



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Lucas Carlos Soares de Matos

**Análise das propriedades magnéticas de aços elétricos de
grão não-orientado de diferentes tamanhos de grão**

Timóteo

Maio de 2023

Lucas Carlos Soares de Matos

**Análise das propriedades magnéticas de aços elétricos de
grão não-orientado de diferentes tamanhos de grão**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais do CEFET-
MG, 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.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Mirela de Castro Santos

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Leandro Rocco

Agência Financiadora: Fundação de Amparo à Pesquisa do
Estado de Minas Gerais – FAPEMIG.

Timóteo

2023

Matos, Lucas Carlos Soares de.

M433a Análise das propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não-orientado de diferentes tamanhos de grão / Lucas Carlos Soares de Matos. – 2023.

119 f. : il.

Orientadora: Mirela de Castro Santos.

Coorientador: Daniel Leandro Rocco.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Timóteo, 2023.

Bibliografia.

1. Aço elétrico. 2. Aço elétrico (Propriedades Magnéticas) 3. Materiais granulados - Permeabilidade. I. Santos, Mirela de Castro. II. Rocco, Daniel Leandro.

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 18 / 2023 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.023203/2023-40

Belo Horizonte-MG, 08 de maio de 2023.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

?ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO NÃO-ORIENTADO DE DIFERENTES TAMANHOS DE GRÃO?

Autor: Lucas Carlos Soares de Matos

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mirela de Castro Santos

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 08 de maio de 2023 esta Dissertação:

Prof.^a Dr.^a Mirela de Castro Santos (ORIENTADORA)
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. Leonel Muniz Meireles (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais ? CEFET-MG

Prof. Dr. Adriano Alex de Almeida (EXAMINADOR EXTERNO)
APERAM SOUTH AMERICA - APERAM

(Assinado digitalmente em 09/05/2023 21:53)
DANIEL LEANDRO ROCCO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DFGTM (11.63.03)
Matrícula: 2647959

(Assinado digitalmente em 09/05/2023 19:15)
LEONEL MUNIZ MEIRELES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DFGTM (11.63.03)
Matrícula: 1095529

(Assinado digitalmente em 09/05/2023 16:10)
MIRELA DE CASTRO SANTOS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CAATM (11.63.01)
Matrícula: 1867757

(Assinado digitalmente em 09/05/2023 14:41)
ADRIANO ALEX DE ALMEIDA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 081.809.416-80

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **18**, ano: **2023**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **08/05/2023** e o código de verificação: **669723b171**

*Dedico esse trabalho
a Deus, família e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me sustentado todos os dias até esse momento e por ter me dado a graça de estudar o que amo, mesmo quando parecia não haver uma oportunidade. Agradeço por ter agido de forma misteriosa, me dando forças mesmo quando apareceram os obstáculos, que a primeira vista pareceram intransponíveis.

A meus pais, Rosângela e Luiz (*in memoriam*). Minha mãe, exemplo de mulher corajosa e destemida, cuja força conhecimento humano não consegue medir, que mesmo contra as estatísticas ensina diariamente como ser um exemplo de sabedoria e compaixão. Agradeço a meu pai, que sonhou em me ver estudar e conquistar lugares que o mesmo não pôde, que acreditou que o mestrado seria uma conquista possível e que me incentivou desde o primeiro passo na escola até seu último suspiro de sua vida. A você, pai, que me viu começar esse sonho em 2019, mas nos deixou pouco depois, dedico essa e todas as conquistas que Deus me permitir. Jamais esquecerei todo esforço que você e minha mãe fizeram pra que eu pudesse estudar. Agradeço também meus familiares, que me apoiaram nos momentos difíceis, especialmente minha querida avó Maria Perpétua, cujo coração e simplicidade tanto prezo. Amo vocês!

Aos meus orientadores, Mirela e Daniel, cuja coragem e ousadia tanto admiro, agradeço por terem acreditado que eu seria capaz de concluir algo tão desafiador. Agradeço por manterem a chama do conhecimento acesa e por terem tido paciência e vigor mesmo que tenhamos passado quase dois anos desse trabalho sem podermos nos ver pessoalmente, em virtude da pandemia. Mesmo assim, a cada reunião, senti a dedicação e o zelo de vocês pelo nosso trabalho. Vocês me inspiram.

Agradeço aos colegas que conheci durante o curso, em especial, Ludmilla, Letícia, Ruan Thalles e Thays, por apoiar esse trabalho. Vocês tornaram essa jornada mais leve.

Agradeço a Aperam Timóteo e aos profissionais do Centro de Pesquisa, sem os quais não teríamos conseguido tamanho êxito.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG pela oportunidade, especialmente aos professores e servidores do campus Timóteo, ao qual tive orgulho de ter sido um dos primeiros alunos de mestrado, em 2019. À FAPEMIG, pela bolsa de pesquisa, sem a qual não conseguiria alcançar esse feito e a CAPES.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para essa conquista, meu mais sincero obrigado!

RESUMO

Aços elétricos são cada vez mais empregados na sociedade, demonstrando serem indispensáveis em vários setores, especialmente no mercado crescente dos veículos elétricos. Eles são materiais ferromagnéticos geralmente compostos por ferro e silício ou ferro e alumínio, e devem apresentar resistividade elétrica suficiente para que se alcance as menores perdas magnéticas durante o uso. As perdas magnéticas são um importante parâmetro de controle de qualidade dos aços elétricos, visto que elas podem limitar a eficiência dos mesmos, e se não controladas, podem aumentar a demanda energética em motores e transformadores, promovendo o desperdício energético. A perda magnética total é composta por três perdas: histerese (P_h), parasita (P_p) e em excesso (P_e). A fim de analisar as propriedades magnéticas, dois aços de grão não-orientado, M350-50A e M530-54A, de diferentes tamanhos de grão, foram estudados. A análise por microscopia óptica apontou para tamanhos de grão médio de 81 e 59 microns, respectivamente. Através do histeresímetro Brockhaus, curvas de histerese dos materiais foram obtidas. Após análise, a perda total mensurada apresentou uma diferença de 14% a 1,5 T e 15% a 1 T entre os dois aços, sendo o aço de menor tamanho de grão, M530-54A, o que apresentou as maiores perdas. Ajustes matemáticos utilizando a metodologia de separação de perdas de Bertotti foram realizados para as frequências de 3 a 100 Hz. Foi percebido que o comportamento de P_h , P_p e P_e foi semelhante nos dois aços, sendo que P_h foi a mais predominante das perdas até 0,9 T, e acima dessa indução, P_p se tornou a maior das três perdas até 1,5 T. Análises das perdas foram feitas em função das frequências e induções e diversos gráficos foram plotados. Ainda dentro das propriedades magnéticas, a remanência dos dois aços foi idêntica, considerando o erro experimental de 2%, enquanto a coercividade foi diferente em todos intervalos de frequências de 3 a 2000 Hz, tanto a 1 T quanto a 1,5 T. Isso mostra que a anisotropia desempenha um papel fundamental em ambos os aços. Por fim, o pico de permeabilidade relativa do aço M350-50A foi maior que o aço concorrente para todas frequências. Com os resultados alcançados foi possível estabelecer discussões sobre a microestrutura dos aços elétricos e suas propriedades magnéticas.

Palavras-chave: Aços elétricos, Grão não orientado, Perdas magnéticas.

ANALYSIS OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF NON-ORIENTED GRAIN ELECTRICAL STEELS OF DIFFERENT GRAIN SIZES

ABSTRACT

Electrical steels are increasingly used in society, proving to be indispensable in several sectors, especially in the growing market of electric vehicles. They are ferromagnetic materials generally composed of iron and silicon or iron and aluminum, and must have sufficient electrical resistivity to achieve the lowest magnetic losses during use. Magnetic losses are an important parameter for quality control of electrical steels, since they can limit their efficiency, and if not controlled, they can increase energy demand in motors and transformers, promoting energy waste. The total magnetic loss is composed of three losses: hysteresis (P_h), parasite (P_p) and excess (P_e). In order to analyze the magnetic properties, two non-oriented grain steels, M350-50A and M530-54A, of different grain sizes, were studied. Optical microscopy analysis pointed to average grain sizes of 81 and 59 microns, respectively. Through the Brockhaus hysteresimeter, hysteresis curves of the materials were obtained. After analysis, the total loss measured showed a difference of 14% at 1.5 T and 15% at 1 T between the two steels, with the smaller grain size steel, M530-54A, showing the highest losses. Mathematical adjustments using the Bertotti loss separation methodology were performed for frequencies from 3 to 100 Hz. It was noticed that the behavior of P_h , P_p and P_e was similar in both steels, with P_h being the most predominant loss up to 0.9 T, and above this induction, P_p became the highest of the three losses up to 1.5 T. Losses analyzes were performed as a function of frequencies and inductions and several graphs were plotted. Still within the magnetic properties, the remanence of the two steels was identical, considering the experimental error of 2%, while the coercivity was different in all frequency ranges from 3 to 2000 Hz, both at 1 T and 1.5 T. It shows that anisotropy plays a key role in both steels. Finally, the relative permeability peak of the M350-50A steel was higher than the competing steel for all frequencies. With the results achieved, it was possible to establish important discussions about the microstructure of the electrical steels studied and their magnetic properties.

Keywords: Electrical steel, Non-grain oriented, Magnetic loss.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	AVANÇOS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA E OS AÇOS ELÉTRICOS.....	4
3.2	AÇOS ELÉTRICOS.....	6
a.	Composição e estrutura	6
b.	Orientação e textura cristalográfica.....	9
c.	Tipos de aços elétricos e suas aplicações	13
3.3	PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	15
a.	Ferromagnetismo e domínios magnéticos	15
b.	Permeabilidade magnética.....	19
c.	Perdas magnéticas	21
d.	Perda por histerese	23
e.	Perda parasita.....	26
f.	Perda em excesso	28
g.	Teoria de separação das perdas magnéticas	30
3.4	TRATAMENTO TÉRMICO E TAMANHO DE GRÃO.....	32
a.	Tratamento térmico em aços.....	32
b.	Efeito do tamanho de grão sobre as propriedades magnéticas	35
3.5	OS AÇOS ELÉTRICOS GNO M350-50A E M530-54A.....	40
4	MATERIAIS E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	42
4.1	MATERIAIS	42
4.2	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	43
a.	Análise do tamanho dos grãos por Microscopia Óptica	43
b.	Medição das perdas magnéticas pelo Brockhaus	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	ANÁLISE DO TAMANHO DOS GRÃOS POR MICROSCOPIA ÓPTICA	47
a.	Método de Heyn ou interseções.....	50
b.	Medição do perímetro dos grãos.....	52
b.1.	Amostra A	55
b.2.	Amostra D	56
b.3.	Amostra E	57
b.4.	Amostra G	58
b.5.	Amostra H	59
c.	Considerações sobre os métodos de medição de grão	60
5.2	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	61
a.	Perdas totais	61
b.	Ajuste matemático para separação das perdas	69

b.1.	Ajustes para obtenção de C_h e C_e no aço M350-50A.....	71
b.2.	Ajustes para obtenção de C_h e C_e no aço M530-54A.....	73
c.	P_h , P_p e P_e e seus comportamentos.....	75
c.1.	P_h , P_p e P_e e comportamentos para o aço M350-50A.....	76
c.2.	P_h , P_p e P_e e comportamentos para o aço M530-54A.....	80
c.3.	P_h , P_p , P_e e P_d em função do tamanho de grão	84
c.4.	Comparativo de P_h , P_p , P_e e P_d em função da frequência nos dois aços	90
c.5.	Comparativo de P_h , P_p , P_e e P_d em função da indução nos dois aços.....	93
d.	Remanência e coercividade	96
d.1.	Remanência	96
d.2.	Coercividade	98
e.	Permeabilidade relativa.....	101
6	CONCLUSÕES	107
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
9	APÊNCICE A: IMAGENS OBTIDAS DURANTE AS CARACTERIZAÇÕES.....	118

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - APLICAÇÕES DOS AÇOS M350-50A E M530-54A	41
TABELA 2 - TABELA DE NUMERAÇÃO E SIGLA DAS AMOSTRAS	42
TABELA 3 - INFORMAÇÕES DOS MATERIAIS INSERIDAS AO <i>BROCKHAUS</i>	45
TABELA 4 - PARÂMETROS INFORMADOS NO <i>BROCKHAUS</i> PARA OBTENÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS	46
TABELA 5 - VALORES ENCONTRADOS DE TAMANHO MÉDIO DE GRÃO PELO MÉTODO DE HEYN	51
TABELA 6 - CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES OBTIDOS NOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE GRÃO	54
TABELA 7 - COMPILAÇÃO DOS VALORES DE AJUSTE DO HISTOGRAMA DA AMOSTRA A.....	55
TABELA 8 - COMPILAÇÃO DOS VALORES DE AJUSTE DO HISTOGRAMA DA AMOSTRA D	56
TABELA 9 - COMPILAÇÃO DOS VALORES DE AJUSTE DO HISTOGRAMA DA AMOSTRA E.....	57
TABELA 10 - COMPILAÇÃO DOS VALORES DE AJUSTE DO HISTOGRAMA DA AMOSTRA G	58
TABELA 11 - COMPILAÇÃO DOS VALORES DE AJUSTE DO HISTOGRAMA DA AMOSTRA H	59
TABELA 12 - PERDA TOTAL PARA OS AÇOS GNO NA INDUÇÃO DE 1,5 T	64
TABELA 13 - PERDA TOTAL PARA OS AÇOS GNO NA INDUÇÃO DE 1 T	66
TABELA 14 - COMPARATIVO DOS VALORES DE REFERÊNCIA COM OS VALORES MEDIDOS DE P_T	69
TABELA 15 - VALORES CONSIDERADOS PARA AS VARIÁVEIS NO CÁLCULO DE C_P	69
TABELA 16 - VALORES OBTIDOS NO CÁLCULO DE C_P	70
TABELA 17 - VALORES OBTIDOS DE C_H E C_E NO AJUSTE – AÇO M350-50A	72
TABELA 18 - VALORES OBTIDOS DE C_H E C_E NO AJUSTE – AÇO M530-54A.....	74
TABELA 19 - VALORES ENCONTRADOS PARA P_H , P_P E P_E A 50 Hz – AÇO M350-50A.....	76
TABELA 20 - VALORES ENCONTRADOS PARA P_H , P_P E P_E A 50 Hz – AÇO M530-54A.....	80

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPARAÇÃO DO EFEITO DO SI E AL NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO FERRO	6
FIGURA 2 - DIAGRAMA DE FASE DA LIGA Fe-Si.....	7
FIGURA 3 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PARÂMETRO DE REDE DE UMA ESTRUTURA Fe CONTENDO Si E/OU AL.	8
FIGURA 4 - CURVA DE MAGNETIZAÇÃO PARA MONOCRISTAIS DE FERRO	12
FIGURA 5 - LÂMINAS APLICADAS EM MOTORES ELÉTRICOS	14
FIGURA 6 - DISPOSIÇÃO DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS EM UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO NA AUSÊNCIA (T ₁) E NA PRESENÇA (T ₂ E T ₃) DE UM CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO	16
FIGURA 7 - DISPOSIÇÃO DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS EM UM MATERIAL PARAMAGNÉTICO NA AUSÊNCIA (1) E NA PRESENÇA (2) DE UM CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO	17
FIGURA 8 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA MUDANÇA DE ORIENTAÇÃO DE DOMÍNIO EM UMA PAREDE DE DOMÍNIO EM 180°.....	18
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DAS PERDAS DE ENERGIA TÍPICAS EM UM MOTOR DE 50 HP	22
FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO DO ESTATOR E ROTOR NO NÚCLEO DE UM MOTOR	22
FIGURA 11 - CURVAS DE HISTERESE DE ACORDO COM A FREQUÊNCIA PARA UM AÇO ELÉTRICO HGO .	24
FIGURA 12 - ESQUEMA DA FORMAÇÃO DAS CORRENTES PARASITAS A PARTIR DA APLICAÇÃO DE UM CAMPO EXTERNO H.....	27
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.....	30
FIGURA 14 - ESQUEMA DA RELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL EM RELAÇÃO AO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO, RECRISTALIZAÇÃO E CRESCIMENTO DE GRÃOS	33
FIGURA 15 - RESULTADOS DE PERDA MAGNÉTICA A 60 Hz E 1,5 T EM RELAÇÃO AO TAMANHO DE GRÃO, OBTIDO POR DE CAMPOS, TEIXEIRA E LANDGRAF (2006).....	36
FIGURA 16 - RESULTADO DAS PERDAS DIVIDIDAS PELA FREQUÊNCIA EM RELAÇÃO AO TAMANHO DE GRÃO, OBTIDO POR DE CAMPOS, TEIXEIRA E LANDGRAF (2006)	38
FIGURA 17 - GRÁFICO DA RELAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO COM AS ENERGIAS DE PERDA PARA REGIÕES DE BAIXA E ALTA INDUÇÃO, OBTIDO POR LANDGRAF, DE CAMPOS E LEICHT (2008)	39
FIGURA 18 - ESQUEMA DE CORTE DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES METALOGRÁFICAS.....	44
FIGURA 19 - ESQUEMA DA MEDIÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS NO <i>BROCKHAUS</i>	46
FIGURA 20 - IMAGENS DE MICROSCOPIA ÓPTICA PARA A AMOSTRA A	47
FIGURA 21 - IMAGENS DE MICROSCOPIA ÓPTICA PARA A AMOSTRA D	48
FIGURA 22 - IMAGENS DE MICROSCOPIA ÓPTICA PARA A AMOSTRA E	48
FIGURA 23 - IMAGENS DE MICROSCOPIA ÓPTICA PARA A AMOSTRA G	49
FIGURA 24 - IMAGENS DE MICROSCOPIA ÓPTICA PARA A AMOSTRA H	49
FIGURA 25 - APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO DOS PERÍMETROS DOS GRÃOS	53
FIGURA 26 - HISTOGRAMA: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GRÃOS PARA AMOSTRA A	55
FIGURA 27 - HISTOGRAMA: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GRÃOS PARA AMOSTRA D	56
FIGURA 28 – HISTOGRAMA: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GRÃOS PARA AMOSTRA E	57
FIGURA 29 - HISTOGRAMA: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GRÃOS PARA AMOSTRA G	58

