



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

CELLINE FERREIRA DE SOUZA

**CORRELAÇÃO ENTRE TAMANHO DE GRÃO, PROPRIEDADES
MAGNÉTICAS E MECÂNICAS DE UM AÇO ELÉTRICO DE GRÃO
NÃO ORIENTADO COM 3,3 % EM PESO DE Si**

TIMÓTEO/MG

2025

CELLINE FERREIRA DE SOUZA

**CORRELAÇÃO ENTRE TAMANHO DE GRÃO, PROPRIEDADES
MAGNÉTICAS E MECÂNICAS DE UM AÇO ELÉTRICO DE GRÃO
NÃO ORIENTADO COM 3,3 % EM PESO DE Si**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao
Curso de Engenharia Metalúrgica, do Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Erriston Campos Amaral
Coorientação: Eng. Edivânia Maria Martins
Alves

TIMÓTEO/MG

2025

FOLHA DE APROVAÇÃO

CELLINE FERREIRA DE SOUZA

CORRELAÇÃO ENTRE TAMANHO DE GRÃO, PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E MECÂNICAS DE UM AÇO ELÉTRICO DE GRÃO NÃO ORIENTADO COM 3,3% EM PESO DE Si

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao
Curso de Engenharia Metalúrgica, do Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Metalúrgica.

Timóteo, 24 de julho de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br ERRISTON CAMPOS AMARAL
Data: 29/07/2025 19:43:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Erriston Campos Amaral
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Campus Timóteo

Documento assinado digitalmente
gov.br EDIVÂNIA MARIA MARTINS ALVES
Data: 30/07/2025 15:40:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora: Eng^a. Edivânia Maria Martins Alves
Engenheira da empresa Aperam

Documento assinado digitalmente
gov.br KARINA APARECIDA MARTINS BARCELOS GONÇALVES
Data: 29/07/2025 21:28:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Prof^a. Dr^a. Karina Aparecida Martins Barcelos Gonçalves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Campus Timóteo

Documento assinado digitalmente
gov.br DOUGLAS GERALDO MAGALHÃES
Data: 30/07/2025 13:51:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Prof. Me. Douglas Geraldo Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Campus Timóteo

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

*Ao meu amado marido, Geidson Clementino de Souza,
cujo amor inabalável, cuidado constante e suporte incansável tornaram esta jornada
possível. Você foi o alicerce em nosso lar, garantindo que eu tivesse todo o apoio físico e
emocional necessário para me dedicar à minha formação. Sua parceria foi, e sempre será,
essencial para todas as minhas conquistas.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar coragem diante dos desafios e por colocar no meu caminho pessoas tão especiais, que, muitas vezes, diante das minhas fraquezas, me animaram e deram forças para vencer os momentos.

Aos meus amados pais, Célia de F. Souza e Célio F. de Oliveira, por serem o alicerce da minha formação e caráter. Mesmo sem as mesmas oportunidades de estudo, vocês sempre nos impulsionaram, a mim e aos meus irmãos, a ir além. Lembro-me da força e determinação da minha mãe, que concluiu o ensino médio grávida, trabalhando como doméstica, e depois se tornou técnica em enfermagem. Essa determinação, somada ao apoio do meu pai, que trabalhou incansavelmente como pedreiro para construir e sustentar nosso lar, moldou a pessoa que sou hoje. As lições da infância, pouco convencionais, como o manuseio das ferramentas do meu pai, despertaram em mim o interesse pela engenharia. Cada sacrifício e ensinamento de vocês foram a base do meu sucesso. Meu mais profundo agradecimento e amor eterno.

Ao meu amado marido, Geidson, por ser meu pilar e maior incentivador. Cada passo na minha jornada profissional e tudo que conquistei é graças a você. Começamos nossa vida juntos com tão pouco, e hoje, com seu incansável apoio aos meus estudos, construímos as condições para realizar nossos sonhos. Sua parceria é o presente mais valioso que a vida me deu.

Aos meus colegas de faculdade e de profissão, e às amizades que surgiram desses encontros: vocês foram a alegria nos dias difíceis e a leveza quando a carga era pesada. Obrigada por cada ouvido atento aos meus desabafos e por compartilharem minhas lágrimas nos tempos de crise. A jornada foi muito mais fácil e divertida com vocês ao meu lado!

Ao meu orientador e aos professores do DMQ do CEFET/MG - Campus Timóteo: minha profunda gratidão. Obrigada por cada ensinamento e por serem referências inspiradoras em minha jornada. Agradeço, especialmente, pela paciência dedicada em cada disciplina.

Às minhas coorientadoras, Edivânia Maria Martins Alves e Dirceni de Souza Costa Amorim: vocês não me deram apenas a base para o meu trabalho de conclusão, mas me presentearam com um propósito. Essa nova perspectiva reacendeu toda a motivação que eu havia perdido durante a elaboração deste estudo. Vocês são mulheres incríveis! Sou muito grata por tudo!

A Aperam South America e aos profissionais do Centro de Pesquisas por conceder os materiais e ensaios necessários para este estudo.

RESUMO

Este trabalho investigou a correlação entre o tamanho de grão, propriedades magnéticas e mecânicas de um aço elétrico de grão não orientado (GNO) com 3,3 % em peso de silício, material essencial na fabricação de estatores e rotores de motores para veículos elétricos. Amostras do material foram submetidas a tratamentos térmicos de recozimento para alívio de tensões e crescimento de grãos em diferentes temperaturas ($650\text{ }^{\circ}\text{C}$, $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $840\text{ }^{\circ}\text{C}$), promovendo alterações significativas na microestrutura, com crescimento de grão proporcional, embora heterogêneo, à temperatura aplicada. Observou-se que o aumento da temperatura resultou na redução das perdas magnéticas totais, especialmente em temperaturas iguais ou superiores a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. A decomposição das perdas, realizada com base no modelo de Bertotti, indicou que a perda por histerese foi a componente dominante e apresentou redução com o aumento do tamanho de grão; as perdas anômalas aumentaram, enquanto as perdas por corrente parasita permaneceram praticamente constantes. Em contrapartida, o aumento da temperatura causou redução progressiva nos valores de limite de escoamento e limite de resistência. A análise integrada dos dados evidenciou uma forte correlação inversa entre o tamanho de grão e a perda por histerese, além de uma correlação ainda mais significativa entre essa perda e o limite de escoamento, sugerindo a atuação de mecanismos adicionais que afetam ambas as propriedades. Os resultados reforçam a necessidade de se identificar um tamanho de grão ideal que proporcione um equilíbrio entre desempenho magnético e resistência mecânica, fator essencial para a eficiência e durabilidade de motores elétricos em aplicações automotivas.

Palavras-chave: Aço elétrico de grão não orientado; Propriedades magnéticas; Propriedades mecânicas; Microestrutura; Tratamento térmico.

ABSTRACT

This study investigated the correlation between grain size, magnetic properties, and mechanical properties of 3.3% silicon non-oriented grain (NOG) electrical steel, a material essential for the manufacturing of stators and rotors in electric vehicle motors. Samples were subjected to annealing heat treatments for stress relief and grain growth at different temperatures (650 °C, 700 °C, 750 °C, 800 °C, and 840 °C), resulting in significant microstructural changes, with grain growth proportional, yet heterogeneous, to the annealing temperature. It was observed that increasing the temperature led to a reduction in total magnetic losses, particularly at temperatures equal to or above 800 °C. The decomposition of losses, carried out using the Bertotti model, indicated that hysteresis loss was the dominant component and decreased with grain growth; anomalous losses increased, while eddy current losses remained nearly constant. In contrast, the rise in annealing temperature caused a progressive reduction in yield strength and ultimate tensile strength. The integrated analysis of the data revealed a strong inverse correlation between grain size and hysteresis loss, as well as an even stronger correlation between hysteresis loss and yield strength, suggesting that additional mechanisms, beyond grain growth, simultaneously influence both magnetic and mechanical properties. The results highlight the importance of identifying an optimal grain size that balances magnetic performance and mechanical strength, which is crucial for ensuring the efficiency and durability of electric motors in automotive applications.

Keywords: Non-oriented grain electrical steel; Magnetic properties; Mechanical properties; Microstructure; Heat treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama ferro-carbono com adições de silício. A linha traço ponto indica o contorno do campo austenítico numa composição de aço carbono convencional, a curvas contínuas são as projeções do campo austenítico a cada adição de silício.	19
Figura 2 - Diagrama de fases Fe-Si contendo 0,03 % de C.....	20
Figura 3 - Representação esquemática da textura de um aço elétrico de GO.	21
Figura 4 - Curvas de magnetização para monocrystalais de ferro.	22
Figura 5 - Diagrama ferro silício com várias adições de carbono.	23
Figura 6 - Representação esquemática das orientações de um aço elétrico GNO.....	24
Figura 7 - Representação simplificada dos domínios magnéticos nos grãos.	26
Figura 8 - Curva de histerética com demonstração de.....	27
Figura 9 - Separação convencional das perdas magnéticas.....	27
Figura 10 - Diagrama tensão deformação convencional e real para um aço dúctil.....	31
Figura 11 - Plano de corte das amostras sendo: a) esquema de corte e indicação das direções de laminação (DL), transversal (DT) e área hachurada indica a área de descarte; b) dimensão da amostra para recozimento, medição de propriedades magnéticas e mecânicas (após usinagem).	34
Figura 12 – Fluxograma de estruturação dos procedimentos experimentais.....	36
Figura 13 - Curvas de temperaturas medidas durante os recozimentos.	37
Figura 14 – Montagem de amostras no quadro Epstein.	38
Figura 15 – Representação esquemática da amostragem e análise microscópica.	39
Figura 16 - Gráfico de tendência das perdas magnéticas em função da frequência.....	40
Figura 17 – Comportamento das perdas histerética e anômala em função da temperatura.....	42
Figura 18 – Gráfico do LE e LR em função da temperatura.	42
Figura 19 - Comparativo das microscopias ópticas. Amostras com ampliação de 100 \times ,.....	44
Figura 20 - Gráfico dos tamanhos dos grãos pela temperatura de recozimento.	44
Figura 21 - Regressão linear do limite de escoamento em função da razão de um sobre	45
Figura 22 - Gráficos de comparação de propriedades. A esquerda a) evolução do tamanho médio dos grãos e da perda magnética em função da temperatura. A direita b) evolução do tamanho médio dos grãos e dos limites de escoamento em função da temperatura.	46
Figura 23 - Gráfico de correlação entre perdas magnéticas e tamanho médio dos grãos.....	47
Figura 24 - Gráfico de correlação entre perdas magnéticas e limite de escoamento.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química típica do aço GNO 3,3 % em peso de Si.....	34
Tabela 2 - Condições de recozimento.....	36
Tabela 3 - Resultados das perdas magnéticas para cada condição.	41
Tabela 4 - Separação de perdas magnéticas para frequência de 400 Hz.	41
Tabela 5 - Propriedades mecânicas por condição.	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Aplicações comuns para aços elétricos. 18

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

α	Ferrita alfa
A	Área da seção transversal da amostra (m^2)
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Indução ou densidade de fluxo magnético (T ou Wb m^{-2})
B_{max}	Indução máxima (T)
C_1	Constante experimental
C_2	Constante experimental
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de face centrada
d	Densidade ($kg\ m^{-3}$)
DL	Direção de laminação
DN	Direção normal à superfície
DT	Direção transversal
e	Espessura da tira (m)
Fe-Si	Ferro-Silício
f	Frequência (Hz)
G	Tamanho do grão (m)
g	Tamanho médio do grão (μm)
GO	Grão orientado
GNO	Grão não orientado
G^w	Coeficiente adimensional (0,1356)
H	Campo magnético externo ($A\ m^{-1}$)
-H	Campo externo com polaridade oposta
H_h	Campo coercivo ($A\ m^{-1}$)
$\langle Js \rangle$	Polarização de saturação (T)
K_a	Perda magnética por excesso ou anômala por ciclo ($J\ kg^{-1}$)
K_h	Perda histerética por ciclo ($J\ kg^{-1}$)
k_h	Constante do material
k'	Constante extensão do empilhamento de discordâncias
K_p	Perda por corrente parasita ou corrente de Foucault por ciclo ($J\ kg^{-1}$)
LE	Límite de escoamento (MPa)
LR	Límite de resistência (MPa)

μ	Permeabilidade (H m^{-1})
P	Perdas magnéticas
P_a	Perda magnética por excesso ou anômala (W kg^{-1})
P_h	Perda magnética por histerese (W kg^{-1})
P_p	Perda magnética por corrente parasita ou corrente de Foucault (W kg^{-1})
P_t	Perda magnética total (W kg^{-1})
ρ	Resistividade elétrica ($\Omega \text{ m}$)
R	Magnetismo remanescente
S	Magnetização máxima ou saturação
S'	Saturação no sentido
σ	Condutividade ($\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$)
σ_0	Tensão de escoamento (MPa)
σ_i	Tensão de atrito que se opõe ao movimento das discordâncias (MPa)
V_0	Efeito da microestrutura no movimento dos domínios (A m^{-1})

