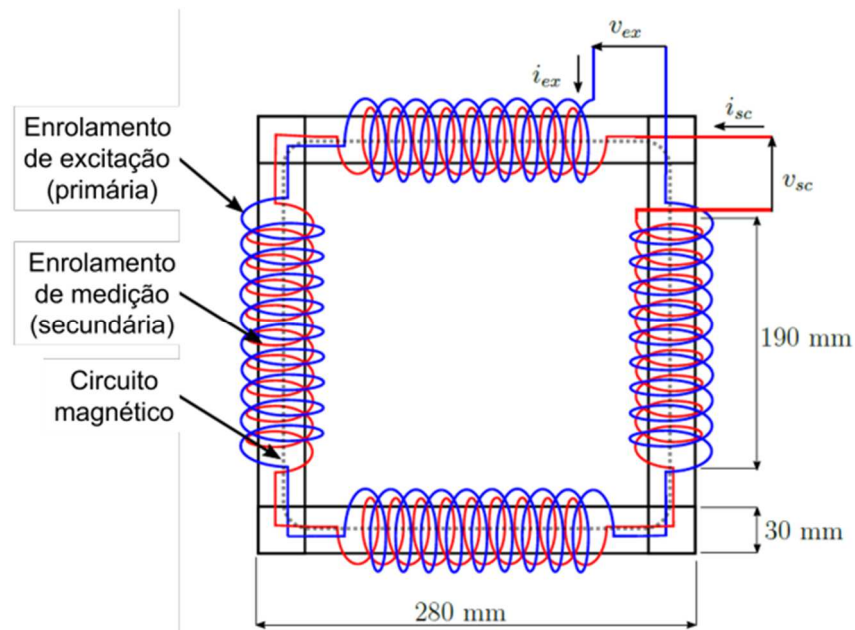
Para a investigação da textura cristalográfica foram realizadas análises das orientações cristalográficas por EBSD. A análise de EBSD foi feita em um microscópio eletrônico de varredura modelo oxford c nano do fabricante Quasi-S. As frações volumétricas das fibras e orientações de textura cristalográfica de interesse e a ODF (Função de Distribuição de Orientações Cristalinas) foram determinadas para as amostras após cada ciclo de tratamento térmico.

3.5 Ensaios Magnéticos

As perdas magnéticas podem ser mensuradas por diversas formas, dentre as quais destaca-se o equipamento fabricado pela empresa Brockhaus que pode ser operado em duas configurações: Quadro de Epstein e o Teste de Chapa Única (da tradução original do inglês de Single Sheet Tester – SST).

O equipamento Brockhaus MPG-100, representado na figura 19, se utiliza de quadro Epstein para realizar caracterização magnética de amostras. O quadro de Epstein trata-se de um dispositivo de medição padronizado usado para obter as propriedades magnéticas de um material, em especial de metais magnéticos, cujo procedimento é regulamentado pela norma brasileira NBR 5161. Este dispositivo consiste em um transformador constituído por dois enrolamentos dispostos em formato de quadro: O enrolamento primário constitui o enrolamento de excitação e o secundário de medição de tensão em W/kg. Os enrolamentos dependem da fonte de alimentação e dos instrumentos de medição utilizados e apresentam um total de 700 a 1000 espiras para testes realizados num intervalo de frequência de 50 a 400 Hz. O núcleo do quadro é formado com amostras laminadas do material em análise (BRODT, 2019). Portanto, o campo induzido, medido pelas espiras secundárias são dependentes do material do núcleo, ou seja, das amostras de aço elétrico utilizado, como discutido na seção 3.2.1.

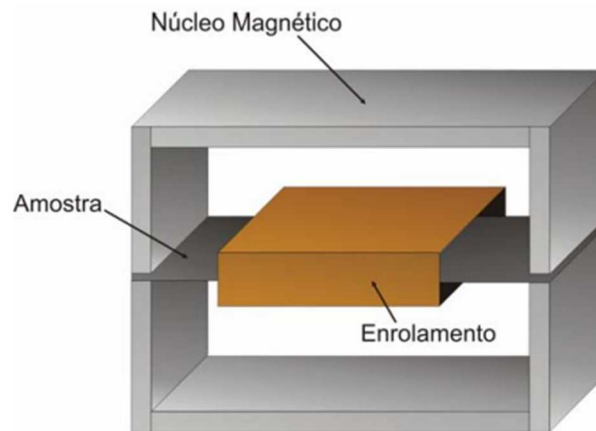
Figura 19 - Esquema simplificado do quadro Epstein formado por quatro bobinas de excitação em série conectadas à fonte de alimentação e quatro bobinas de medição.



Fonte: Adaptado de (SALVADOR, 2016).

Ao contrário do quadro de Epstein, o sistema SST se difere por utilizar apenas uma lâmina como amostra e poder empregar métodos diretos de medição de campo magnético. O SST possui seu próprio circuito magnético, sendo a amostra colocada como complemento ou fechamento do circuito global. Dentre as configurações possíveis do SST a mais recomendada pelas normas internacionais é a representada na figura 20 que utiliza duplo circuito magnético (SOARES, 2001). Além disso o SST é um ensaio mais econômico pois ele utiliza menos lâminas e as medições são realizadas de maneira mais simples e mais rápida do que no quadro de Epstein. Entretanto, é importante destacar que são necessários vários ensaios no SST para se obter uma “característica média” do material.

Figura 20 - Representação esquemática do sistema SST



FONTE: (JÚNIOR, 2007).

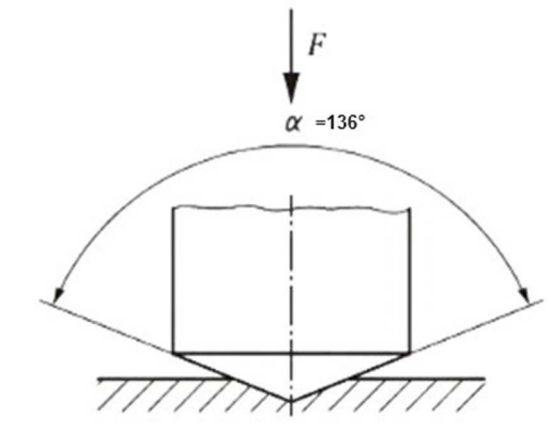
3.5 Ensaios Mecânicos

3.5.1 Dureza/Microdureza Vickers

Conforme a norma ISO 6507 “Materiais metálicos - ensaio de dureza conforme Vickers; Parte 1: Método de ensaio”, o ensaio de dureza Vickers é um método de ampla aplicação visto que ele é adequado para medir a dureza de inúmeros materiais, tais como: cerâmicas, materiais compostos e todos os tipos metais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

O ensaio de dureza Vickers consiste na aplicação de uma determinada carga sobre a superfície do material por meio de um penetrador piramidal de base quadrada de diamante com uma geometria específica e ângulo plano entre as faces de 136°, conforme mostrado na figura 21. O valor da dureza Vickers é obtido analisando-se a endentação deixada na superfície do material pelo penetrador (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Figura 21 - Representação esquemática do ângulo obtido pelo penetrador piramidal de base quadrada de diamante.



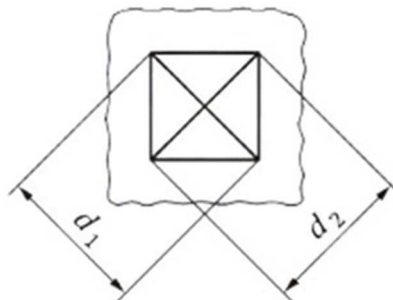
Fonte: Adaptado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Através da equação 6 pode-se calcular o valor da dureza de Vickers “ H_v ” que corresponde ao quociente da carga “ F ” aplicada (kgf) pela área da superfície da endentação “ A ” (mm^2) no material ensaiado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019; FERREIRA, 2011).

$$H_v = \frac{F}{A} \quad (6)$$

A máquina de ensaio Vickers não fornece o valor da área de impressão, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais “ d_1 ” e “ d_2 ” formadas pelos vértices opostos da pirâmide, como mostra a figura 22 (FERREIRA, 2011).

Figura 22 - Representação esquemática das medidas das diagonais “ d_1 ” e “ d_2 ” fornecidas pela máquina de ensaio Vickers.



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Conhecendo-se as diagonais é possível calcular a área da pirâmide de base quadrada, através da equação 7 (FERREIRA, 2011).

$$A = \frac{D^2}{\left[2 \operatorname{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)\right]} \quad (7)$$

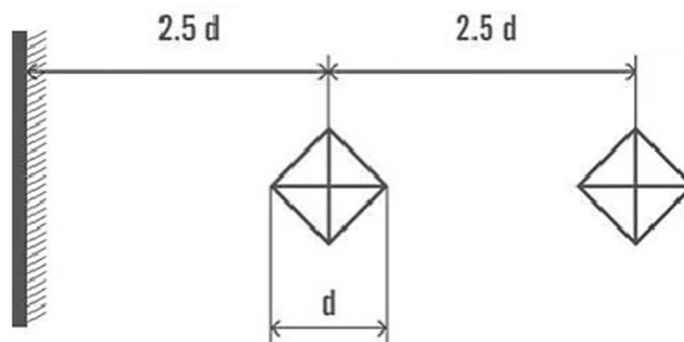
Juntando e simplificando as duas equações, a equação de vickers também pode ser descrita da seguinte conforme a equação 8:

$$H_v = 1,8544 \cdot \frac{F}{D^2} \quad (8)$$

Onde F é a carga (Kgf), D é a média aritmética das duas diagonais (mm) e H_v é a Dureza Vickers que é representada colocando primeiro o valor de dureza calculado através da medição das diagonais, em seguida H_v e posteriormente o valor da carga aplicado em kgf (FERREIRA, 2011).

A norma ISO 6507 define as distâncias mínimas d_1 e d_2 , conforme mostrado na figura 23, entre os pontos de ensaio (indentações de ensaio) e a aresta da amostra para o ensaio de dureza Vickers. A fim de não gerar deformações e interferências decorrentes de uma indentação em relação à indentação subsequente, a distância mínima entre d_1 e d_2 é igual a 2,5 vezes o valor da diagonal da indentação.

Figura 23 - Representação esquemática da distância mínima entre as indentações de ensaio e a aresta da amostra para o ensaio de dureza Vickers.



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Os valores de dureza obtidos pelo método Vickers dependem da carga aplicada, estas variam de 1 a 120 kgf, assim, quanto mais duro o material, menor a área de impressão

deixada pelo penetrador. O método Vickers possui vantagens das quais pode-se destacar: Escala contínua; Precisão de medida; Impressões pequenas; Medição de durezas superficiais (microdureza) onde são utilizadas cargas inferiores a 1,0 kgf (ALMEIDA, 2018).

4 METODOLOGIA

4.1 Material

As amostras utilizadas nesse estudo foram confeccionadas a partir de chapas de aço GNO 3,3% Si com 0,3 mm de espessura. As chapas de aço foram fornecidas pela Aperam South America, siderúrgica situada na cidade de Timóteo/MG, no estado totalmente processado, ou seja, produzidas por lingotamento contínuo, seguido de laminação a quente, laminação a frio e recozimento. A composição química deste aço está indicada na tabela 2.

Tabela 2 - Composição Química do aço GNO NO30-16.

C	N	Mn	Si
0,002%	0,002%	0,4%	3,3%

Fonte: Aperam South America (2024).

4.1.1 Amostras

As amostras utilizadas para a realização das análises foram adquiridas a partir de uma parte maior do Aço NO30-16. Três das quatro amostras recebidas passaram por um tratamento térmico de recozimento com duração de 30 min e com três diferentes condições de temperatura máxima: 700 °C, 800 °C, 900 °C. Posteriormente, todas as amostras foram cortadas e preparadas para ensaio no Single Sheet conforme a norma NBR 5161:1977. Após o corte foi realizado o embutimento das amostras, que em seguida foram lixadas, polidas, lavadas e atacadas com solução de nital 4%, para

assim passar pelas análises de Microscopia e EBSD. Todos os procedimentos mencionados estão detalhados a seguir.

4.1.1.1 Corte

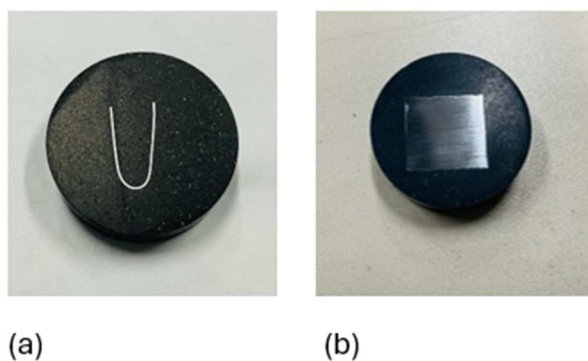
As amostras foram cedidas pela Aperam já cortadas pelo método de guilhotina. O equipamento foi ajustado para operar com uma folga de corte de 0,03 mm.

As chapas cuja densidade é de 7650 kg/m^3 foram divididas em três grupos com as seguintes dimensões: A. 200 mm x 30 mm; B. 200 mm x 15 mm; C. 200 mm x 7,5 mm.

4.1.1.2 Embutimento

No trabalho descrito, foi utilizado o embutimento a quente em todas as amostras, a resina utilizada foi a baquelite, caracterizada por ser quimicamente estável e resistente ao calor. A figura 24 (a) mostra o corpo de prova embutido de perfil para realização da análise de EBSD e a figura 24 (b) mostra a vista frontal do corpo de prova embutido para a análise de microscopia óptica e medição de microdureza.

Figura 24 – Amostras da chapa de aço embutidas: (a) seção e (b) superfície.



Fonte: O autor (2024).

4.1.1.3 Lixamento e Polimento

No presente trabalho utilizou-se a técnica de lixamento mecânico, que consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até que desapareçam todos os traços da lixa anterior.

O lixamento das amostras foi realizado no laboratório de metalografia do CEFET -MG com o auxílio de uma politriz metalográfica, a sequência utilizada de lixas foi 220, 400, 800 e 1200.

Foi utilizado o processo de polimento mecânico através de uma politriz, onde a amostra foi trabalhada no disco de polimento utilizando-se a pasta de diamante como agente polidor, devido as suas características de granulometria, dureza, forma dos grãos e poder de desbaste.

Foram realizados três polimentos em cada amostra, utilizando-se a pasta de diamante de 12 µm, 6 µm e 3 µm respectivamente. A cada troca da pasta de diamante, os panos de polimento também eram trocados e rotulados.

4.1.1.5 Limpeza

A limpeza foi realizada imediatamente após o polimento, nesse procedimento utilizou-se álcool 99,3% em abundância e em seguida as amostras foram suavemente secadas com algodão.

4.1.1.6 Ataque Químico

O ataque foi realizado colocando cerca de 30mL da solução de Nital 4% (96% de álcool etílico + 4% de ácido nítrico, HNO₃, com pureza de 99,9%) num béquer, e introduzindo a amostra por 12 segundos, que foram cronometrados para todas as quatro amostras. Posteriormente, as amostras foram lavadas com álcool etílico e

secadas com o auxílio de um soprador de ar quente, a fim de evitar a rápida oxidação da amostra.