FIGURA 30 - HISTOGRAMA: DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GRÃOS PARA AMOSTRA H	59
FIGURA 31 - CURVAS DE HISTERESE PARA O AÇO M350-50A A 1,5 T, DE 3 A 100 Hz	62
FIGURA 32 - CURVAS DE HISTERESE PARA O AÇO M350-50A A 1 T, DE 3 A 2000 Hz	62
FIGURA 33 - CURVAS DE HISTERESE PARA O AÇO M530-54A A 1,5 T, DE 3 A 100 Hz	63
FIGURA 34 - CURVAS DE HISTERESE PARA O AÇO M530-54A A 1 T, DE 3 A 2000 Hz	63
FIGURA 35 - GRÁFICO DA PERDA TOTAL PARA OS DOIS AÇOS NA INDUÇÃO DE 1 T, PARA AS FREQUÊNCIAS DE 3 A 2000 Hz	67
FIGURA 36 - GRÁFICO DA PERDA TOTAL PARA OS DOIS AÇOS NA FREQUÊNCIA DE 60 Hz, PARA AS INDUÇÕES DE 0,1 A 1,5 T	68
FIGURA 37 - IMAGENS DOS AJUSTES MATEMÁTICOS PARA O AÇO M350-50A, DE 1,5 A 0,8 T	71
FIGURA 38 - IMAGENS DOS AJUSTES MATEMÁTICOS PARA O AÇO M350-50A, DE 0,7 A 0,1 T	71
FIGURA 39 - IMAGENS DOS AJUSTES MATEMÁTICOS PARA O AÇO M530-54A, DE 1,5 A 0,8 T	73
FIGURA 40 - IMAGENS DOS AJUSTES MATEMÁTICOS PARA O AÇO M350-50A, DE 0,7 A 0,1 T	73
FIGURA 41 - GRÁFICOS DE P_H , P_P E P_E <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA PARA O AÇO M350-50A, DE 0,1 A 0,6 T	77
FIGURA 42 - GRÁFICOS DE P_H , P_P E P_E <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA PARA O AÇO M350-50A, DE 0,7 A 1,2 T	78
FIGURA 43 - GRÁFICOS DE P_H , P_P E P_E <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA PARA O AÇO M350-50A, DE 1,3 A 1,5 T	79
FIGURA 44 - GRÁFICOS DE P_H , P_P E P_E <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA PARA O AÇO M530-54A, DE 0,1 A 0,6 T	81
FIGURA 45 - GRÁFICOS DE P_H , P_P E P_E <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA PARA O AÇO M350-50A, DE 0,7 A 1,2 T	82
FIGURA 46 - GRÁFICOS DE P_H , P_P E P_E <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA PARA O AÇO M530-54A, DE 1,3 A 1,5 T	83
FIGURA 47 - P_H , P_P E P_E EM FUNÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO PARA 1,5 T E 50 Hz	84
FIGURA 48 - P_H E P_D EM FUNÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO PARA 1,5 T E 50 Hz	85
FIGURA 49 - GRÁFICOS DE P_H , P_P E P_E (À ESQUERDA) E P_H E P_D (À DIREITA) <i>VERSUS</i> TAMANHOS DE GRÃO PARA OS DOIS AÇOS NAS FREQUÊNCIAS DE 3, 5 E 10 Hz A 1,5 T	87
FIGURA 50 - GRÁFICOS DE P_H , P_P E P_E (À ESQUERDA) E P_H E P_D (À DIREITA) <i>VERSUS</i> TAMANHOS DE GRÃO PARA OS DOIS AÇOS NAS FREQUÊNCIAS DE 60 E 100 Hz A 1,5 T	88
FIGURA 51 - P_H EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA COMPARANDO OS DOIS AÇOS A 1,5 T	90
FIGURA 52 - P_P EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA COMPARANDO OS DOIS AÇOS A 1,5 T	91
FIGURA 53 - P_E EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA COMPARANDO OS DOIS AÇOS A 1,5 T	92
FIGURA 54 - P_H EM FUNÇÃO DA INDUÇÃO COMPARANDO OS DOIS AÇOS A 50 Hz	93
FIGURA 55 - P_P EM FUNÇÃO DA INDUÇÃO COMPARANDO OS DOIS AÇOS A 50 Hz	94
FIGURA 56 - P_E EM FUNÇÃO DA INDUÇÃO COMPARANDO OS DOIS AÇOS A 50 Hz	95
FIGURA 57 - GRÁFICO DE REMANÊNCIA <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA A 1 T, DE 3 A 2000 Hz	96
FIGURA 58 - GRÁFICO DE REMANÊNCIA <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA A 1,5 T, DE 3 A 100 Hz	97
FIGURA 59 - GRÁFICO DE CAMPO COERCITIVO <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA A 1 T, DE 3 A 2000 Hz	98
FIGURA 60 - GRÁFICO DE CAMPO COERCITIVO <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA A 1,5 T, DE 3 A 100 Hz	99
FIGURA 61 - GRÁFICO DE CAMPO COERCITIVO <i>VERSUS</i> INDUÇÃO A 50 Hz, DE 0,1 A 1,5 T	100
FIGURA 62 - GRÁFICO DE M_R <i>VERSUS</i> INDUÇÃO DE 3 A 2000 Hz PARA O AÇO M350-50A	101
FIGURA 63 - GRÁFICO DE M_R <i>VERSUS</i> INDUÇÃO DE 3 A 2000 Hz PARA O AÇO M530-54A	102
FIGURA 64 - GRÁFICO DE M_R <i>VERSUS</i> INDUÇÃO A 50, 60 E 100 Hz – AÇOS M350-50A E M530-54A	103
FIGURA 65 - GRÁFICOS DOS PICOS DE INDUÇÃO <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIAS	105

FIGURA A. 1 - GRUPO 1 (AMOSTRA A) - AÇO GNO M350-50A.....	118
FIGURA A. 2 - GRUPO 2 (AMOSTRA D) - AÇO GNO M350-50A.....	118
FIGURA A. 3 - GRUPO 3 (AMOSTRA E) - AÇO GNO M530-54A.....	118
FIGURA A. 4 - GRUPO 4 (AMOSTRAS G E H) - AÇO GNO M530-54A	119
FIGURA A. 5 - ALGUMAS DAS AMOSTRAS APÓS PROCESSO DE CORTE, EMBUTIMENTO E LIXAMENTO .	119
FIGURA A. 6 - COMPARAÇÃO DO ASPECTO SUPERFICIAL DA AMOSTRA LIXADA COM A AMOSTRA LIXADA E POLIDA.....	119

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

-	ρ	densidade
-	σ	desvio padrão
-	μ	permeabilidade magnética
-	μ_m	permeabilidade do material
-	μ_0	permeabilidade magnética no vácuo
-	μ_r	permeabilidade relativa
-	θ	resistividade elétrica
-	A	perímetro dos grãos
-	B	indução magnética
-	$B_{\max}$	máximo de indução magnética
-	C_e	coeficiente da perda em excesso
-	C_h	coeficiente da perda por histerese
-	C_p	coeficiente da perda parasita
-	D	diâmetro dos grãos
-	d	espessura da lâmina
-	f	frequência
-	GO	aço elétrico de grão orientado
-	GNO	aço elétrico de grão não-orientado
-	H	campo magnético aplicado
-	HGO	aço elétrico de grão super orientado
-	$H_{\max}$	máximo de intensidade do campo magnético aplicado
-	$J_{\max}$	máximo de polarização magnética
-	P_e	perda magnética em excesso
-	P_h	perda magnética por histerese
-	P_p	perda magnética parasita
-	P_t	perda magnética total
-	u	média dos tamanhos de grão

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Aços elétricos são materiais compostos geralmente de ferro (Fe) e silício (Si) ou ferro e alumínio (Al), podendo apresentar a combinação desses três elementos, Fe+Si+Al e outros elementos de liga (BERTOTTI; FIORILLO, 1994). O aço elétrico possui melhores respostas a aplicação de estímulos eletromagnéticos se comparado ao aço baixo carbono, o que torna sua utilização mais adequada em núcleos de motores elétricos e transformadores (BECKLEY, 2002). Segundo Bertotti e Fiorillo (1994), ligas a base de ferro que possuem em sua composição Si e/ou Al apresentam uma melhoria de suas propriedades eletromagnéticas em comparação com demais aços, possibilitando assim, economia de energia. Com isso, os aços elétricos representam uma parcela significativa do mercado de aços no mundo (CANALYS, 2021). Para aplicações em transformadores, os aços siliciosos apresentam composições com cerca de 3% de Si, além de requererem orientações específicas dos grãos, que garantirão propriedades magnéticas superiores, quando comparada a aços que não possuem essas características, alcançando uma alta permeabilidade e baixas perdas magnéticas (BECKLEY, 2002; BERTOTTI; FIORILLO, 1994). Essa orientação ótima dos grãos do aço elétrico foi evidenciada pelo físico americano Norman Goss na década de 1930 e é amplamente difundida e aplicada a esse tipo de material até os dias de hoje (BERNIER et al., 2013; BIROSCA et al., 2020; CESAR, 2012; GOSS, 1934; MEHDI et al., 2019; YONAMINE et al., 2002).

O aço elétrico é classificado como material ferromagnético, que quando submetido a um campo magnético externo, seus domínios magnéticos serão orientados na direção de aplicação desse campo, produzindo uma resposta, conhecida como indução magnética. A indução é dependente não somente da intensidade do campo magnético aplicado como também da permeabilidade magnética do material, sendo que, quando maior a permeabilidade desse material, maior será a indução produzida. A questão é que a permeabilidade magnética é diretamente afetada pelas perdas magnéticas totais do material. De forma simples, a perda magnética é a redução da eficiência eletromagnética do material ocasionada por mecanismos físicos atuantes. A perda magnética

total de um aço elétrico é gerada a partir de três perdas magnéticas que possuem diferentes mecanismos físicos atuantes. A perda por histerese é a perda no limite de frequência tendendo a zero, enquanto a perda clássica está associada a correntes parasitas, e por fim, a perda em excesso, representada pelo valor da perda total menos a soma das duas anteriores. (CHIKAZUMI, 1997; GUIMARÃES, 2009; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Cada uma dessas perdas somadas representa a perda magnética total do material, que intencionalmente deve ser a menor possível para que se garanta o máximo de eficiência (BECKLEY, 2002). Ainda, é importante relacionar o parâmetro frequência de trabalho dos aços elétricos com a intensidade de perda, pois esse material apresenta valores de perdas associadas dependentes diretamente da frequência de excitação do campo magnético externo a qual está submetido. As redes elétricas no Brasil operam com uma frequência de 60 Hz, enquanto nos Estados Unidos, a 50 Hz, fazendo com que, a indução magnética obtida seja diferente nas devidas situações (MEURER, 2005; NUNES et al., 2021).

Tendo em vista a crescente demanda por aços elétricos na indústria automotiva, esse trabalho pretende investigar as propriedades magnéticas de dois aços elétricos de grão não-orientado produzidos pela Aperam South America, os GNOs M350-50A e M530-54A, que possuem diferentes tamanhos de grão. Visa-se mensurar as perdas magnéticas totais e separá-las, classificando-as de acordo com os três tipos de perda citados. Ainda, será feita a análise do tamanho de grão dos aços e a observação da textura cristalográfica dos mesmos. Por fim, espera-se discutir os valores observados e estabelecer um comparativo sobre as propriedades que foram medidas no material relacionando-as com suas diferentes aplicações.

2 OBJETIVOS

Pretende-se analisar as propriedades magnéticas e tamanho de grão dos aços elétricos de grão não orientado M350-50A e M530-54A. Para tanto, seguem os objetivos específicos:

- Medir e comparar o tamanho dos grãos;
- Quantificar as perdas magnéticas totais;
- Realizar ajustes matemáticos de separação de perda e classificação das perdas em histeréticas, parasita e em excesso;
- Discutir sobre o comportamento das perdas por histerese, parasita e em excesso em relação aos tamanhos de grão, frequências e induções;
- Verificar a remanência e a coercividade dos aços;
- Investigar as diferenças de permeabilidade relativa;
- Estabelecer relações e discussões sobre tamanho de grão e propriedades magnéticas, correlacionando-as.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na primeira seção, 3.1, é abordada de forma sucinta o surgimento dos aços e a evolução científica-industrial até o surgimento dos aços elétricos, além da demanda atual e das perspectivas futuras do mesmo. Na seção 3.2, são destacadas estrutura e composição, orientação cristalográfica e tipos de aços elétricos e suas aplicações. Adiante, na 3.3, é tratado sobre propriedades magnéticas, ferromagnetismo, domínios magnéticos, além de permeabilidade e perdas magnéticas. Na seção 3.4 é falado sobre tratamentos térmicos em aços elétricos, importante processo no ajuste do tamanho dos grãos. Por fim, a seção 3.5 traz uma breve descrição dos aços M350-50A e M530-54A, que são utilizados nos experimentos, apontando suas principais aplicações.

3.1 Avanços na indústria siderúrgica e os aços elétricos

O marco inicial da produção siderúrgica no Brasil data de 1557, quando foi instalada na cidade de São Paulo uma pequena produtora de ferro. Quase quatrocentos anos mais tarde, no início do século XX, foi criada em Minas Gerais a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, que foi de suma importância para o desenvolvimento do setor no país, alcançando anos mais tarde a produção de 100 mil toneladas anuais de aço (ANDRADE; CUNHA, 2002). Foi justamente nos anos 1940 que a produção de aço no Brasil se desenvolveu com maior fôlego, sendo que a indústria siderúrgica nacional já conseguia naquela década suprir a demanda interna de ferro-gusa, expandindo daí em diante sua capacidade produtiva (BARROS, 2015).

Dentre os diversos tipos de produtos da indústria siderúrgica, se destacam os aços elétricos. A constatação de que o ferro é capaz de se comportar como um ímã quando magnetizado, levou a incorporação de materiais ferromagnéticos em partes móveis e estacionárias de motores e geradores. Porém, percebeu-se que a permeabilidade do ferro fundido não era tão boa, tornando-o inconveniente para diversas aplicações eletromagnéticas. Notou-se então, a necessidade de aprimoramento desse material tão promissor (BECKLEY, 2002). Devido às necessidades específicas para aplicações cada vez mais complexas, inovações nos setores de pesquisa e desenvolvimento

em aços elétricos se tornaram cada vez maiores, visando proporcionar melhores resultados à aplicação desse material, reduzindo as perdas energéticas associadas.

O primeiro aço elétrico Fe-Si foi produzido em 1905, e pouco mais de vinte e cinco anos depois, surgiram os aços elétricos de grão orientado, através da importante descoberta feita por Norman Goss, que otimizou o processo produtivo desse material através das combinações ótimas de tratamento térmico e laminação a frio, produzindo uma textura, hoje amplamente difundida como textura de Goss (BIROSCA et al., 2020). Nos dias atuais, os aços elétricos são materiais de alto valor agregado e com crescente importância em diversas áreas da sociedade. Dentre as diversas inovações no setor siderúrgico, a aplicação desse tipo de aço especial em veículos elétricos se demonstra promissora, visto que esse tipo de automóvel reduz a necessidade de utilização de combustíveis fósseis, reduzindo consequentemente a emissão de poluentes, além de poupar fontes finitas de recursos energéticos, como o petróleo. No ano de 2020, marcado pela recessão econômica provocada pela pandemia de coronavírus, a venda de veículos elétricos no mundo teve um aumento de 39% se comparado ao ano anterior. Estima-se que esse ritmo de vendas só aumente nos próximos anos, e que em 2030, os veículos elétricos representem 48% do total de carros vendidos mundialmente, como apontado pela Canalys, empresa analista do mercado de tecnologia mundial (CANALYS, 2021).

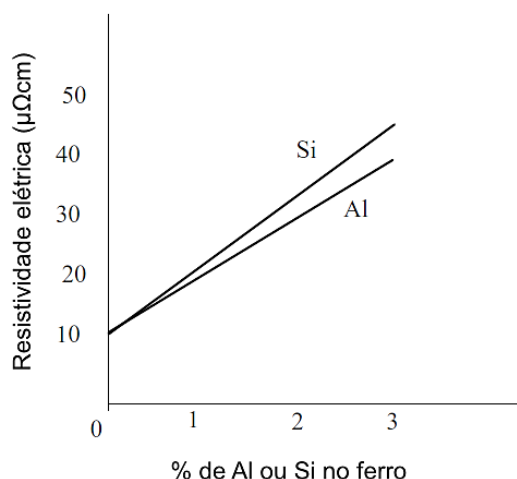
A demanda crescente por insumos tecnológicos e materiais com propriedades adequadas torna necessário o estudo das propriedades dos aços elétricos, sobretudo na melhoria da resposta magnética desse tipo de material, que possui grande aplicabilidade para fins diversos.

3.2 Aços elétricos

a. Composição e estrutura

No processamento siderúrgico do aço elétrico, o Si e o Al são empregados, dentre outras funções, na melhoria da resistividade elétrica. No gráfico exibido na Figura 1, observa-se um aumento da resistividade elétrica do aço à medida que a concentração desses elementos, Si e Al, é aumentada até 3%, além de que, o acréscimo do Si à composição proporciona o aumento dessa propriedade se comparado ao mesmo percentual de Al, conforme apontado por Beckley (2002). De acordo com Beckley, em geral, um aço contendo acima de 3% de Si consegue restringir as correntes parasitas, reduzindo ainda mais as perdas magnéticas totais, porém, isso torna o material mais custoso.

Figura 1 - Comparação do efeito do Si e Al na resistividade elétrica do ferro

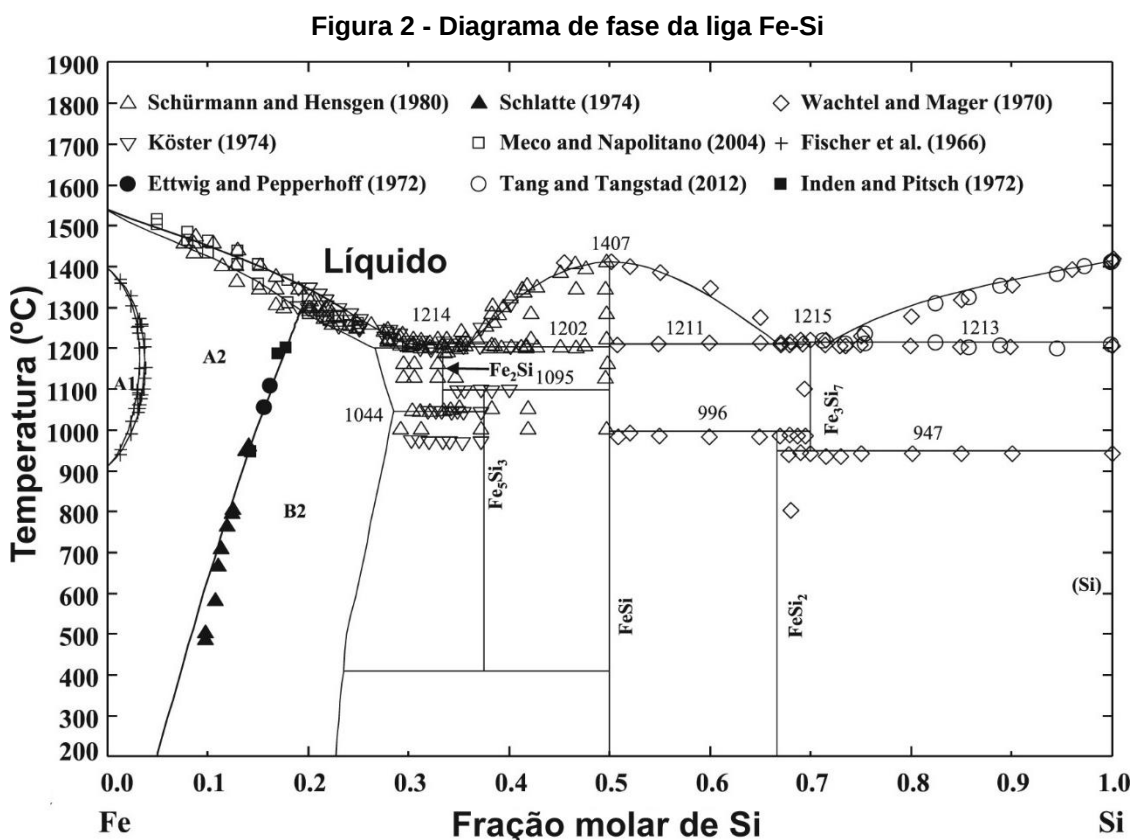


Fonte: Beckley (2002, adaptada).