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	AÇOS ELÉTRICOS	18
3.1.1	Adição de silício e seu efeito no equilíbrio de fases.....	19
3.1.2	Aço elétrico de grão orientado.....	20
3.1.3	Aço elétrico de grão não orientado.....	22
3.2	PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	24
3.2.1	Influência de defeitos cristalinos nas propriedades magnéticas	25
3.2.2	Perdas magnéticas	26
3.2.2.1	Perda por Histerese	28
3.2.2.2	Perdas por Corrente Parasita	29
3.2.2.3	Perdas Anômalas	30
3.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS	31
3.3.1	Influência dos defeitos cristalinos nas propriedades mecânicas.....	32
3.3.2	Limite de escoamento	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	MATERIAIS	34
4.2	EQUIPAMENTOS.....	35
4.2.1	Tratamento térmico de recozimento	35
4.2.2	Ensaio eletromagnético.....	35
4.2.3	Microscopia óptica	35
4.2.4	Ensaio de tração	35
4.3	METÓDOS	36
4.3.1	Tratamento térmico de recozimento	36
4.3.2	Determinação das perdas magnéticas	37
4.3.2.1	Ensaio magnético.....	38
4.3.2.2	Separação de perdas magnéticas pelo método de Bertotti.....	38
4.3.3	Determinação do tamanho médio dos grãos	39
4.3.4	Determinação das propriedades mecânicas	39

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	PERDAS MAGNÉTICAS.....	40
5.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	42
5.3	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	43
5.3.1	Tamanho médio dos grãos.....	44
5.3.1.1	Tamanho médio dos grãos por Hall-Petch.....	45
5.4	COMPARATIVOS E CORRELAÇÕES	46
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

O uso consciente das energias renováveis e não renováveis, tem sido objeto de intensos debates em escala global. Entre esses debates, destacam-se as metas estabelecidas na Agenda Global 2030, que inclui, em seu 12º tópico, o objetivo de garantir padrões sustentáveis de produção e consumo, e o acordo de Paris que objetiva limitar o aumento global da temperatura. Uma medida crucial para alcançar essas metas é a transição do uso de veículos movidos a combustíveis fósseis, para veículos elétricos. Essa mudança não apenas reduzirá as emissões nocivas ao meio ambiente, mas também promoverá um modelo de mobilidade mais limpo e sustentável para as futuras gerações (UNFCCC, 2015; FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS, 2017; NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2024; UNITED NATIONS, 2024).

Para que os veículos elétricos sejam tão eficientes quantos os movidos a combustíveis serão necessárias diversas melhorias, que vão desde a pontos de carregamento nas estradas ao menor consumo de energia das baterias para alcançar um bom rendimento sem a necessidade de recarga. Para isso, se faz necessário reduzir as perdas de energia geradas no processo de transformação de energia elétrica em movimento, e uma forma de fazer isso é melhorando o desempenho dos aços elétricos de grão não orientado que constituem rotores e estatores de motores elétricos (FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS, 2017).

Os aços siliciosos de grão não orientado totalmente processados são amplamente utilizados em estatores e rotores de motores elétricos. Esses aços passam por um processo de laminação e subsequentes tratamentos térmicos para promover a recristalização e o crescimento do grão. Eles são então recobertos por revestimentos isolantes e, em alguns casos, podem receber um pós-processamento para alívio de tensões, otimizando suas propriedades magnéticas (LANDGRAF, 2009; AISI e AKATSU, 2022).

Para as aplicações comuns dos aços elétricos, é fundamental que esses aços exibam baixa perda magnética em baixas frequências e que possuam uma alta indução magnética. No entanto, em aplicações como a de carros elétricos, onde os motores operam com frequências mais elevadas, outras propriedades além da baixa perda magnética em altas frequências e a alta indução magnética se tornam cruciais. Nesses casos, além das características magnéticas, é exigida uma elevada resistência mecânica à deformação. Isso se deve ao alto torque de trabalho e às altas rotações, que atualmente podem atingir cerca de 20.000 rotações por minuto, com uma

tendência de aumento contínuo para atender às demandas do mercado automotivo (LANDGRAF, 2009; AISI e AKATSU, 2022).

O controle de qualidade das propriedades magnéticas e mecânicas dos aços para mobilidade elétrica é essencial para garantir uma aplicação eficiente, minimizando falhas nos motores e perdas de energia elétrica. Com base no conhecimento científico, sabe-se que uma parte das perdas magnéticas e as propriedades mecânicas podem ser associadas ao tamanho dos grãos. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo entender a correlação entre microestrutura, propriedades magnéticas e mecânicas do aço elétrico GNO para aplicação em veículos elétricos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Entender a correlação entre microestrutura, propriedades magnéticas e as propriedades mecânicas do aço silício de grão não orientado com 3,3 % em peso de Si após recozimento em temperaturas variadas para alívio de tensões e crescimento de grãos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem em:

- Realizar tratamento térmico de recozimento em temperaturas variadas em grupos de amostras compostas por lâminas de aço GNO com 3,3 % em peso de Si;
- Determinar os valores de perda magnética total das amostras por meio de ensaio magnético utilizando um testador de aço elétrico;
- Definir por meio de equações as perdas em suas três componentes com base nos resultados do ensaio magnético e em equações referenciadas na literatura;
- Determinar o tamanho do grão médio das amostras;
- Determinar os limites de escoamento e resistência por meio de ensaio de tração;
- Verificar a correlação ou dependência entre os valores do limite de escoamento e das perdas magnéticas, associando-os ao tamanho do grão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS ELÉTRICOS

Os aços elétricos são materiais magnéticos macios que apresentam suas propriedades desenvolvidas para aplicações em equipamentos de transformação, geração e distribuição de energia. Os aços elétricos são classificados em dois grupos principais: aços elétricos de grão orientado (GO) e aços elétricos de grão não orientado (GNO). Suas aplicações são variadas, esses aços podem ser empregados conforme Quadro 1, onde estão apresentadas as principais divisões dos aços elétricos e suas aplicações (BARRETT, W. F., BROWN, W. F., & HADFIELD, R. A., 1902; SOUZA, 2013).

Quadro 1- Aplicações comuns para aços elétricos.

Aplicação	Aço de grão não orientado			Aço de grão orientado	
	Aço carbono	Baixo Si	Alto Si	Convencional	Alta indução
Pequenos motores	*****				
Reatores de lâmpadas	*****				
Médios motores		*****			
Transformadores para soldagem		*****			
Transformadores para som			*****		
Pequenos transformadores				*****	
Grandes máquinas rotativas				*****	
Médios geradores				*****	
Transformadores de distribuição					*****
Transformadores de potência					*****

Fonte: Adaptado de Souza (2013).

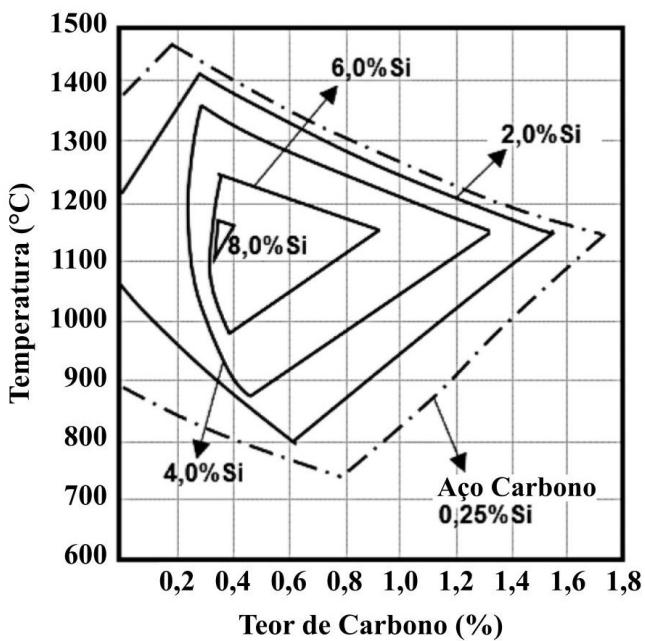
Atualmente, além das aplicações citadas o aço GNO com alto Si é empregado no mercado de mobilidade elétrica onde são aplicados nos rotores e estatores dos motores usados nos carros elétricos (APERAM, 2019).

Aços elétricos, como os tipos GNO (com baixo e alto silício) totalmente processados (laminados, recozidos e revestidos), GO convencional e GO de alta indução, são caracterizados pela adição de silício como principal elemento de liga, geralmente na faixa de 2 % a 3,5 %. O silício aumenta a resistividade elétrica do aço, ou seja, sua capacidade de resistir à passagem de corrente elétrica, reduzindo drasticamente as correntes parasitas (ou correntes de Foucault) e, consequentemente, diminui as perdas magnéticas associadas (CULLITY e GRAHAM, 2009; LANDGRAF, 2009; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

3.1.1 Adição de silício e seu efeito no equilíbrio de fases

O ferro puro apresenta duas principais fases alotrópicas: a ferrita, com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), e a austenita, com estrutura cúbica de face centrada (CFC), que se forma em temperaturas acima de 912 °C. A adição de carbono ao ferro para a formação do aço modifica tanto as proporções quanto as temperaturas de formação dessas fases. O silício atua como um elemento estabilizador da ferrita; ou seja, à medida que sua concentração na liga aumenta, o campo austenítico se reduz, enquanto o campo ferrítico se expande, conforme ilustrado na Figura 1 (CALLISTER e RETHWISCH, 2016; PINEDO, 2021).

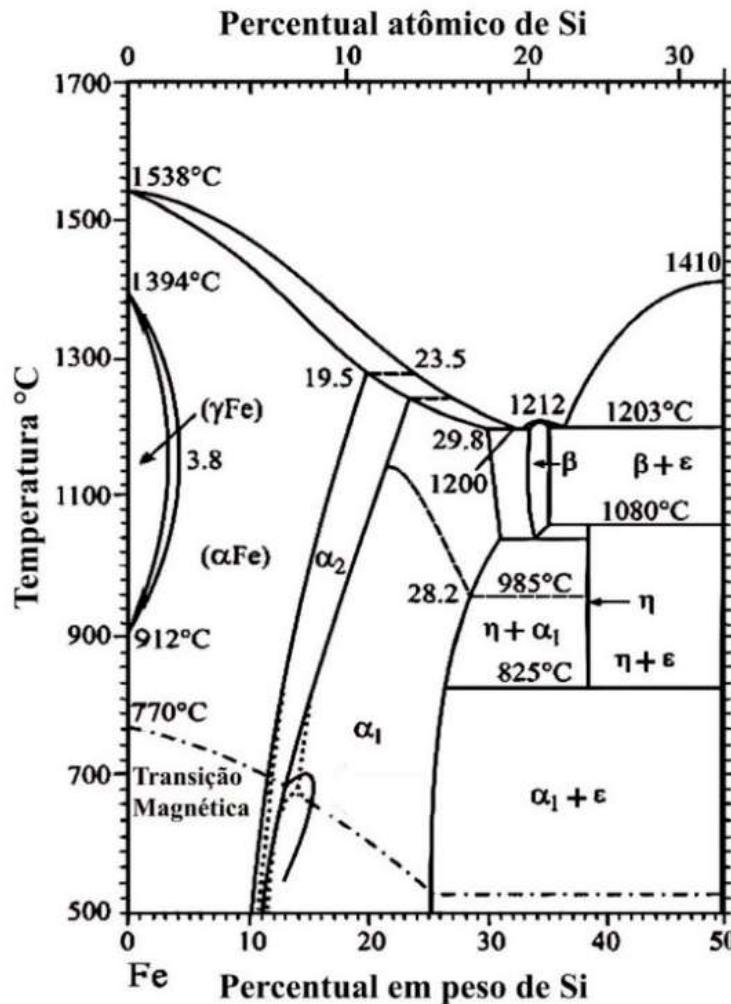
Figura 1 - Diagrama ferro-carbono com adições de silício.
A linha traço ponto indica o contorno do campo austenítico numa composição de aço carbono convencional, a curvas contínuas são as projeções do campo austenítico a cada adição de silício.



Fonte: Adaptado de Pinedo (2021).

Quando o principal elemento de liga do aço é o silício torna-se mais conveniente avaliar as fases do aço a partir de um diagrama de equilíbrio de fases ferro-silício (Fe-Si) da Figura 2. No diagrama apresentado o teor de carbono foi fixado em 0,03 % que é um faixa de carbono comum para alguns aços elétricos. Neste diagrama pode verificar-se a área reduzida de transformação da austenita (γ) e faixa aumentada de ferrita (α), que é a estrutura ideal para a obtenção de um aço magnético (LANDGRAF, 2009).

Figura 2 - Diagrama de fases Fe-Si contendo 0,03 % de C.