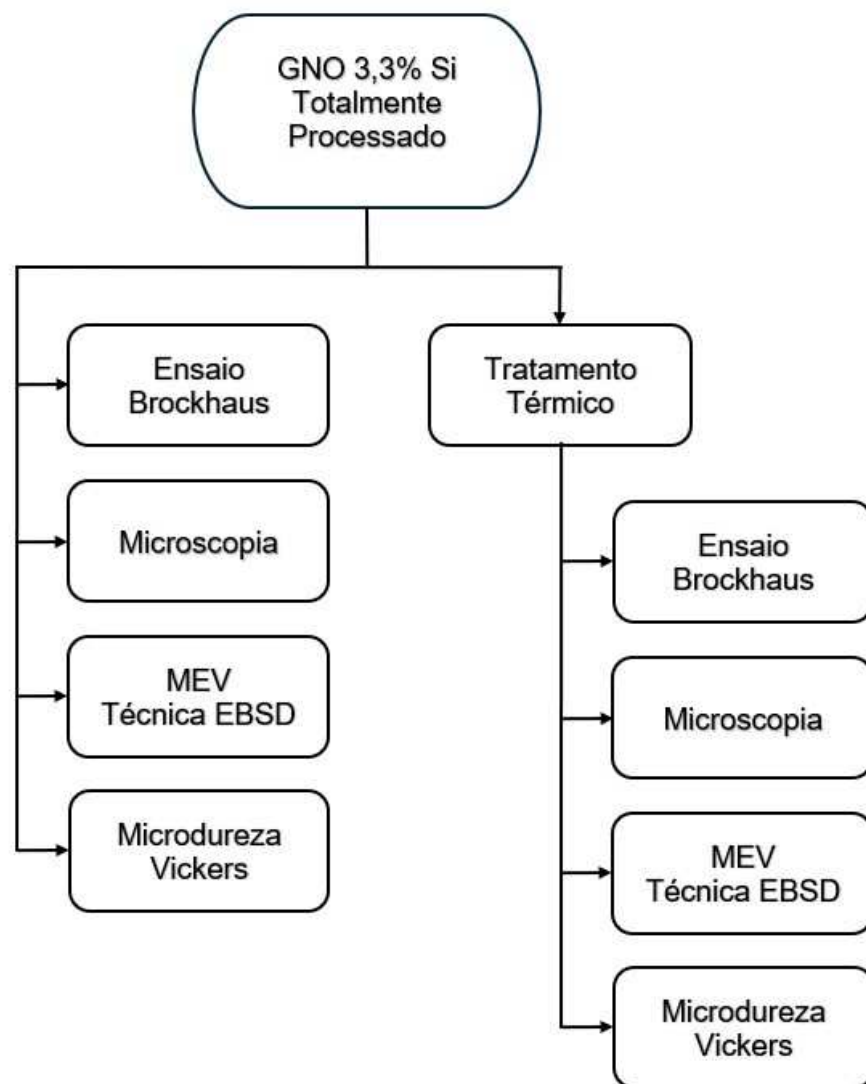
4.2 Métodos

Com intuito de avaliar a influência do processamento térmico nas respostas magnéticas do aço em estudo, buscou-se analisar a microestrutura das amostras de aços elétricos GNO, isto é, a partir da caracterização dos aços no estado de entrega pelo fornecedor e após os corpos de prova serem submetidos à diferentes condições de temperatura.

As técnicas que serão aplicadas no desenvolvimento deste projeto para a caracterização mecânica do material, podem ser divididas nas seguintes etapas: Microscopia Óptica, Microdureza Vickers, Brockhaus (Single Sheet) e Microscopia Eletrônica de Varredura (EBSD). Nesta seção serão apresentados os equipamentos, normas e metodologias utilizadas para a obtenção destes dados.

No esquema apresentado na figura 25 é exibida uma representação do estudo realizado, contendo as etapas das atividades propostas e executadas na parte experimental do presente trabalho. Cada uma destas etapas será didaticamente detalhada nos subcapítulos subsequentes.

Figura 25 - Representação Esquemática do Procedimento Experimental do Projeto.

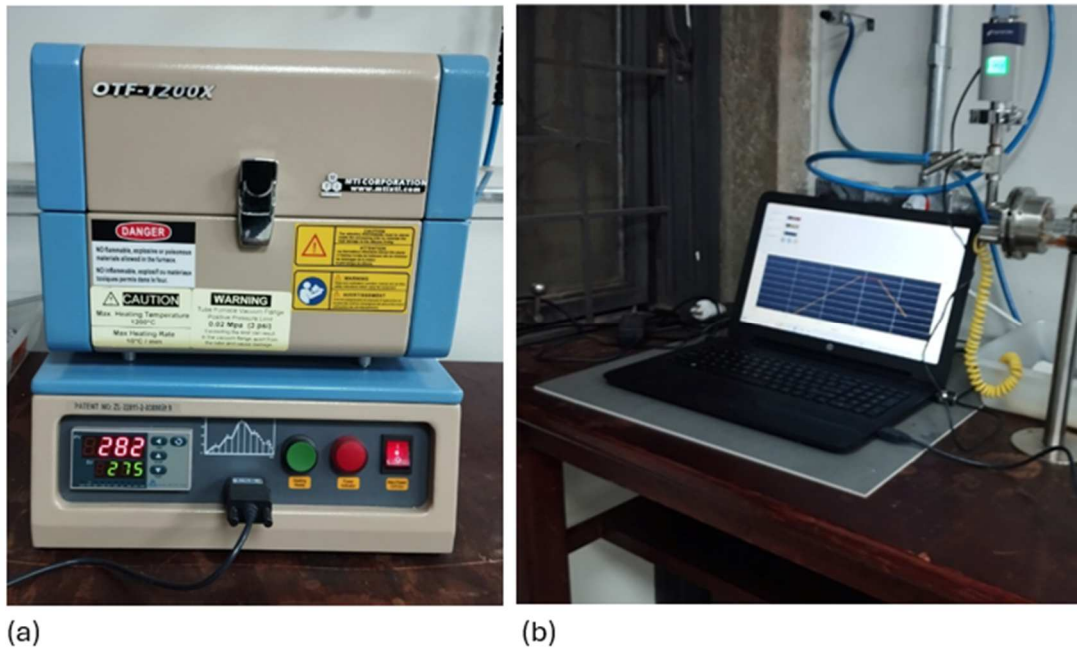


Fonte: O Autor (2024).

4.2.1 Tratamento Térmico

Os tratamentos térmicos de recozimento conduzidos neste trabalho foram realizados no laboratório LCPNano (Laboratório de Caracterização e Processamento da Nanomateriais) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O forno marca MTI Corp, modelo OTF-1200X, utilizado para realizar o tratamento térmico das amostras atinge a temperatura máxima de 1200 °C. A figura 26 (a) indica o forno MTI Corp, bem como o computador, figura 26 (b), que gerencia o software Furnace Monitoring, para estabelecer a temperatura de encharque.

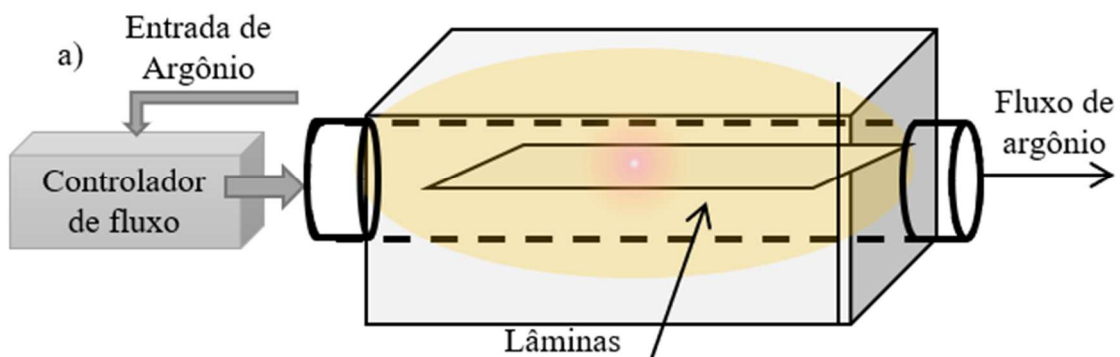
Figura 26 - (a) forno MTI Corp (b) computador utilizado para gerenciar o software Furnace Monitoring.



Fonte: O autor (2024).

O tratamento foi realizado com o forno em temperatura ambiente, a figura 27 mostra as lâminas inseridas em um tubo de quartzo de alta pureza, bem como a atmosfera do forno controlada com um fluxo de Argônio mantido a 300 cc/min.

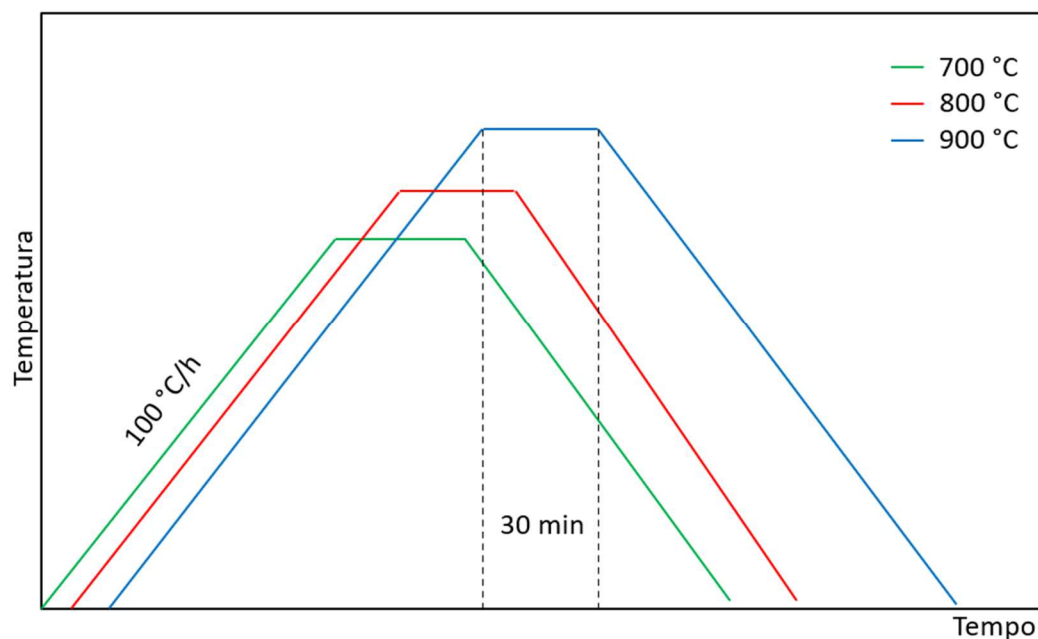
Figura 27 - Representação esquemática do sistema de tratamento térmico.



Fonte: O autor (2024).

A figura 28 mostra as etapas envolvidas no processo de recozimento, inicialmente as amostras são aquecidas a uma velocidade de 100 °C/h até atingir as temperaturas de encharque de 700 °C, 800 °C, 900 °C. O tempo de encharque selecionado para o tratamento térmico foi de 30 min. Após esse período, o material foi resfriado lentamente dentro do forno. O tratamento ocorreu sob atmosfera controlada.

Figura 28 - Representação esquemática da curva de tratamento térmico.



Fonte: O autor (2024).

Serão testadas as amostras no estado de entrega (EE) para se criar um parâmetro inicial das propriedades e as amostras após serem submetidas ao tratamento térmico de recozimento (TR).

4.2.2 Microscopia Óptica

A caracterização microestrutural foi realizada após a preparação das amostras, quando as mesmas são levadas a sala onde são realizadas as microscopias ópticas, com o auxílio do microscópio são feitas as análises dos corpos de prova e os

resultados são armazenados em um computador que está acoplado ao microscópio, a figura 29 representa o microscópio óptico da marca Fortel utilizado neste trabalho, posteriormente capturou-se quatro imagens de diferentes pontos de cada uma das quatro amostras através do software Image View. Para observação dos tamanhos de grãos das amostras as análises foram feitas utilizando-se a lente objetiva amarela que permite campos de ampliação de 10 vezes. Para a análise do tamanho de grão, foi utilizado o método do intercepto linear médio, com base na norma ASTM E112 (2007).

Figura 29 - Microscópio Óptico da marca Fortel utilizado para caracterização microestrutural das amostras.



Fonte: O autor (2024).

4.2.3 Dureza/Microdureza Vickers

Após as análises de microscopia, as mesmas amostras foram submetidas à análise de Microdureza Vickers antes do tratamento térmico. As análises foram realizadas no equipamento Digital Metallic Vickers Hardness Tester da marca Time, modelo TH710 com um indentador de diamante piramidal. Foram realizadas 10 indentações em cada corpo de prova, com distância de 0,1 mm entre cada uma delas. A carga aplicada durante o ensaio foi de 1,96 N durante 5 segundos. As medidas também foram

realizadas nas amostras tratadas termicamente, a fim de averiguar a influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas próximo à borda de corte.

4.2.4 Medições de Perdas Magnéticas (Brockhaus)

Devido às dimensões das lâminas analisadas neste trabalho, optou-se por utilizar o sistema SST para o estudo das propriedades magnéticas: permeabilidade magnética e perda magnéticas das amostras. Os testes foram realizados no laboratório do CEFET-MG, a figura 30 mostra o equipamento Messtechnik modelo MPG100 utilizado. Nota-se uma balança acoplada ao equipamento, que permite o cálculo da espessura durante o teste.

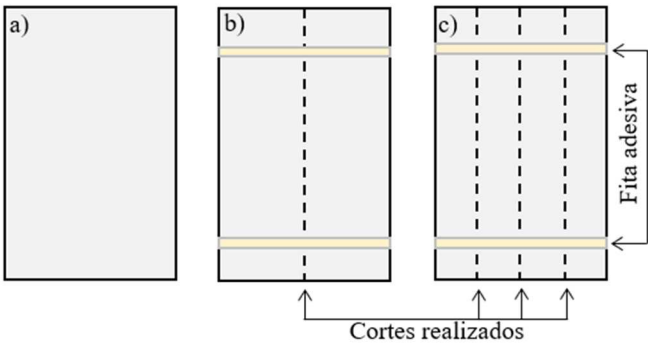
Figura 30 - Messtechnik modelo MPG100 com balança acoplada utilizado nas medições de perdas magnéticas.



Fonte: O autor (2024)

As amostras foram cortadas em formato de folha com o auxílio de uma guilhotina ajustada para a folga de 0,03 mm. Para a realização das medições uniram-se duas lâminas de 15 mm e quatro lâminas de 7,5 mm, ambas geraram uma lâmina de 30 mm cada que foram submetidas a dois parâmetros de teste. A figura 31 (a) indica a chapa de aço com dimensões de 30 x 200 mm, em 31 (b) é ilustrado a chapa em folhas com corte longitudinal, resultando em duas folhas de 15 x 200 mm e em 31 (c) é ilustrado a chapa com dois cortes no comprimento, resultando em quatro chapas medindo 7,5 x 200 mm.

Figura 31 - ilustração das chapas de aço com dimensões de (a) 30 x 200 mm (b) 15 x 200 mm (c) 7,5 x 200 mm.



Fonte: O autor (2024).

Para melhor organização do trabalho, as amostras foram divididas em 9 grupos, cujo critério são largura da amostra e a temperatura máxima atingida no tratamento térmico, conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Identificação das amostras e respectivas condições de análise

Amostra	Largura (mm)	Temperatura (°C)
A.7	30	700
B.7	15	700
C.7	7,5	700
A.8	30	800
B.8	15	800
C.8	7,5	800
A.9	30	900
B.9	15	900
C.9	7,5	900

Fonte: O autor (2024).

Para o primeiro parâmetro de cálculo das perdas magnéticas as amostras foram analisadas variando-se a frequência em 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 50 Hz e 60 Hz para polarizações de 0,1~1,5 T (em intervalos de 0,1 T), para o segundo parâmetro adotou-se as frequências de 100 Hz, 200 Hz 300 Hz e 400 Hz com faixa de polarização de 0,1~1,0 T (em intervalos de 0,1 T), conforme mostrado na tabela 3. A densidade considerada do aço GNO adotada para o cálculo da espessura foi de 7,65 g/cm³.

Tabela 4 - Parâmetros de medida para ensaio Single Sheet.

Frequência (Hz)	Indução Magnética (T)														
10	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	
20	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	
30	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	
40	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	
50	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	
60	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	
100	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0					
200	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0					
300	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0					
400	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0					

Fonte: O autor (2024).

Após a coleta dos dados através da máquina de ensaio Brockhaus Messtechnik com o auxílio do Excel, foi possível plotar os gráficos relacionando a curva de histerese às frequências de 20 Hz, 30 Hz, 50 Hz e 60 Hz com polarizações 1,5 T e à frequência de 400 Hz com polarização de 1 T.

4.2.5 Separação das perdas magnéticas

O presente trabalho também realizou a investigação da influência do tratamento em cada componente da perda magnética. Para tanto, usou-se o método de separação proposto Bertotti (1988). Através deste método é possível indicar qual fenômeno de perda: histerese, clássico ou excesso é mais influenciado por cortes e tratamento térmico.

Utilizando-se a constante de perda clássica (C_c) como valor fixo, e com o auxílio dos dados obtidos de perda magnética, realizou-se o ajuste para obter os valores de perda

por histerese (Ph), perda clássica (Pc) e perda por excesso (Pe) para investigar a influência de cada componente de perda em função da frequência, e como o tratamento térmico influencia esses componentes.