Ainda, é possível a inserção de fósforo para controle de dureza e de manganês também para o controle da resistividade. Além disso, elementos como carbono, enxofre, nitrogênio e oxigênio não são desejáveis em altos percentuais, pois, altos teores de carbono, por exemplo, provocam o envelhecimento magnético ou a perda de potência com o tempo. O titânio, por exemplo, pode ser aplicado como aditivo antienvelhecimento, pois retem os precipitados de carboneto, atuando na redução desse efeito. Nas últimas

décadas, a indústria siderúrgica se tornou capaz de reduzir os percentuais de carbono e enxofre para valores menores que 0,003%, através do refino secundário (BECKLEY, 2002).

A Figura 2 apresenta o diagrama de fase para a liga Fe-Si, onde as composições são expressas em percentual e as temperaturas na escala Celsius. Esse tipo de diagrama permite uma visão ampla dos tipos de componentes e fases possíveis de serem obtidos variando os parâmetros temperatura e composição. O diagrama apresentado a seguir foi elaborado por Cui e Jung (2017), que analisaram os diversos diagramas de fase da liga Fe-Si disponíveis na literatura, avaliando e otimizando-os a fim de melhorar a descrição termodinâmica do sistema. O diagrama obtido foi resultado da comparação dos pontos experimentais com outros autores, os quais estão representados por diferentes símbolos ao longo do diagrama e referenciados na região superior do mesmo (CUI; JUNG, 2017).



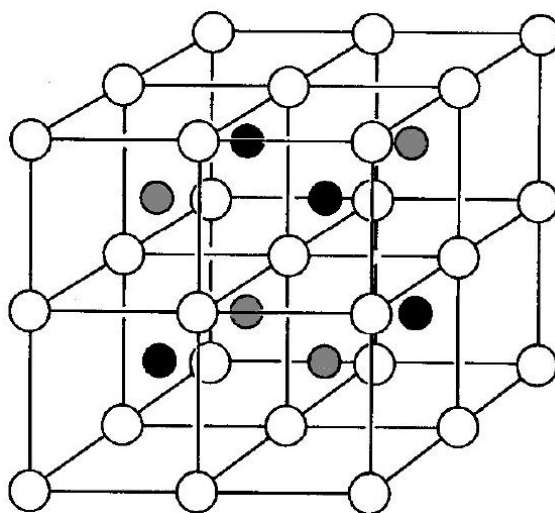
Fonte: Cui e Jung (2017, adaptada).

Levando em consideração que a composição de um aço elétrico Fe-Si comercial, é de, geralmente, 1 a 3% de Si (0,01 a 0,03 em termos de fração molar), observa-se pelo diagrama anterior, que após a fusão da liga, a 1536 °C, o resfriamento controlado permitirá a formação de um sistema é monofásico, originando a fase α A2 sólida, como observado na região de 200 °C.

Algumas empresas optam por produzir aços elétricos a partir da liga Fe-Al, o que torna o processo menos oneroso, porém o produto possui menor permeabilidade magnética e consequentemente maiores perdas, quando comparado ao aço Fe-Si (BECKLEY, 2002; BERTOTTI; FIORILLO, 1994). A fim de melhorar as respostas magnéticas e as propriedades mecânicas requeridas, um aço elétrico pode ainda apresentar silício e alumínio juntamente em sua composição, formando a liga ternária Fe-Si-Al, como um aço *Sendust*, por exemplo, que apresenta composição 9,6% em peso de Si e 5,5% de Al (SYUGAEV et al., 2021; MAGMATTEC, 2016; BERTOTTI; FIORILLO, 1994; MASUMOTO; YAMAMOTO, 1937).

A Figura 3 apresenta a estrutura da célula unitária da liga de ferro com silício e/ou alumínio. Os átomos de coloração branca, representam Fe ou Fe I. Os representados em coloração preta são locais ocupados por Si ou Al. Os átomos de coloração cinza representam Fe II ou prováveis locais de ocupação de Si ou Al na rede cristalina.

Figura 3 - Esquema representativo do parâmetro de rede de uma estrutura Fe contendo Si e/ou Al.



Fonte: Bertotti e Fiorillo (1994, adaptada).

A maneira como os átomos desses elementos químicos se organizam nas células unitárias e por consequência, na rede cristalina, além do parâmetro de rede e os sítios equivalentes, faz com que diferentes propriedades se manifestem e isso está diretamente relacionado a aplicabilidade do material (GUIMARÃES, 2009; BERTOTTI; FIORILLO, 1994).

b. Orientação e textura cristalográfica

Os metais, assim como a maioria dos materiais de estado sólido, como cerâmicas e minerais, apresentam estruturas policristalinas, que por sua vez são compostas por uma infinidade de cristalitos individuais, ou simplesmente grãos. Ao se tratar de textura, implicitamente entende-se que a anisotropia está relacionada às propriedades daquele material, sendo que as orientações de policristais, seja por ocorrência natural ou fabricados por tecnologias, não são dispostas aleatoriamente, mas sim numa textura preferencial na qual certas orientações específicas podem melhorar as propriedades do material de 20 a 50% (ENGLER; RANDLE, 2010).

Em um material policristalino, cada grão e sua vizinhança possuem orientações cristalográficas diferentes, podendo esses grãos, inclusive, estarem dispostos de forma aleatória em relação a uma direção preferencial ou de referência (AMORIM, 2012).

Na produção de aços elétricos, o efeito da textura é trabalhado para produzir materiais com características e comportamentos específicos. Nesses materiais há uma relação entre a microestrutura e as propriedades e esta é a chave para o desenvolvimento de estratégias que melhorem seu desempenho (ENGLER; RANDLE, 2010; KOCKS; TOMÉ; WENK, 1998).

O físico americano Norman P. Goss (1902-1977), desenvolveu e patenteou nos anos 1930 um método de manufatura e processamento de aços elétricos com uma estrutura de orientações específicas, a fim de melhorar as propriedades magnéticas e redução das perdas envolvidas, apresentando esse material, propriedades consideravelmente anisotrópicas. Este tipo de material é conhecido como aço elétrico de grão orientado, e sua orientação

cristalográfica se dá na direção de mais fácil magnetização (BECKLEY, 2002; GOSS, 1934).

O método de processamento de aços elétricos patenteado por Goss foi amplamente difundido e ainda nos dias de hoje é aplicado na produção de aços elétricos para transformadores, equipamento que necessita de altas permeabilidades magnéticas e reduzidas perdas. Goss apontou em seu documento-patente que os aços de baixo carbono, ainda na sua época utilizados como aços para fins eletromagnéticos, envelheciam magneticamente muito rápido. Já existia naquela época a adição de silício à composição, porém o processo exigia trabalho manual e reaquecimento frequente, o que tornava inviável. Foi então que Goss sugeriu que para a fabricação de lâminas de aços elétricos, fosse utilizado cerca de 3% de Si na sua composição, empregada uma espessura de 0,20 cm (0,075") na lâmina, e utilizada a temperatura de 871 °C (1600 °F) no tratamento térmico de recozimento, sob atmosfera controlada, além de o material apresentar a textura cristalográfica em (110) [001], onde possibilitaria a fácil magnetização. A laminação e o recozimento, se corretamente aplicados, produzem o crescimento seletivo dos grãos do material, obtendo as direções de mais fácil magnetização na direção de laminação da tira, como será discutido na seção adiante (BECKLEY, 2002; GOSS, 1934).

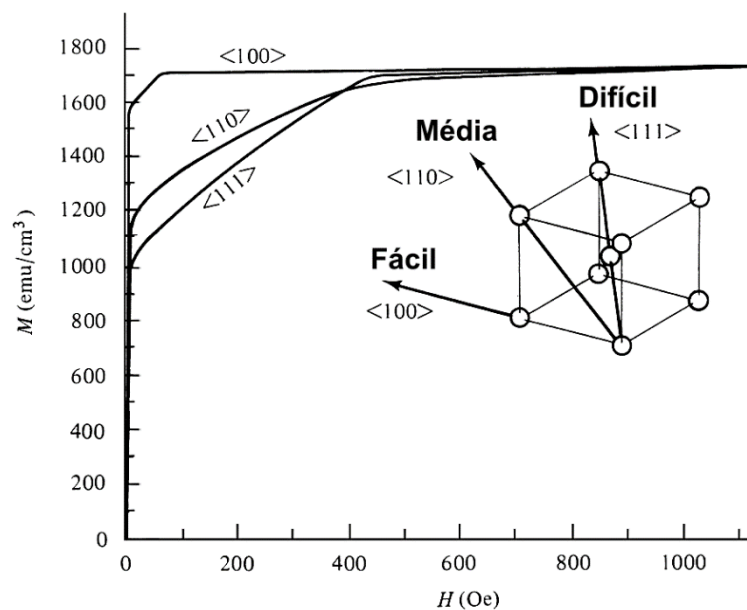
Sidor et al. avaliaram as mudanças estruturais no processamento de um aço elétrico de grão não-orientado a fim de aprimorar as propriedades magnéticas de uma liga Fe-Si. A evolução da textura de recristalização em orientações magneticamente favoráveis melhorou as propriedades magnéticas nos parâmetros analisados, de acordo com os experimentos e modelagem baseados na cristalografia adotada. Ainda no estudo, um material com textura mais fraca e com anisotropia mínima exibiu a maior indução magnética média (SIDOR et al., 2012).

Higuchi et al. propuseram um método de modelagem das propriedades magnéticas bidimensionais (2D), baseado nas várias propriedades magnéticas unidimensionais (1D), através da aplicação de diferentes ângulos de inclinação em relação a direção de laminação em amostras de um aço elétrico de grão

não-orientado. Os resultados numéricos apontaram que a distribuição de densidade de fluxo magnético no modelo proposto foi concentrada em relação a direção de laminação, apontando o método 2D empregado ainda mais eficaz que o método convencional de medição de propriedades magnéticas naquele tipo de material (HIGUCHI et al., 2012).

Através da curva de magnetização de um material ferromagnético é possível observar a influência da anisotropia na facilidade ou dificuldade de atingir a saturação magnética conforme ocorre a magnetização. Se considerarmos para fins de análise, um monocristal de ferro, que possui estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), como nas medições mostradas na Figura 4, é percebido que a saturação pode ser alcançada com campos baixos na família de direções $\langle 100 \rangle$, que é chamada direção de fácil magnetização. Isso está relacionado aos domínios magnéticos do ferro no estado desmagnetizado. Nesse caso, a parede que separa dois domínios de um cristal pode ser movida apenas com a aplicação de uma pequena intensidade de campo. As direções $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$ apresentam maior dificuldade de atingir a saturação, se comparada a anterior, necessitando de maior intensidade do campo externo para consegui-la. Na literatura, é observado que a família de orientações $\langle 110 \rangle$ é chamada de direção de média magnetização, enquanto a $\langle 111 \rangle$ de difícil magnetização. Em geral, a energia de anisotropia magnética tem a mesma simetria que a estrutura cristalina do material, sendo essa chamada de anisotropia magnetocristalina (CHIKAZUMI, 1997; CULLITY; GRAHAM, 2008).

Figura 4 - Curva de magnetização para monocristais de ferro



Fonte: Cullity; Graham (2008, adaptada).

Chernenkov et al. investigaram a estrutura atômica de um aço de liga Fe-Si variando o percentual de silício entre 5 e 6%, e por meio do tratamento térmico empregado, visaram obter um estado com grau definido de anisotropia magnética induzida. Através da técnica de Difração de Raios X foi possível observar a formação de um determinado tipo de células ao longo de um dos eixos $\langle 100 \rangle$, eixo de mais fácil magnetização. (CHERNENKOV et al., 2007).

Carara investigou a dinâmica das paredes de domínios através da impedanciometria, a fim de observar a mobilidade e velocidade crítica das paredes, a largura dos domínios e paredes, além da densidade de energia da parede, propondo um método para obtenção dos parâmetros citados em aços elétricos de GO com 3% de Si. As amostras dos eixos $[001]$ foram classificadas como de fácil magnetização, enquanto as $[110]$ de média magnetização e as de $[111]$ como eixo de difícil magnetização. Foi percebido que a estrutura dos domínios variou ao longo da curva de magnetização, corroborando com a condição de mínimo de energia livre magnética, como diz a literatura. Foi observado também, que o aumento da temperatura de tratamento térmico no recozimento aumentou a permeabilidade, justificado pelo aumento da

movimentação das paredes como na rotação dos momentos, para uma amostra recozida a 580 °C (CARARA, 2001).

Ao se obter a curva de magnetização de um material através da relação indução *versus* campo aplicado, observa-se uma curva de histerese que é influenciada diretamente pela anisotropia magnética. A expressão anisotropia magnética é usada para explicar a dependência da energia interna na direção de magnetização espontânea. A anisotropia ainda pode ser dos tipos magnetocristalina, de forma, de tensão, induzida por recozimento magnético, por deformação plástica, por irradiação e de troca. Dentre esses diversos tipos, somente a cristalina é intrínseca do material. Os demais tipos ou são extrínsecos ou induzidos (CHIKAZUMI, 1997; CULLITY; GRAHAM, 2008).

Portanto, entender as implicações da anisotropia é fundamental para compreensão das propriedades dos aços elétricos, pois esse parâmetro influencia a escolha do tipo do material de acordo com sua aplicação.

c. Tipos de aços elétricos e suas aplicações

Os aços elétricos de grão não-orientado (GNO) são comumente aplicados em motores elétricos. Para máquinas rotativas, a orientação de Goss não é adequada, pois a superfície da lâmina não apresenta propriedades isotrópicas requeridas nesse tipo de aplicação, ou seja, não há necessidade de boas propriedades magnéticas em uma direção específica. Nesse caso, há melhores orientações dos grãos para essa aplicação, como a {100}, porém, elas geralmente são aleatórias para garantir boas propriedades magnéticas em todas direções. Nos motores elétricos geralmente são aplicadas altas frequências, a fim de se ter um melhor controle de velocidade e mais alta quantidade de energia disponível. Em aplicações como em aeronaves, por exemplo, ou outras específicas, onde o peso e o tamanho das máquinas rotativas são muito consideráveis, frequências de 400 a 2000 Hz são empregadas (BECKLEY, 2002; BERTOTTI; FIORILLO, 1994).

A Figura 5 mostra o formato das lâminas que são utilizadas em motores elétricos. Na imagem é possível observar que há um empilhamento dessas lâminas, que formam uma das partes internas de um motor elétrico.

Figura 5 - Lâminas aplicadas em motores elétricos



Fonte: Tessin (2021a).

Já os aços elétricos de grão orientado em Goss são aplicados especialmente em transformadores elétricos. Para tal aplicação, se faz necessário a orientação cristalográfica desse material nas condições de (110) [001]. Esse material é classificado em duas categorias: os aços elétricos de grão orientado convencional (GO); e os de alta permeabilidade, HGO, aços elétricos de grão super orientado. Os aços HGO apresentam acentuadas texturas cristalográficas em torno da direção de laminação, da ordem de 3 graus, quando os GO apresentam da ordem de 7 graus de desvio em relação a orientação de Goss, o que promove, no HGO, a acentuada permeabilidade magnética que o mesmo apresenta. Os aços elétricos de grão orientado são produzidos com espessuras de 0,18 a 0,35 mm, e são obtidos por meio de um processo metalúrgico apurado, o qual possibilita o crescimento anormal e seletivo nas direções (110) [001], obtendo grãos com poucos centímetros de largura (BERTOTTI; FIORILLO, 1994). Os núcleos de transformadores requerem materiais macios magneticamente, que são magnetizados e desmagnetizados facilmente, além de apresentarem altas resistividades elétricas. Assim, é garantido que haverá mínimas perdas magnéticas para aplicação nesse equipamento (DOBÁK et al., 2022).

3.3 Propriedades magnéticas

Ao abordar o tema de propriedades magnéticas, diversos assuntos se mostram relevantes. Sobretudo, para compreensão das suas causas e efeitos, é necessário compreender o conceito de ferromagnetismo, bem como a estrutura de domínios e paredes magnéticas antes de se discutir sobre permeabilidades e perdas magnéticas em si. Todos esses assuntos são abordados nesta seção.

a. Ferromagnetismo e domínios magnéticos

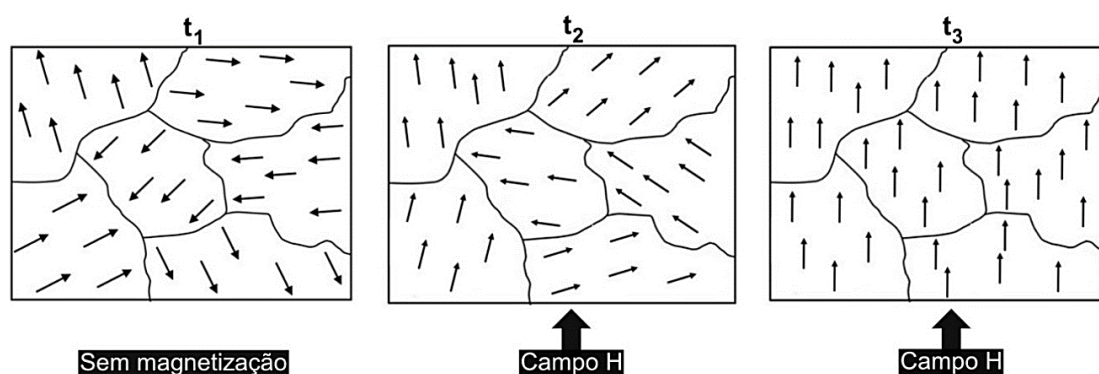
O aço elétrico é um material ferromagnético, ou seja, ele possui um magnetismo permanente advindo dos alinhamentos dipolares magnéticos dos átomos (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Chikazumi apontou que os materiais ferri ou ferromagnéticos apresentam estruturas de domínios nas quais a magnetização espontânea toma direções distintas em domínios diferentes (CHIKAZUMI, 1997). Os domínios magnéticos foram estudados pelo físico alsaciano Pierre-Ernest Weiss (1865-1940) em seu artigo *L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique* (WEISS, 1907). Weiss observou, como citado também por Chikazumi, que os materiais ferromagnéticos não são necessariamente magnetizados até a saturação, pois a magnetização espontânea toma direções distintas em diferentes domínios. Já em 1919, o físico alemão Heinrich Barkhausen (1881-1956) descobriu que o processo de magnetização ocorre em várias pequenas etapas descontínuas para os materiais ferromagnéticos, denominando esse fenômeno de Efeito *Barkhausen* (apud Chikazumi, 1997, p. 387). Pesquisas realizadas por cientistas nos anos seguintes permitiram observar com mais clareza e aprimoraram as considerações dos autores anteriormente citados.

Na atualidade, entende-se domínios magnéticos como sendo pequenas regiões de volume nas quais há um alinhamento mútuo de todos os momentos de dipolos magnéticos, sendo esses, organizados em um mesmo sentido. As dimensões de um domínio são microscópicas e em amostras policristalinas, cada grão pode conter mais de um domínio magnético. Na presença de um campo externo (H), a forma dos domínios se altera, bem como seus tamanhos,

devido ao movimento dos contornos dos domínios. Os materiais ferri e ferromagnéticos são divididos em múltiplos domínios, onde a magnetização assume diferentes orientações. Uma região com a mesma orientação é um domínio magnético. Os domínios existem nesse tipo de material com a finalidade de reduzir a energia magnetostática associada (PUCHÝ et al., 2016; CHIKAZUMI, 1997).