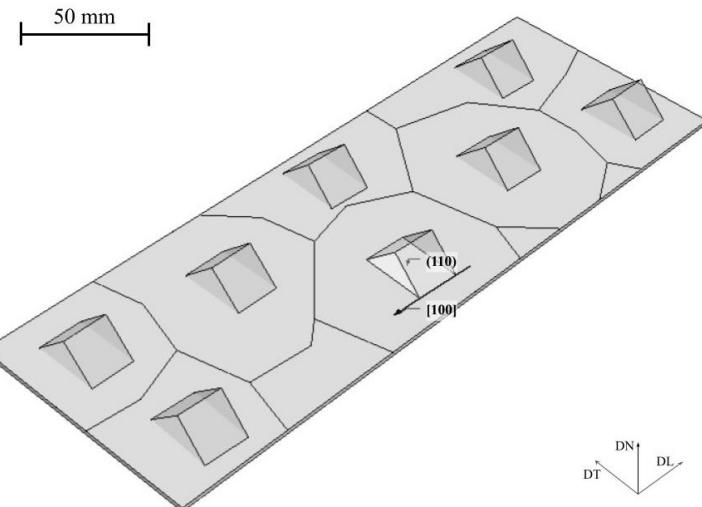
Fonte: Adaptado de Alcântara (2012) apud. Massalski *et al.*, (1986).

3.1.2 Aço elétrico de grão orientado

Os aços silício de GO são ligas que contêm aproximadamente 3 % de silício. Sua estrutura cristalina possui uma orientação cristalográfica definida, o que facilita a passagem do fluxo magnético em uma direção preferencial, coincidindo com a direção de laminação. Por essa razão, as propriedades magnéticas são excelentes nessa direção, tornando este aço um material anisotrópico, ou seja, um material que tem suas propriedades bem definidas em uma direção preferencial (LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS, 2001).

Nos aços GO, a textura é bastante pronunciada, com a quase totalidade dos grãos apresentando seu plano (110) paralelo à superfície da chapa e a direção [100] paralela à direção de laminação (DL) como representado na Figura 3 (CULLITY e GRAHAM, 2009).

Figura 3 - Representação esquemática da textura de um aço elétrico de GO.

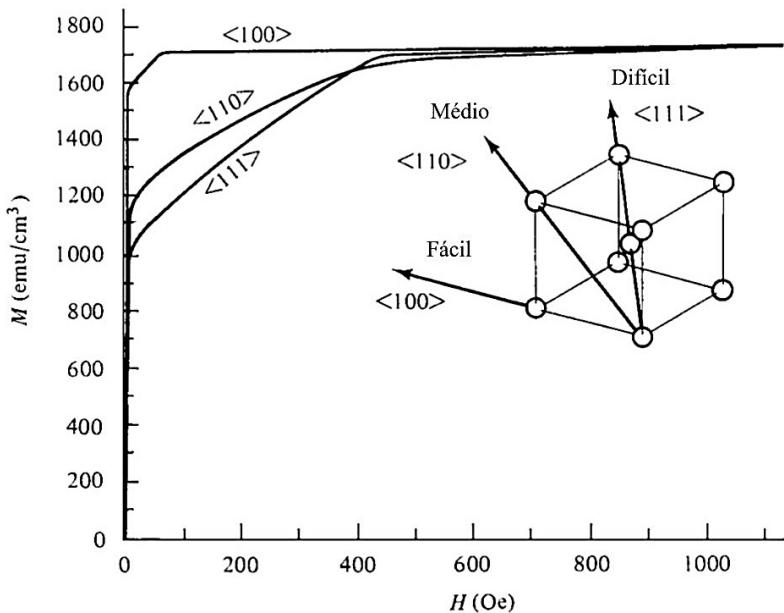


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Essa textura, conhecida como "cubo na aresta" ou textura de Goss, forma-se em um processo de recristalização em duas etapas. A recristalização primária ocorre quando o material encruado é recristalizado, resultando em um pequeno desenvolvimento do tamanho dos grãos. Em seguida, a recristalização secundária, realizada em altas temperaturas, promove o crescimento anormal dos grãos formados na etapa primária, nesta etapa os grãos se tornam macroscópicos. Consequentemente, os grãos do aço GO podem facilmente atingir tamanhos superiores a 50 mm após essa recristalização secundária (LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS, 2001; CULLITY e GRAHAM, 2009; AMORIM, 2012).

A direção [100] é a de fácil magnetização no Fe- α , onde a energia de anisotropia é mínima. Isso ocorre porque a interação spin dos elétrons não emparelhados (que de forma simplificada corresponde ao giro dos elétrons no seu próprio eixo e é este movimento que é responsável pela magnetização) com o campo cristalino do reticulado favorece o alinhamento dos spins nessa direção. No aço GO, processos de laminação e tratamentos térmicos controlados criam uma forte textura de Goss, alinhando a maioria dos eixos [100] com a direção de laminação. Isso minimiza o campo magnético externo necessário para a saturação nessa direção, otimizando o desempenho magnético nas direções <100>, conforme ilustrado na Figura 4 (CULLITY e GRAHAM, 2009; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

Figura 4 - Curvas de magnetização para monocrristais de ferro.

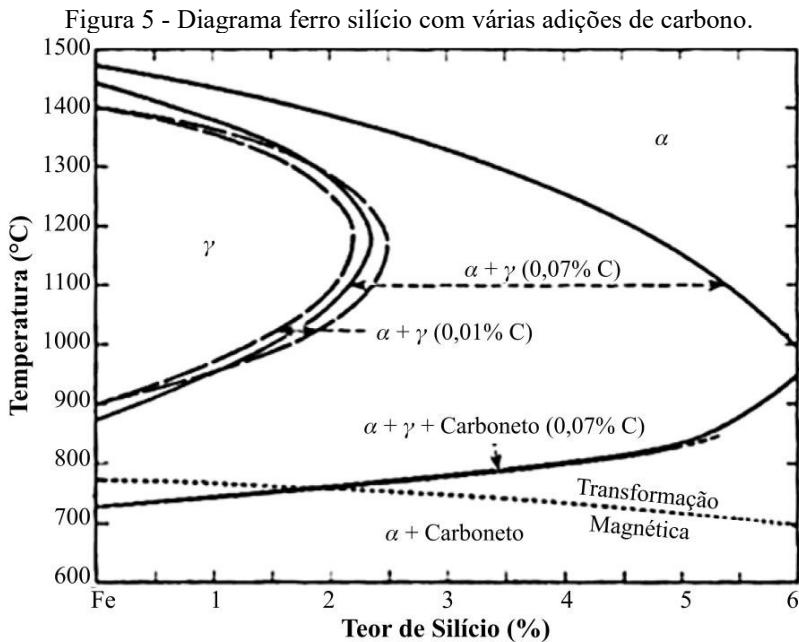


Fonte: Adaptado de Cullity e Graham (2009).

O aço silício de GO exibe baixos valores de perda magnética e alta indução magnética na direção de laminação. A perda magnética típica serve como um fator de comparação entre os fabricantes e reflete o avanço tecnológico de cada um (LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS, 2001).

3.1.3 Aço elétrico de grão não orientado

Ajustar a composição química dos aços elétricos GNO é crucial para balancear desempenho e custo. Adicionar silício (até 3,5 %) e alumínio (até 0,5 %) é benéfico, pois eles aumentam a resistividade elétrica, mas também elevam os custos. Impurezas que formam inclusões como nitretos, sulfetos e óxidos afetam as propriedades magnéticas de forma direta e indireta, influenciando o tamanho do grão e a textura. O teor de carbono final deve ser mantido abaixo de 0,003 %, embora em alguns casos são inicialmente produzidos com uma faixa ligeiramente maior, porém são levemente descarbonetados no recozimento final para a faixa desejada. Esse teor de carbono se faz importante visto que à medida que o teor de carbono aumenta, a área de transformação da austenita se estende como pode ser verificado em um corte do diagrama ferro silício presente na Figura 5. Do contrário pode ser observado que para um teor de carbono inferior a 0,01 % não há presença do campo austenítico em todas as temperaturas para teores de silício acima de 2,5 %, isso garante que não ocorra formação de fases indesejadas no aço (LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS, 2001).

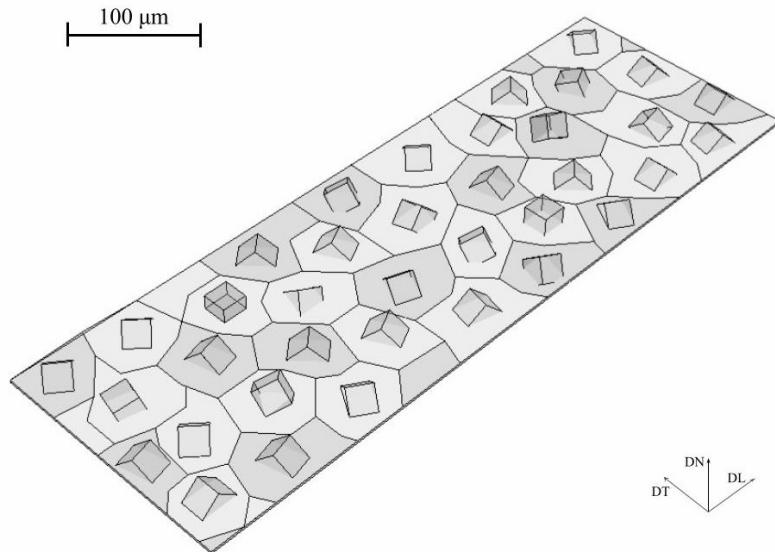


Fonte: Adaptado de Bozorth (1993).

Os aços GNO (grão não orientado) são amplamente utilizados na fabricação de máquinas elétricas rotativas, como motores e geradores. Sua aplicação se deve às suas excelentes propriedades magnéticas que se mantêm praticamente constantes em todas as direções, devido à baixa anisotropia (LANDGRAF, 2009).

Apesar de sua denominação os aços elétricos de GNO, não possuem uma orientação completamente aleatória, exibindo, na verdade, uma textura cristalográfica. A textura teoricamente ideal para esta aplicação seria aquela onde todos os grãos apresentassem planos pertencentes a família {100}, paralelos à superfície da chapa e direções distribuídas em todas as orientações no plano da chapa. No entanto, ainda não existe um processo comercial capaz de produzir essa textura, e frequentemente os aços GNO disponíveis no mercado exibem um componente de textura Goss pronunciado, paralela à superfície da chapa. Na Figura 6 pode ser observada uma representação esquemática de as orientações comuns de um aço GNO (LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS, 2001).

Figura 6 - Representação esquemática das orientações de um aço elétrico GNO.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O processamento dos aços GNO inclui etapas de laminação a quente, laminação a frio e recozimento. O tamanho do grão e a textura final são formados durante o último recozimento, resultado da combinação de recristalização e crescimento de grão. Este último maior ou menor de acordo com a aplicação posterior. A textura da recristalização é controlada principalmente pelas orientações dos núcleos recristalizados, que se desenvolvem em uma matriz de cristais deformados durante a laminação a frio (LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS, 2001).

3.2 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

As propriedades magnéticas básicas que definem as características de um material são:

- Indução ou densidade de fluxo magnético (B) - Intensidade do campo magnético produzido no interior de um material, durante aplicação de um campo magnético externo. Matematicamente é o produto do campo magnético externo (H dado em $A\ m^{-1}$) pela permeabilidade (μ dado em $H\ m^{-1}$) (LANDGRAF, 2009; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).
- Permeabilidade (μ) - Capacidade de aumentar o campo magnético aplicado externamente. Matematicamente é a constante de proporcionalidade entre os campos: indução magnética, ou densidade do fluxo magnético (B dado em $Wb\ m^{-2}$) e intensidade do campo aplicado. Seu valor no vácuo é de $1,257 \times 10^{-6} H\ m^{-1}$ (LANDGRAF, 2009; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

- Perdas magnéticas (P) - Energia dissipada durante os ciclos de magnetização, são divididas em três tipos. Suas características e definições matemáticas serão abordadas a seguir (LANDGRAF, 2009).

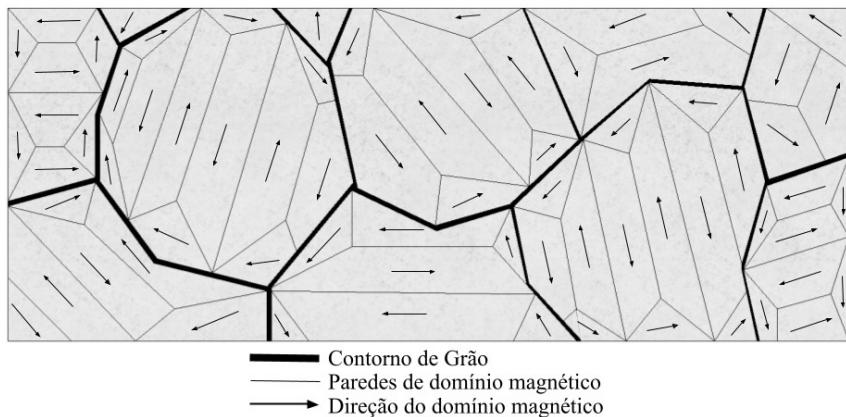
3.2.1 Influência de defeitos cristalinos nas propriedades magnéticas

Defeitos cristalinos são desvios de regularidade na formação periódica das estruturas atômicas. Esses defeitos são comumente divididos em quatro principais grupos (CALLISTER e RETHWISCH, 2016):

- Defeitos pontuais - São irregularidades localizadas em posições atômicas específicas como lacunas, átomos localizados nos espaços entre os átomos da rede, também chamados de átomos intersticiais e os átomos substitucionais, ou seja, átomos de um elemento de liga que ocupam o lugar de um átomo do metal base, por exemplo, como o silício substituindo um átomo de ferro na rede cristalina de um aço elétrico (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).
- Defeitos lineares - Conhecidos como discordâncias, são defeitos que se estendem ao longo de uma linha de na rede cristalina (DIETER, 1981; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).
- Defeitos de superfície - São interfaces que separam regiões do material com diferentes orientações cristalográficas ou mesmo diferentes estruturas. Os contornos de grão são fronteiras entre estruturas encontradas em materiais policristalinos denominados grãos. Quando dois ou mais conjuntos atômicos com orientações diferentes se encontram, é formada esta descontinuidade chamada de contorno de grão (CULLITY e GRAHAM, 2009; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).
- Defeitos volumétricos - São imperfeições de maior escala, como precipitados, inclusões não metálicas (óxidos, sulfetos), poros e trincas (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

Os contornos de grão são barreiras limitadoras para os domínios magnéticos. Dentro de um grão pode haver um ou mais domínios magnéticos como pode ser visto na Figura 7. Quando o metal ferromagnético se encontra desmagnetizado, os domínios presentes no grão têm sentidos opostos e se anulam (CULLITY e GRAHAM, 2009).