4.2.6 Permeabilidade

Foi possível extrair os valores relativos de permeabilidade (μ_r) de cada amostra. Para esta extração utilizou-se a equação 9:

$$\mu_r = \frac{\Delta J}{\Delta H} = \frac{J_{m\acute{a}x} - 0}{H_{m\acute{a}x} - 0} \quad (9)$$

Ou seja, o material que apresenta menor perda magnética possui maior permeabilidade relativa (μ_r), já o aço com maior permeabilidade magnética oferece menor resistência ao fluxo magnético.

4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (Técnica EBSD)

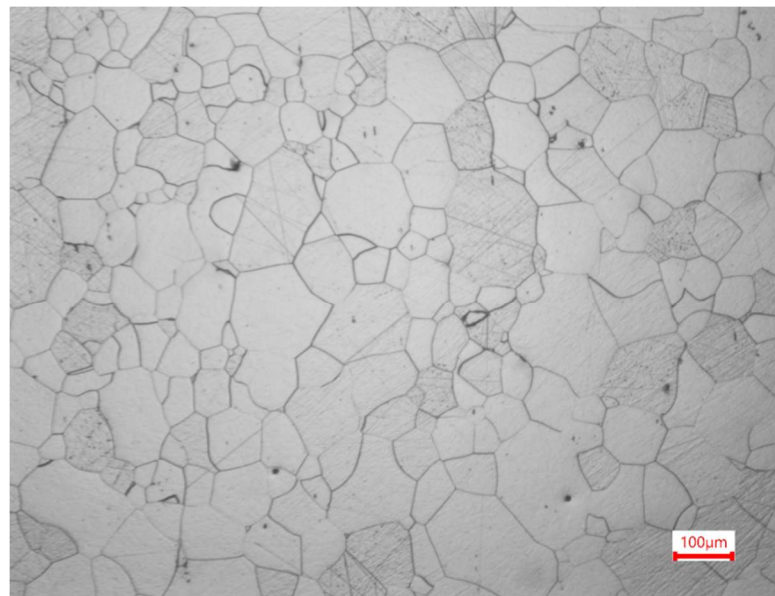
Para a investigação da textura cristalográfica foram realizadas análises das orientações cristalográficas por EBSD. A análise de EBSD foi feita em um microscópio eletrônico de varredura modelo oxford c nano do fabricante Quasi-S. As frações volumétricas das fibras e orientações de textura cristalográfica de interesse e a ODF (Função de Distribuição de Orientações Cristalinas) foram determinadas para as amostras após cada ciclo de tratamento térmico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Microestrutura e Tamanho de Grão

Na figura 32 são mostradas as fotomicrografias do aço GNO investigado no estado. Essa figura foi utilizada como parâmetro de referência para a verificação da ocorrência de crescimento de grão nas amostras que foram termicamente tratadas.

Figura 32 - Micrografia do aço NO30-16 em seu estado de entrega, ampliação de 10x.

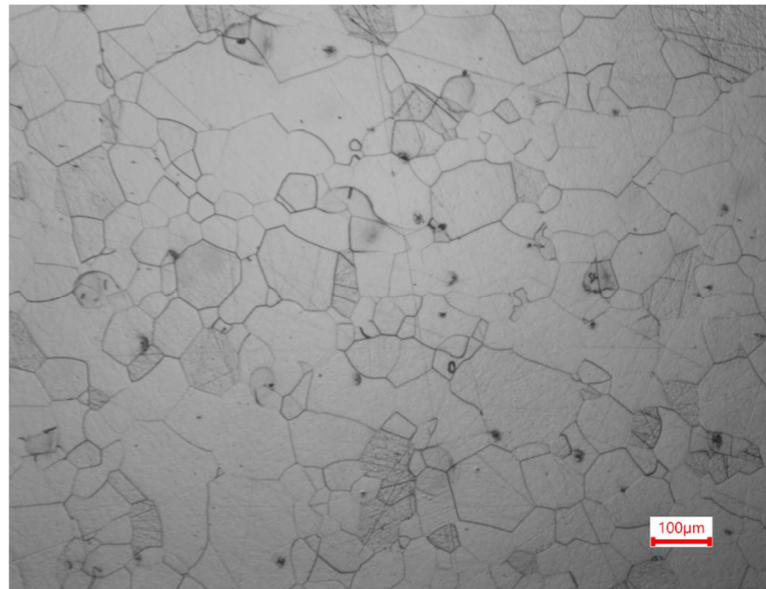


Fonte: O autor (2024).

Nota-se pela figura 32, numa análise qualitativa, o tamanho de grão relativamente grande, cujos valores serão detalhados mais a frente nesta seção, premissa necessária para favorecer boas propriedades magnéticas do aço GNO. É possível observar, a presença de riscos de coloração mais escura na imagem, isso ocorre devido à facilidade de oxidação do material. Percebe-se, ainda, a presença de pequenos pontos pretos distribuídos por unidade de área no material, estes devem-se a possíveis falhas durante a preparação das amostras, mais especificamente na etapa de limpeza.

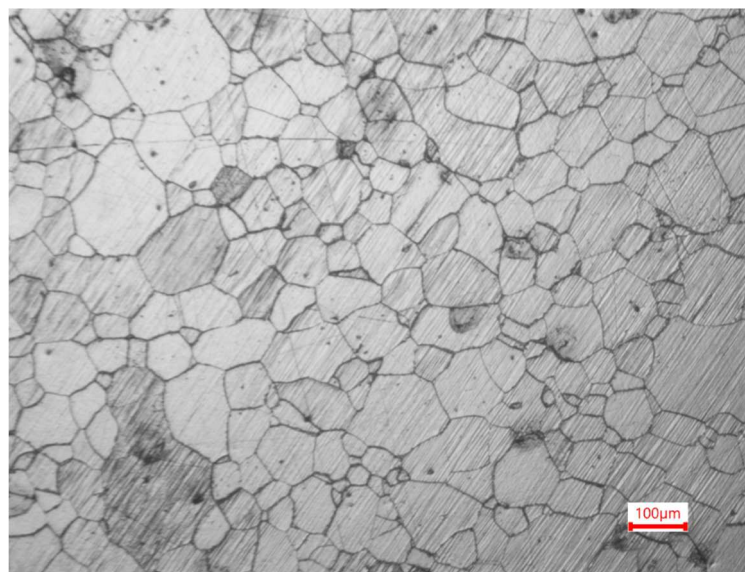
Após submetidas ao tratamento térmico, três amostras foram selecionadas para a preparação metalográfica, e em seguida à análise microestrutural. As figuras 33, 34 e 35 representam as microestruturas encontradas nas amostras tratadas termicamente à 700 °C, 800 °C e 900 °C respectivamente.

Figura 33 - Fotomicrografia do aço GNO NO30-16 tratado à 700 °C, ampliação de 4X.



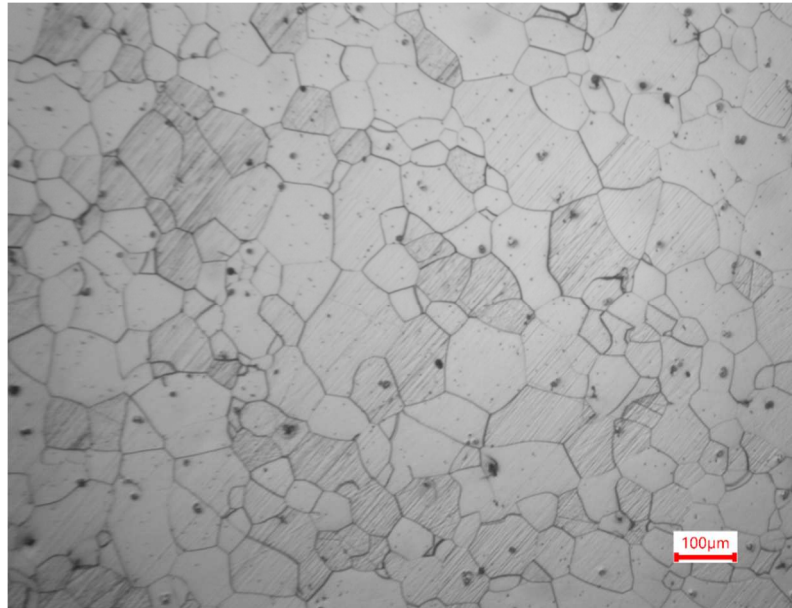
Fonte: O autor (2024).

Figura 34 - Fotomicrografia do aço GNO NO30-16 tratado à 800 °C, ampliação de 4X.



Fonte: O autor (2024).

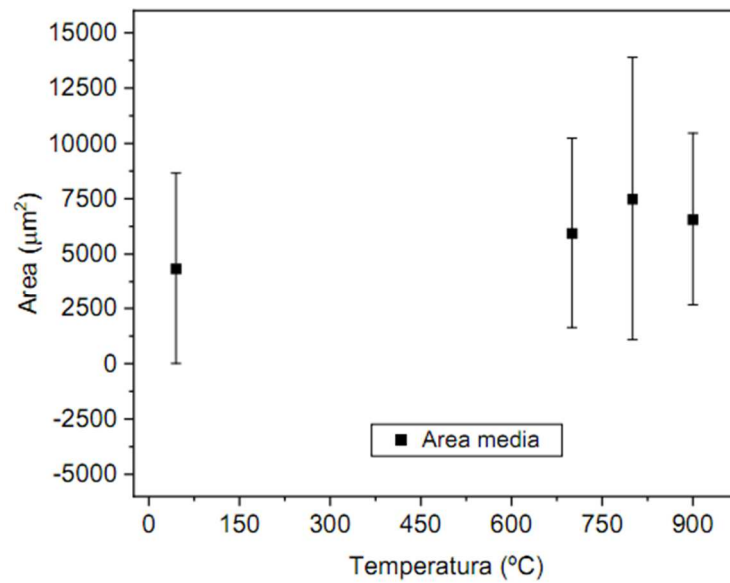
Figura 35 - Fotomicrografia do aço GNO NO30-16 tratado à 900 °C, ampliação de 4X.



Fonte: O autor (2024).

A análise comparativa das figuras 33, 34 e 35 sugere que a variação das temperaturas durante o tratamento térmico promoveu uma tênue alteração no tamanho de grão, onde estes se apresentaram mais grosseiros, mas ainda assim homogeneamente distribuídos. As figuras 36 e 37 apresentam um comparativo da área e do comprimento médio do grão respectivamente, antes e após o tratamento térmico. Como pode-se observar, o tratamento térmico de recozimento promove de fato alteração na área e largura média dos grãos. Ambos os comportamentos serão detalhados mais a frente nessa seção.

Figura 36 - Resultado da medição da área média dos grãos.

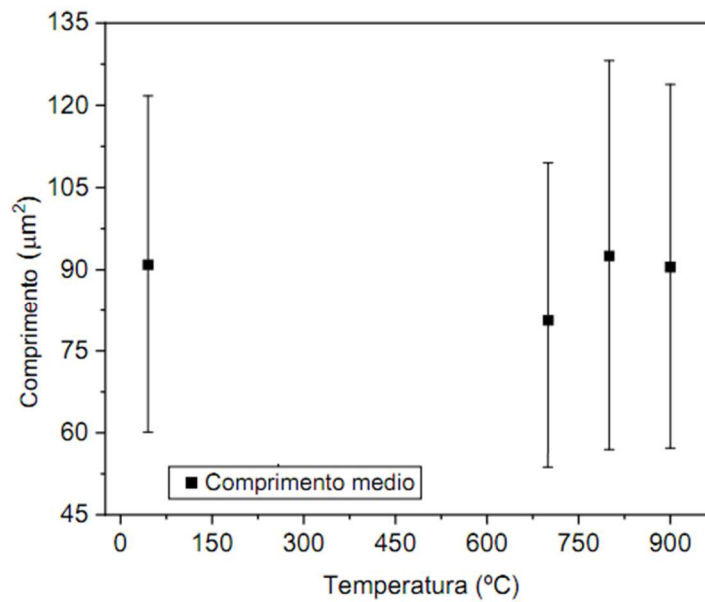


Fonte: O autor (2024).

A figura 36 mostra a área média dos grãos para as amostras analisadas, antes do tratamento térmico obteve-se uma área média de $4000 \mu\text{m}^2$ ao passo que após o tratamento térmico de recozimento esses valores ficaram entre 7000 e $7500 \mu\text{m}^2$, representando um aumento de aproximadamente 75%, 87,5% e 80% na área média dos grãos tratados termicamente à 700°C , 800°C e 900°C respectivamente.

Vale salientar que o tamanho de grão tem grande influência nas propriedades magnéticas, especialmente no que se refere a perdas magnéticas, como a variação do tamanho de grão com o recozimento não foi suficiente para promover alterações nas perdas magnéticas, as diferenças entre as propriedades magnéticas podem ser explicadas por outros fatores, tais como: a composição química, condições de processamento e textura cristalográfica.

Figura 37 - Resultado da medição da largura média de grão.



Fonte: O autor (2024).

Como pode-se observar na figura 37 a largura de grão médio obtido para as amostras antes do tratamento térmico de recozimento ficou próximo a 90 μm , valor ligeiramente inferior ao considerado ideal para a literatura. Para Landgraf *et al.* (2002) o tamanho de grão é inversamente proporcional às perdas magnéticas por histerese, esta relação propicia a existência de um tamanho de grão ótimo, considerado entre 100 μm e 150 μm .

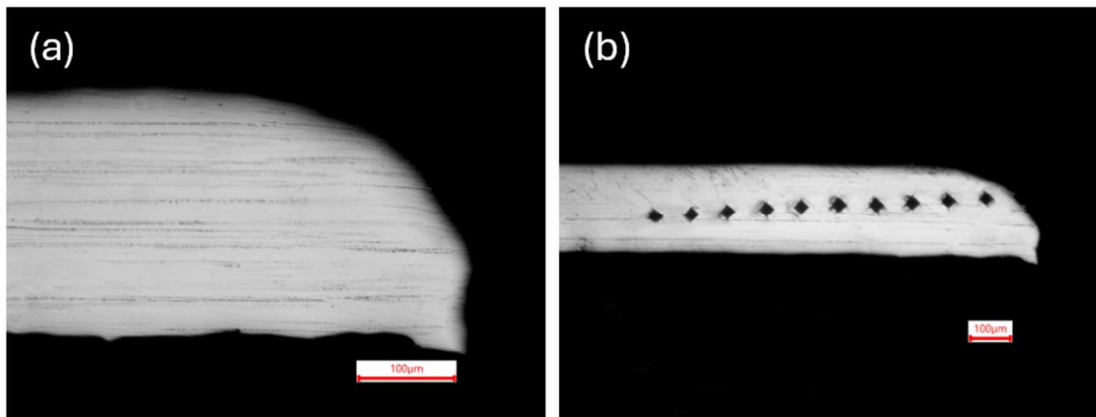
De acordo com a evolução microestrutural mostrada na figura 35, pode-se inferir que após o tratamento térmico de recozimento a largura média de grão variou entre 76 e 88 μm . Os valores mostrados na figura 37 demonstram que houve uma variação entre a largura média dos grãos antes do tratamento e a largura média dos grãos após o tratamento igual a 15,55% para o aço tratado à 700 °C e 2,22% para o aço tratado à 900 °C, já para o aço tratado à 800 °C a área média dos grãos manteve-se constante. Este resultado tem origem na deformação durante o tratamento térmico, devido ao baixo tempo de recozimento, ocorre apenas recuperação microestrutural. Em outras palavras, a textura não muda após este tratamento térmico porque o aço está completamente acabado e não possui nenhuma força motriz adicional, o que ativaria o crescimento dos grãos nas condições convencionais de recozimento. Assim, a

microestrutura permanece semelhante àquela encontrada no estado de entrega do aço.

5.2 Ensaio de Microdureza Vickers

Com o intuito de verificar a influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas próximo à borda de corte, foram realizadas análises e caracterizações de microdureza, conforme citado na metodologia apresentada. Na figura 38 são mostrados os corpos de prova (a) antes e (b) após serem submetidos ao ensaio mecânico de Microdureza Vickers. Na figura 38 (b) pode-se observar as indentações impressas pelo microdurômetro ao pressioná-lo contra a superfície da amostra.