A Figura 6 mostra um esquema representativo dos domínios magnéticos em um material ferromagnético. No momento t_1 o material se encontra em seu estado natural, apresentando dessa forma, magnetização total igual a zero, pois os vetores dos domínios se anulam. É percebido que, na ausência de um campo externo, os domínios, representados na figura em forma de setas, se organizam de forma aleatória ao longo desse material, sendo separados por contornos ou camadas de transição, conhecidas como parede de domínio, tratadas mais adiante. Num segundo momento, t_2 , um campo magnético externo (campo H) é aproximado do material ferromagnético, iniciando o alinhamento dos domínios magnéticos conforme o sentido de aplicação desse campo. Nesse momento, observa-se que a magnetização total é diferente de zero. Num terceiro momento, em t_3 , o campo H tem intensidade suficiente para conseguir alinhar todos os domínios magnéticos do material na direção de sua aplicação, produzindo a magnetização máxima esperada. Nesse momento, é atingida a saturação magnética.

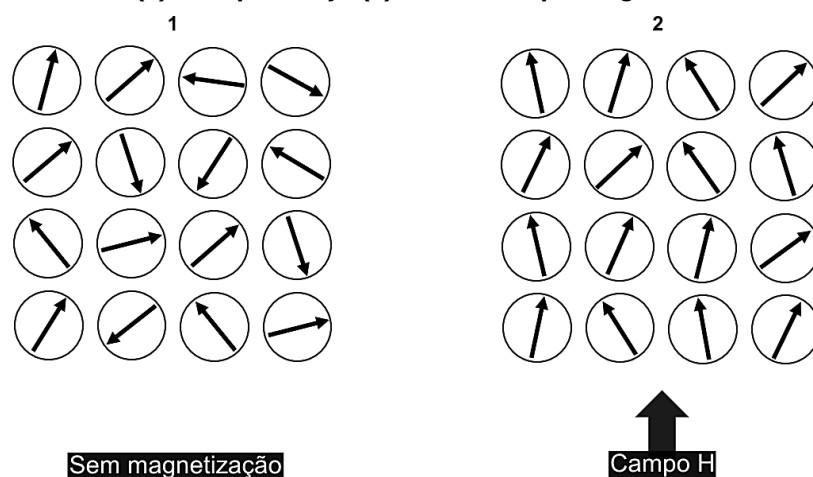
Figura 6 - Disposição dos domínios magnéticos em um material ferromagnético na ausência (t_1) e na presença (t_2 e t_3) de um campo magnético externo



Fonte: autor.

Entretanto, as características magnéticas dos materiais são afetadas pela temperatura, de forma que o aumento da temperatura de um sólido provoca o aumento na magnitude das vibrações térmicas nos átomos. Também com o aumento da temperatura, a magnetização de saturação diminui gradualmente e se torna zero imediatamente ao atingir a temperatura de Curie (T_c), fazendo com que o material passe de ferromagnético para paramagnético, e nessa condição, mesmo aumentando a intensidade do campo externo, os domínios magnéticos não se orientarão mais na direção de aplicação do campo, como pode ser observado no esquema da Figura 7 (CALLISTER; RETHWISCH, 2021; GUIMARÃES, 2009; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 7 - Disposição dos domínios magnéticos em um material paramagnético na ausência (1) e na presença (2) de um campo magnético externo



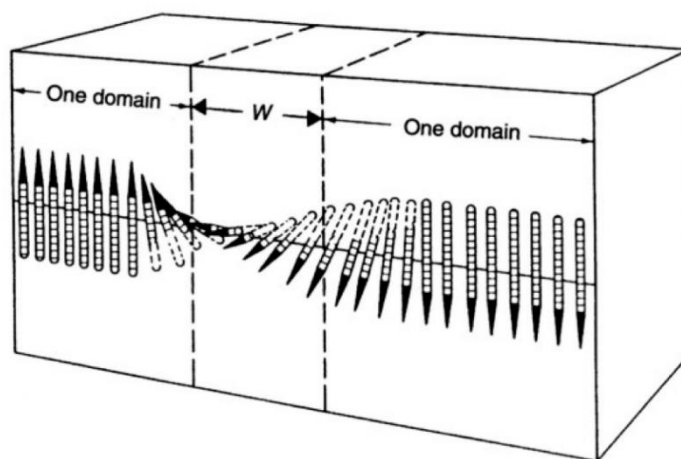
Fonte: Callister; Rethwisch (2021, adaptada).

Avanços científicos ao longo dos anos permitiram compreender que nos limites de domínios existe uma camada de transição, onde os spins mudam de direção de um domínio para outro, definindo as paredes de domínios. Portanto, os domínios são separados por paredes paralelas com ângulo de 180° em relação ao plano y-z. Um grão monocristalino possui vários domínios magnéticos (AHMADI et al., 2008).

Buschow e De Boer representaram esquematicamente os domínios e a parede de domínio, como pode ser mostrado na Figura 8. As regiões denominadas “one domain” representam um domínio magnético do material,

sendo essas, separadas por uma região denominada “w” (de “wall”, do inglês, parede), representando a parede que separa esses dois domínios. Justamente na parede há a mudança da orientação (giro) de domínio (BUSCHOW; DE BOER, 2003).

Figura 8 - Esquema representativo da mudança de orientação de domínio em uma parede de domínio em 180°.



Fonte: Buschow e De Boer (2003).

Betz et al. empregaram uma fonte de espalhamento de nêutrons a fim de visualizar e interpretar a resposta das paredes de domínio em um aço elétrico de grão super orientado (HGO), através da técnica de *neutron dark-field imaging* (DFI, em português: imagem de campo escuro de nêutrons). Foi investigada a movimentação das paredes de domínio sob a influência de um campo magnético alternado. Para as frequências variando de 0 a 200 Hz, quando aplicada uma amplitude de oscilação da fonte externa de até 1500 A/m, foi registrada a transição de uma estrutura de parede de domínio congelada para uma estrutura móvel. Foi percebida também a dependência da frequência de oscilação em função da mobilidade das paredes, de forma que, à medida que a frequência era aumentada era necessária uma maior amplitude para transformar paredes congeladas em móveis (BETZ et al., 2016).

Os domínios magnéticos, portanto, indicam qual a direção da indução produzida, de acordo com a direção de magnetização. Como dito por Beckley (2002), a natureza sempre tende a estar em uma condição de mais baixa energia. Essa energia total dos domínios magnéticos pode ser calculada pelo

somatório da energia de troca juntamente com as energias magnetostática, anisotrópica e magnetostritiva. A energia de troca é a responsável por estabelecer a ordem magnética, deixando os spins magnéticos dos elétrons apontados na mesma direção, diminuindo à medida que os domínios estão alinhados. A magnetostática é o tipo de energia armazenada associada ao campo magnético produzido por um ímã permanente, quando todos os domínios magnéticos estão alinhados. Essa energia diminui com a formação dos domínios. A energia anisotrópica é relacionada a direção de mais fácil magnetização. O momento magnético terá preferência a ficar no eixo de magnetização, obedecendo a uma equação que considera o ângulo da direção de magnetização, sendo assim, caso o alinhamento do domínio seja na direção de mais fácil magnetização, essa energia será zerada, e a energia total minimizada. Por fim, a energia magnetostritiva é associada a tensões na rede cristalina. Assim que o campo magnético é aproximado, o material muda seu volume à medida que o campo é aplicado, favorecendo dessa forma, o desalinhamento magnético justamente por causa dessa variação de volume, que pode inclusive ocasionar a produção de ruído em transformadores durante sua operação. Como dito, fisicamente, o material ferromagnético organizará seus domínios de forma a atingir uma menor energia total quando não está sendo submetido a um campo magnético externo (repouso). Por consequência, no estado de repouso a magnetização total será igual a zero, ou seja, não haverá indução (GUIMARÃES, 2009).

Portanto, os principais parâmetros de controle de qualidade dos aços elétricos são a permeabilidade e as perdas magnéticas. Atuar na melhoria da eficiência dos aços elétricos vai no sentido de aumentar a permeabilidade do material através da redução das perdas magnéticas associadas a ele (MEURER, 2005). A permeabilidade e as perdas magnéticas são discutidas de forma mais aprofundada nos tópicos seguintes.

b. Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética (μ) fornece a medida magnética de um material, uma vez que é possível estabelecer a relação da indução B como

sendo o produto da permeabilidade, μ , pelo campo H. Geralmente, a permeabilidade de um material não é constante, pois depende do valor do campo H, além de que, em condições de anisotropia, ou seja, quando as propriedades do material dependem da direção do campo aplicado, seu valor se alterará. Assim, é possível estabelecer uma relação entre a permeabilidade magnética relativa (μ_r) e a permeabilidade magnética no vácuo (μ_0), sendo a relativa dada pelo valor da permeabilidade dividido pela permeabilidade no vácuo (GUIMARÃES, 2009).

Os materiais ferromagnéticos apresentam altas permeabilidades quando comparado com outros materiais não ferromagnéticos, alcançando permeabilidade magnética da ordem de 10^2 a 10^6 (CHIKAZUMI, 1997).

Varga e Kovac investigaram a contribuição da magnetização para a permeabilidade de um material recozido através da observação dos ciclos de histerese. Através da separação das partes real e imaginária da permeabilidade foi possível observar quatro fenômenos associados, levando os autores a concluir que os seguintes pontos contribuíram para se obter uma boa simulação do espectro de permeabilidade: (a) a corrente parasita; (b) o movimento das paredes do domínio, que originou um tipo irreversível de momento dipolar resultante entre as duas cargas, positiva e negativa (*Debye*); (c) o surgimento de um tipo de contribuição ressonante a baixas frequências e alta indução e (d) uma contribuição reversível do momento de dipolo para todas as excitações e altas frequências. Os autores observaram que para baixas amplitudes, as situações (a) e (b) apresentavam maior contribuição. As situações (c), (d) e as paredes dos domínios contribuíram no caso da aplicação de campos magnéticos relativamente altos (VARGA; KOVAC, 2018).

Fatores como tamanho de grão, textura (anisotropia), composição química, envelhecimento magnético, tensões mecânicas, recozimento e frequência afetam a permeabilidade magnética do aço elétrico (SANTOS, 2005), podendo aumentar as perdas magnéticas no material.

A permeabilidade relativa dos aços pode ser determinada pela relação exibida na Equação (1) e a permeabilidade do material (μ_m) calculada pela Equação (2).

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0}$$

(1)

$$\mu_m = \frac{dB}{dH} = \frac{B_{max} - 0}{H_{max} - 0}$$

(2)

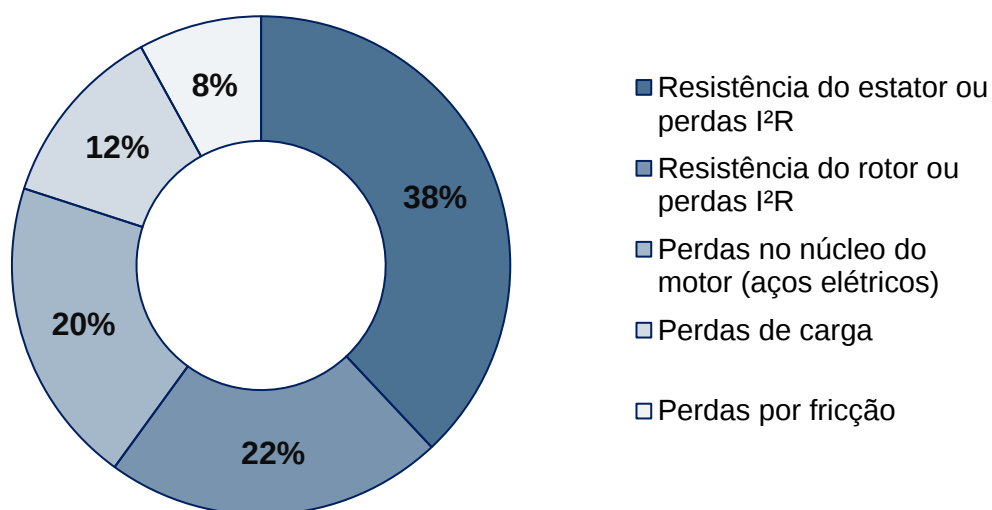
Onde μ_0 representa a permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ ou $1,2566 \times 10^{-6}$ H/m). Já B_{max} e H_{max} correspondem ao máximo de indução e máximo de intensidade de campo magnético, respectivamente.

c. *Perdas magnéticas*

A perda magnética é a energia dissipada durante o ciclo de magnetização de um aço elétrico, quando submetido a uma certa intensidade de campo, que por sua vez apresenta uma frequência e é capaz de fazer o material ferromagnético produzir uma indução como resultado desse processo. É de fundamental importância que o material ferromagnético tenha suas perdas magnéticas mensuradas, e ainda, que ele seja testado com os mesmos parâmetros (indução, frequência e intensidade de campo), que os de sua aplicação, seja em motores ou transformadores (BECKLEY, 2002). As perdas magnéticas geralmente são expressas nas unidades de W/kg, J/Kg, W/m³ ou J/m³.

A Figura 9 mostra a distribuição das perdas de energia totais de um motor de 50 HP de potência (OUYANG et al., 2019). A resistência do estator corresponde a 38% das perdas totais. Também estão listadas as perdas no rotor, 22%, enquanto 12% representam a perda de carga. A parcela menos significativa dessas, representando 8% das perdas totais, é a perda por fricção. A de maior interesse, correspondendo a 20% das perdas totais nesse tipo motor, é a perda no núcleo do equipamento. É justamente nessa que estão contabilizadas as perdas relacionadas à aplicação das lâminas de aços elétricos, ou seja, a redução das perdas magnéticas nesse material implicaria na redução de parte desse percentual correspondente às perdas energéticas totais de um motor.

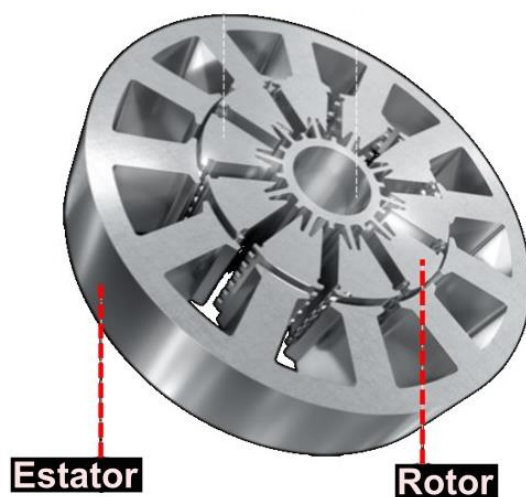
Figura 9 - Distribuição das perdas de energia típicas em um motor de 50 HP



Fonte: Ouyang et al. (2019, adaptada).

A Figura 10 mostra o núcleo de um motor e aponta as regiões que se localizam o estator e o rotor (WAEELZHOLZ, [s.d.]).

Figura 10 - Localização do estator e rotor no núcleo de um motor



Fonte: Waelzholz (201-, adaptada).

Quando se fala em perdas magnéticas, implicitamente é tratado como as perdas totais do material naquela condição específica. Contudo, é fundamental entender que as perdas magnéticas são divididas em três tipos:

perdas por histerese; parasita (clássica, corrente parasita ou correntes de *Foucault*); e em excesso (ou anômalas). Nos tópicos a seguir são apresentados os três tipos de perdas magnéticas e os mecanismos físicos associados a cada uma delas.

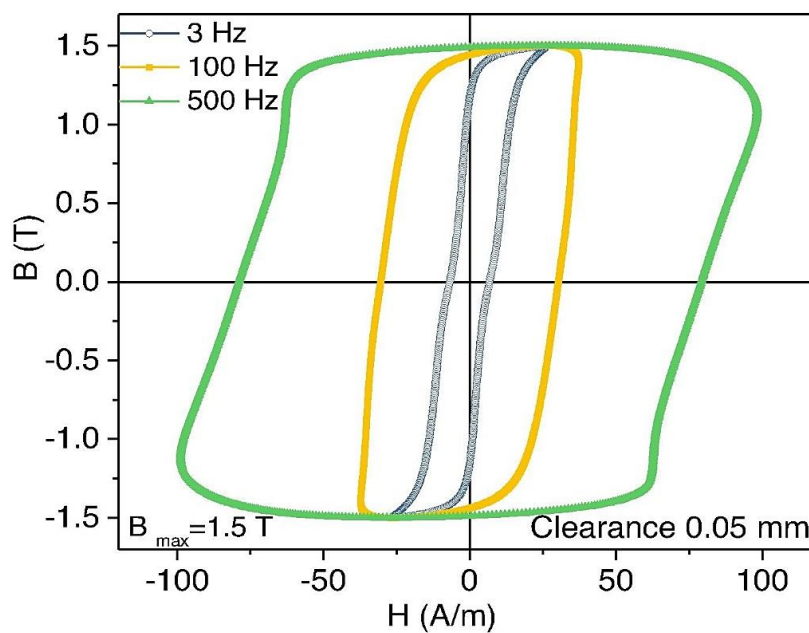
d. *Perda por histerese*

Nos materiais ferromagnéticos, a histerese é um atraso apresentado na indução magnética produzida em relação ao campo magnético aplicado. A histerese está relacionada ao atraso dos alinhamentos dos domínios magnéticos do aço elétrico, representando a dificuldade que o material terá para acompanhar as oscilações de sentido do campo externo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

As curvas de histerese características de um material ferromagnético de acordo com os parâmetros requeridos para análise, podem ser obtidas por um histeresímetro ou um magnetômetro. O conhecimento da curva de histerese do material é de suma importância no entendimento de suas propriedades magnéticas (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006).

A Figura 11 mostra uma curva de histerese de um aço elétrico HGO, de composição Fe e 3,25% Si. O teste foi realizado com indução máxima de 1,5 T. As cores das curvas indicam variação de frequência de teste, sendo elas 3, 100 e 500 Hz (NUNES et al., 2021).

Figura 11 - Curvas de histerese de acordo com a frequência para um aço elétrico HGO



Fonte: Nunes et al. (2021).

Observa-se pela curva que, à medida que o campo magnético externo (H) apresenta intensidade suficiente para alinhar os domínios magnéticos, é observado o surgimento da indução (B), que é a resposta à aplicação desse campo. À medida que a intensidade desse campo é aumentada, mais domínios magnéticos se alinham na direção da aplicação do campo, o que aumenta também a indução. Ao alinhar todos os domínios magnéticos do material na direção de magnetização, observa-se pela curva de histerese, que é atingida a curva de saturação, ou seja, a magnetização máxima é atingida. Ao alterar o sentido da aplicação do campo, é observado um atraso na resposta dos domínios magnéticos e na indução em relação à aplicação do campo. Esse atraso do alinhamento dos domínios em relação ao novo sentido do campo externo gera a curva de histerese característica desse material. A área da curva é a energia dissipada sob forma de calor, sendo essa, a perda por histerese daquele material naquela condição (MOSES et al., 2019; GUIMARÃES, 2009).

A frequência de trabalho representa a quantidade de oscilação em relação ao tempo, e no caso da unidade *Hertz* (Hz), oscilações por segundo. Assim, quanto maior a frequência do campo externo, maior será o esforço que os domínios magnéticos daquele material terão naquele mesmo espaço de

tempo para acompanhar as mudanças de sentido. Sendo assim, o aumento da frequência aumenta também as perdas magnéticas (NUNES et al., 2021).

A curva de histerese também fornece informações sobre o valor do campo coercitivo (ou coercividade ou coercitividade), que é o campo sob o qual a magnetização se anula. A coercividade depende da microestrutura, especialmente do tamanho dos grãos, além da presença de impurezas e outros fatores. Outro parâmetro importante é a saturação, onde a quantidade de campo magnético aplicado será suficiente para alinhar todos os domínios magnéticos do material ferromagnético, como dito. Ainda, a remanência (ou magnetização remanente) que é o valor de indução para o qual ainda há magnetização mesmo quando a intensidade do campo externo é igual a zero (GUIMARÃES, 2009).