Figura 7 - Representação simplificada dos domínios magnéticos nos grãos.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

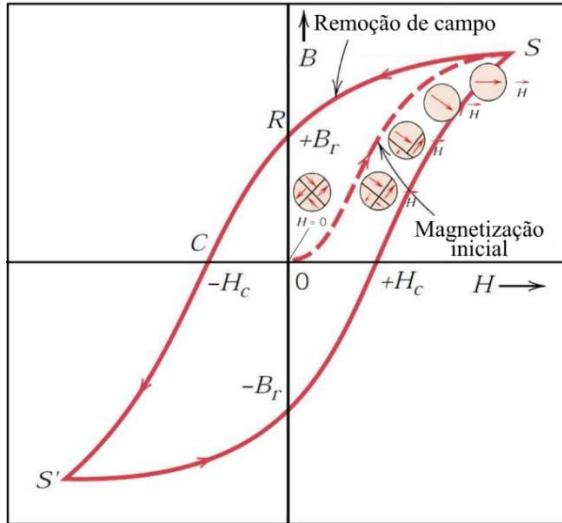
O tamanho do grão impacta fortemente as perdas magnéticas. Um aumento no tamanho do grão geralmente reduz a parcela histerética das perdas, mas eleva a parcela de perda anômala, indicando que existe um tamanho do grão ideal (LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS, 2001).

3.2.2 Perdas magnéticas

As perdas magnéticas correspondem à parcela de energia dissipada durante os ciclos ou histerese de magnetização de um material. No caso dos aços elétricos, que são materiais ferromagnéticos, a histerese ocorre porque o material é retirado de sua condição de repouso magnético pela indução gerada por um campo magnético externo aplicado (H). Quando atinge a magnetização máxima ou saturação (S), o campo H é reduzido para zero, a indução magnética (B) não retorna a sua condição inicial de repouso dando origem a um magnetismo remanescente (R). Em outras palavras, ocorre uma “retenção do magnetismo”, pois a polarização dos momentos magnéticos do aço é mantida em alguns domínios magnéticos, mesmo após a remoção do campo externo (CALLISTER e RETHWISCH, 2016; CULLITY e GRAHAM, 2009).

Porém se um campo magnético externo com polaridade oposta ($-H$) for aplicado, é possível reverter essa condição, fazendo com que a indução volte a condição inicial, com valor igual a zero. Contudo se o processo de magnetização continuar aplicando $-H$ até atingir a saturação (S'), e em seguida revertendo novamente a polaridade do campo para H , forma-se um ciclo completo de magnetização e desmagnetização, conhecido como ciclo de histerese magnética representado na Figura 8 (CULLITY e GRAHAM, 2009; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

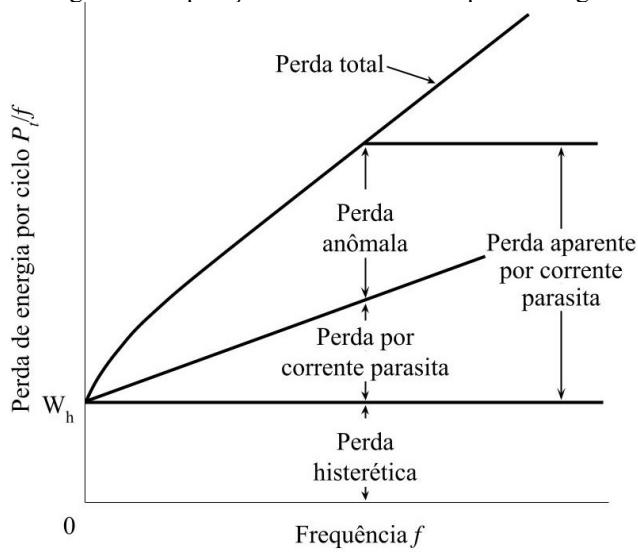
Figura 8 - Curva de histerética com demonstração de alinhamento de domínios.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

As perdas magnéticas podem ser divididas em três tipos: perda histérica (P_h), perda por corrente parasita ou Foucault (P_p) e perda anômala também chamada de perda de excesso (P_a). Ao somar estas três perdas obtém-se a perda magnética total (P_t), suas frações correspondentes podem ser vistas na Figura 9 (CULLITY e GRAHAM, 2009).

Figura 9 - Separação convencional das perdas magnéticas.



Fonte: Adaptado de Cullity e Graham (2009).

O valor das perdas magnéticas depende de características eletromagnéticas que podem ser atribuídos a parâmetros de ensaios (indução máxima e frequência de excitação), características da amostra (espessura, direção de amostragem, resistividade elétrica e densidade) e características microestruturais do material (LANDGRAF, 2009).

Um modelo estatístico para separação de perdas em três componentes, histerética, parasítica e anômala é dado pelas Equações 1 e 2. Esse modelo permite investigar o efeito dessas variáveis em cada um dos componentes, facilitando a compreensão dos efeitos (BERTOTTI, 1988).

$$P_t = P_h + P_p + P_a \quad [W \text{ kg}^{-1}] \quad \text{Equação 1}$$

$$P_t = k_h \cdot B_{máx}^{\alpha} \cdot f + \frac{\pi^2 \cdot B_{max}^2 \cdot e^2 \cdot f^2}{6 \cdot \delta} + \frac{8}{\delta} \sqrt{\sigma \cdot G \cdot A \cdot V_0} \cdot B_{máx}^{1,5} \cdot f^{1,5} \quad [W \text{ kg}^{-1}] \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$B_{máx}$ - é a indução máxima de teste (T);

f - é frequência (Hz);

σ - é a condutividade elétrica ($\Omega^{-1} \mu^{-1}$);

δ - é a massa específica (kg m^{-3});

e - é a espessura (m);

A - é a área da seção transversal de amostra (m^2);

k_h, G, α - são constantes do material;

V_0 - é o efeito da microestrutura no processo de movimentação dos domínios (A m^{-1}).

A perda por ciclo, em J kg^{-1} , pode ser expressa através da Equação 3. Para validar o modelo calcula-se a perda por corrente parasita clássica e verifica a relação $(P_t - P_p)/f$ versus $f^{0,5}$ (BERTOTTI, 1988).

$$\frac{P_t}{f} = K_h + K_p \cdot f + K_a \cdot f^{0,5} \quad [\text{J kg}^{-1}] \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

K_h, K_p, K_a - são as respectivas perdas histerética, parasíticas e anômalas por ciclos.

3.2.2.1 Perda por Histerese

Esta perda representa a energia perdida por ciclo, quando o ensaio é realizado em corrente contínua ou, aproximadamente, em condição quase estática. O valor da perda por histerese é a área interna da curva demonstrada na Figura 8, quando medida em frequências muito baixa

(inferiores a 1 Hz). Portanto, quanto maior é a área interna à curva maior é a perda por histerese (BERTOTTI, 1988; OLIVEIRA, 2006).

O tamanho do grão é um fator importante para perda magnética, devido a interação entre as superfícies dos contornos de grão e as paredes dos domínios magnéticos. A perda por histerese cresce com a diminuição do tamanho do grão. Por outro lado, o crescimento excessivo dos grãos resulta em aumento da perda total, devido ao aumento do tamanho médio dos domínios magnéticos, e consequentemente da velocidade das paredes do domínio durante o processo de magnetização (CULLITY e GRAHAM, 2009).

Além do método experimental citado para determinação da perda por histerese o valor da mesma pode ser estipulado por meio de cálculo realizado pela Equação 4 (STEINMETZ, 1984).

$$P_h = \left(C_1 + \frac{C_2}{g} \right) \cdot B_{max}^\alpha \cdot f \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

C_1 - Constante experimental;

C_2 - Constante experimental;

g - Tamanho médio do grão (μm).

3.2.2.2 Perdas por Corrente Parasita

As perdas por correntes parasitas são geradas durante os ciclos de magnetização sob campos magnéticos alternados. Sua intensidade é função da frequência do campo magnetizante, o que resulta em maiores perdas, quanto maior for a frequência de medida (CULLITY e GRAHAM, 2009).

A variação do fluxo magnético vai induzir uma diferença de potencial elétrico no material, e a corrente elétrica que circulará dependerá da resistividade elétrica do material. Essas correntes são também conhecidas como correntes de Foucault (CULLITY e GRAHAM, 2009).

As perdas por correntes parasitas por unidade de massa podem ser calculadas pela Equação 5 (CULLITY e GRAHAM, 2009).

$$P_p = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \cdot e^2}{6 \cdot \rho \cdot d} [W \ kg^{-1}]$$

Equação 5

Onde:

ρ - é a resistividade elétrica ($\Omega \ m$);

d - é a densidade ($kg \ m^{-3}$).

Observa-se que as perdas por correntes parasitas são proporcionais ao quadrado da espessura e inversamente proporcionais à resistividade da chapa. Ciente disso, em grande parte das aplicações são utilizadas lâminas finas (inferiores a 1 mm) de aço silício de alta resistividade a fim de reduzir as perdas por correntes parasitas (CULLITY e GRAHAM, 2009).

3.2.2.3 Perdas Anômalas

As perdas anômalas podem ser definidas como sendo a diferença entre as perdas totais e as perdas por histerese e correntes parasitas (BERTOTTI *et al.*, 1985), Equação 6.

$$P_a = P_t - (P_p + P_h)$$

Equação 6

Afirma-se que as perdas anômalas crescem com o tamanho do grão, e que são proporcionais às perdas parasíticas. Bertotti (1988) desenvolveu um modelo que relaciona as perdas anômalas com o tamanho do grão, condutividade e perda histerética. Segundo este modelo, as perdas anômalas são descritas pela Equação 7 (BERTOTTI, 1988; LANDGRAF, 2009).

$$P_a = 8 \cdot B_{máx} \cdot f \cdot G \cdot \frac{(2 \cdot \sigma \cdot G^w \cdot \langle J_s \rangle \cdot H_h \cdot f)^{1/2}}{\rho}$$

Equação 7

Onde:

G^w - é um coeficiente adimensional = 0,1356;

G - é o tamanho do grão em metros (m);

$\langle J_s \rangle$ - é o valor da polarização de saturação (T);

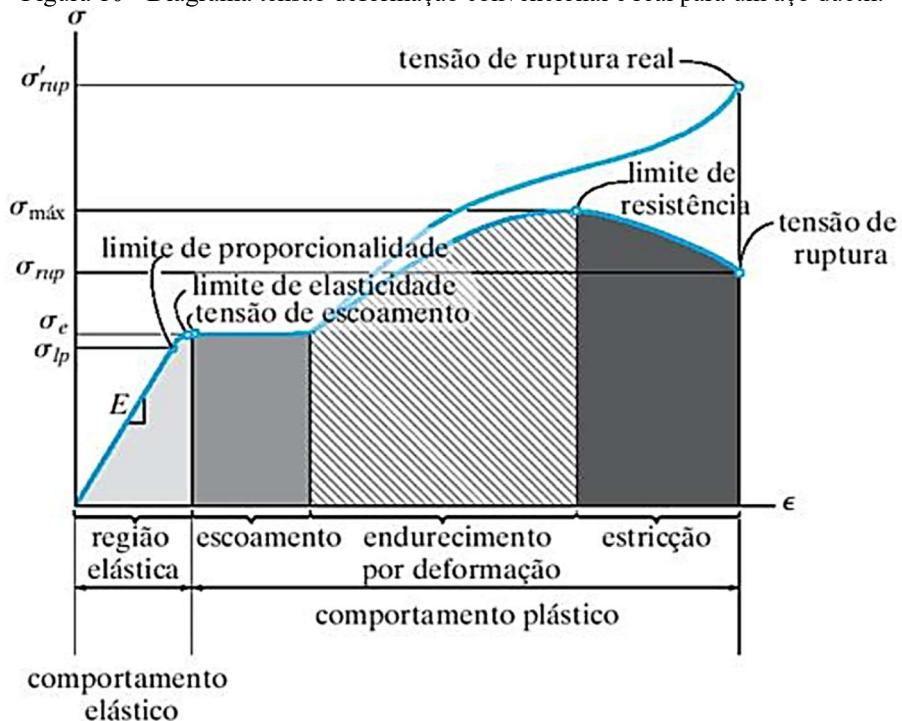
H_h - é o campo coercivo dado por $P_h \cdot \frac{e}{4} \cdot B_{máx} \cdot f$.