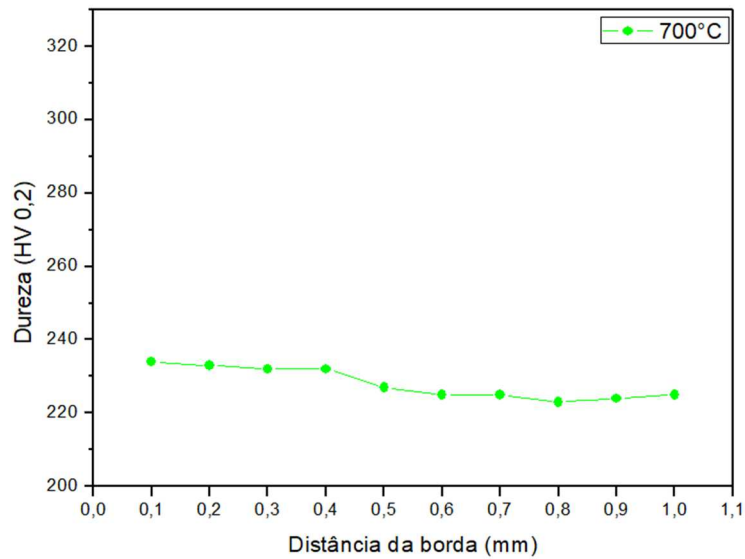
Figura 38 - Corpo de prova (a) antes e (b) após ser submetido ao ensaio mecânico de microdureza Vickers.



Fonte: O autor (2024).

As figuras 39, 40 e 41 mostram o gráfico de perfil de microdureza em função da distância de indentação (mm) próximo à borda do material para as chapas de aço elétrico tratados termicamente à 700 °C, 800 °C e 900 °C respectivamente.

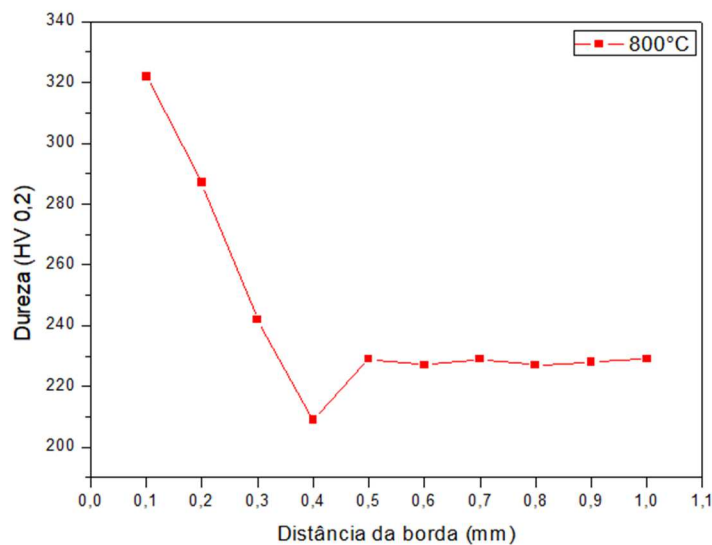
Figura 39 - Perfil de microdureza do aço NO30-16 para o tratamento térmico à 700 °C.



Fonte: O autor (2024).

A figura 39 mostra o comportamento da dureza para o material tratado termicamente à 700 °C, pode-se observar que até 0,4 mm de distância da borda de corte aço NO30-16 apresentou declínio moderado, com declínio pronunciado até 0,8 mm. No entanto, entre 0,8 mm e 1 mm a dureza do material aumentou ligeiramente devido às indentações terem se aproximado da borda inferior do corpo de prova.

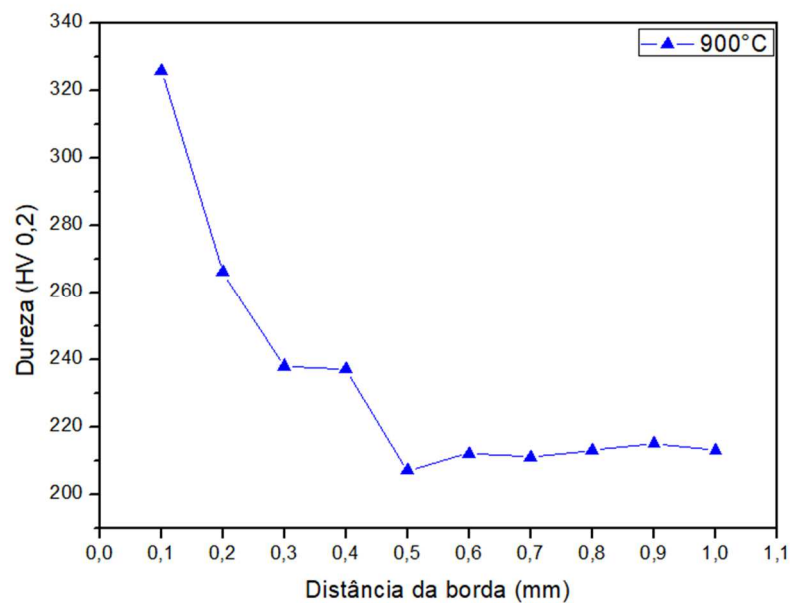
Figura 40 - Perfil de microdureza do aço NO30-16 para o tratamento térmico à 800 °C.



Fonte: O autor (2024).

Na figura 40, pode-se observar que para o material tratado termicamente à 800 °C há um declínio acentuado da dureza até 0,4 mm de distância da borda de corte, no entanto, posteriormente a dureza do material manteve-se constante até o fim do ensaio.

Figura 41 - Perfil de microdureza do aço NO30-16 para o tratamento térmico à 900 °C.



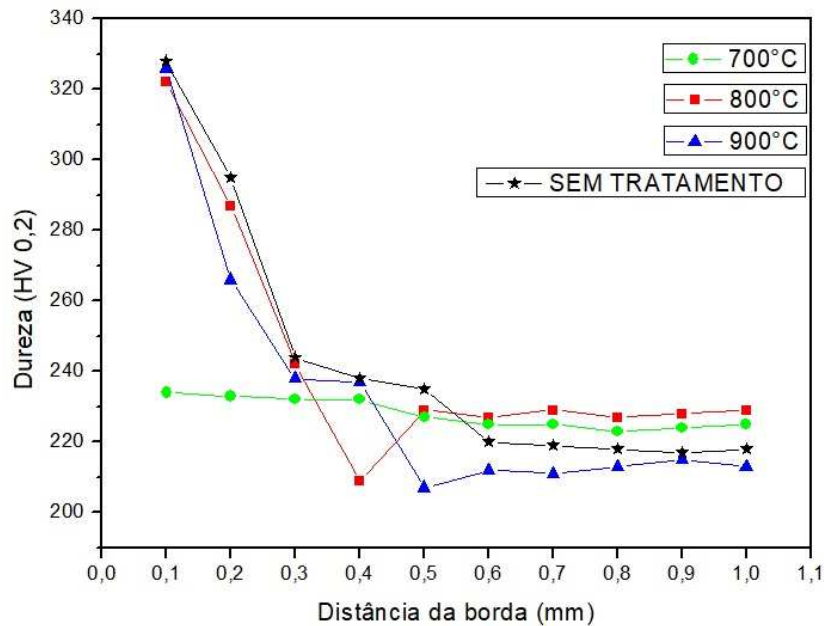
Fonte: O autor (2024).

Conforme ilustrado na figura 41, a dureza no material tratado termicamente à 900 °C, reduz consideravelmente até 0,5 mm de distância da borda de corte, a partir desse ponto o corpo de prova apresenta comportamento semelhante ao tratado termicamente à 800 °C e também se mantém constante até o fim do ensaio de microdureza Vickers.

A figura 42 apresenta um comparativo das medidas de microdureza realizadas após cada ciclo de tratamento térmico, estas evidenciaram um decréscimo geral da dureza dos aços analisados, no entanto é possível observar que a dureza próxima a borda de corte do aço tratado à 900 °C é maior em relação à dos aços tratados a 700 °C e 800 °C. Pode-se observar ainda, que a dureza próxima a borda de corte do aço sem

tratamento é superior à das demais amostras, evidenciando a eficácia do tratamento térmico.

Figura 42 - Comparativo dos perfis de microdureza do aço NO30-16 sem tratamento térmico e tratado termicamente à 700 °C, 800 °C e 900 °C.



Fonte: O autor (2024).

Conforme mostrado na Figura 42, os tratamentos térmicos nas temperaturas de 800 °C e 900 °C praticamente não resultaram em redução da dureza próximo a borda de corte, os valores de dureza das amostras tratadas a 800 °C e 900 °C sofreram uma redução de 2,12% e 0,31% respectivamente. Por outro lado, o tratamento térmico à 700 °C diminuiu em aproximadamente 28,26% a dureza do material, sugerindo potencial remoção de defeitos nos grãos. Esta mudança observada na dureza dentro da região da borda pode ser atribuída a um alívio de tensão, mecanismo associado ao revestimento do aço. Há a possibilidade de estar ocorrendo algum processo a 700 °C, que parece reversível após tratamento térmico superior a 800 °C.

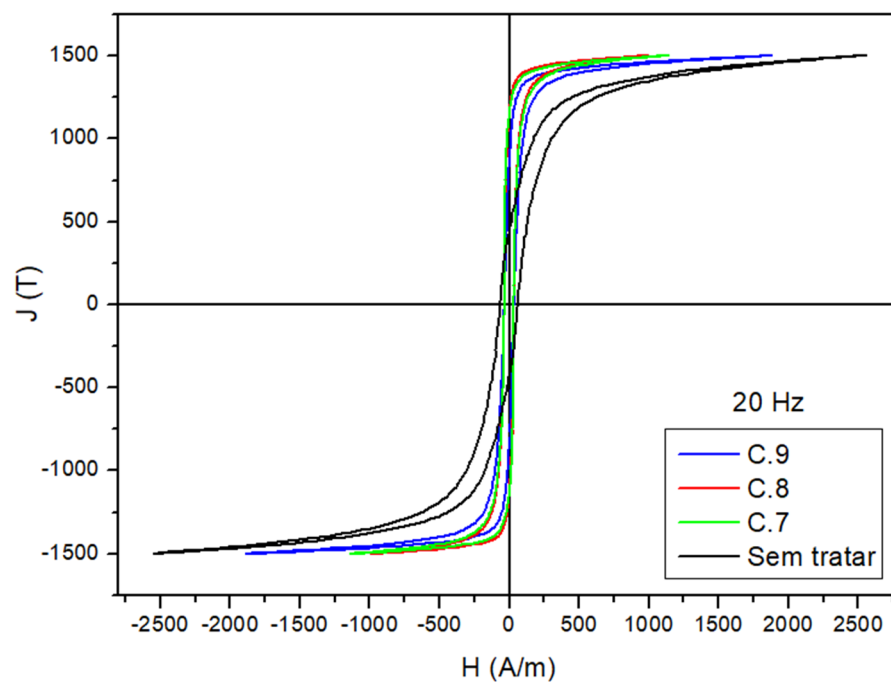
O trabalho de Schotten (2023) onde um aço baixo carbono foi submetido ao tratamento térmico de recozimento em temperatura de 700°C, corrobora com os resultados obtidos neste estudo. Dentre os resultados obtidos na pesquisa, pode-se destacar que as amostras normalizadas e recozidas apresentaram menor valor de

dureza em comparação as outras. Tais resultados podem ser atribuídos ao tratamento de recozimento, visto que este eleva a ductilidade do material.

5.3 Caracterização Magnética

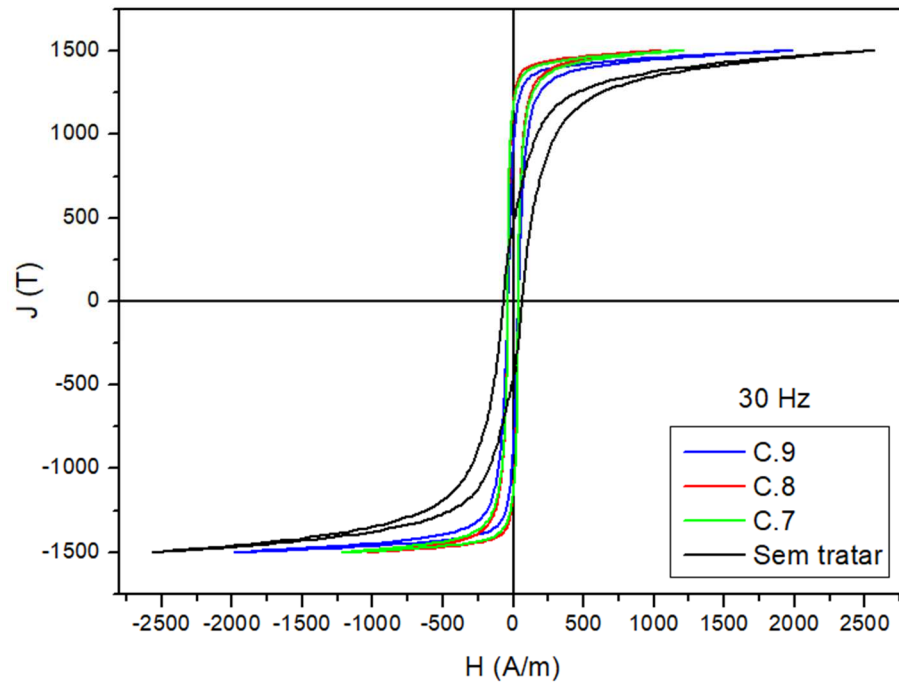
As figuras 43, 44, 45, 46 e 47 ilustram a variação da área de histerese das amostras com largura de 7,5 mm em função da variação dos parâmetros e dos tratamentos térmicos aplicados.

Figura 43 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 20 Hz.



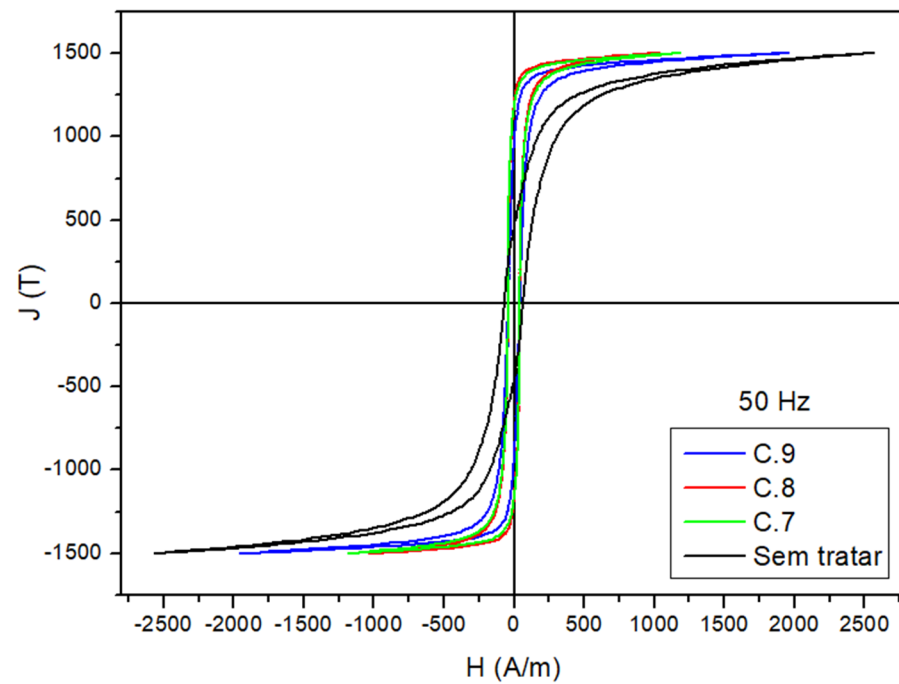
Fonte: O autor (2024).

Figura 44 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 30 Hz.