Os materiais ferromagnéticos podem ser classificados como magneticamente macio ou duro, dependendo da facilidade ou dificuldade de se alcançar a saturação conforme a aplicação do campo externo. Por apresentar um valor baixo de campo coercitivo em relação a outros materiais, o aço elétrico é classificado como um material magneticamente macio, quando analisada sua curva de histerese (BERTOTTI, 1988).

Landgraf, De Campos e Leicht propuseram a separação da curva de histerese em duas regiões distintas, uma considerando baixas induções (de 0 a 0,7 T) e outra de altas induções (0,8 a 1,4 T), a fim de investigar os mecanismos físicos distintos que atuam nessas condições de indução propostas, sendo que a perda por histerese total do material corresponde ao somatório dessas duas partes, a região de baixa e a de alta indução. Para tal, utilizaram três tipos de aços elétricos, o primeiro com composição de 0,3% de Si + Al; o segundo, 3,5% de Si; e o terceiro, com 6,5% de Si. A partir da metodologia adotada, foi possível observar que a evolução da perda por histerese nos componentes de baixa e alta indução em função da indução máxima se deu de forma diferente. Foi discutida a dependência angular em relação as baixas e altas induções, apontando para diferentes mecanismos que afetaram as perdas (LANDGRAF; DE CAMPOS; LEICHT, 2008).

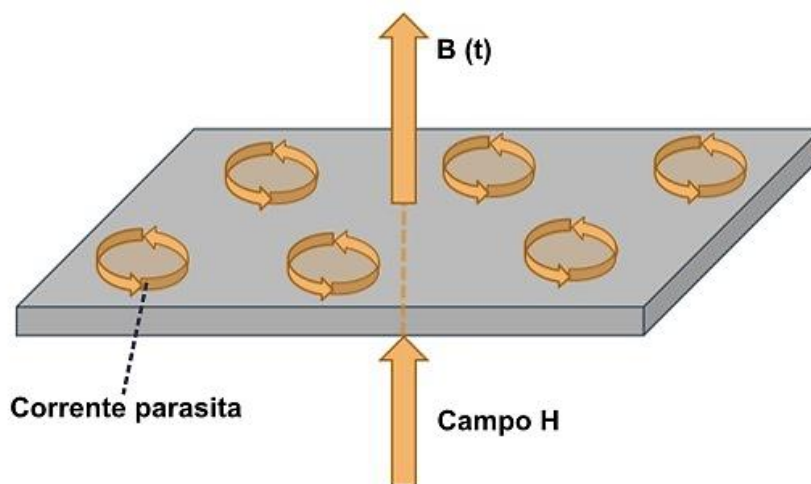
Portanto, foi evidenciado pelas análises dos autores, que existem diferentes mecanismos físicos atuantes na perda por histerese e que os mesmos são ativados em determinadas induções. Os autores concluíram nas análises que o mecanismo físico que atua na região de baixa indução, até 0,7 T, é a deformação plástica, sendo que a perda por histerese aumenta muito para deformações mecânicas abaixo de 0,5%. Já a região de alta indução, acima de 0,8 T, é particularmente influenciada pela energia anisotrópica média, proveniente tanto da nucleação (a mudança de sentido do campo externo aplicado cria um campo no contorno dos grãos, e ao se diminuir a indução esse efeito é reduzido); quanto pela aniquilação dos domínios magnéticos (acima de 1,2 T os domínios magnéticos desaparecem, ocasionando um comportamento assimétrico e uma rotação de domínio irreversível). Em suma, Landgraf, De Campos e Leicht concluíram que a região de baixa indução é afetada pelas tensões microresiduais relacionadas a força coercitiva e a de alta indução é impactada pela tensão provocada pela densidade de deslocamento dos domínios.

e. Perda parasita

As perdas parasitas (ou perdas clássicas ou correntes de Foucault) são perdas associadas ao efeito de magnetização do material e a forma com que o mesmo interage com o campo magnético ao qual está sob efeito, podendo ou não, apresentar um desvio de energia indesejado, produzindo calor (MOSES et al., 2019; MEURER, 2005).

Como pode ser visto no esquema da Figura 12, quando uma amostra de um material ferromagnético é submetida a um campo magnético externo, e na presença desse campo o material se move ou ainda quando o campo magnético oscila com o tempo (mudança de sentido de corrente, por exemplo), é observado um fenômeno na superfície do material, conhecido como corrente parasita. Essa corrente é indesejada nos aços elétricos, tendo em vista que representa um desvio de energia em relação a indução que deveria ser produzida (SANTOS, 2005; BECKLEY, 2002; CHIKAZUMI, 1997).

Figura 12 - Esquema da formação das correntes parasitas a partir da aplicação de um campo externo H



Fonte: autor.

Para reduzir a formação das correntes parasitas, pode-se laminar o material, a fim de reduzir o caminho de formação desses anéis de corrente, ou ainda, melhorar a resistividade do aço, através do ajuste da composição química no processo produtivo do mesmo (MEURER, 2005).

Como os metais, em grande parte, apresentam ótimas propriedades de condutividade elétrica à temperatura ambiente, isso pode implicar em redução da eficiência de um aço elétrico, visto que altos valores de condutividade elétrica podem promover ainda mais a formação de correntes parasitas na superfície do material. Para os aços elétricos, como dito, é necessária uma boa resistividade elétrica, e esse parâmetro é o inverso da condutividade. Segundo a regra de *Matthiessen*, em um metal, a resistividade elétrica total será dada pela soma das contribuições térmicas, das impurezas e das deformações do material (BERRADA et al., 2020; CALLISTER; RETHWISCH, 2021). A adição dos elementos de liga como cobalto, tungstênio, níquel, molibdênio, manganês, alumínio, silício e fósforo ajudam a aumentar a resistividade elétrica do material, cada qual desses citados em uma devida proporção específica (SANTOS, 2005).

Na literatura, é conhecido o efeito do aumento de resistividade elétrica provocado pelos metais terra rara nos aços elétricos. Esses elementos

químicos possuem um momento magnético orbital que pode ser, em alguns casos, diferente de zero. Como a anisotropia magnetocristalina dos metais e ligas de terra rara são consideravelmente altas, os momentos magnéticos orbitais permanecem intactos nesses materiais. Os momentos magnéticos orbitais dos metais terra rara não são extintos com a aplicação de um campo externo, visto que esses momentos são produzidos devido aos elétrons da camada 4f, que estão localizados relativamente longe do núcleo, dentro dos átomos, sendo protegidos da influência dos átomos vizinhos. Esses momentos se originam do momento angular total, sendo composto por um momento angular de spin (S) e momento angular orbital (L) de valores consideráveis, ou seja, diferentes de zero (CHIKAZUMI, 1997).

f. *Perda em excesso*

As perdas em excesso (ou perdas anômalas), são alvo de estudo e observação mais aprofundada. As equações de Maxwell para a definição das perdas parasitas assumem que o material é homogêneo e desprovido de domínios magnéticos. Entretanto, a existência destes, resulta em uma distribuição mais complexa e não uniforme das correntes parasitas. Assim, as perdas por corrente parasita que não podem ser explicadas pelo modelo clássico de magnetização são conhecidas como perda em excesso (BERTOTTI; FIORILLO, 2016).

Bertotti e Fiorillo (2016) apontaram que a perda em excesso está diretamente ligada aos domínios magnéticos e é resultado do movimento suave e em larga escala das paredes de domínio através da seção transversal da amostra. Os autores apontaram que a relevância da perda em excesso em comparação a parasita e a histerética dependerá substancialmente do tamanho e do arranjo dos domínios magnéticos, de forma que, quanto mais refinada a estrutura do domínio, menor a contribuição da perda em excesso. Porém, em muitos casos, o tamanho dos domínios magnéticos acaba não sendo o parâmetro mais importante sobre o controle dessas perdas, pois, através de recursos microestruturais, como ajuste no tamanho de grão do aço, por

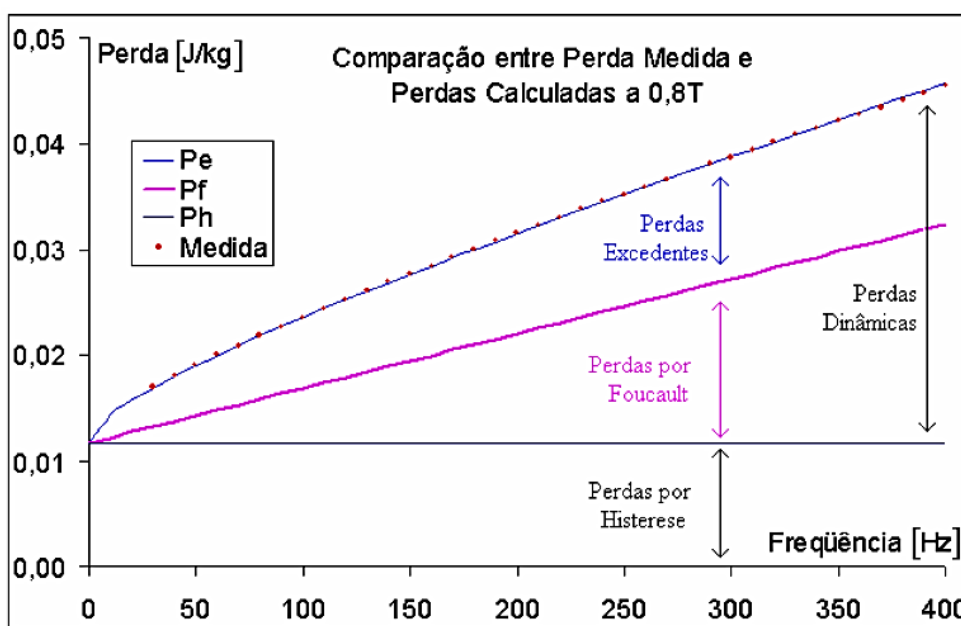
exemplo, é possível obter comprimentos característicos que tendem a controlar o crescimento dessas perdas no material.

Varga e Kovac simularam um espectro de permeabilidade para diferentes valores de amplitude de campo, e observaram que o movimento das paredes de domínio dá origem a um tipo irreversível de dipolo magnético, sendo esse considerável para o cálculo das perdas totais, e que a contribuição desse fator é muito observada para altas frequências (VARGA; KOVAC, 2018).

He et al. propuseram um modelo matemático para o cálculo das perdas em excesso e observaram que, para a rede neural artificial considerada, foi possível prever com efetividade, nas situações laboratoriais e para os parâmetros determinados, quais seriam as perdas em excesso obtidas em um aço de grão não-orientado, 35PN440, ao variar as frequências, mesmo com a alternância de campo. Foram utilizadas diferentes medições com frequências de 50 e 100 Hz, e constataram que a frequência era uma variável independente no modelo proposto. O modelo para previsão das perdas em excesso levou em consideração a densidade mássica do material, o tempo (período de densidade de fluxo magnético), além da variação de campo magnético anômalo e indução ao longo do tempo. Os autores apontaram que o algoritmo pode ser aplicado também para situações de altas frequências (HE et al., 2021).

Para as três categoriais de perda, especialmente para as em excesso, é notado na literatura a importância da observação da frequência adotadas em experimentos quanto em aplicações em equipamentos, pois o aumento desse parâmetro pode produzir valores de perda muito significativos, que não podem ser desprezados, como mostrado na Figura 13 (MEURER, 2005).

Figura 13 - Representação das perdas magnéticas em função da frequência



Fonte: Meurer (2005).

Alguns autores agrupam as perdas parasitas e em excesso como perdas dinâmicas (P_d), sendo essas dependentes da frequência (DE CAMPOS; TEIXEIRA; LANDGRAF, 2006; MEURER, 2005).

Portanto, as perdas magnéticas são um fator indispensável no controle de qualidade dos aços elétricos, pois estão diretamente relacionadas a economia de energia nos equipamentos que utilizam os aços elétricos.

g. Teoria de separação das perdas magnéticas

A teoria de separação de perdas de Bertotti foi descrita pelo autor em Bertotti e Mayergoyz (2006) e Bertotti (1988), sendo estudada e aplicada por diversos autores, como He, Kim e Koh (2022), Chen et al. (2022), Koprivica e Divac (2021), Nunes et al. (2021), Almeida et al. (2014), Dlala, (2009), dentre outros. Ela visa quantificar as três perdas magnéticas através de variáveis que influenciam cada uma.

Inicialmente, sabe-se que a perda total pode ser calculada através da Equação (3):

$$P_t = P_h + P_p + P_e$$

(3)

Onde P_h , P_p e P_e , dadas em W/kg, representam a perda por histerese, parasita e em excesso, respectivamente, originando a perda total, P_t , associada a aquele material naquela condição analisada.

Cada uma das três perdas magnéticas pode ser expressa através de seus coeficientes multiplicados pela frequência, originando a Equação (4):

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

Onde C_h (J/kg), C_p (J.s/kg) e C_e (J.s^{0,5}/kg) representam, respectivamente, os coeficientes das perdas por histerese, parasita e em excesso, e f a frequência (em Hz).

O coeficiente da perda parasita pode ser calculado através de valores conhecidos sobre o material. A Equação (5) mostra essa correlação entre C_p e as variáveis:

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

Onde d representa a espessura do material (em metros), B a indução (em T), θ a condutividade elétrica (1/resistividade elétrica) (em $\Omega.m$), e ρ a densidade do material (em kg/m³).

Obtendo o valor do coeficiente da perda parasita, e consequentemente o valor da perda parasita em si, os valores a serem determinados no ajuste de separação de perdas são os demais coeficientes, C_h e C_e .

Utilizando um software de processamento de dados, como o Origin, por exemplo, a Equação (4) é utilizada para descobrir os valores dos demais coeficientes das perdas, sendo esses, C_p e C_e , tratados como parâmetros de ajuste e C_p como valor fixo, previamente calculado. O ajuste é realizado para cada indução, de 0,1 a 1,5 T, obtendo coeficientes respectivos a cada uma dessas induções a partir de gráficos de perda total variando com relação a frequência.

Por fim, o ajuste de separação de perdas é uma excelente ferramenta para o estudo das propriedades magnéticas, pois através dele é possível

observar o comportamento das perdas de maneira singular, o que torna o controle de qualidade na produção desse material mais efetivo.

3.4 Tratamento térmico e tamanho de grão

Os aços elétricos, ao final do processo produtivo, podem passar por uma etapa de tratamento térmico para ajuste das propriedades mecânicas requeridas ao uso. Essa seção discute a importância do tratamento térmico no controle de qualidade dos aços, e a seguir, a importância do estudo do tamanho dos grãos para redução das perdas magnéticas em aços elétricos.

a. Tratamento térmico em aços

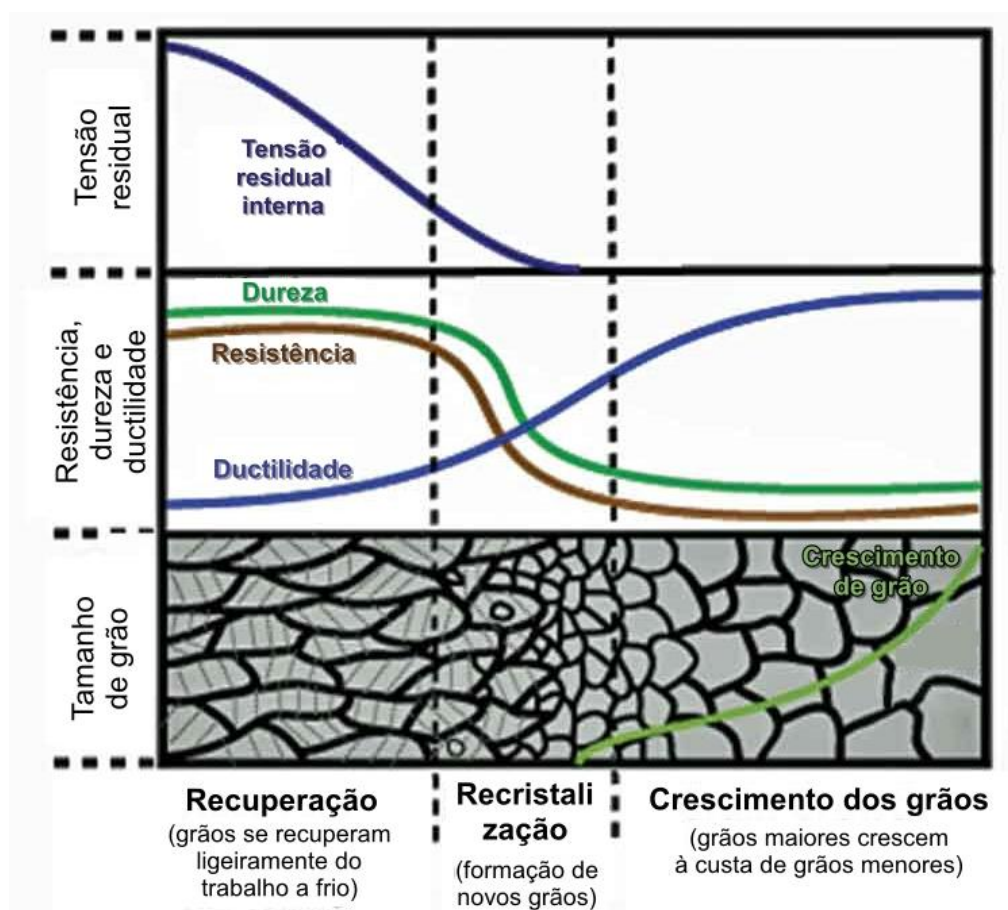
O tratamento térmico tem por objetivo provocar alterações na estrutura do aço através do calor, promovendo ajuste nas propriedades do material. O aço, quando comparado a outros ferros e ligas, passa por alterações consideráveis na sua estrutura quando submetido a um tratamento térmico. Dentre os tipos existentes, o recozimento de recristalização foi a primeira operação de tratamento térmico, sendo utilizada inicialmente cinco milênios antes de nossa era (TOTTEN, 2006; NOVIKOV, 1994).

No recozimento o material é exposto a uma elevada temperatura durante um tempo prolongado, e em seguida é resfriado lentamente. É tanto empregado no alívio de tensões internas, quanto para reduzir a dureza, aumentar a ductilidade e também para produzir uma microestrutura específica. As mudanças que ocorrem no material são microestruturais e alteram as propriedades mecânicas e podem ajudar a melhorar as magnéticas, se realizadas dentro de parâmetros específicos (ALVES; SILVEIRA; DA CUNHA, 2020; PEDROSA; PAOLINELLI; COTA, 2015; RODRIGUES et al., 2014).

A Figura 14 mostra um esquema do que acontece com as propriedades do material, como tensão residual, resistência, dureza e ductilidade conforme o processo de tratamento térmico acontece. Na etapa de recuperação, os grãos se recuperam da laminação a frio, e nesse momento a tensão residual interna provocada pelo processo anterior é reduzida consideravelmente, bem como observa-se uma redução sutil da dureza e da resistência do material. Ainda na fase de recuperação é observado o aumento da ductilidade, aumentando a

capacidade do material sofrer o esforço sem ruptura. Na sequência, ocorre a recristalização, dando início a formação de novos grãos no material. Nesse momento a tensão residual interna é a mínima, e observa-se uma redução muito considerável na dureza e na resistência. Assim como na recuperação, a ductilidade do material é aumentada. Por fim, ocorre o crescimento dos grãos. De acordo com Beckley, nessa fase, quando o aço é mantido a uma temperatura elevada, por exemplo, em torno de 800 °C a 1000 °C, os grãos crescem à custa uns dos outros. Nesse momento, é possível ajustar o tamanho de grão do aço de acordo com a necessidade e a aplicabilidade (BENSON, 2019; BECKLEY, 2002).