3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são o conjunto de características que definem o comportamento mecânico de um material em resposta a uma força aplicada. Uma das formas mais comuns de realizar a caracterização mecânica de um material é a partir de um ensaio de tração. Este ensaio nos possibilita relacionar a deformação gerada em um material, à medida que é submetido a uma tensão progressiva (DIETER, 1981; CALLISTER e RETHWISCH, 2016; HIBBELER, 2018).

O resultado de um ensaio de tração é uma curva onde apresenta em seu eixo vertical os valores de tensão e no eixo horizontal a deformação como visto na Figura 10. Essa curva tensão-deformação caracteriza a faixa de tensão onde ocorre a deformação plástica de material, ou seja, a tensão onde se inicia a deformação plástica uniforme de um material também chamada de tensão de escoamento (σ_0 ou σ_e) ou limite de escoamento (LE), caracteriza também a tensão máxima ou onde se inicia uma deformação plástica não uniforme (σ_{\max}) e o ponto de tensão em que ocorre a fratura chamado de tensão de ruptura (σ_{rup}) ou limite de resistência (LR). Com isso também é possível saber o quanto um material pode ser alongado antes que ocorra sua fratura (SOUZA, 1982; HIBBELER, 2018).

Figura 10 - Diagrama tensão-deformação convencional e real para um aço dúctil.



Fonte: Hibbeler (2018).

3.3.1 Influência dos defeitos cristalinos nas propriedades mecânicas

A interação entre defeitos cristalinos do tipo linha (discordâncias) e do tipo superficial (contornos de grão) é um dos principais fatores responsáveis pela alteração das propriedades mecânicas dos materiais por meio de mecanismos de endurecimento. Os contornos de grão atuam como barreiras eficazes ao movimento das discordâncias, dificultando sua propagação. Como grãos adjacentes possuem orientações cristalográficas distintas, uma discordância que se move em um grão não consegue atravessar diretamente para o grão vizinho, exigindo uma mudança de direção ou reconfiguração, o que demanda energia adicional. Isso faz com que as discordâncias se "empilhem" nos contornos, aumentando a resistência do material (DIETER, 1981; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

As propriedades mecânicas são alteradas de acordo com o tamanho do grão da seguinte forma: quanto maior o tamanho do grão, maior o caminho livre médio para movimento das discordâncias, ou seja, mais dúctil será o material; quanto menor o tamanho do grão, maior a área total de contornos de grão, portanto menor caminho livre médio para as discordâncias se moverem, tornando assim o metal mais resistente (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

Outra grande alteração das propriedades mecânicas ocorre pelo endurecimento por solução sólida que é defeito pontual. Quando átomos de um elemento de liga (como carbono, manganês e silício) são adicionados ao aço, eles entram na estrutura do ferro como átomos intersticiais ou substitucionais. Esses átomos criam campos de tensão localizados na rede cristalina que interagem com os campos de tensão das discordâncias. Essas interações dificultam o deslizamento das discordâncias, exigindo uma tensão maior para iniciar e sustentar a deformação plástica (DIETER, 1981; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

3.3.2 Limite de escoamento

O limite de escoamento é o ponto onde a deformação deixa de ter características elásticas e passa a ser permanente ou plástica. Este ponto define a resistência do material. Durante a deformação plástica o material sofre encruamento devido a movimentação de discordâncias no interior dos grãos, isso gera emaranhados de discordâncias que ficam empilhados nos contornos de grão e em outras descontinuidades (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

Como dito no tópico 3.3.1 o tamanho do grão tem impacto direto no limite de escoamento, a Equação 8 conhecida como equação de Hall-Petch demonstra essa relação. Esta equação mostra que a tensão de escoamento (σ_0) é igual a tensão de atrito que se opõe ao movimento das discordâncias (σ_i), mais a razão da constante que representa uma medida da extensão do empilhamento de discordâncias nas barreiras (k') pela raiz do diâmetro ou tamanho do grão (g) (DIETER, 1981).

$$\sigma_0 = \sigma_i + k' \cdot g^{-1/2} \quad \text{Equação 8}$$

A equação de Hall-Petch amplamente aplicada, mas possui uma limitação, pois se o valor do tamanho do grão for extrapolado para um valor muito pequeno, o valor da tensão de escoamento pode chegar a valores próximos a tensão de cisalhamento teórica (DIETER, 1981).

Nos aços elétricos utilizados na mobilidade elétrica, observa-se uma tendência de aumento da resistência ao escoamento, uma vez que se busca evitar a deformação plástica nos motores. Além disso, a formação de emaranhados de discordâncias ocorridas na deformação plástica afeta negativamente o movimento dos domínios magnéticos, contribuindo para o aumento das perdas magnéticas. Um dos mecanismos para elevar a resistência é a redução do tamanho de grão, conforme a relação $\sigma_0 \propto g^{-1/2}$. No entanto, essa mesma redução intensifica as perdas magnéticas na componente histerética, dado que $P_h \propto g^{-1}$. Diante disso, torna-se essencial determinar um tamanho de grão ideal que promova um equilíbrio entre propriedades mecânicas e magnéticas, assegurando um desempenho adequado para cada aplicação. (BERTOTTI *et al.*, 1985).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os materiais utilizados, processos e análises realizadas nesta pesquisa foram concedidos pelo Centro de Pesquisa da Aperam South America.

4.1 MATERIAIS

O material selecionado para este estudo foi um aço elétrico GNO totalmente processado, ou seja, laminado a frio e recozido e revestido em escala industrial pela Aperam South America, com espessura nominal de 0,30 mm, contendo em sua composição química os valores dispostos na Tabela 1.

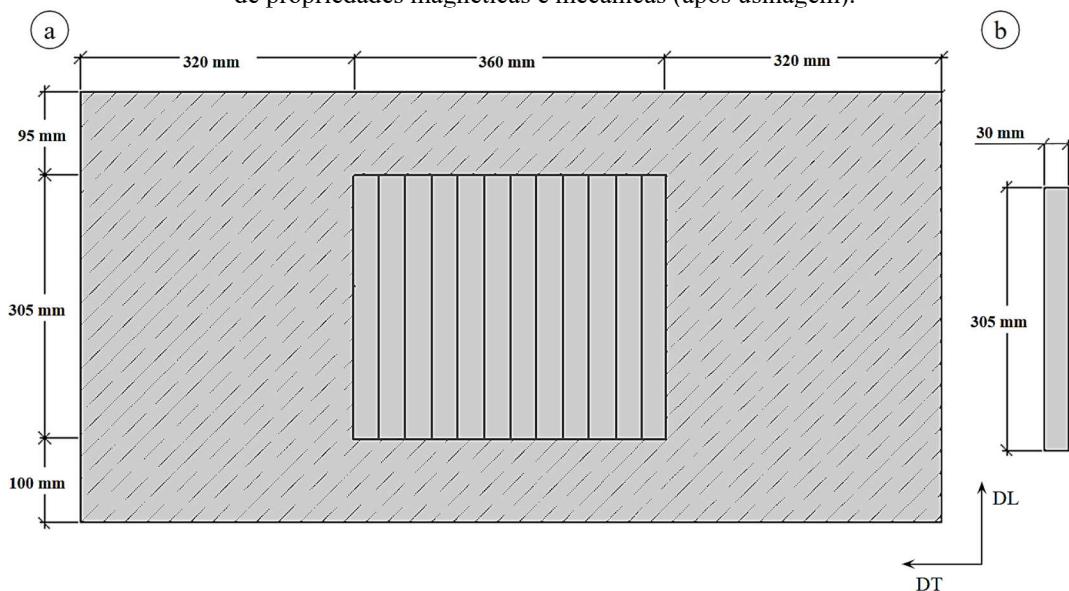
Tabela 1 - Composição química típica do aço GNO 3,3 % em peso de Si.

% (massa)				
Fe	Si	Mn	C	N
95,09 – 96,99	2,8 - 3,4	0,2 - 1,5	0,0015 - 0,0027	0,0012 - 0,0035

Fonte: Dados cedidos pela APERAM (2025).

Foram usadas cinco chapas fornecidas pela Aperam com dimensões de 500 × 1.000 mm. As chapas foram cortadas em guilhotina afim de obter 12 amostras nas dimensões de 305 mm × 30 mm em cada chapa. Os cortes foram realizados no centro da chapa e na direção longitudinal a direção de laminação (DL) como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Plano de corte das amostras sendo: a) esquema de corte e indicação das direções de laminação (DL), transversal (DT) e área hachurada indica a área de descarte; b) dimensão da amostra para recozimento, medição de propriedades magnéticas e mecânicas (após usinagem).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Após a realização dos cortes as amostras foram separadas em cinco grupos contendo 12 amostras cada.

4.2 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados nesta pesquisa pertencem ao Centro de Pesquisa da Aperam South America.

4.2.1 Tratamento térmico de recozimento

Para realização dos recozimentos foi utilizado um forno mufla modelo AN1232 com controle de ciclo de temperatura, concentração de gases na atmosfera e ponto de orvalho fornecido pela Analógica Instrumentação e Controle.

4.2.2 Ensaio eletromagnético

Para realizar a medição das perdas magnéticas totais foi utilizado um testador de aços elétricos da fabricante Brockhaus Measurements modelo MPG200D, com quadro Epstein (sensor de medição com arranjo de na forma de bobina quadrada).

4.2.3 Microscopia óptica

As micrografias utilizadas no ensaio de determinação do tamanho médio dos grãos foram obtidas por meio de um microscópio óptico modelo DMLM, fabricado pela Leica, em conjunto com o software de aquisição e análise de imagens LAS EZ.

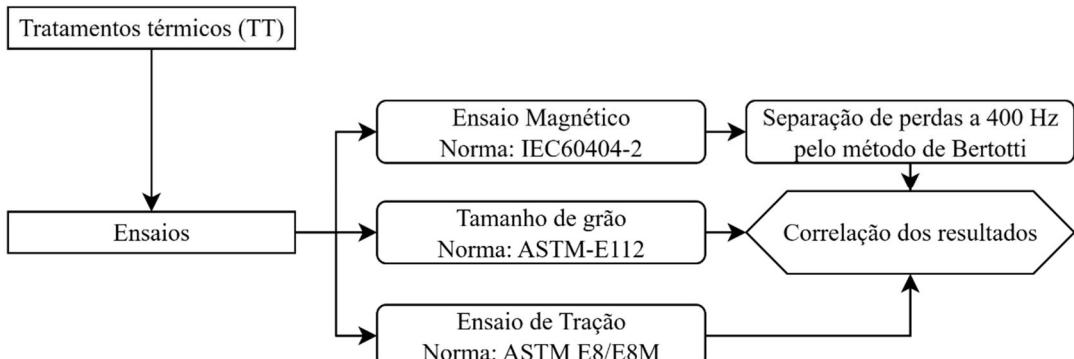
4.2.4 Ensaio de tração

Para realização dos ensaios de tração foi utilizado uma máquina universal de ensaios modelo 5583 da fabricante Instron equipada com extensômetro de 10 mm de base de medida.

4.3 METÓDOS

Para execução do procedimento experimental seguiu-se as etapas descritas no fluxograma da Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma de estruturação dos procedimentos experimentais.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.3.1 Tratamento térmico de recozimento

Os grupos contendo 12 amostras foram submetidos a um tratamento térmico de recozimento para alívio de tesões dos cortes e para promover o crescimento dos grãos já recristalizados nos processos de produção industrial. As condições de processo selecionadas estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de recozimento.