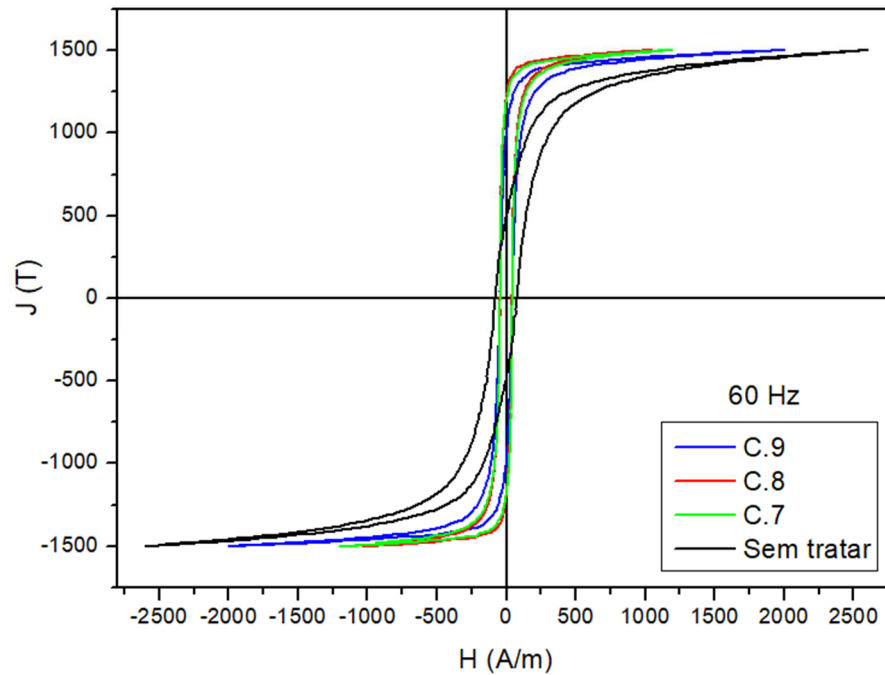
Fonte: O autor (2024).

Figura 45 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 50 Hz.



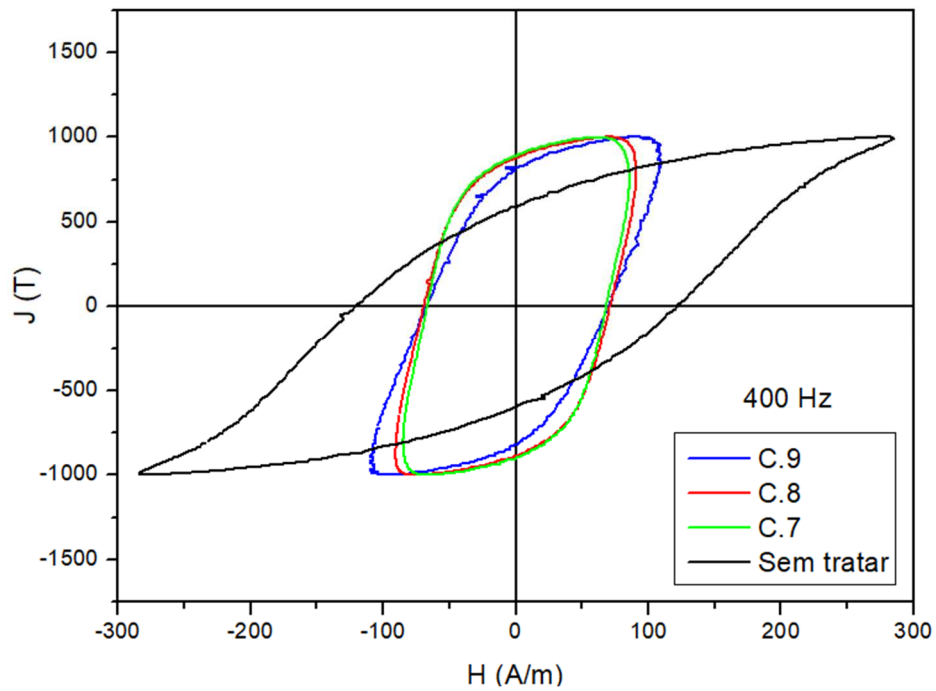
Fonte: O autor (2024).

Figura 46 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 60 Hz.



Fonte: O autor (2024).

Figura 47 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1 T e frequência de 400 Hz.

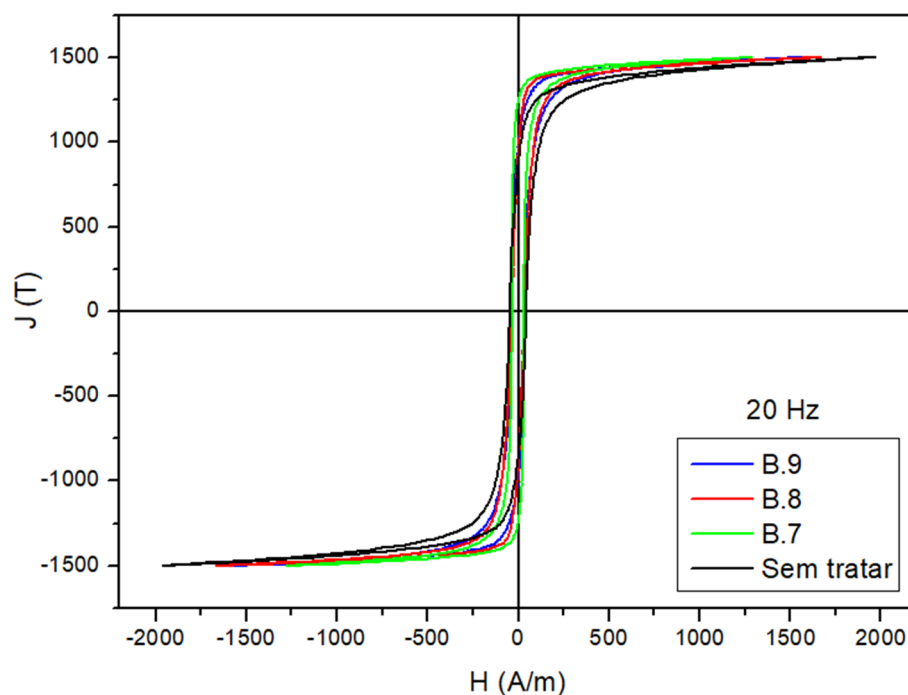


Fonte: O autor (2024).

A análise das figuras 43 até 47 permite constatar que, para amostras de 7,5 mm de largura, os resultados das curvas de histerese antes e após o tratamento térmico demonstram que o campo aplicado para induzir um campo magnético de 1,0 T ou 1,5 T no aço elétrico é menor para os aços tratados termicamente. Isto quer dizer que, quando aplicados a um mesmo campo, os aços tratados termicamente conseguem maximizar o campo aplicado com mais eficiência quando comparados ao aço sem tratamento térmico, chegando a campos induzidos com mais facilidade.

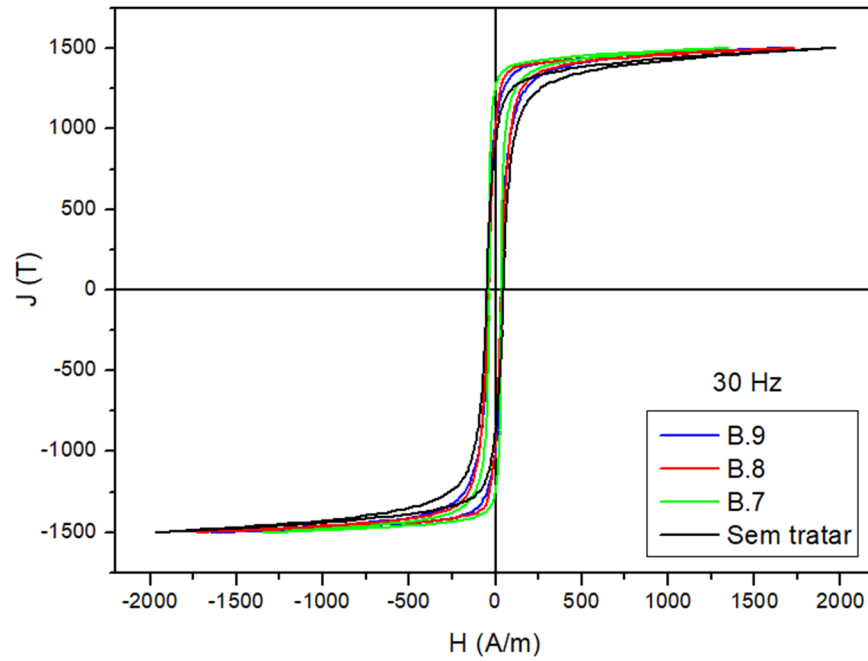
As figuras 48, 49, 50, 51 e 52 ilustram a variação da forma da curva de histerese das amostras com largura de 15 mm em função da variação dos parâmetros e dos tratamentos térmicos aplicados.

Figura 48 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 20 Hz.



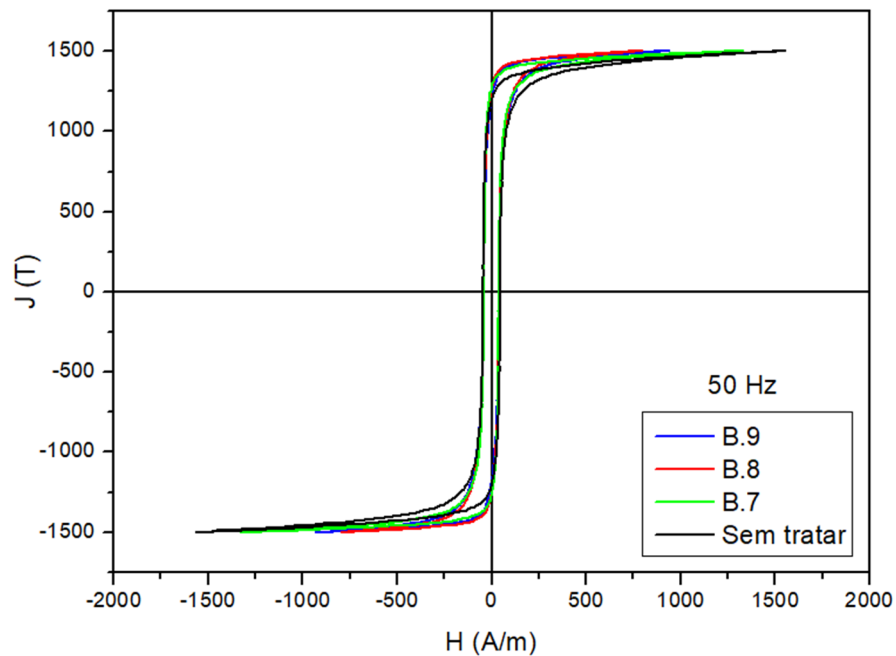
Fonte: O autor (2024)

Figura 49 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 30 Hz.



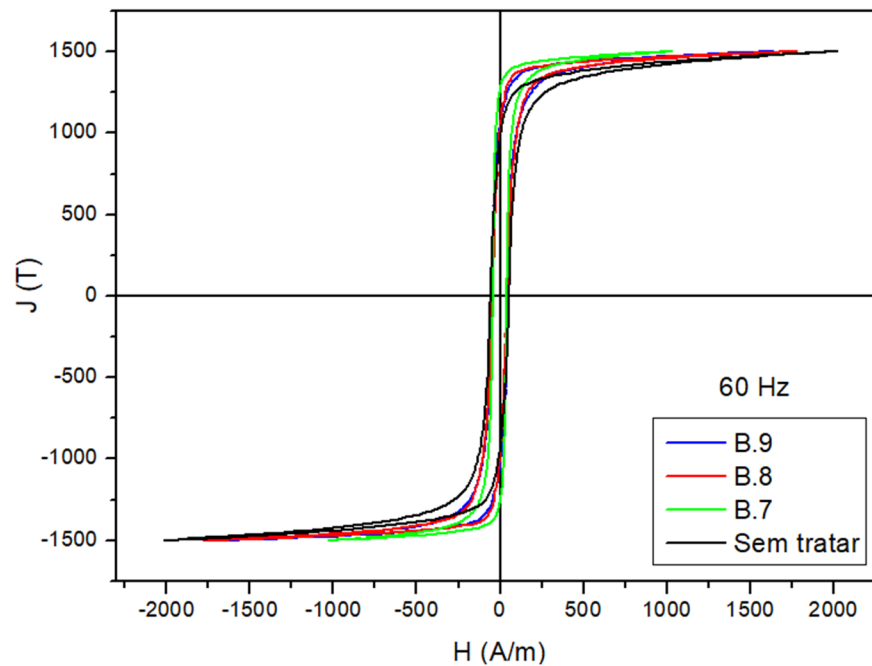
Fonte: O autor (2024).

Figura 50 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 50 Hz.



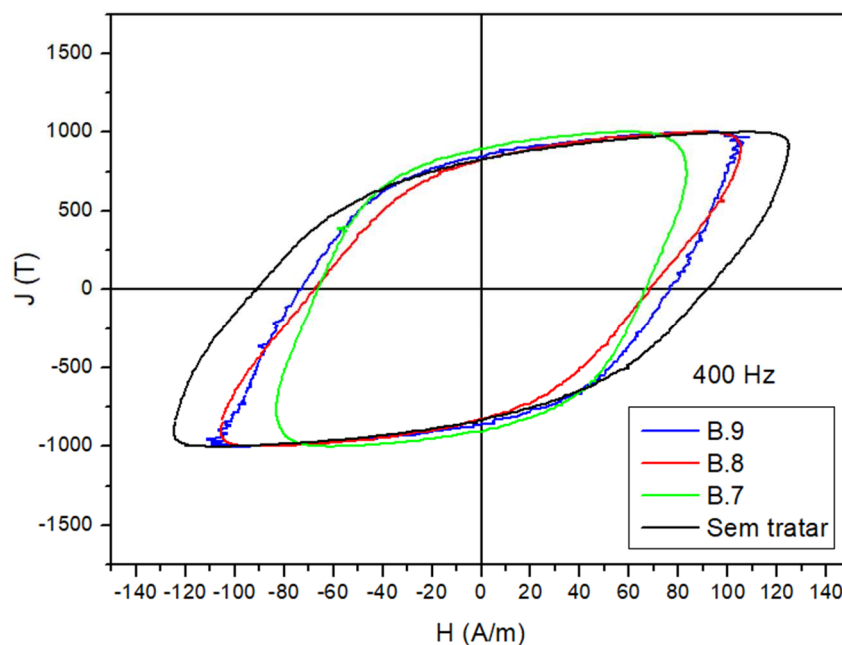
Fonte: O autor (2024).

Figura 51 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 60 Hz.



Fonte: O autor (2024).

Figura 52 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1 T e frequência de 400 Hz.



Fonte: O autor (2024).

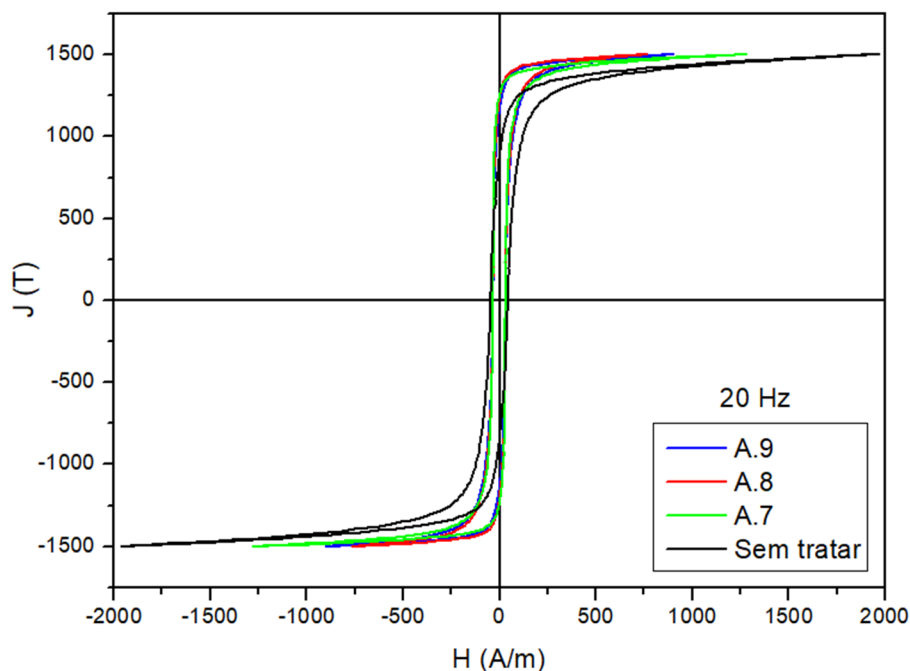
Como pode-se constatar, em todos os casos, o processo de tratamento térmico, em qualquer faixa, proporciona uma tendência à recuperação da área original. Este

resultado fica mais evidente na figura 52, onde é apresentado o resultado da lâmina com 15 mm de largura na frequência de 400 Hz, onde a área da curva de histerese é maior. Tal comportamento está em conformidade com o observado por Landgraf (2014), em seu trabalho intitulado 'Microestrutura e Propriedades Magnéticas', o autor dispõe que o cálculo do valor da energia dissipada é realizado através da dimensão da área no interior da curva de histerese. Desta forma, à medida que se reduz a frequência, a potência dissipada diminui e a curva se estreita, ocasionando uma menor dissipação de energia.