Figura 14 - Esquema da relação das propriedades do material em relação ao processo de recuperação, recristalização e crescimento de grãos



Fonte: Benson (2019, adaptada).

Como dito, Goss já havia, nos anos 1930, indicado que o tratamento térmico é um aliado no controle das perdas magnéticas nos aços elétricos

(GOSS, 1934). As evoluções nos processos produtivos atuais permitiram que o processo de recozimento fosse aprimorado, sendo possível encontrar na literatura, diversos trabalhos que investigam a eficiência do mesmo, além da variação dos parâmetros de processo, como o tempo de recozimento, e em especial, a temperatura.

Alves, Silveira e Da Cunha analisaram a influência do tratamento térmico de recozimento para alívio de tensões na microestrutura das bordas de corte e a recuperação das propriedades magnéticas em aços elétricos de grão orientado. As amostras foram submetidas a um tratamento térmico com temperaturas variando entre 600 °C a 900 °C, a fim de avaliar o efeito do aumento da temperatura sobre os parâmetros analisados. A microestrutura foi avaliada pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) equipado com EBSD, sendo possível observar o processo de recuperação e recristalização responsáveis pela liberação de energia armazenada na região de corte e cisalhamento. Nesse estudo, foi observado a melhoria das propriedades magnéticas com o aumento da temperatura de recozimento, sendo que, houve uma redução significativa das perdas magnéticas a uma temperatura de recristalização em torno de 700 °C (ALVES; SILVEIRA; DA CUNHA, 2020).

Dias et al. avaliaram a redução da perda de energia de um aço elétrico de grão orientado não revestido através do recozimento para tratamento de tensões. Foi investigado o efeito da baixa temperatura de tratamento térmico para alívio do estresse nas curvas de histerese e nas energias de perda. Foi percebido que as reduções significativas de energia de perda ocorreram para o recozimento acima de 400 °C, pois a partir dessa temperatura, houve um aumento da permeabilidade e redução do campo coercitivo. Foi apontado ainda que abaixo de 300 °C, os átomos de Si não apresentaram mobilidade suficiente na difusão e nenhuma anisotropia extrínseca foi introduzida (DIAS et al., 2020).

Rodrigues Junior et al. investigaram o efeito do tratamento térmico de recuperação sobre as propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não-orientado, aplicando diferentes tempos e temperaturas no processo, e observaram as diferentes transformações microestruturais provocadas pela ação do recozimento. Foi apontado que o recozimento realizado a 700 °C levou

a uma recristalização incompleta, o que promoveu um pequeno aumento das perdas em excesso, porém, não houveram conclusões específicas de que essa parcela de perda de energia fosse relacionada com a frequência de excitação (RODRIGUES JUNIOR et al., 2013).

Portanto, o tratamento térmico de recozimento é comprovadamente efetivo na redução das perdas magnéticas totais, sendo esse amplamente discutido na literatura. A seguir, será discutido como o tamanho dos grãos afeta as propriedades magnéticas dos aços elétricos.

b. Efeito do tamanho de grão sobre as propriedades magnéticas

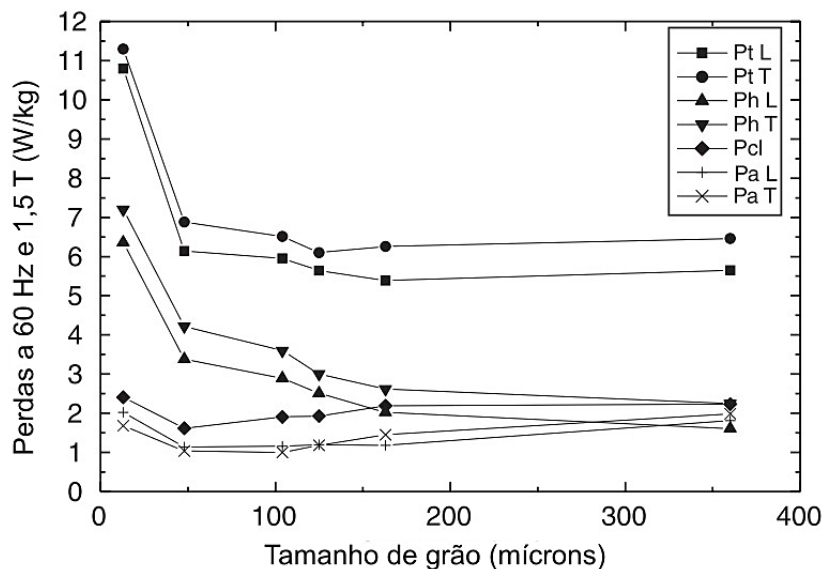
Existem diversas tecnologias que promovem o crescimento rápido e extensivo dos grãos. É importante ressaltar que nem sempre aumentar o tamanho de grão de forma excessiva é algo positivo. Como na fase de crescimento de grão o tamanho do mesmo é aumentado, a presença dos contornos de grão será menor por unidade de volume, quanto maior for o tamanho do grão. A literatura relata que o espaçamento da parede do domínio aumenta à medida que o tamanho do grão aumenta. Os contornos de grão são os principais locais de fixação de parede de domínio, de modo que grãos grandes reduzem a quantidade total de obstrução do movimento da parede por unidade de volume (BECKLEY, 2002).

Então, se o espaçamento da parede de domínio for grande, as paredes individuais necessitam se mover de uma forma muito mais rápida (alta velocidade) quando ocorre a mudança no sentido de magnetização. A movimentação rápida das paredes de domínio gera micro correntes parasitas associadas à rotação do vetor de magnetização interno, aumentando as perdas. Portanto, existe um tamanho de grão favorável que não pode ser muito excedido, tendo em vista o aumento das perdas associadas (BECKLEY, 2002).

De Campos, Teixeira e Landgraf investigaram qual seria o tamanho de grão ideal para um aço com 0,54% de Si em sua composição, visando reduzir as energias de perda, separando e classificando-as em perda por histerese,

parasita e em excesso. Com isso, propuseram um modelo matemático que explicava a relação existente entre tamanho de grão e as perdas magnéticas. Além disso, investigaram a relação de dependência da frequência de excitação do campo magnético externo. Os autores perceberam que o modelo sugerido, que levava em consideração variáveis como resistividade, indução, espessura e frequência, foi eficiente para prever o tamanho de grão ótimo naquele material, corroborando com dados experimentais de outros autores. Porém, também apontaram a necessidade da observação da frequência de aplicação do produto final, pois perceberam que o aumento desse parâmetro culminava em maiores perdas. Os resultados da relação de perdas magnéticas para uma frequência de 60 Hz e indução de 1,5 T são mostrados na Figura 15. Na legenda do gráfico, P_{tL} e P_{tT} correspondem a perda total medida no sentido longitudinal e transversal, respectivamente. O mesmo raciocínio se aplica a P_{hL} e P_{hT} (perda por histerese) e P_{aL} e P_{aT} (perda anômala ou em excesso). P_{cl} representa a perda clássica ou parasita. As perdas magnéticas no gráfico referido estão expressas em W/kg (DE CAMPOS; TEIXEIRA; LANDGRAF, 2006).

Figura 15 - Resultados de perda magnética a 60 Hz e 1,5 T em relação ao tamanho de grão, obtido por De Campos, Teixeira e Landgraf (2006)

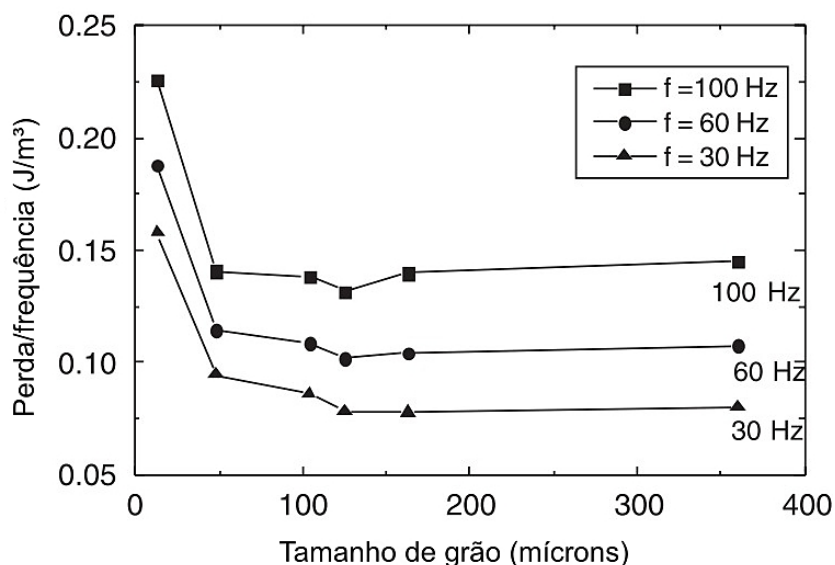


Fonte: De Campos, Teixeira e Landgraf (2006, adaptada).

É possível constatar nos resultados mostrados acima, que para frequência de 60 Hz e indução de 1,5 T, as perdas por histerese apresentaram uma redução considerável à medida que se aumentava o tamanho de grão de 0 a 50 μm , e que para tamanho de grão acima de 175 μm , uma estabilização dessa perda era percebida, e a mesma se mantinha constante conforme o tamanho era aumentado até 450 μm , tamanho máximo avaliado. Enquanto isso, para todos os valores de tamanho de grãos, de 0 a 450 μm , a perda clássica (parasita) apresentou pequenas variações, de 1,5 a 2,5 W/kg. A tendência de comportamento da perda em excesso foi semelhante ao da clássica, apresentando valores inferiores que a mesma até aproximadamente 300 μm . Porém, dentre essas perdas, a em excesso foi a única que apresentou um leve aumento à medida que o tamanho de grão era aumentado, destoando do comportamento das demais, apresentando ao final, no tamanho de grão 450 μm , um valor bem próximo do da perda por histerese. As perdas totais, como dito, são o somatório das três perdas, portanto, é possível dizer, que nas condições especificadas pelos autores, a perda por histerese foi muito mais influenciada pela modificação do tamanho dos grãos do material, representando uma parcela significativa das perdas totais até o tamanho de grão de 175 μm .

O mesmo artigo trata também da relação de dependência da frequência de excitação do campo externo aplicado em relação as perdas totais, como pode ser visto na Figura 16. Nota-se pelos resultados, que o aumento da frequência de 30 para 50 Hz, e a seguir para 100 Hz, ocasionou também o aumento das perdas totais em relação a frequência, expressas nesse gráfico em J/m^3 (DE CAMPOS; TEIXEIRA; LANDGRAF, 2006).

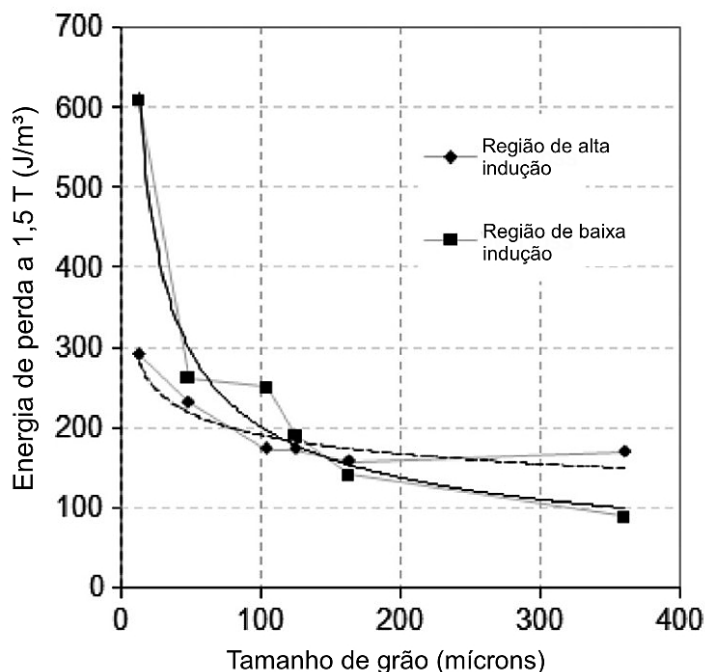
Figura 16 - Resultado das perdas divididas pela frequência em relação ao tamanho de grão, obtido por De Campos, Teixeira e Landgraf (2006)



Fonte: De Campos, Teixeira e Landgraf (2006, adaptada).

Um artigo tratado anteriormente na seção de perdas por histerese, trouxe um outro estudo realizado por Landgraf, De Campos e Leicht, que realizaram a separação da curva de histerese em regiões de baixas (0,1 a 0,7 T) e de altas induções (0,8 a 1,4 T). Os autores verificaram a influência do tamanho de grão nas energias de perda para um aço contendo 0,5% de Si, numa indução de 1,5 T. Os resultados estão expressos no gráfico da Figura 17, onde as perdas são expressas em J/m³ (LANDGRAF; DE CAMPOS; LEICHT, 2008).

Figura 17 - Gráfico da relação do tamanho de grão com as energias de perda para regiões de baixa e alta indução, obtido por Landgraf, De Campos e Leicht (2008)



Fonte: Landgraf, De Campos e Leicht (2008, adaptada).

A partir dos dados apresentados pelos autores, é possível desprender que nas condições adotadas nos testes, a região de baixa indução é muito mais impactada pelo aumento do tamanho de grão, mantendo uma redução significativa das perdas até valores de aproximadamente 120 μm e reduzindo até o maior valor analisado, 375 μm . Para tamanhos de grão acima de 120 μm até 375 μm , as regiões de alta indução passaram a apresentar maiores perdas se comparadas a região de baixa indução.

A literatura aponta que para tamanhos de grão acima de 10 microns, a coercividade é reduzida à medida que o tamanho de grão é aumentado (GALLAUGHER et al., 2015; LANDGRAF; DA SILVEIRA; RODRIGUES-JR., 2011).

Portanto, o tamanho de grão também é um parâmetro crítico e deve ser controlado a fim de assegurar as melhores respostas magnéticas ao aço elétrico.

A seção a seguir relaciona as aplicações dos aços M350-50A e M530-54A que serão utilizados nos procedimentos experimentais.

3.5 Os aços elétricos GNO M350-50A e M530-54A

Os aços M350-50A e M530-54A pertencem a classe dos aços elétricos de grão não orientado totalmente processados, ou seja, passaram pelo processo de encruamento e recozimento ao final do processo produtivo, o que garante o alívio de tensões de laminação e refino das propriedades mecânicas essenciais a sua aplicação (APERAM SOUTH AMERICA, 2015).

Esses aços podem receber uma camada de revestimento isolante em sua superfície, o que ajuda no processo de contenção do aumento de perdas durante a aplicação do material, pois esse revestimento atuará como uma proteção à formação de correntes de fuga, que podem se formar pelo contato de lâminas sem devido isolamento, acarretando também no sobreaquecimento do equipamento e perda da eficiência eletromagnética (LOISOS; MOSES; BECKLEY, 2003).

A literatura aponta que esses aços apresentam em torno de 1% de Si em sua composição (NOVAK et al., 2017).

Uma das principais características desse material é sua ótima aplicação em qualquer direção de aplicação de campo magnético, conservando suas boas propriedades magnéticas devido à ausência de uma orientação cristalográfica específica. Esse cenário ideal para aplicação em motores, por exemplo, pois o núcleo do equipamento, quando em funcionamento, está em constantemente movimento, sem a aplicação do campo magnético em um sentido específico (CHASIOTIS; KARNAVAS; SCUILLER, 2022; OU; LIU; DOPPELBAUER, 2021; TONG et al., 2017).

Os aços M350-50A e M530-54A possuem algumas aplicações comuns entre si e outras específicas. O que difere esses dois materiais, além da composição, é o tamanho de grão dos mesmos, que é trabalhado nas etapas finais do processo produtivo. De acordo com o catálogo de produtos da fabricante (APERAM SOUTH AMERICA, 2015), os aços M350-50A e M530-54A podem ser aplicados nas seguintes situações descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Aplicações dos aços M350-50A e M530-54A

Aplicações	M350-50A	M530-54A
Hidrogeradores e turbogeradores	sim	-
Transformadores para indústria eletroeletrônica	sim	sim
Transformadores para máquinas de solda	-	sim
Transformadores reguladores de tensão	-	sim
Grandes motores de CC e CA	sim	-
Médios motores de CC e CA	-	sim
Pequenos motores de CC e CA	-	sim
Medidores de energia	sim	-
Reatores para sistemas de iluminação	-	sim
Compressores herméticos	sim	sim

Fonte: Aperam South America (2015, adaptada).

Ainda de acordo com o catálogo da empresa que foi consultado, elaborado no ano de 2015, as siglas de referência do aço M350-50A são M350-50A e M290-35A, enquanto as do M530-54A são M600-65A, M530-54A e M530-50A, também referenciadas como E145 e E230 internamente.

Por fim, a literatura consultada para elaboração da revisão bibliográfica serviu como embasamento para elaboração da metodologia empregada, detalhada a seguir, e na posterior discussão dos resultados.

4 MATERIAIS E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Os tópicos a seguir relacionam os materiais analisados e suas especificações, bem como uma descrição mais aprofundada das técnicas de caracterização adotadas para verificação das propriedades de interesse.

4.1 Materiais

Foram utilizadas lâminas de aços elétricos de grão não orientado, produzidos pela Aperam South America, dos tipos GNO M350-50A e M530-54A, com percentual de silício em torno de 1%.

Os dois tipos de aços analisados, GNO M350-50A e M530-54A foram separados em 4 grupos (siglas A-H) contendo 20 lâminas cada. Para execução das caracterizações, foram classificadas conforme o tipo de aço e o sentido de corte da lâmina em relação ao plano de laminação, podendo ser transversal ou longitudinal. A Tabela 2, a seguir, exibe a classificação realizada, bem como detalha as siglas adotadas. As amostras das siglas A, D, E, G e H, destacadas em negrito na tabela foram as utilizadas para realização das análises de tamanho de grão.

Tabela 2 - Tabela de numeração e sigla das amostras

Grupo	Sigla da amostra	Tipo de aço	Sentido do corte (em relação ao plano de laminação)
1	A	M350-50A	Transversal
	B	M350-50A	Longitudinal
2	C	M350-50A	Transversal
	D	M350-50A	Longitudinal
3	E	M530-54A	Transversal
	F	M530-54A	Longitudinal
4	G	M530-54A	Transversal
	H	M530-54A	Longitudinal

Fonte: autor.