Grupo	Taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C h}^{-1}$)	Temperatura de encharque ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo de encharque (h)	Atmosfera	Ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$)
1	100	650 \pm 10	1	$90\% \text{ N}_2 + 10\% \text{ H}_2$	-20
2		700 \pm 10			
3		750 \pm 10			
4		800 \pm 10			
5		840 \pm 10			

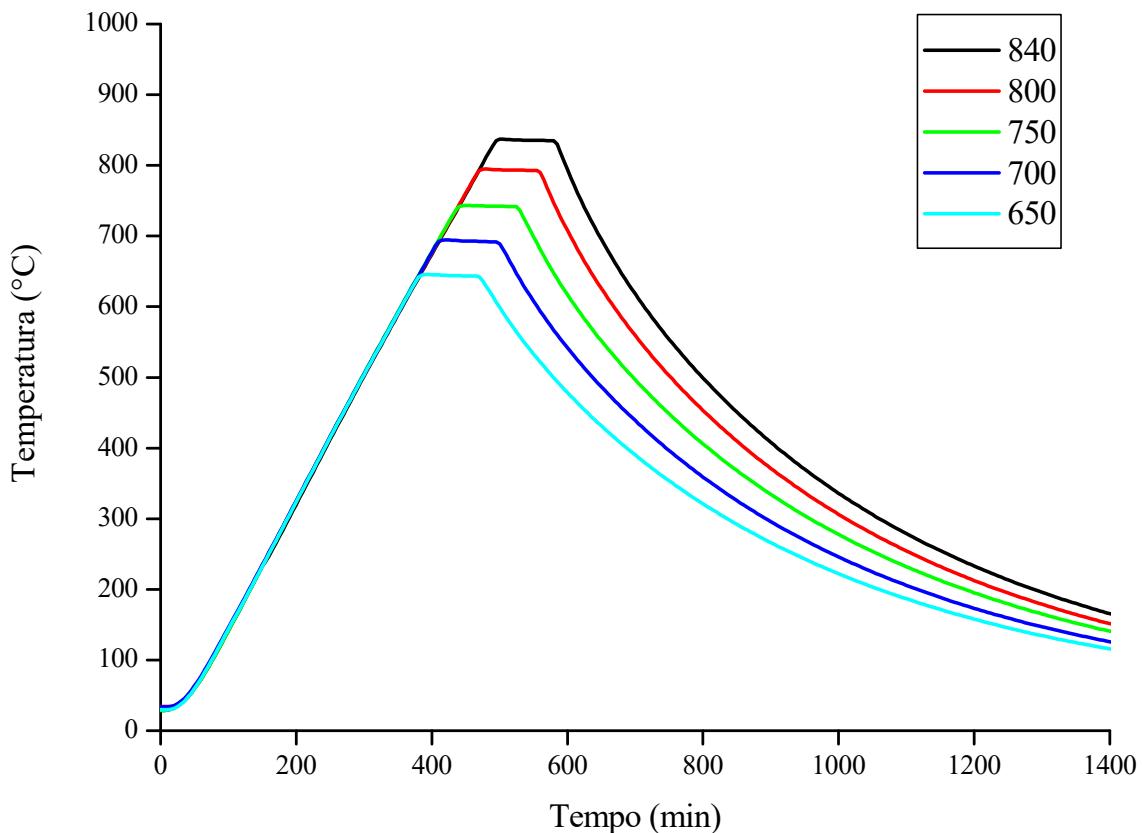
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As condições de atmosfera e ponto de orvalho (temperatura de condensação de água em uma mistura gasosa) foram selecionadas com o intuito de evitar umidade e a oxidação das amostras (JONES et al., 2024).

As amostras foram agrupadas e colocadas no forno em temperatura ambiente. Após o selamento do forno foi feita a adequação da atmosfera com a adição dos gases e em sequência foi iniciado o aquecimento na taxa definida de $100\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$. Após o tempo de permanência nas temperaturas determinadas (encharque) as amostras continuaram no forno com a mesma atmosfera durante o resfriamento até obter temperaturas inferiores a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os processos completos duraram em média 23 horas, a curva de aquecimento e patamar se mantiveram dentro das condições especificadas. Os resultados de medição das temperaturas para cada condição estão presentes na Figura 13.

Figura 13 - Curvas de temperaturas medidas durante os recozimentos.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

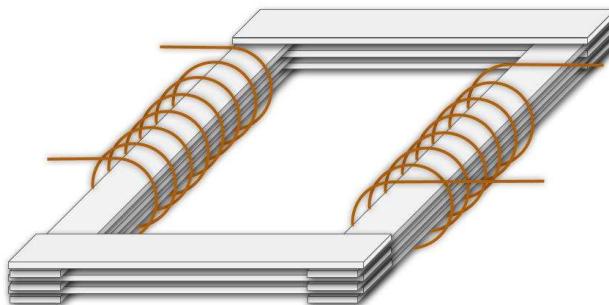
4.3.2 Determinação das perdas magnéticas

A determinação das perdas magnéticas seguiu em duas etapas, as medições das perdas totais através de ensaio magnético e os cálculos para determinação da separação da perda total em suas três parcelas pelo método de Bertotti.

4.3.2.1 Ensaio magnético

Cada grupo de amostras teve sua perda magnética total determinada pelo ensaio magnético realizado em um quadro Epstein com arranjo composto pelas doze amostras do grupo, formando um campo magnético fechado conforme exemplificado na Figura 14, seguindo o padrão da norma IEC60404-2. As perdas foram determinadas em 16 frequências diferentes entre 3 e 1.000 Hz com uma polarização de indução de 1 T. Todos os testes foram realizados à temperatura ambiente (25 °C).

Figura 14 – Montagem de amostras no quadro Epstein.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.3.2.2 Separação de perdas magnéticas pelo método de Bertotti

Para realizar a separação das perdas magnéticas por ciclo foram considerados somente os valores medidos até 400 Hz. Inicialmente foram calculadas as perdas por corrente parasita (P_p) por meio da Equação 5 para cada frequência. Foram utilizados os valores de densidade igual a 7650 kg m^{-3} e resistividade igual a $6,14 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$.

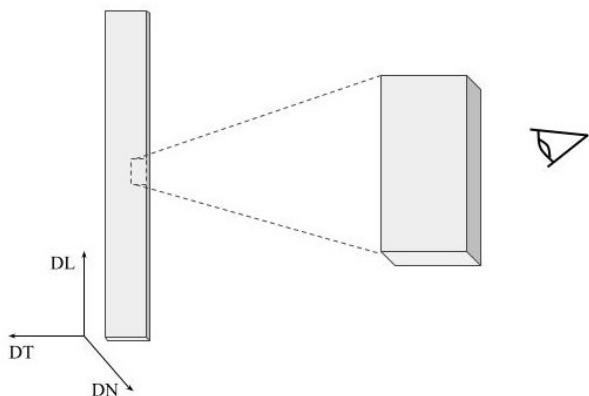
As perdas por histerese (P_h) foi obtida encontrando a perdas por histerese por ciclo (K_h) por extração, segundo o modelo de Bertotti, usando a perda total medida menos a perda por corrente parasita ($P_t - P_p$) versus $f^{0,5}$. Os valores encontrados de K_h foram os pontos de interceptação onde $f^{0,5}$ foi igual a zero. Na sequência multiplicou-se K_h por cada frequência para obter os valores de P_h .

As perdas anômalas (P_a) foram calculadas pela diferença entre os componentes conforme Equação 6.

4.3.3 Determinação do tamanho médio dos grãos

Para determinar o tamanho médio dos grãos foi usada uma amostra de cada grupo e dela foi amostrada uma fração com dimensões aproximadas de 20 mm na DL, 10 mm na DT e 0,30mm de espessura. Essa fração foi preparada e analisada na superfície entre DL e direção normal à superfície (DN), referente a espessura da amostra como esquematizado na Figura 15.

Figura 15 – Representação esquemática da amostragem e análise microscópica.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Foi feito embutimento em baquelite, lixamento nas lixas de com granulometria de 120, 220, 320, 600 e 1.000 mesh, polimento com auxílio de pano para polimento vermelho e pasta de diamante de 0,9 µm, 0,3 µm e 0,1 µm e ataque com Nital 5 % (v/v).

As imagens foram obtidas ao longo de toda seção da fração amostrada com auxílio de um microscópio óptico com ampliação de 100×. O tamanho médio dos grãos foi determinado pelo método do diâmetro equivalente de acordo com a norma ASTM E112 (2013).

4.3.4 Determinação das propriedades mecânicas

Para determinar o limite de escoamento e limite de resistência mecânica do aço, realizou-se o ensaio de tração à temperatura ambiente a uma taxa de deformação de $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Foram realizadas medições em triplicata para cada grupo e a propriedade de interesse determinada pela média.

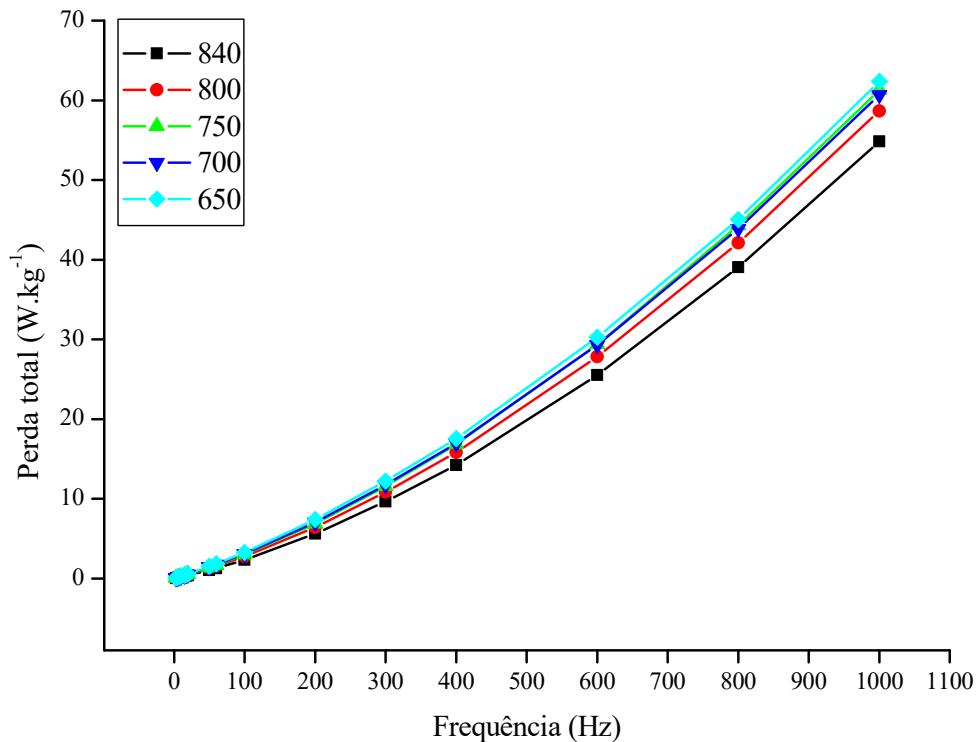
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos na investigação da correlação entre o tamanho de grão, as propriedades magnéticas e as propriedades mecânicas do aço elétrico de GNO.

5.1 PERDAS MAGNÉTICAS

Os resultados das perdas magnéticas totais em função das frequências estão presentes na Figura 16. Nesta pode ser observado que a perda total aumenta significativamente a cada acréscimo da frequência com uma tendência crescente bem definida.

Figura 16 - Gráfico de tendência das perdas magnéticas em função da frequência.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os valores das perdas nas condições inferiores a 800 °C não obtiveram uma variação tão relevante quanto às condições de 800 °C e 840 °C, que obtiveram um resultado mais baixo que as demais nas frequências superiores a 200 Hz. O mesmo ocorreu no estudo realizado por JONES *et al.* (2024), onde o mesmo observou que para um aço GNO 0,25 mm com teor de silício entre 3 e 4 %, as condições de recozimento onde as temperaturas foram inferiores a 794 °C, tiveram pouca variação nos valores das perdas totais.

Comparando os valores das perdas totais nas frequências comuns de distribuição de 50 e 60 Hz e em uma frequência mais alta de 400 Hz na Tabela 3, podemos observar que as perdas diminuíram com o aumento das temperaturas.

Tabela 3 - Resultados das perdas magnéticas para cada condição.

Condição	Perda total - P_t (W kg^{-1})		
	1 T/50 Hz	1 T/60 Hz	1 T/400 Hz
650	1,53	1,87	17,55
700	1,44	1,76	16,96
750	1,39	1,69	16,85
800	1,27	1,56	15,82
840	1,06	1,30	14,24

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As mudanças nas perdas foram mais acentuadas nas temperaturas maiores. Comparando as reduções das perdas magnéticas entre as amostras de 650 °C e 840 °C observou-se que nas frequências mais baixas a redução da perda foi de 30 %, já na frequência mais alta de 400 Hz a redução foi de aproximadamente 19 %.

Os valores das parcelas das perdas magnéticas obtidas método de Bertotti para a frequência 400 Hz estão presentes na Tabela 4.

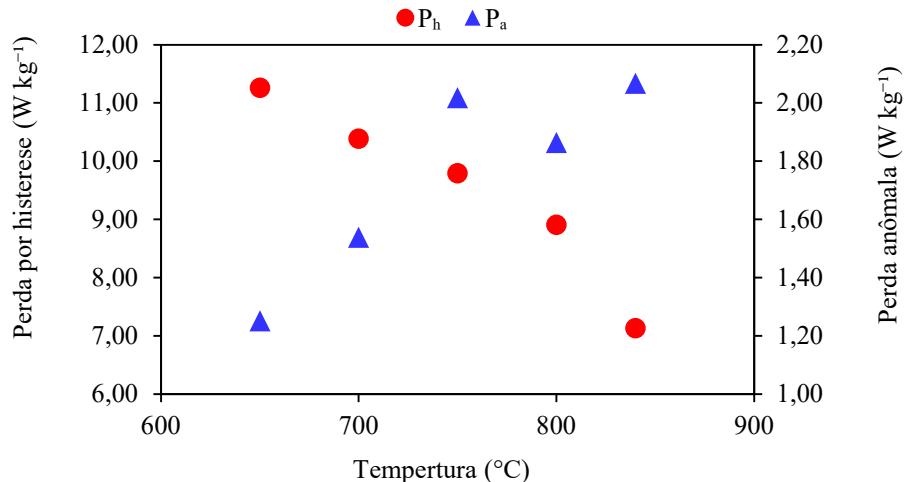
Tabela 4 - Separação de perdas magnéticas para frequência de 400 Hz.