É importante ressaltar que dentro da faixa de duração do tratamento térmico, comumente referido como enxarque, não há promoção de crescimento de grãos em aços totalmente processados, conforme evidenciado nas figuras 33, 34 e 35. Isto sugere que o efeito observado tem origem no alívio de tensões na região deformada pelo corte.

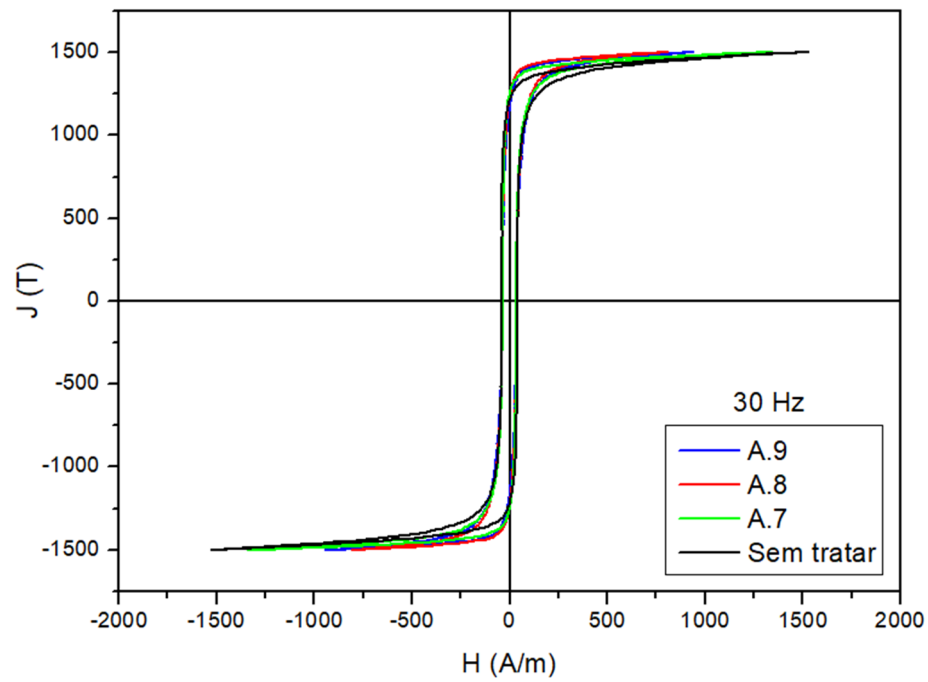
As figuras 53, 54, 55, 56 e 57 ilustram a variação da forma da curva de histerese das amostras com largura 30 mm em função da variação dos parâmetros supracitados e dos tratamentos térmicos aplicados.

Figura 53 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 400 Hz.



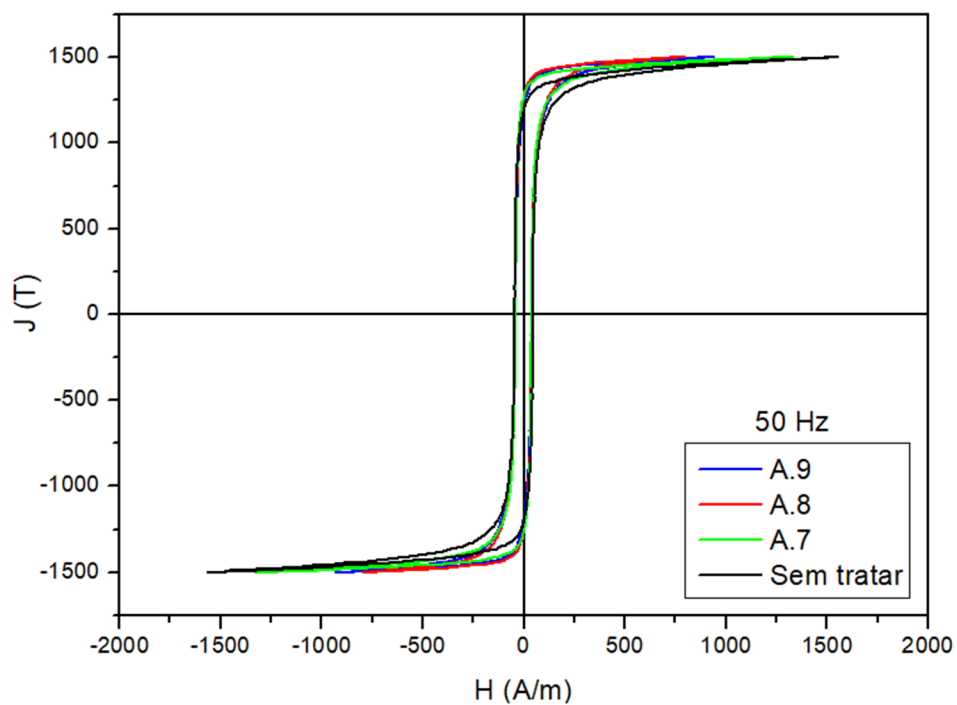
Fonte: O autor (2024).

Figura 54 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 30 Hz.



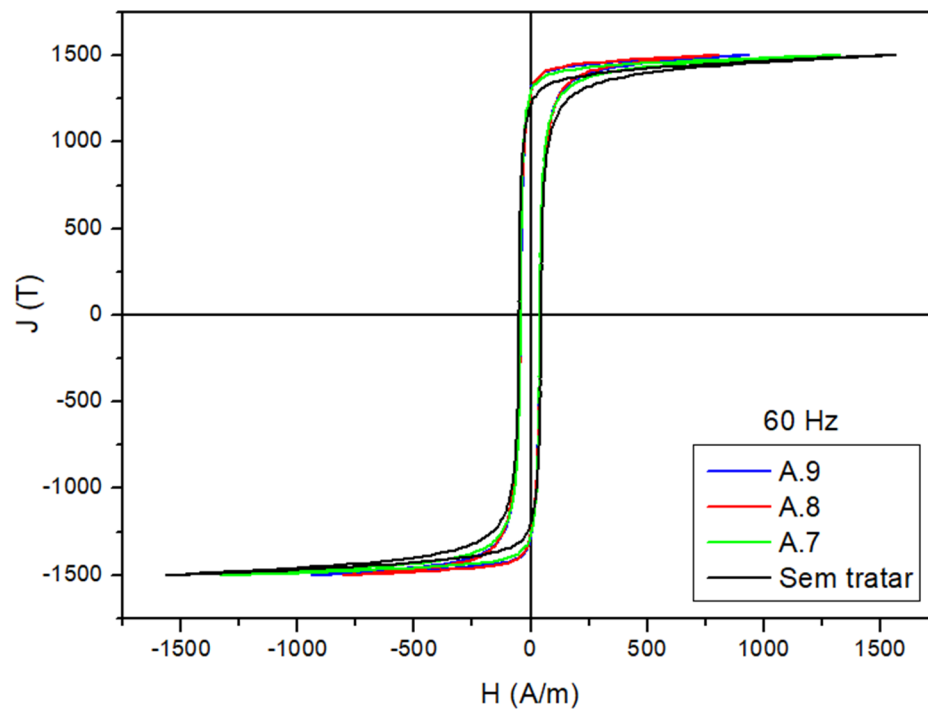
Fonte: O autor (2024).

Figura 55 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 50 Hz.



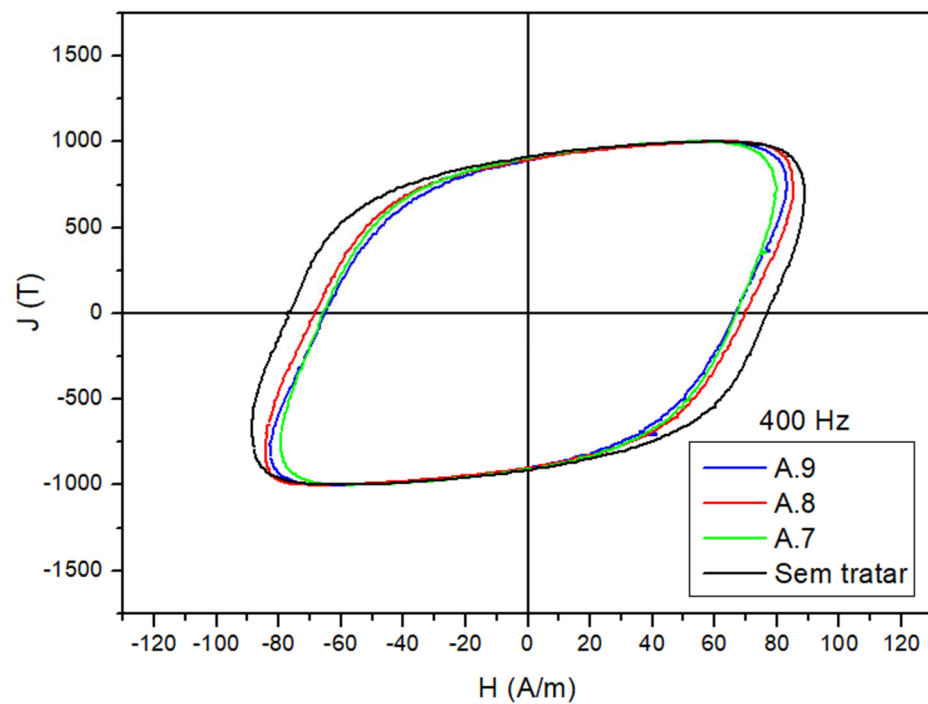
Fonte: O autor (2024).

Figura 56 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 60 Hz.



Fonte: O autor (2024).

Figura 57 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre as curvas de histerese do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T e frequência de 60 Hz.



Fonte: O autor (2024).

Uma análise global dos gráficos referentes às curvas de histerese do aço GNO permite constatar que o aumento do número de cortes nas lâminas provoca um aumento na área da curva de histerese. Ou seja, as lâminas de 7,5 mm apresentaram área da curva de histerese superiores às lâminas de 15 mm, que por sua vez, se mostraram superiores às lâminas de 30 mm. Tal comportamento indica uma maior dissipação de energia por unidade de volume,

Ao comparar-se o efeito do tratamento térmico nas curvas de histereses, nota-se que para a temperatura de 700 °C há variações mais significativas, visto que a área interna do gráfico representa a energia dissipada no ciclo magnético de histerese. Esse fenômeno pode ser mais bem observado a altas frequências conforme os gráficos das figuras 47, 52 e 57. Freitas (2011), em seu estudo sobre a influência do recozimento nas perdas magnéticas por histerese em aços GNO, demonstrou que todos os materiais analisados após tratamento térmico a 700 °C apresentaram uma queda considerável nas perdas magnéticas por histerese.

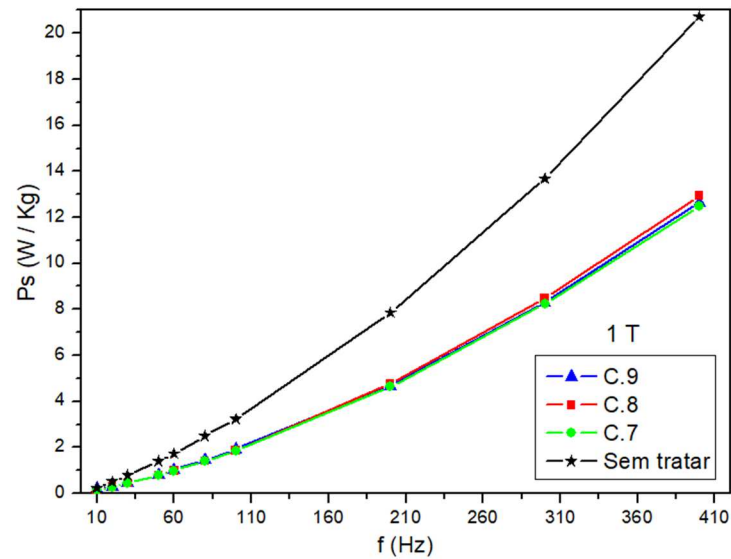
5.3.1 Perda Magnética Total

Para investigar a influência do tratamento térmico na recuperação da perda magnética, extraiu-se o valor desta perda em função da frequência aplicada e pela polarização.

Os gráficos das figuras 58, 59 e 60 representam os resultados da perda magnética total (W/kg) encontrados para as amostras submetidas ao tratamento térmico às frequências de 10 Hz a 400 Hz com polarização de 1 T.

Em todas as amostras analisadas com 7,5 mm de largura as perdas magnéticas totais obtiveram uma queda considerável, sendo de 39,5% para as amostras tratadas à 700 °C e 900 °C, e 37,5% para a amostra tratada à 800 °C, nas condições de 1,0T e 400Hz, como mostrado na figura 58.

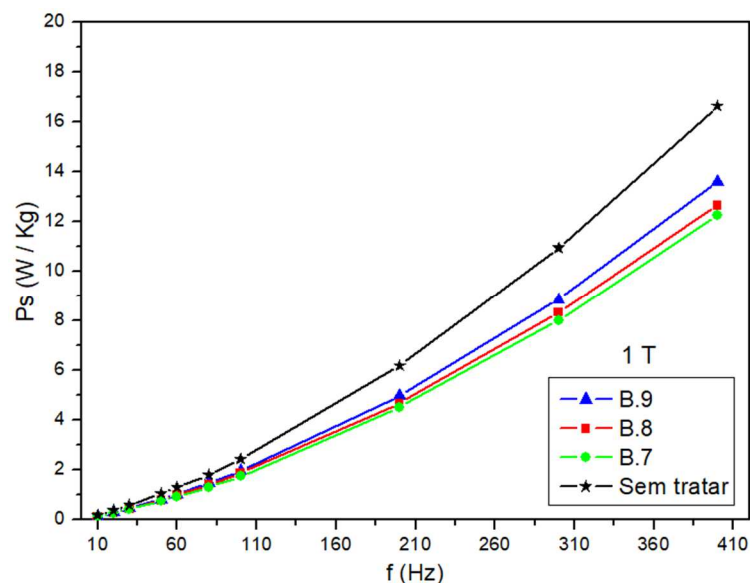
Figura 58 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a perda magnética total do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1 T.



Fonte: O autor (2024).

A figura 59 aponta que as amostras analisadas com 15 mm de largura também apresentaram redução considerável nas perdas magnéticas totais, sendo de 25,62% para a amostra tratada à 700 °C, 23,75% para a amostra tratada à 800 °C e 18,12% nas amostras tratadas a 900 °C, nas condições de 1,0T e 400Hz.

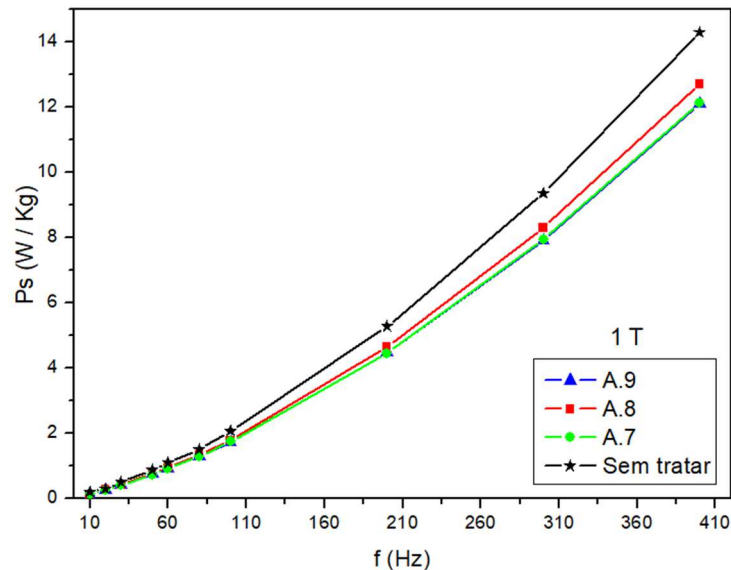
Figura 59 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a perda magnética total do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1 T.



Fonte: O autor (2024).

Conforme mostrado na figura 60 em todas as amostras analisadas com 30 mm de largura as perdas magnéticas totais obtiveram uma queda considerável, sendo de 14,64% para as amostras tratadas à 700 °C e 900° C, e 11,42% para a amostra tratada à 800 °C, nas condições de 1,0T e 400Hz.

Figura 60 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a perda magnética total do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1 T.



Fonte: O autor (2024).