4.2 Técnicas de caracterização

Os tópicos seguintes descrevem as técnicas de caracterização empregadas nesse trabalho, bem como a metodologia para condução dos experimentos.

a. *Análise do tamanho dos grãos por Microscopia Óptica*

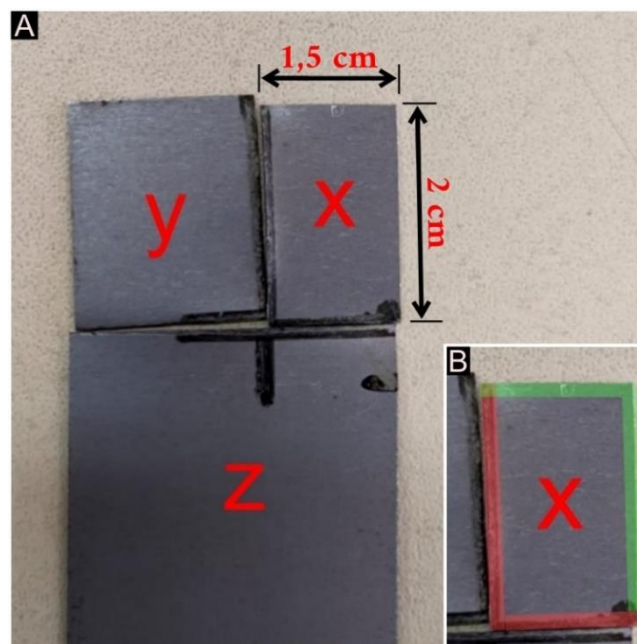
Para observar o tamanho de grão, foram realizadas inicialmente as preparações metalográficas, que se deram conforme a norma da *American Society for Testing and Materials*, ASTM E112-96 (ASTM INTERNATIONAL, 1996). Todos os devidos procedimentos de preparação e análise com microscópio óptico foram realizados nos Laboratórios de Metalografia, Microscopia e Soldagem do CEFET-MG, Campus Timóteo.

As amostras escolhidas para preparação metalográfica e posterior análise no microscópio óptico foram selecionadas de forma a se ter duas amostras do aço M350-50A (A e D) e três do M530-54A (E, G e H), bem como contemplando os dois tipos de corte, três no sentido transversal (A, E e G) e duas longitudinais (D e H) conforme as classificações adotadas na Tabela 2, apresentada na seção de materiais desse trabalho. Portanto, foram realizadas preparações metalográficas e análises de microscopia óptica em cinco amostras, A, D, E, G e H.

Para obtenção das amostras no formato adequado para análise, as tiras foram cortadas numa guilhotina manual em dimensões de 2 cm por 1,5 cm. Na Figura 18 é apresentado um esquema de como foram cortadas as amostras. Na parte A da figura, a região apontada como x é correspondente a amostra de interesse, y a parte lateral descartada e z o restante do corpo da lâmina, também não utilizada nessa caracterização. O corte foi realizado em apenas uma lâmina dentre as dez de cada conjunto. Na inserção B da mesma figura, observa-se que a parte de interesse, x, possui indicações nas bordas de corte em vermelho e verde. A região marcada de vermelho representa onde foi utilizado o corte da guilhotina manual, enquanto a região de verde representa

o corte realizado pela empresa Aperam South America durante o processo produtivo.

Figura 18 - Esquema de corte das amostras para análises metalográficas



Fonte: autor.

A seguir, conforme instruções da Norma ASTM E112, foram feitas as preparações metalográficas. Após, as amostras foram submetidas a análise com microscópio óptico. Utilizou-se a lente objetiva amarela (ampliação de 10 vezes) para observação dos tamanhos de grão das amostras. Foi utilizado o microscópio óptico da fabricante Fortel, que possuía uma câmera acoplada ao computador do Laboratório de Microscopia Óptica do CEFET-MG, sendo que, em primeira análise, realizada em 2021, a câmera empregou um zoom de 15x e em posterior análise, em 2022, de 10x, gerando imagens com barras de escalas 150 e 100 microns, respectivamente, como poderá ser observado nas imagens posteriores. Através do *software Image View*, foi possível capturar diversas imagens de diferentes pontos de cada uma das cinco amostras, sendo essas, exibidas na seção de resultados desse trabalho.

b. Medição das perdas magnéticas pelo Brockhaus

As medições foram realizadas no Centro de Pesquisas da Aperam South America, em Timóteo (MG), em maio de 2022, utilizando o histeresímetro da fabricante *Brockhaus* modelo MPG 200D, com o *software* instalado no sistema operacional *Windows 7*. Para obtenção dos dados foram seguidos os procedimentos estabelecidos na Norma ABNT NBR 5161 de 1977 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977).

A Tabela 3 mostra as informações do material que foram inseridas no equipamento para a medição no *software*, referente aos aços M350-50A e M530-54A, a fim de se obter os dados referentes às propriedades magnéticas.

Tabela 3 - Informações dos materiais inseridas ao Brockhaus

Aço	Densidade (g/cm ³)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Nº de lâminas	Massa total (g)	Espessura (mm)
M350-50A	7,75	305	30	16	562,66	0,4959
M530-54A					613,95	0,5411

Fonte: autor.

Para realização da análise, foram inseridas um conjunto de dezesseis lâminas dentro do Quadro *Epstein* do equipamento. Foram utilizadas oito lâminas dispostas na horizontal (que foram cortadas no sentido longitudinal com relação a direção de laminação) e a mesma quantidade na vertical (cortadas no sentido transversal).

Além das informações referentes aos materiais, o *software* solicita as informações de quais valores desejados de frequência, indução ou intensidade de campo, para que sejam realizadas as análises das perdas magnéticas. Sendo assim, a Tabela 4 informa os valores de frequência e indução magnética inseridos no momento posterior à análise com o *Brockhaus*.

Tabela 4 - Parâmetros informados no *Brockhaus* para obtenção das perdas magnéticas

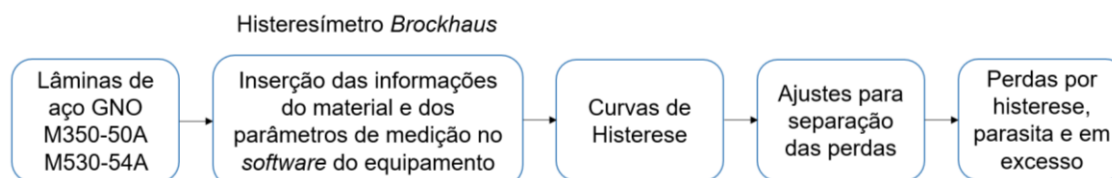
Frequências (Hz)	Induções (T)
3, 5, 10, 50, 60 e 100	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 e 1,5
200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 e 2000	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1

Fonte: autor.

As induções foram medidas com um intervalo de indução de 0,1 em 0,1 T para todas as frequências. Devido a limitação de segurança do equipamento, para frequências de 200 Hz a 2000 Hz, a indução máxima medida foi de 1 T. Para valores de frequência até 100 Hz, foi considerada 1,5 T como a indução máxima. Portanto, nos resultados desse trabalho, ao se realizar o ajuste para a separação de perdas, optou-se por realizar para frequências baixas e médias apenas (3, 5, 10, 50, 60 e 100 Hz), tendo em vista que são esses os valores de frequências aos quais conseguiu-se medir indução máxima de 1,5 T.

Dessa forma, após as análises, foram obtidas as curvas de histerese, além de uma série de dados como frequências e induções correspondentes, bem como intensidades do campo externo aplicada, permeabilidade relativa, coercividade, remanência, dentre outras, que serão discutidas no capítulo de Resultados.

Por fim, o esquema apresentado na Figura 19 mostra o passo-a-passo para obtenção dos valores de perda total e posteriormente o valor das perdas magnéticas (por histerese, parasita e em excesso).

Figura 19 - Esquema da medição das perdas magnéticas no *Brockhaus*

Fonte: autor.

No capítulo a seguir, os resultados obtidos e as discussões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

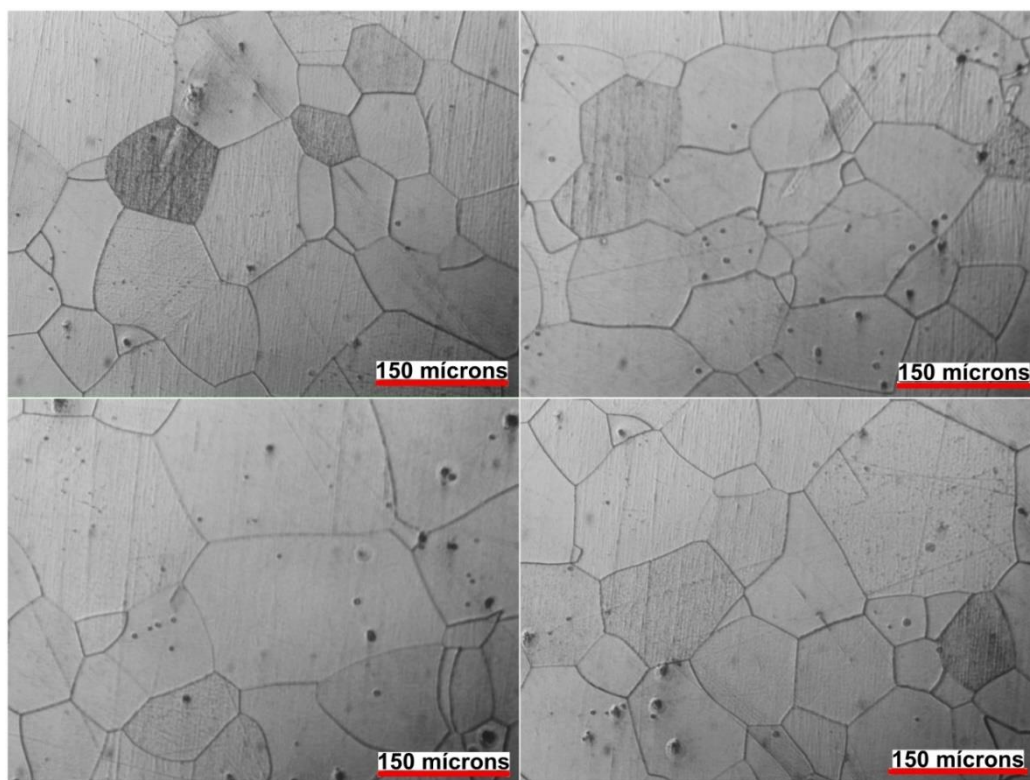
Na seção 5.1 são exibidos os resultados da análise de tamanho dos grãos através da técnica de microscopia óptica. Na seção 5.2, os resultados das propriedades magnéticas.

5.1 Análise do tamanho dos grãos por Microscopia óptica

As imagens das amostras antes dos procedimentos de caracterização estão no APÊNCICE A: Imagens obtidas durante as caracterizações, ao final do mesmo (vide Figura A. 1 a Figura A. 4).

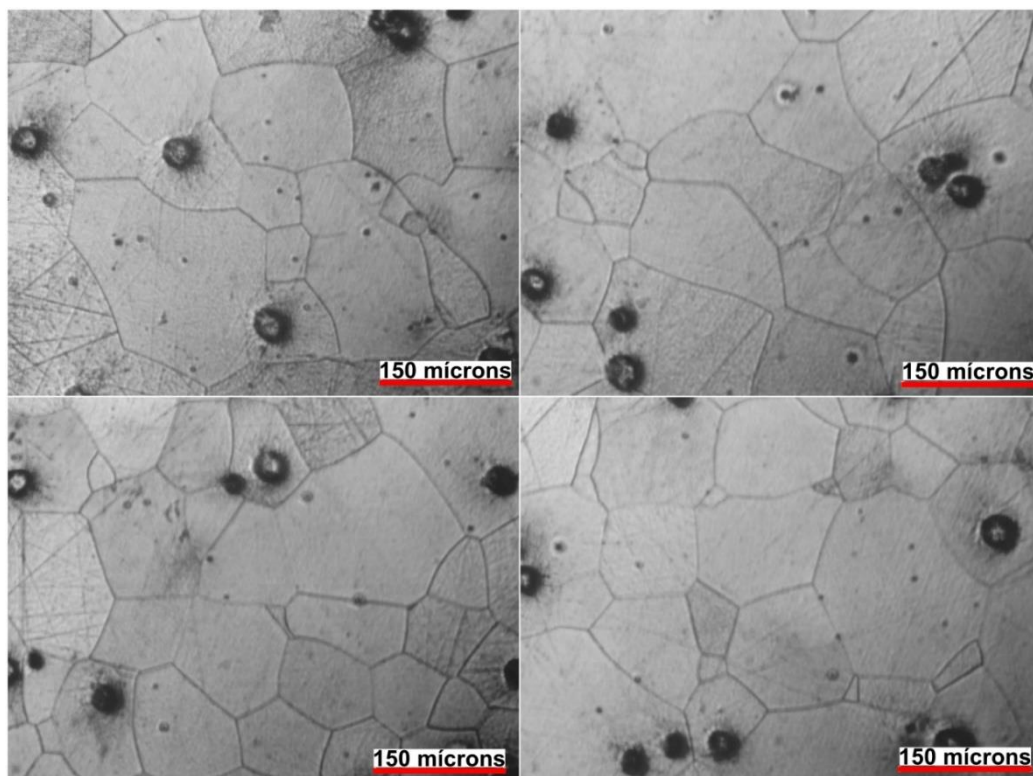
Foram capturadas imagens das amostras utilizando o microscópio óptico, sendo essas exibidas a seguir (Figura 20 a Figura 24).

Figura 20 - Imagens de Microscopia Óptica para a amostra A



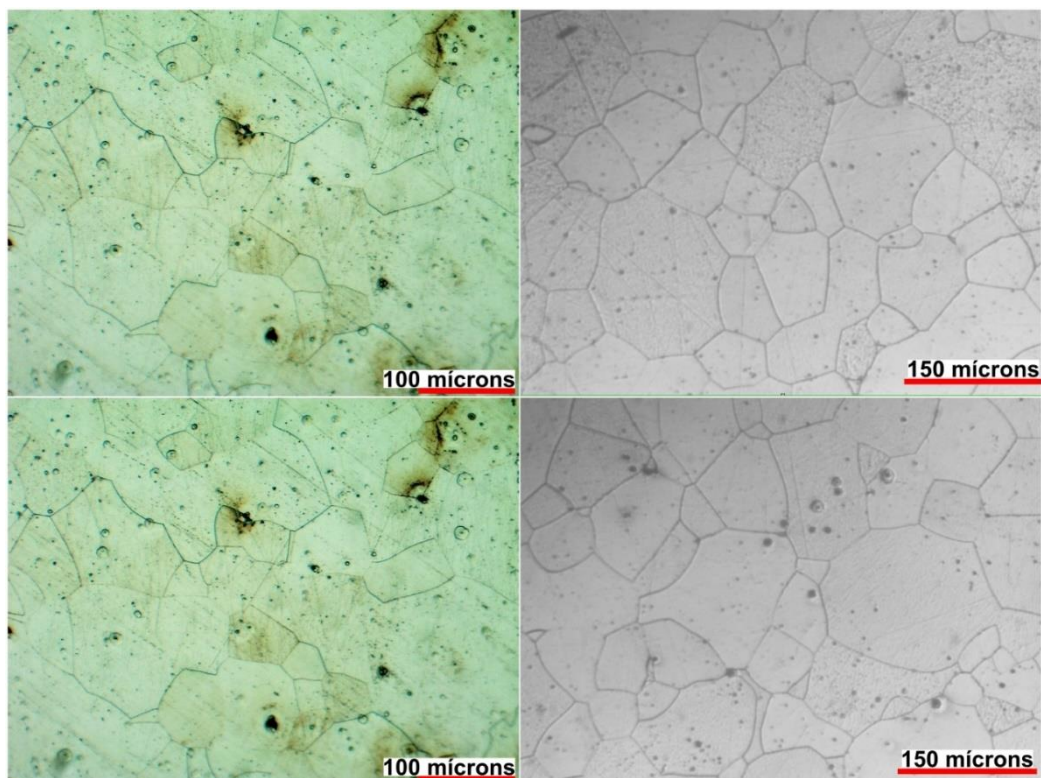
Fonte: autor.

Figura 21 - Imagens de Microscopia Óptica para a amostra D



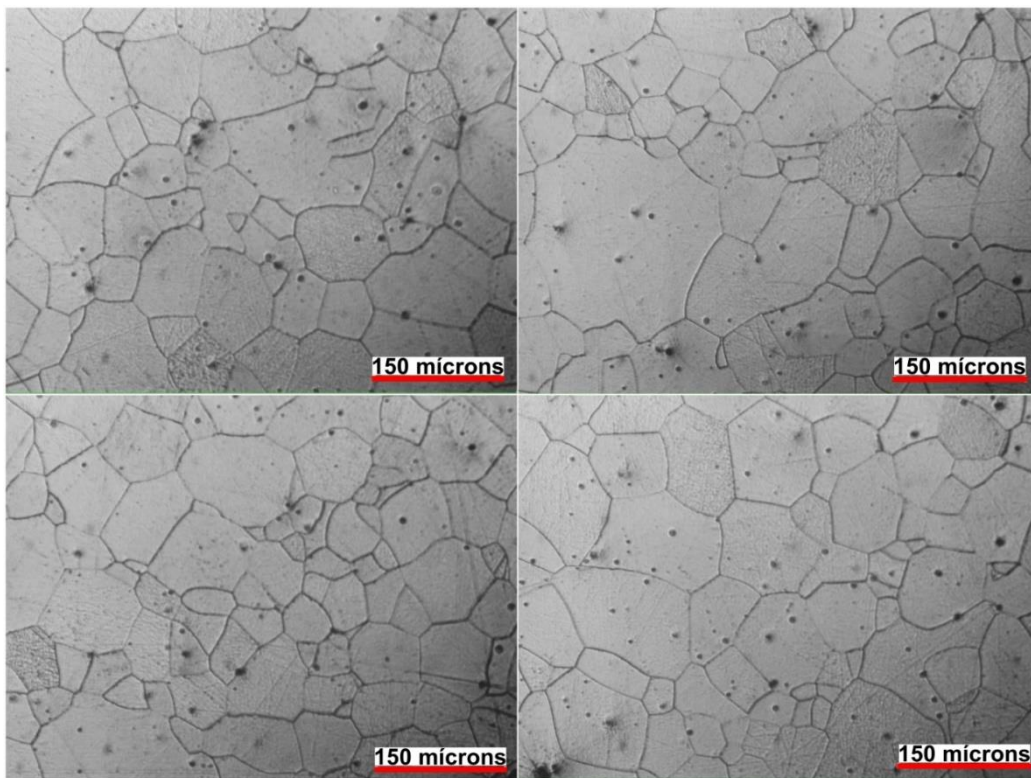
Fonte: autor.

Figura 22 - Imagens de Microscopia Óptica para a amostra E



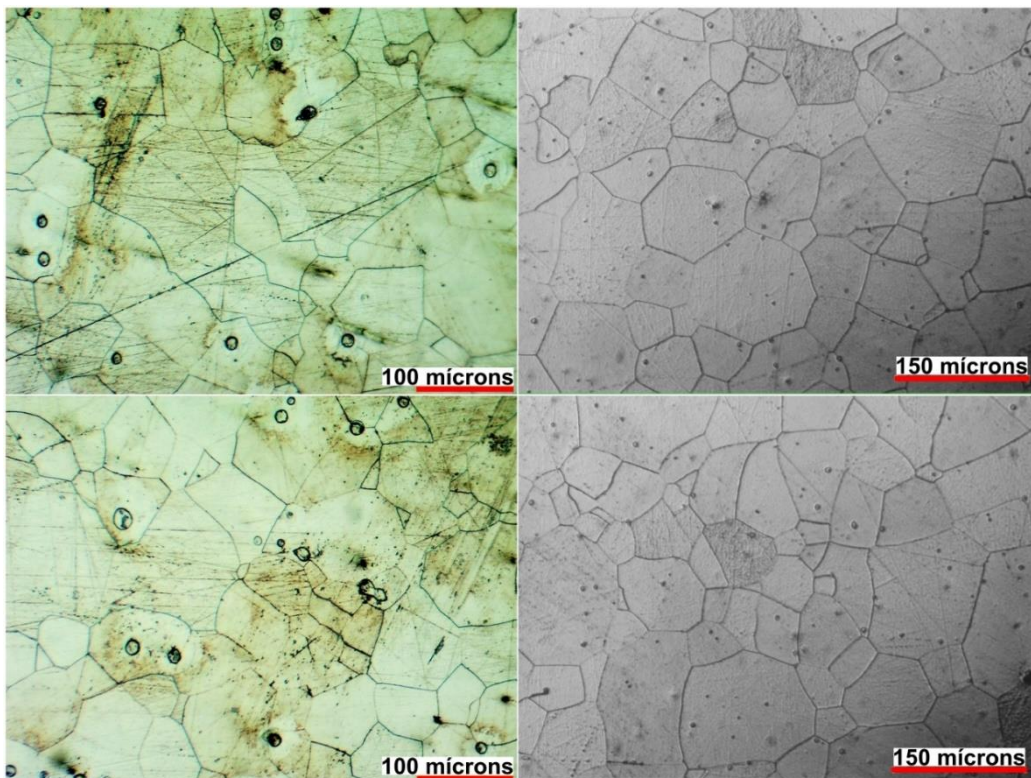
Fonte: autor.