Condição	Perdas Magnéticas a 1 T/400 Hz (W kg^{-1})			
	P_t	P_h	P_p	P_a
650	17,55	11,26	5,04	1,25
700	16,96	10,38	5,04	1,54
750	16,85	9,79	5,04	2,02
800	15,82	8,91	5,04	1,86
840	14,24	7,13	5,04	2,07

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Observou-se que a perda por histerese corresponde à maior parcela, seguida pela perda por corrente parasita e perda anômala. À medida que as temperaturas de recozimento foram subindo, a perda por histerese reduziu e a perda anômala cresceu, a Figura 17 representa essa relação de forma gráfica. O valor da perda por corrente parasita não obteve variações por se tratar de uma parcela afetada por características do material (como espessura e composição química) que não foram alteradas nos recozimentos.

Figura 17 – Comportamento das perdas histerética e anômala em função da temperatura.



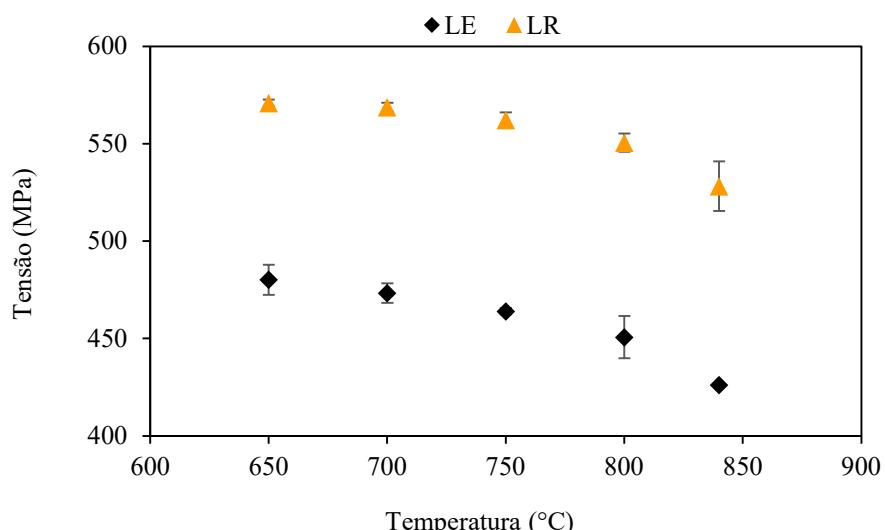
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ampliar excessivamente o tamanho de grão pode não gerar a melhoria esperada na perda magnética total em aços para aplicações em carros elétricos que operam nessa faixa de frequência de 400 Hz. Isso ocorre porque, embora o aumento do grão possa reduzir a perda por histerese, ele também acentua a perda anômala, impactando negativamente a perda total.

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Analizando os resultados médios das propriedades mecânicas medidas presentes na Figura 18, observa-se que o aumento das temperaturas de recozimento reduziu progressivamente os valores de limite de escoamento (LE) e limite de resistência (LR).

Figura 18 – Gráfico do LE e LR em função da temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Tabela 5 observa-se uma redução considerável em ambas as propriedades mecânicas entre as temperaturas de 650 °C e 840 °C. A diminuição registrada nesse intervalo foi de aproximadamente 50 MPa no limite de escoamento, o que representa cerca de 10 % do valor inicial.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas por condição.

	Propriedades Mecânicas (MPa)									
	650		700		750		800		840	
	LE	LR	LE	LR	LE	LR	LE	LR	LE	LR
Média	480	571	473	569	464	562	451	551	426	528
Desvio Padrão	8	2	5	2	2	4	11	5	1	13

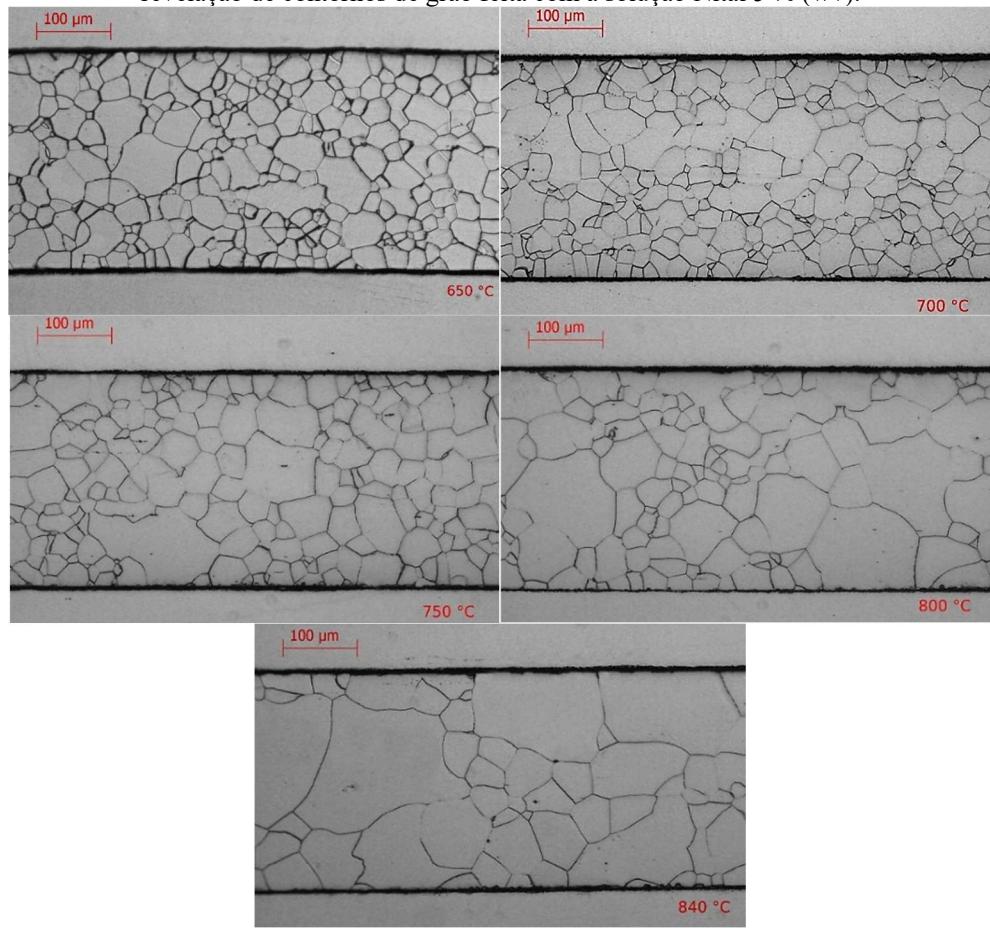
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Esse resultado indica que, ao buscar a melhoria das propriedades magnéticas por meio do aumento do tamanho de grão, pode-se comprometer a resistência mecânica necessária para aplicações deste aço nos motores de veículos elétricos que trabalham em altas rotações e elevado torque. Isso reitera a necessidade de encontrar um equilíbrio entre as propriedades.

5.3 MICROSCOPIA ÓPTICA

Observando as imagens presentes na Figura 19 foi possível comparar de forma qualitativa a regularidade dos grãos. Avaliando a amostra 650 e 700 °C observa-se que uma grande fração dos grãos tem tamanho aproximado, de certa forma homogêneos. Porém, à medida que as temperaturas aumentaram, o tamanho e regularidade dos grãos mudou, apresentando assim grãos com muita divergência de tamanho entre si.

Figura 19 - Comparativo das microscopias ópticas. Amostras com ampliação de 100×, revelação de contornos de grão feita com a solução Nital 5 % (v/v).

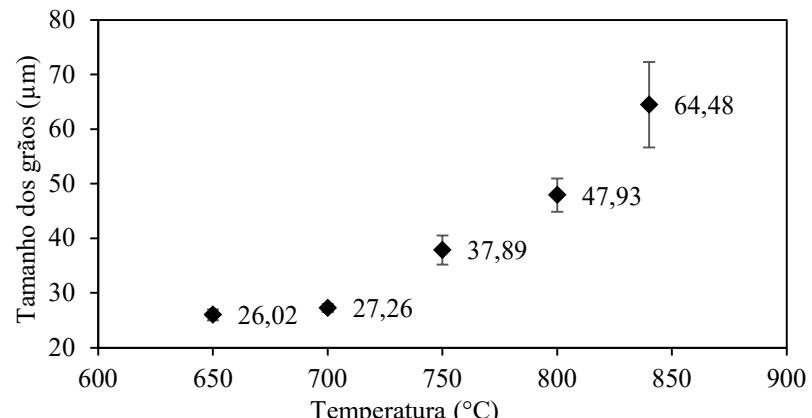


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.3.1 Tamanho médio dos grãos

Os valores da análise quantitativa do tamanho médio de grão pelo método do diâmetro equivalente estão dispostos na Figura 20.

Figura 20 - Gráfico dos tamanhos dos grãos pela temperatura de recozimento.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

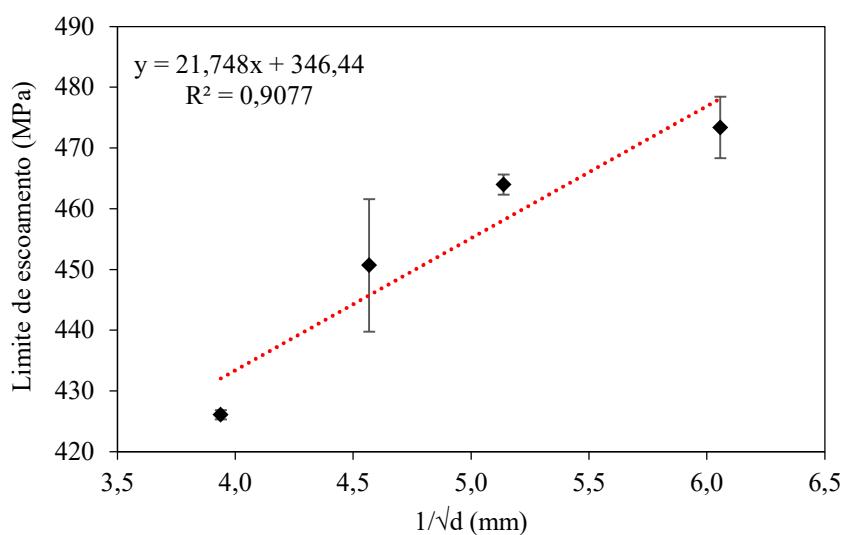
Foi possível observar que ocorreu crescimento dos grãos proporcional a cada temperatura utilizada, porém, não é observada uma relação linear. Quanto maior o tamanho dos grãos, maior foi o desvio padrão encontrado. Isso apenas reafirma o que foi visualizado na metalografia: à medida que a temperatura foi aumentando, os grãos cresceram, porém, de forma heterogênea.

A heterogeneidade nos tamanhos dos grãos é um efeito conhecido e pode ser influenciada pela estrutura da matriz do aço quando laminado a quente, pelo grau de deformação durante o processo de laminação, pela textura e por um crescimento anormal dos grãos, sendo este último mais raro em aços GNO (LANDGRAF, TAKANOHASHI e CAMPOS, 2001; PAOLINELLI, 2008).

5.3.1.1 Tamanho médio dos grãos por Hall-Petch

Com base nos dados de caracterização obtidos, tamanho de grão e limite de escoamento, aplicou-se a equação de Hall-Petch para estimar o diâmetro médio dos grãos de uma das amostras. Neste caso, o valor estimado corresponde à amostra recozida a 650 °C. Para isso, realizou-se uma regressão linear do limite de escoamento (LE) em função de $1/\sqrt{d}$, utilizando os dados das demais amostras, exceto a de 650 °C, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Regressão linear do limite de escoamento em função da razão de um sobre a raiz do tamanho médio dos grãos.