Os resultados obtidos em função da frequência e com campo de indução de 1 T tornam evidente que aumentando-se a quantidade de cortes nas amostras, bem como a frequência, proporciona-se um aumento na perda magnética total. Embora os três tratamentos térmicos realizados tenham contribuído para a redução desta perda, o tratamento realizado a 700 °C apresenta novamente melhor eficiência em toda a faixa de frequência medida.

Após o tratamento térmico a 700 °C, foi observada uma redução de 39,5% na perda magnética na amostra com 7,5 mm de largura em comparação ao seu estado inicial. Este resultado sugere que o tratamento térmico não apenas aliviou tensões na região de corte, mas também reverteu as deformações dos grãos, resultando na recuperação das propriedades magnéticas do material.

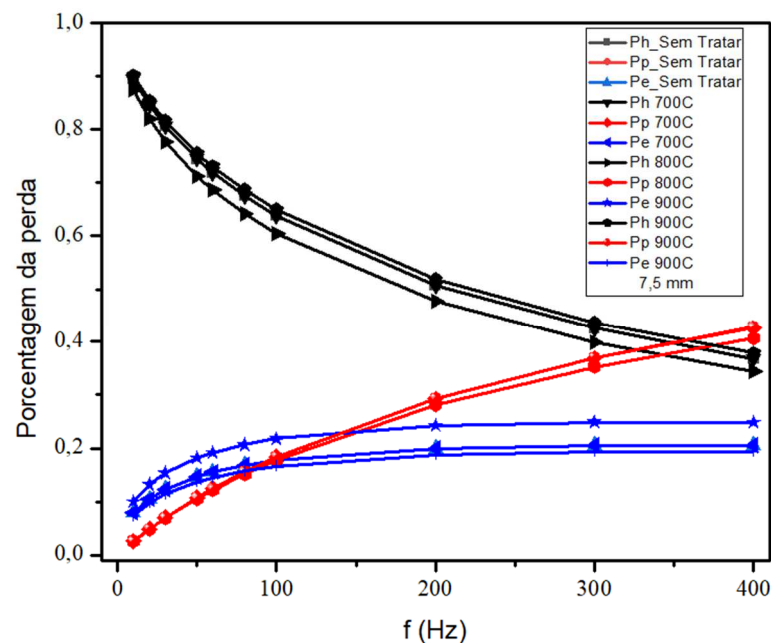
CRUZ *et al.* (2021), ao investigarem o efeito do tratamento térmico nas propriedades magnéticas para três amostras de aços com fins elétricos, observaram que o

recozimento final à temperatura de 700 °C, utilizado principalmente para alívio de tensões e crescimento de grãos, proporcionou redução significativa das perdas totais e aumento da permeabilidade magnética em todas as amostras analisadas. Além disso, o estudo também constatou que a parcela histerética das perdas se apresentou como a maior representante nas perdas totais.

5.3.2 Separação das perdas magnéticas

As figuras 61 e 62 mostram isoladamente a contribuição de cada perda para a perda magnética total. Os valores expostos são provenientes das relações: Ph/P_t , Pc/P_t e Pe/P_t , que estão detalhadas na seção 3.2.2.

Figura 61 - Resultado da contribuição de cada perda para a perda total em função da frequência para lâminas com 2 cortes (7,5 mm).



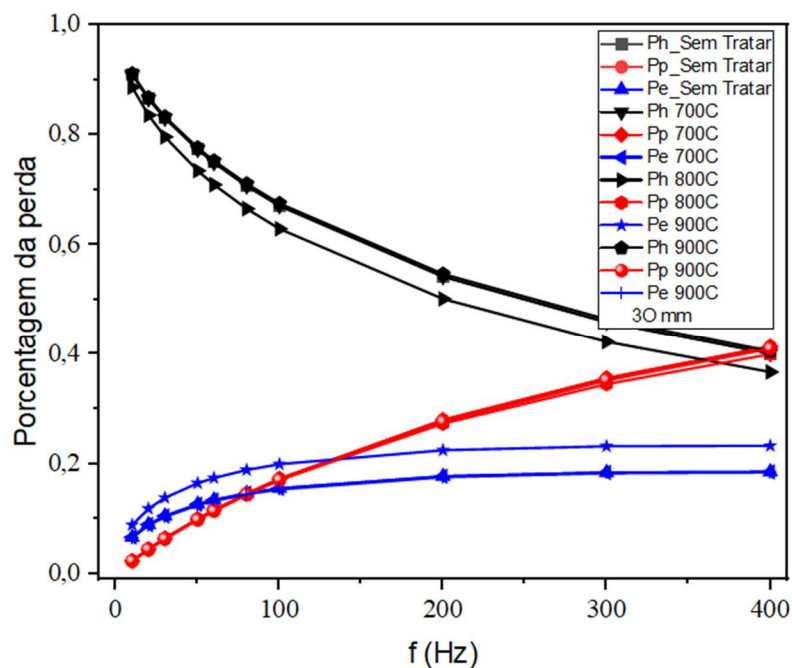
Fonte: O autor (2024).

Ao se analisar a figura 61, observa-se que para frequências abaixo de 400 Hz a perda é dominada pela histerese, em todos os tratamentos térmicos, inclusive os não tratados, a partir de 400 Hz a perda é dominada pela perda clássica. Porém, no

tratamento térmico a 700 °C esta frequência é reduzida para aproximadamente 380 Hz. Outro ponto a ser observado é que a perda clássica se torna maior que a perda excessiva para frequências acima de 100 Hz.

O comportamento das componentes das perdas é variável, portanto, ao se analisar as amostras tratadas à 60 Hz, que é a frequência mais usual, observou-se que dentre as componentes, a perda histerética obteve importante destaque, representando uma parcela em torno de 70% das perdas totais, enquanto as perdas clássicas e por excesso representaram aproximadamente 10% e 20% das perdas totais respectivamente. Por outro lado, as amostras tratadas a 400 Hz, que é a frequência do material, demonstraram uma parcela de 33% das perdas histeréticas, 22% das perdas por excesso e 42% das perdas clássicas, nas perdas totais.

Figura 62 - Resultado da contribuição de cada perda para a perda total em função da frequência para lâminas sem cortes (30 mm).



Fonte: O autor (2024).

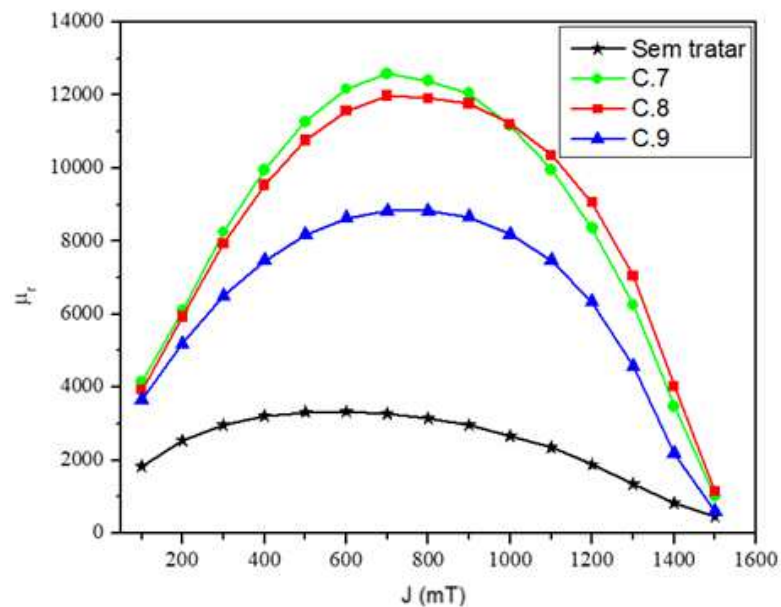
A figura 62 mostra que para frequência de 60 Hz a perda também é dominada pela histerese com uma parcela de 75% das perdas totais, as perdas por excesso representam 19% e as perdas clássicas 6%. A partir de 400 Hz a perda é dominada

pelas perdas clássica e histerética que representam 40% cada, enquanto as perdas por excesso representam 20% do total das perdas magnética.

5.3.3 Permeabilidade

As figuras 63, 64 e 65 mostram os valores da permeabilidade relativa em função da polarização J (T) e da frequência para diferentes larguras de cortes e tratamentos.

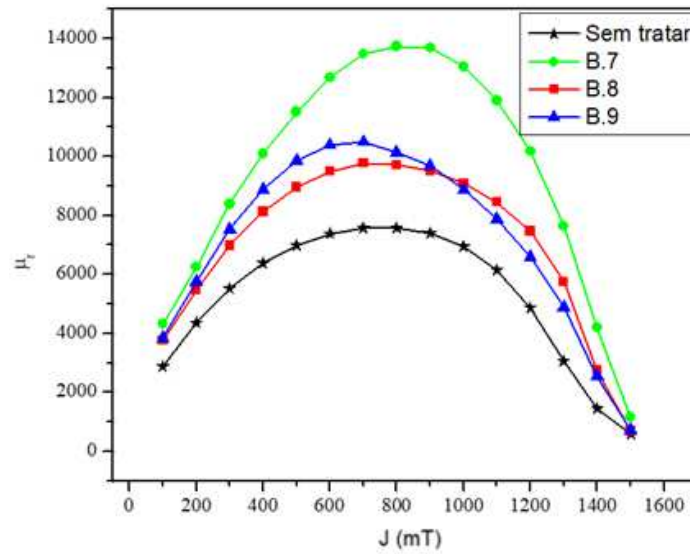
Figura 63 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a permeabilidade relativa do aço GNO 7,5 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T.



Fonte: O autor (2024).

A figura 63 mostra o resultado da permeabilidade para as lâminas com 7 mm de largura, nota-se que o tratamento à 700 °C promoveu a melhor recuperação dos valores de permeabilidade, cujo valor relativo máximo é igual a 13000, e a ampliação foi aproximadamente 300%, na condição de 0,8 T.

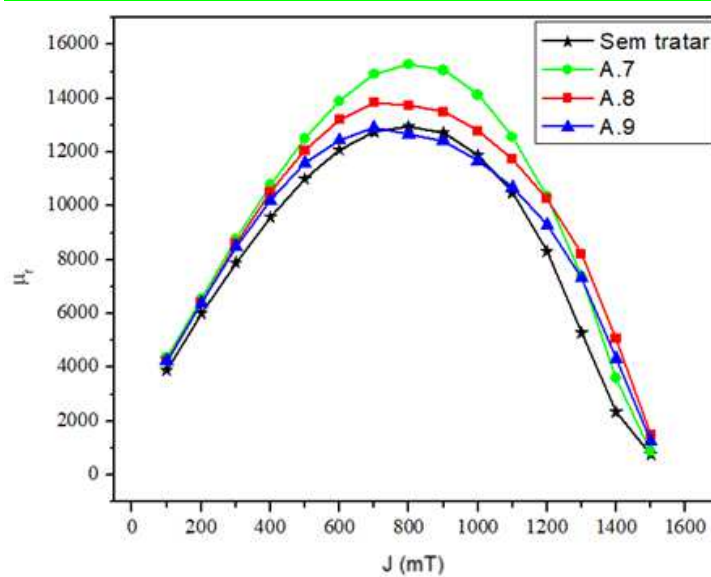
Figura 64 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a permeabilidade relativa do aço GNO 15 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T.



Fonte: O autor (2024).

A figura 64 mostra o resultado da permeabilidade para as lâminas com 15 mm de largura, nota-se que o tratamento à 700 °C também promoveu a melhor recuperação dos valores de permeabilidade, cujo aumento foi de aproximadamente 100%, ou seja, a permeabilidade dobrou na condição de 0,8 T.

Figura 65 - Gráfico comparativo do efeito do tratamento térmico sobre a permeabilidade relativa do aço GNO 30 mm, em campo induzido máximo de 1,5 T.



Fonte: O autor (2024).

A figura 65 mostra o resultado da permeabilidade para as lâminas com 30 mm de largura, onde pode-se observar uma menor disparidade na recuperação da permeabilidade em relação à temperatura aplicada no tratamento térmico, ainda assim o tratamento à 700 ° C também promoveu a melhor recuperação dos valores de permeabilidade, cujo acréscimo foi de aproximadamente 125%, na condição de 0,8 T.

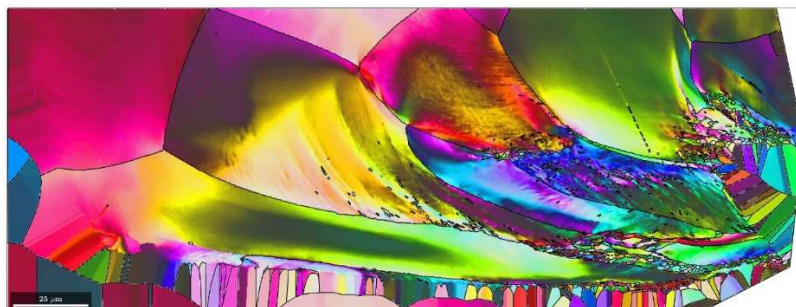
Como pode ser observado, novamente, o tratamento foi eficiente, principalmente na figura 63 onde o resultado é mostrado para as lâminas com 7,5 mm de largura, ou seja, com mais arestas de corte, onde a recuperação dos valores de permeabilidade, cujo valor relativo máximo é igual a 13000, foi de aproximadamente 300%, na condição de 0,8 T. Isso indica que a região magneticamente afetada pelo corte teve uma boa recuperação das suas características magnéticas após este tratamento.

Diante das considerações expostas acima, fica evidente a importância do tratamento térmico de recozimento nas amostras analisadas, pois além de se mostrar eficiente na redução das perdas magnéticas totais (Pt), o recozimento também contribuiu no aumento da eficiência dos aços em função do aumento da permeabilidade magnética.

5.4 Análise da textura cristalográfica via EBSD.

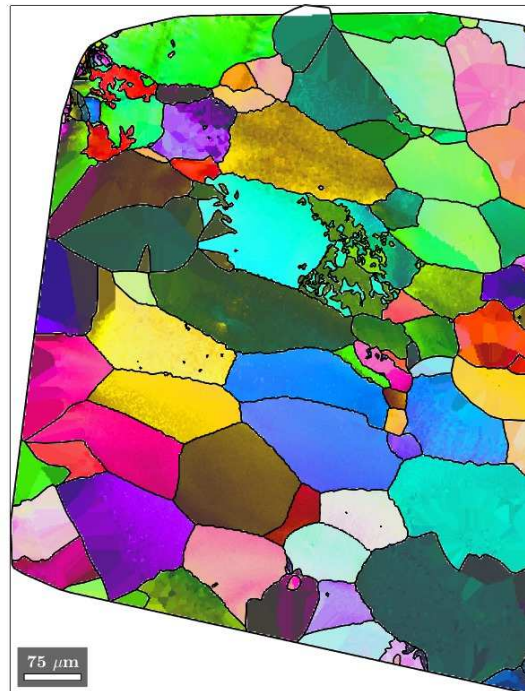
As figuras 66, 67, 68, 69 e 70 apresentam os resultados da avaliação de textura das amostras, obtidos pela técnica de EBSD. Através dos mapas de EBSD é possível analisar a borda cisalhada e avaliar a microestrutura por meio da distribuição da desorientação nos grãos.

Figura 66 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO no estado de entrega, antes do corte.



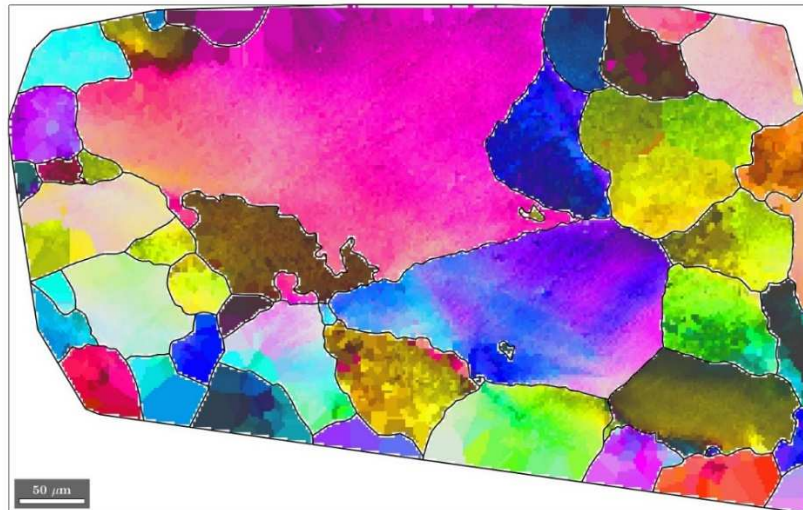
Fonte: O autor (2024).