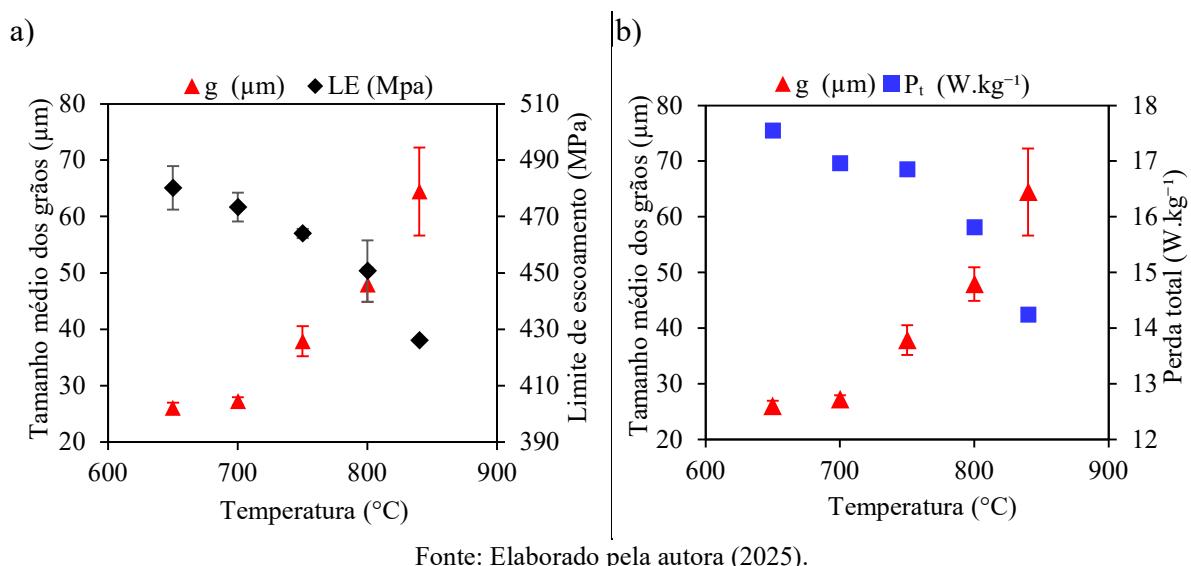
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O valor encontrado para σ_i foi de 346,44 MPa e para k' foi de 21,75. Uma vez que para o valor de LE para a condição de 650 °C, o tamanho médio dos grãos, conforme definido pela Equação 8 foi de aproximadamente 0,026 mm ou 26,42 μm . Esse valor demonstra que há consistência com o tamanho de grão medido pelo método diâmetro equivalente que foi de $26,02 \pm 0,98 \mu\text{m}$.

5.4 COMPARATIVOS E CORRELAÇÕES

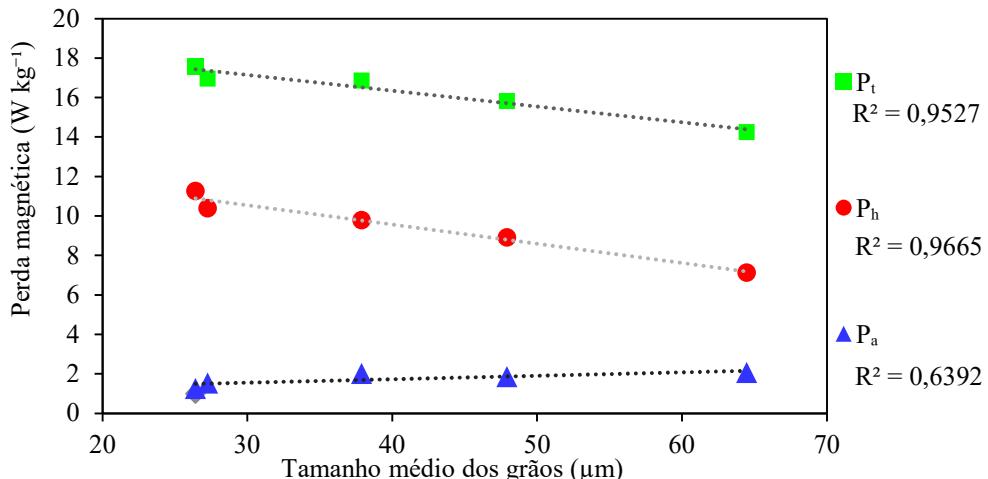
Analizando a Figura 22 (a e b), onde a perda magnética total e o limite de escoamento são comparados ao tamanho de grão em função das temperaturas, percebeu-se que a perda total e o limite de escoamento são inversamente proporcionais ao acréscimo de temperatura. Já o tamanho dos grãos é diretamente proporcional.

Figura 22 - Gráficos de comparação de propriedades. A esquerda a) evolução do tamanho médio dos grãos e da perda magnética em função da temperatura. A direita b) evolução do tamanho médio dos grãos e dos limites de escoamento em função da temperatura.



Correlacionando as parcelas das perdas magnéticas com o valor do tamanho médio dos grãos medidos na Figura 23, observa-se uma boa correlação entre a perda por histerese e o tamanho de grão.

Figura 23 - Gráfico de correlação entre perdas magnéticas e tamanho médio dos grãos.

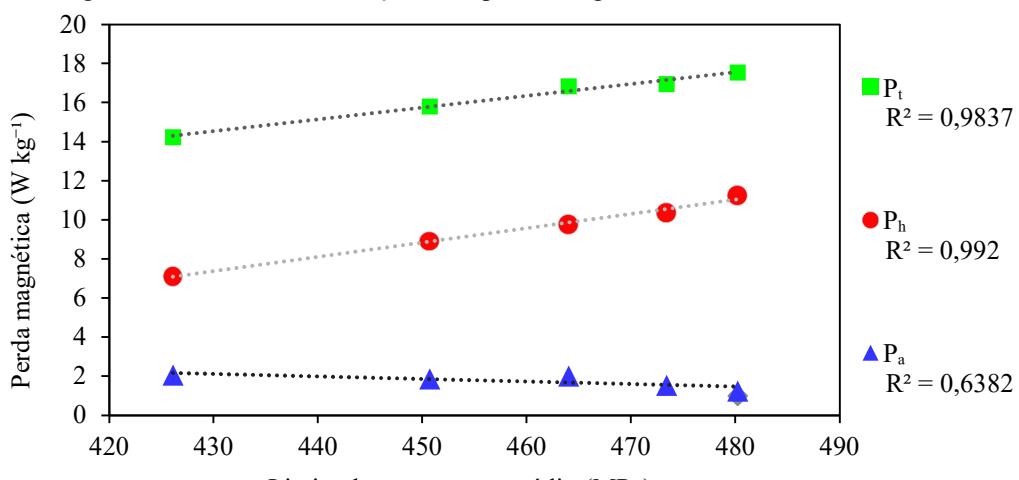


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os valores presentes demonstram, como já afirmado na literatura por meio das Equações 4 e 7, uma correlação muito favorável da perda por histerese com o tamanho dos grãos. Visto que esta é uma fração relevante da perda total, isso implicou também uma boa correlação da perda total com o tamanho dos grãos. A perda anômala, por sua vez, apresentou um coeficiente de determinação (R^2) menor.

Realizando a correlação direta das perdas separadas em suas componentes e o limite de escoamento temos uma correlação muito satisfatória para a perda por histerese. Na Figura 24 pode ser observada a regressão linear dos dados e seus respectivos coeficientes de determinação. A perda por histerese obteve um coeficiente de 0,992 que indica uma boa precisão na regressão linear dos pontos.

Figura 24 - Gráfico de correlação entre perdas magnéticas e limite de escoamento.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Observou-se que a correlação entre a perda por histerese e o limite de escoamento foi mais precisa em comparação com a correlação da perda por histerese com o tamanho de grão. Essa maior precisão sugere que o limite de escoamento e a perda por histerese compartilham influências de outros fatores microestruturais e compostionais que podem alterar ambas as propriedades simultaneamente. Entre esses fatores, destacam-se os defeitos pontuais, provenientes das adições de elementos de liga como silício, manganês e carbono, que afetam a estrutura cristalina do aço. Além disso, os defeitos volumétricos, como certos precipitados e inclusões não metálicas, também desempenham um papel relevante na modificação dessas propriedades, impactando a mobilidade de discordâncias e a parede de domínios magnéticos, respectivamente (DIETER, 1981; CULLITY e GRAHAM, 2009; CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho investigou a correlação entre microestrutura, propriedades magnéticas e mecânicas de um aço elétrico de GNO com 3,3 % em peso de silício, material fundamental para rotores e estatores de motores de veículos elétricos.

Os recozimentos em diferentes temperaturas (650 °C, 700 °C, 750 °C, 800 °C e 840 °C) promoveram alterações significativas na microestrutura do material, com o aumento da temperatura resultando em um crescimento proporcional, porém heterogêneo dos grãos.

Em relação às propriedades magnéticas, observou-se que as perdas magnéticas totais diminuíram com o aumento das temperaturas de recozimento. As maiores reduções foram notadas em temperaturas iguais ou superiores a 800 °C. A análise detalhada das parcelas de perdas magnéticas revelou que a perda por histerese foi a componente dominante e apresentou uma redução à medida que a temperatura de recozimento aumentava. Em contrapartida, as perdas anômalas aumentaram com a elevação da temperatura, enquanto as perdas por corrente parasita foram consideradas inalteradas conforme sugerido na literatura.

Quanto às propriedades mecânicas, o aumento das temperaturas de recozimento causou uma redução progressiva nos valores de limite de escoamento (LE) e limite de resistência (LR).

A correlação entre as propriedades demonstrou que o crescimento do grão impacta diretamente tanto as perdas magnéticas quanto às propriedades mecânicas. Há uma forte correlação inversa entre a perda por histerese e o tamanho de grão e uma correlação aparentemente maior entre a perda por histerese e o limite de escoamento, o que sugere que outros mecanismos de além do tamanho de grão impactam essas duas propriedades de forma similar. Estudos futuros podem explorar esta correlação com uma maior amplitude dados para validar essa condição.

A partir dos resultados, reitera-se a importância de identificar um tamanho de grão ótimo para o aço GNO, a fim de balancear as propriedades magnéticas e mecânicas. Este balanceamento é crucial para otimizar o desempenho de motores elétricos em veículos elétricos, que exigem tanto baixa perda de energia em altas frequências quanto elevada resistência mecânica para suportar o alto torque e rotação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/8M**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials: ASTM, 2022.

AISO, K.; AKATSU, K. Performance Comparison of High-Speed Motors for Electric Vehicle. **World Electric Vehicle Journal**, Basel, v. 13, n. 4, p. 17, 23 mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13040057>.

ALCÂNTARA, Fabrício Luiz de. **Estudo da precipitação de MnS, AlN e CuS no aço 3 % Si, em uma laminação a quente com acabamento reversível**. 2012. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

AMORIM, Dirceni de Souza Costa. **Efeito do envelhecimento entre passes durante a laminação a frio sobre as propriedades magnéticas do aço silício de grão orientado de alta permeabilidade**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2012.

APERAM. **A inovação em veículos elétricos e híbridos**. 2019. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/biblioteca/Aperam%20-%20A%20inova%C3%A7%C3%A3o%20em%20ve%C3%ADculos%20el%C3%A9tricos%20e%C3%ADbidos.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2024.

BARRETT, W. F., BROWN, W. F., & HADFIELD, R. A. **Researches on the electrical conductivity and magnetic properties of upwards of one hundred different alloys of iron**. Journal of Institute of Electrical Engineers, v.31, 674-722, 1902.

BERTOTTI, G. General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials. **IEEE Transaction on Magnetics**, v. 24, n. 1, 1988.

BERTOTTI, G. *et al.* On the effect of grain size on magnetic losses of 3 % non-oriented Si-Fe. **Journal de Physique**, Torino, v. 46, p. 385-388, set. 1985.

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. Piscataway: IEEE Press, 1993. 968 p.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 1. ISBN 978-85-216-3103-3.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. 2. ed. New Jersey: IEEE Press, 2009. v. 1. ISBN 978-0-471-47741-9.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. v. 1.

DIN. **EN 10303:2015**: Thin magnetic steel strip and sheet for use at medium frequencies. out. 2015. 25 p.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Carros Elétricos.** 2017. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf. Acesso em: 20 mar. 2024.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** 10. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018. v. I. ISBN 9788543024998.

JONES, Chris *et al.* The magnetic performance of automotive grade non-oriented electrical steel when subjected to various stress-relief anneal conditions. In: **11th International Conference on Magnetism and Metallurgy**, L'Aquila. p. 434-444, jun. 2024.

LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos.** 2009.

LANDGRAF, Fernando J. G.; TAKANOHASHI, Rubens; CAMPOS, Marcos F. de. Tamanho de grão e textura dos aços elétricos. In: **Workshop sobre textura e relações de orientação.** São Paulo, 2001. p. 161-188.

MAGNETIC Materials—Part 2: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Strip and Sheet by Means of an Epstein Frame. **IEC Standard 60404-2.** 2008.

MASSALSKI, T. B. et al. **Binary Alloy Phase Diagrams.** Ohio: ASM, 1986.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>. Acesso em: 19 mar. 2024.

NEOCHARGE. **Como funciona o motor de um carro elétrico.** 2025. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/motor-como-funciona>. Acesso em: 19 jan. 2025.

OLIVEIRA, José Carlos de. **Uma estimativa das perdas magnéticas em reatores com saturação natural.** 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2006.

PAOLINELLI, Sebastião da Costa. **Estudo da influência da temperatura de laminação a quente de acabamento sobre a estrutura e propriedades magnéticas de aços GNO com 2,0 e 3,0% Si.** 2008. 139 f. Tese (Doutorado) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

PINEDO, Carlos Eduardo. **Tratamentos térmicos e superficiais dos aços.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2021. 326 p. ISBN 978-65-5506-221-2.

SOUZA, Ronie Magno Pinheiro de. **Efeito do perfil térmico de recozimento das bobinas laminadas a.** 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos.** 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982. v. 1. ISBN 9788521200123.

Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. **ASTM Standard E112.** 1996.

STEINMETZ, Chas. Proteus. On the law of hysteresis. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 72, p. 26, fev. 1984.

UNITED NATIONS. **The Paris Agreement**. 2024. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 19 mar. 2024.