Figura 67 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO após o corte e sem tratamento térmico.



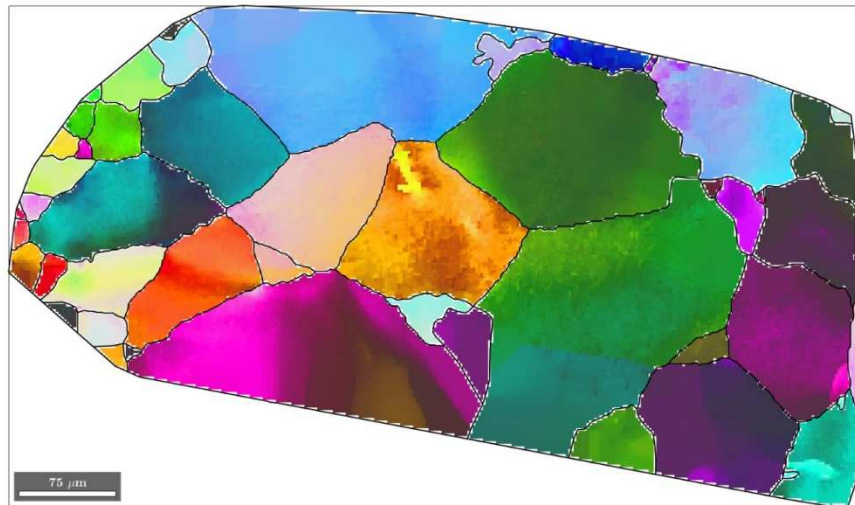
Fonte: O autor (2024).

Figura 68 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO após tratamento térmico à 700 °C.



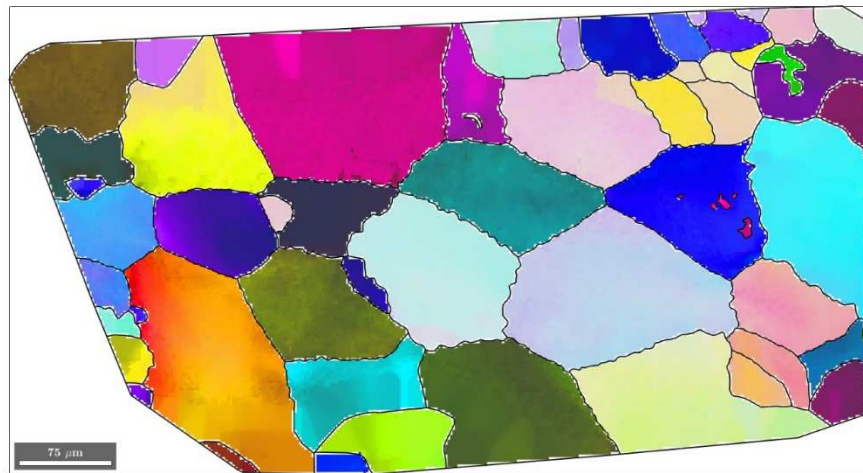
Fonte: O autor (2024).

Figura 69 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO após tratamento térmico à 800 °C.



Fonte: O autor (2024).

Figura 70 - Representação esquemática da varredura de EBSD do aço GNO após tratamento térmico à 900 °C.



Fonte: O autor (2024).

Os mapas de EBSD expostos nas figuras 68, 69 e 70 evidenciam a ocorrência de variações graduais de orientação no interior de cada grão em função de rotações ocasionadas pelas deformações provenientes do corte. Além disso, pode-se observar nas amostras analisadas a presença de uma nova organização dos grãos pós-tratamento térmico, que se correlaciona com a recuperação magnética observada nos resultados do presente trabalho.

Neste aspecto, a análise EBSD aponta para uma redução mais significativa na desorientação dos grãos durante o tratamento térmico à temperatura de recozimento de 700 °C, tais resultados estão relacionados à redução das tensões mecânicas dentro da rede cristalina e a recuperação das propriedades eletromagnéticas.

Alves *et al.* (2020) ao analisarem a influência da temperatura de recozimento com alívio de tensões na microestrutura da aresta de corte e na recuperação das propriedades magnéticas de aços elétricos de grão orientado, constataram através de análises por microscópio eletrônico de varredura equipado com ferramenta EBSD que ocorre uma desorientação dos grãos causada pela deformação na região da aresta de corte em amostras de aço GNO, conforme representado na figura 67, seguida de uma reorganização distinta dos grãos após o tratamento térmico, conforme ilustrado nas figuras 68, 69 e 70.

6 CONCLUSÃO

A discussão acerca dos resultados sobre a recuperação das propriedades magnéticas de um aço Fe-Si de grãos não orientados após o corte em função do tratamento térmico de recozimento permitiu obter as seguintes conclusões:

- A largura média de grão antes do tratamento e após o tratamento variou em 15,55% para o aço tratado à 700 °C e 2,22% para o aço tratado à 900 °C. A largura média de grão do aço tratado à 800 °C manteve-se constante.
- Após o tratamento ocorreu um aumento de aproximadamente 75%, 87,5% e 80% na área média dos grãos tratados termicamente à 700 °C, 800 °C e 900 °C respectivamente.
- As análises de microdureza vickers apontaram que a amostra tratada a 700 °C obteve a maior redução percentual de dureza (28,26%) quando comparada à dureza do material como recebido. Em contrapartida as amostras tratadas a 800 °C e 900 °C obtiveram redução de apenas 2,12% e 0,31% respectivamente.
- A alteração significativa na dureza da região da borda, possivelmente está ligada a processos de alívio de tensões. Este fenômeno, particularmente perceptível a 700 °C, na verdade indica um alívio de tensão que também foi observado nas imagens EBSD. Porém, acima de 800 °C pode ter ocorrido um processo de sedimentação envolvendo o material de revestimento;
- A melhor condição encontrada de perda magnética total foi para a amostra tratada termicamente à 700 °C, onde foi observada uma redução de 39,5% na perda magnética na amostra com 7,5 mm de largura em comparação ao aço sem tratamento térmico.
- Ainda que o tratamento à 700 °C tenha apresentado os melhores resultados, todos os tratamentos térmicos promoveram redução nas perdas magnéticas e restauraram as propriedades magnéticas pós-corte, apresentando potencial para induzir a recuperação magnética estrutural;
- Os tratamentos térmicos sob atmosfera controlada influenciam efetivamente componentes específicos de perda, possibilitando ajustes precisos no desempenho magnético ou alcançando efeitos diversos;

- Quanto à separação das perdas magnéticas, observou-se que em baixas frequências (60 Hz) a perda é dominada pela histerese que representa 70% das perdas totais, tendo esse quadro invertido a 400 Hz quando a perda é dominada pela perda clássica cuja parcela representa 42% nas perdas totais.
 - A permeabilidade foi melhor para a amostra tratada à 700 °C, cuja redução foi de aproximadamente 300%. Este dado é congruente com a melhor redução de dureza, menores perdas magnéticas e menor desorientação dos grãos.
-
- A recuperação microestrutural observada através da caracterização EBSD evidenciou que tratamentos térmicos direcionados podem iniciar processos microestruturais essenciais para restaurar propriedades magnéticas;
 - O ensaio de EBSD corroborou com os resultados obtidos no ensaio magnético, onde percebe-se uma redução mais significativa na desorientação dos grãos durante o tratamento térmico à temperatura de recozimento de 700 °C, assim como os dados obtidos das amostras analisadas no *Single Sheet*.
 - Os dados extraídos da análise de perdas magnéticas dependente da frequência fornecem insights sobre como diferentes frequências impactam os mecanismos de perda em materiais como o aço GNO, ressaltando a importância das considerações de frequência na otimização do desempenho magnético. Essas descobertas têm implicações práticas para indústrias que dependem de materiais magnéticos eficientes, como transformadores elétricos e sistemas de transmissão de energia.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Construção e dimensionamento de um estampo de corte similar ao utilizado nas indústrias.
- Submissão das chapas de aço à diferentes folgas mecânicas entre as lâminas do equipamento e realizar o estudo da resposta magnética exibida pelo aço GNO.
- Aumentar a quantidade de amostras, podendo assim confirmar a repetibilidade dos resultados e a confiabilidade no projeto.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5161: produtos laminados planos de aço para fins elétricos – verificação das propriedades. Rio de Janeiro: ABNT, 1977.
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 6507: Materiais metálicos - ensaio de dureza conforme Vickers; Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- Alves, E. M. M.; Silveira, C. C.; Cunha M. A. da. Influence of stress relief annealing temperature on the cutting edge microstructure and on the recovery of magnetic properties of grain oriented electrical steel, *Materials Characterization*, vol. 166, p. 110408, 2020.
- ANJOS, M. S. Desenvolvimento e Avaliação de Aços para fins Elétricos Totalmente Processados em Recozimento em Caixa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.
- APERAM SOUTH AMERICA. Aços Elétricos Sustentabilidade e eficiência. Timoteo, 2024. Citado na página 45.
- ASTM E112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 2007.
- ARAÚJO, J. R. L. de *et al.* Efeito do processo de recozimento primário e secundário em aços elétricos de grão orientado. *Research, Society and Development*, v. 8, n. 3, p. e3483731, 2019. Citado na página 18.
- ASSIS, C. L. F. de *et al.* Refino De Grão Em Aços Baixo Carbono: Uma Revisão Crítica. In: [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8. Citado na página 18.
- BASTOS, J. P. A. Eletromagnetismo e Cálculo de Campos. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 1996. 250 p. Citado na página 20.
- BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 24, n. 1, p. 621–630, jan. 1988.
- BOHN, F. *et al.* Propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não-orientado. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. [s.n.], 2004. Disponível em: Citado 2 vezes nas páginas 21 e 24.
- BOTELHO, R. A. Laminções Assimétricas E Propriedades De Aços Elétricos Gno Com 3,0% De Silício. 135 p. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.
- CALISTER, W. D. J. D. G. R. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. 864 p. ISBN 8521637284. Citado 5 vezes nas páginas 9, 15, 20, 22 e 23.
- CARDOSO, R. F. D. A. Influência do tamanho de grão e das adições de Al e Mn nas propriedades magnéticas dos aços elétricos de grão não orientado com 3% Si. Rio

de Janeiro Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, 2005. Citado na página 15.

CHUEN, S. L. Determinação dos parâmetros operacionais do recozimento de descarbonetação do aço silício. 120 p. Tese (Doutorado) — UFMG, 1980. Citado na página 18.

COLPAERT, H.; SILVA, A. L. V. d. Costa e. Metalografia dos produtos siderurgicos comuns. São Paulo: Ed. Blucher, 2012.

CRUZ, J dos S. M. S. Et Al. Caracterização Microestrutural E Análise Das Propriedades Magnéticas De Aços Para Fins Elétricos De Baixa Eficiência. III Congresso Online de Engenharia de Materiais. 4. ed. 2021.

EMURA, E. *et al.* Efeito do corte nas propriedades magnéticas de aços elétricos. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT São Paulo, 2000.

FERREIRA, M. F. S. Ensaios de dureza Rockwel, Vickers, Brinell e Microdureza, ensaios de Tração e ensaio Jominy. Relatório 1 de Laboratório de Materiais de Construção Mecânica, 2011.

FREITAS, F. N. C. Influencia da Recristalização no comportamento da textura cristalográfica e nas perdas magnéticas por histerese de um aço elétrico de grão não orientado (GNO). 171 p. Tese (Doutorado) – UFC, 2011.

GBLER, S. R. Caracterização dos parâmetros de recozimento de aços totalmente processados para fins elétricos. 124 P. Tese (Mestrado) - UFSC, 2000.

GUIMARAES, A. P. MAGNETISMO E RESSONANCIA MAGNETICA EM SOLIDOS. 1. ed. São Paulo: EDUSP, 2009. 334 p. ISBN 9788531409462. Citado na página 15.

JILES, D. Introduction to Magnetism and Magnetic material. 1 ed. Chapman & Hall. 1991. Citado na página 26.

JÚNIOR, P. A. D. S. Bancada Para Ensaios De Materiais Ferromagnéticos Em Chapa Única Sob Campos Rotacionais. 122 P. Tese (Doutorado) - UFSC, 2007.

LANDGRAF, F.; CAMPOS, M. de; LEICHT, J. Hysteresis loss subdivision. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 320, n. 20, p. 2494–2498, oct 2008. ISSN 03048853. Citado na página 21.

LANDGRAF, F. J. Microestrutura e Propriedades Magnéticas. São Paulo: [s.n.], 2014. 61 p. Disponível em: Citado 2 vezes nas páginas 16 e 70.

LANDGRAF, F. J. *et al.* Separating components of the hysteresis loss of non-oriented electrical steels. Materials Science Forum, v. 302-303, n. January, p. 440–445, 1999. ISSN 16629752. Citado na página 23.

LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. In: Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos. [S.l.: s.n.], 2002. p. 109 – 128. Citado 6 vezes nas páginas 9, 15, 16, 18, 19 e 23.

MANNHEIMER, W. A. Microscopia dos Materiais – Uma Introdução. Rio de Janeiro. Editora e-papers, 2002.

MEURER, E. J. Estudo das Perdas Magnéticas Interlaminares em Máquinas Elétricas. 114 p. Tese (Doutorado), 2005. Disponível em: Citado 3 vezes nas páginas 21, 24 e 25.

MONTEIRO, R. A. Efeito do teor de carbono sobre a evolução do envelhecimento magnético e das propriedades mecânicas de um aço elétrico grão não orientado com 2,0%Si. 98 p. Tese (Doutorado) - UFOP, 2015. Citado na página 16.

NA, S. M.; FLATAU, A. B. Surface-energy-induced selective growth of (001) grains in magnetostrictive ternary Fe–Ga-based alloys. Smart Materials and Structures, IOP Publishing, v. 21, n. 5, p. 055024, may 2012. Citado na página 19.

NEGRI, G. M. R. Estudo De Caso De Envelhecimento Magnético Em Aços Elétricos De Grão Não Orientado De Baixa Eficiência. Tese (Doutorado) — UFSC, 2011. Citado na página 23.

OLIVEIRA Jr, J. R. Estudo do envelhecimento magnético em aços silício de grão não orientado 2%Si. 43 p. Tese (Doutorado) — UFMG, 2014. Citado na página 21.

PULNIKOV, A. Modification of Magnetic Properties of Non Oriented Electrical Steels by the Production of Electromagnetic Devices. 251 p. Tese (Doutorado) - Ghent University, 2004. Citado na página 25.

RODRIGO FELIX DE ARAUJO CARDOSO. Aços Elétricos de Alto Silício por Imersão a Quente: Análise do Processo e da Microestrutura. Tese (Doutorado) — INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, 2010. Citado na página 24.

SALVADOR, L. Influence of cutting process on magnetic properties of electrical steel. 76 p. Tese (Doutorado), 2016. Citado na página 25.

SANTOS, J. P. Influência do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos: o efeito da textura. 2005. 137p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2005. Citado na página 20.

SCHOTTEN, A. J.; SANTOS, T. H. dos. Influência Do Tratamento Térmico Na Dureza E Resistência À Tração Em Junta Soldada De Aço Com Baixo Teor De Carbono. Revista Foco. v. 16, n. 2, p.01-04, jan de 2023. Citado na página 62.

SOARES, R. A. Estudo Comparativo de Ensaio de Chapa Única para Medidas de Perdas em Aços Elétricos. São Paulo, 2001. Dissertação (Mestre em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SOUZA, R. M. P. d. S. Efeito do perfil térmico de recozimento das bobinas laminadas a quente nas propriedades do aço elétrico de grão orientado. 1–85 p. Tese (Doutorado) — UFMG, 2013. Citado na página 18.

TUMANSKI, S. Magnetic measurements. [S.l.: s.n.], 1928. v. 121. 601 p. ISSN 00280836. ISBN 9781439829523. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 19.

YONAMINE, T.; LANDGRAF, F. J. G.; FALLEIROS, I. G. S. Evolução da textura e das propriedades magnéticas de Fe-3,1% Si durante deformação plástica e recozimento. In: Metalurgia and Materials. [S.l.: s.n.], 2003. v. 59, n. SUPPL. 6, p. 11–14. ISSN 01040898. Citado na página 20