Figura 23 - Imagens de Microscopia Óptica para a amostra G



Fonte: autor.

Figura 24 - Imagens de Microscopia Óptica para a amostra H



Fonte: autor.

Na amostra D foram observados pontos escuros na superfície do aço. Após discussão, foi apontada a possibilidade de oxidação da amostra e o emprego de possível reagente abrasivo inadequado durante as preparações metalográficas. Porém, mesmo após novo processo de lixamento e polimento, seguindo a norma ASTM E112, os pontos persistiram. Na amostra H, para as imagens na escala de 100 microns, também foi observado tais pontos, em menor quantidade. As demais amostras não apresentaram pontos semelhantes na mesma intensidade.

Para analisar o tamanho dos grãos dos aços M350-50A e M530-54A, foram empregadas duas técnicas, sendo a primeira delas contida na Norma ASTM E112, e a segunda, um método de medição adotado pelo autor. Ambas são descritas nas subseções a seguir.

a. Método de Heyn ou interseções

A primeira técnica de medição do tamanho de grão médio utilizada foi a da interseção ou método de Heyn, que é aplicado na contagem de grãos em materiais monofásicos, descrito no tópico 13 da Norma ASTM E112.

Para a medição foi utilizado o *software Image J* versão 1.53k e o programa *Microsoft Excel Professional Plus 2021* para se trabalhar com os dados. Antes do início da medição em cada imagem capturada, foi feito o ajuste da escala no *software*, seguindo a barra de escala da imagem em análise.

Nas amostras A e H foram realizadas medições de tamanho de grão em dez imagens para cada uma. Já para as amostras D (do aço M350-50A) e as E e G (M530-54A), que dispunham de menos imagens coletadas no microscópio, somente oito, nove e quatro, respectivamente. No total, foram analisadas 41 imagens para todas as amostras, que resultaram em um total de 2.364 interseções.

É necessário destacar que, segundo a norma, é recomendável que sejam coletados no mínimo 50 interseções em cada imagem, o que não foi possível nas amostras A3 (38 interseções observadas), A5 (43), A6 (45,5), A8 (32), A9 (44), D2 (42,5), D3 (44,5), D4 (41), D5 (44,5) e D8 (31,5), que estão destacadas com um asterisco na tabela, justamente por terem sido capturadas

em regiões onde haviam grãos significativamente grandes, o que diminuía o número de interseções finais.

A Tabela 5 apresenta os valores de tamanho médio de grão, em microns, obtidos utilizando o método de Heyn por interseção. São expressos os valores de tamanho médio para todas imagens em cada amostra, e ainda, no cenário nos quais o tamanho médio foi determinado para o mínimo 50 interseções, como apontado pela norma.

Tabela 5 - Valores encontrados de tamanho médio de grão pelo Método de Heyn

Aço	M350-50A		M530-54A		
Amostras	A	D	E	G	H
1	97,790	81,534	64,182	54,827	58,408
2	79,909	91,729 *	73,326	59,770	59,632
3	112,248 *	91,265 *	70,024	52,784	56,345
4	80,016	94,638 *	64,143	48,091	58,358
5	79,734 *	96,270 *	69,083	-	57,975
6	80,157 *	83,976	58,309	-	58,318
7	79,916	76,580	62,263	-	57,593
8	113,080 *	124,526 *	72,212	-	64,421
9	80,609 *	-	68,643	-	54,346
10	70,842	-	-	-	57,718
Tamanho médio total (µm)	87,430	92,565	66 ± 5	54 ± 4	58 ± 1
Tamanho médio – mínimo 50 interseções (µm) ± desvio padrão	81,7 ± 0,4	80,7 ± 0,4			
Média (somente com mínimo de 50 interseções)	81,2		59,3		
Número total de interseções	464	364,5	536,5	315	684

Fonte: autor.

Para o número total de interseções para as amostras D e E, foram obtidos valores decimais, porque, segundo o Método de Heyn, quando há cruzamento entre três grãos, essa interseção recebe o valor de 1,5.

O valor do desvio padrão foi feito calculando a média dos valores encontrados naquele aço (amostra A e D e amostras E, G e H, cada aço separadamente), e realizado o cálculo de desvio padrão amostral daquele valor da amostra em relação à média calculada.

Portanto, empregando o Método de Heyn, descrito na Norma ASTM E112, foi encontrado valor de aproximadamente 81,2 μm como tamanho médio de grão para o aço M350-50A, e 59,7 μm para tamanho de grão médio do aço M530-54A. Segundo informações do fabricante, os aços M350-50A tem tamanho de grão acima de 80 μm , enquanto os M530-54A, entre 40 e 60 μm .

O Método de Heyn para contagem das interseções e consequentemente do tamanho médio de grão é consideravelmente simples, porém não transmite uma ideia de distribuição de tamanhos médios dos grãos. Para fazer tal verificação e observar a distribuição dos tamanhos de grão em cada amostra, recorreu-se a uma segunda técnica de medição, descrita a seguir.

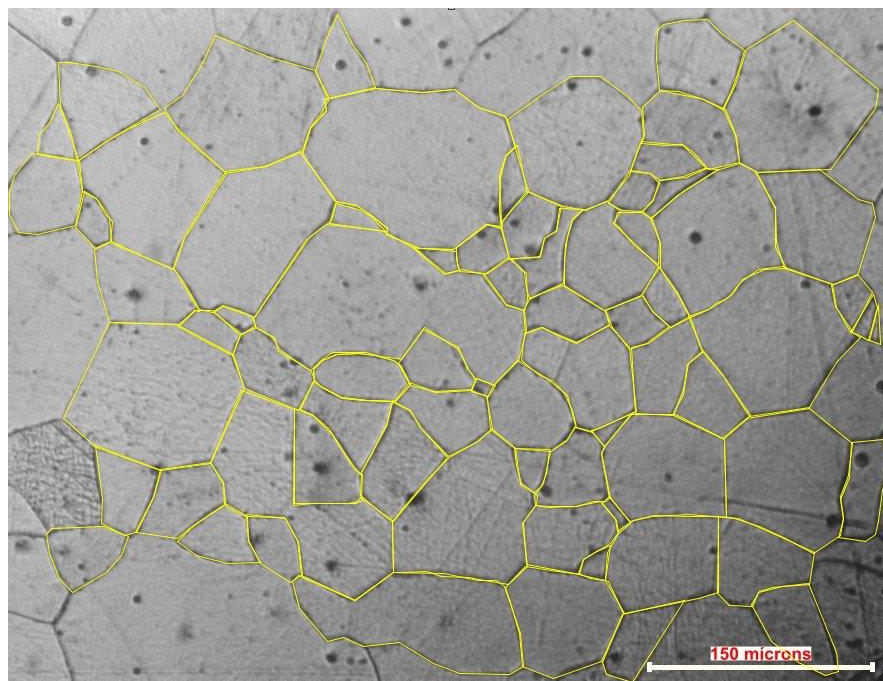
b. Medição do perímetro dos grãos

A fim de medir o tamanho individual de cada grão, foi realizada a medição do perímetro dos grãos em cada uma das imagens, pois através desse método foi possível observar com mais detalhes a diversidade de tamanhos de grão nos aços. Quando foram coletadas as imagens através do microscópio, notou-se que havia uma grande diversidade de tamanhos de grãos, o que ficou evidenciado pela aplicação dessa técnica de medição desenvolvida pelo autor.

Para tal, foi utilizado novamente o *software ImageJ*. O primeiro passo foi a realização das devidas calibrações do programa com a barra de escala para cada imagem, e através de uma ferramenta “*polygon selections*”, disponível no *software*, foi possível realizar a marcação exata dos contornos de cada grão naquela amostra. Para maior precisão, foram medidos somente os grãos que tinham todos contornos visíveis na imagem. Os que só apresentaram uma parte visível na imagem capturada foram desconsiderados.

A Figura 25 mostra o resultado da aplicação do método de medição dos perímetros dos grãos, nesse caso para a amostra G4, onde as linhas amarelas representam o contorno realizado utilizando o programa. Dessa forma foram coletados os valores de perímetro, em microns, para cada uma das 41 imagens obtidas no microscópio. No total, foram medidos 1.077 grãos em todas as amostras.

Figura 25 - Aplicação do método de medição dos perímetros dos grãos



Fonte: autor.

A Tabela 6 mostra os valores encontrados de perímetros em casa amostra, o número total de grãos medidos e o fator de correlação entre os métodos de perímetros e de Heyn. O fator de correlação foi feito dividindo os valores encontrados pelo de método de Heyn pelo valor dos respectivos dos perímetros.

Tabela 6 - Correlação entre os valores obtidos nos métodos de medição de grão

Aço	Amostra	Número total de grãos	Perímetro médio dos grãos (μm)	Tamanho de grão – Heyn (μm)	Correlação entre os métodos (Heyn / perímetros)
M350-50A	A	159	272	81,7	0,30
	D	106	312	80,7	0,26
M530-54A	E	207	243	66	0,27
	G	233	193	54	0,28
	H	372	198	58	0,29

Fonte: autor.

Uma das vantagens de se medir o perímetro individual dos grãos é poder observar a distribuição de tamanhos de grão em cada amostra, e observar os valores mais presentes através de análises estatísticas, o que não se mostrou possível pela aplicação do Método de Heyn. Sendo assim, as próximas figuras (Figura 26 a Figura 30) exibem os histogramas para a distribuição dos perímetros dos grãos observados para as amostras A, D, E, G e H. Para plotar os histogramas, foram feitas as conversões dos valores encontrados pelo método dos perímetros multiplicando-os pelo fator de correlação entre os métodos, a fim de se obter o valor do tamanho de grão.

Os histogramas e os ajustes matemáticos foram realizados no *software Origin Pro 2021* (64-bit, versão 9.8.0.200). O ajuste não-linear dos histogramas foi feito utilizando a Equação (6) de distribuição log-normal (TORRES et al., 2022).

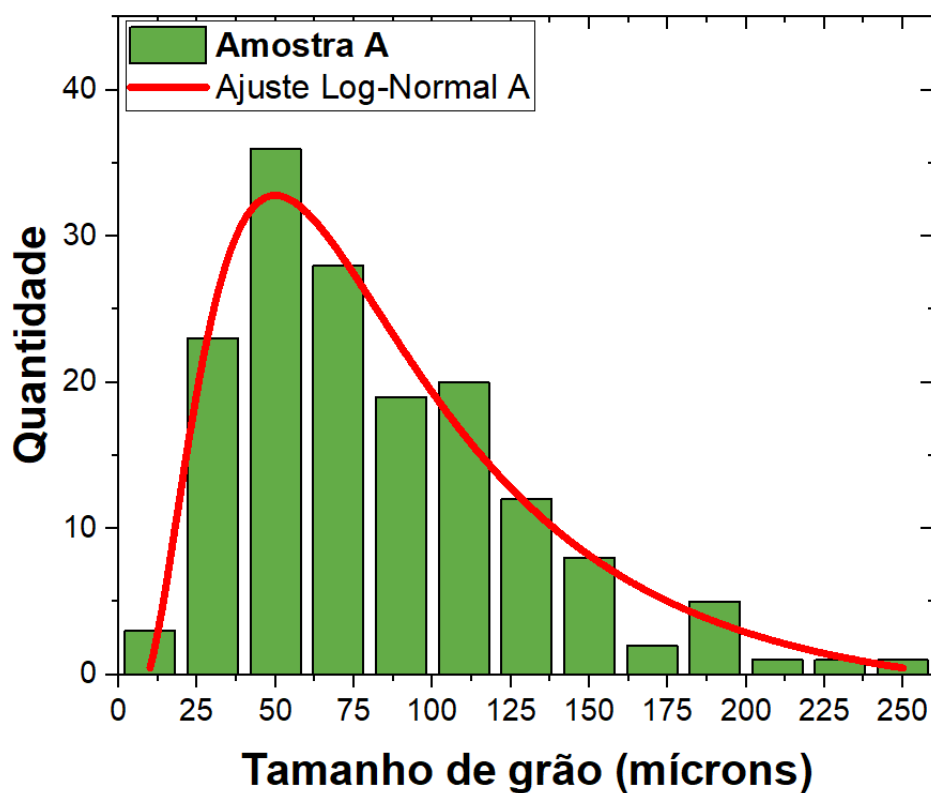
$$f(D) = \frac{A}{\sigma D \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-[\ln(D) - u]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

Onde A corresponde ao perímetro dos grãos, u a média, σ o desvio padrão e D o diâmetro.

Além dos histogramas de distribuição de tamanho de grão, são mostradas tabelas (Tabela 7 a Tabela 11) com compilação de alguns valores importantes para o ajuste dos histogramas ou obtidos no próprio ajuste.

b.1. Amostra A

Figura 26 - Histograma: Distribuição de tamanho de grãos para amostra A



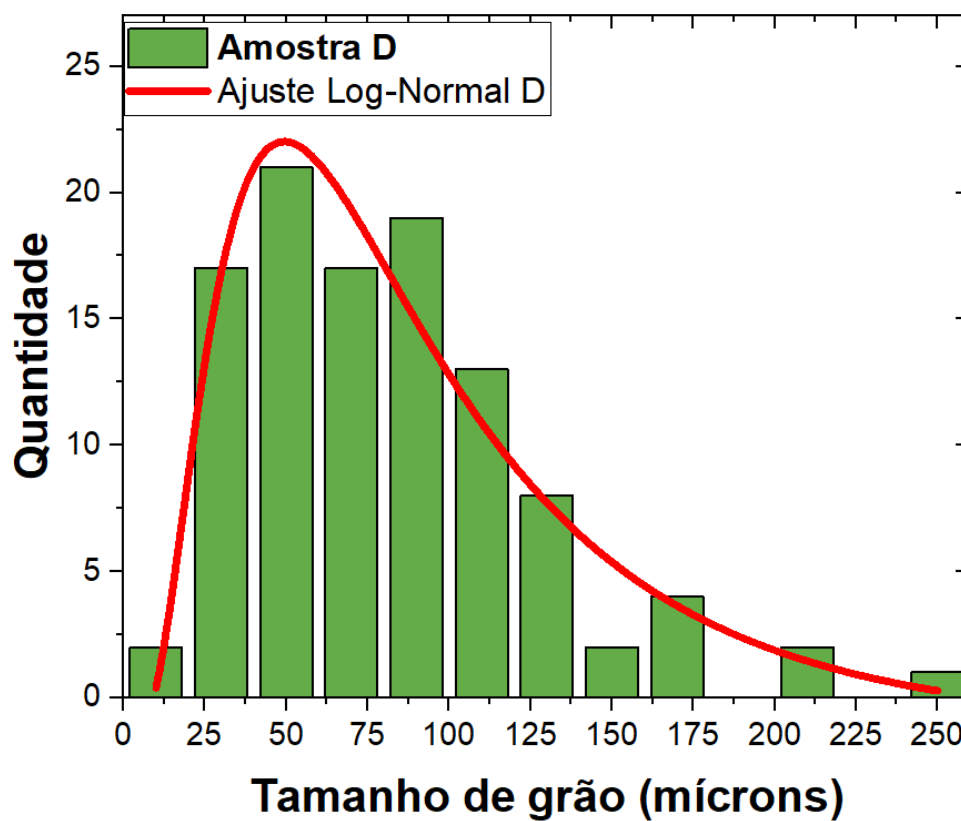
Fonte: autor.

Tabela 7 - Compilação dos valores de ajuste do histograma da amostra A

$u \pm \sigma$ (média – valor fixo) $\pm$ desvio padrão	R^2 (obtido no ajuste)
$81,7 \pm 0,7$	0,96

b.2. Amostra D

Figura 27 - Histograma: Distribuição de tamanho de grãos para amostra D



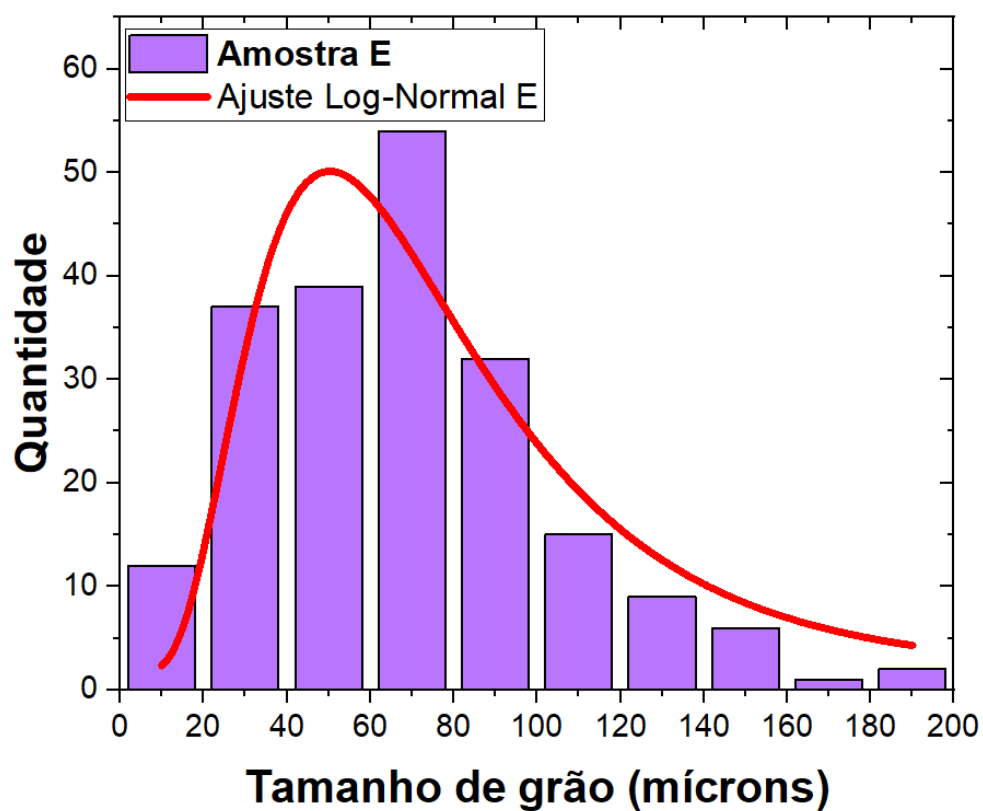
Fonte: autor.

Tabela 8 - Compilação dos valores de ajuste do histograma da amostra D

u (média – valor fixo) ± desvio padrão	R² (obtido no ajuste)
81,1 ± 0,7	0,94

b.3. Amostra E

Figura 28 – Histograma: Distribuição de tamanho de grãos para amostra E



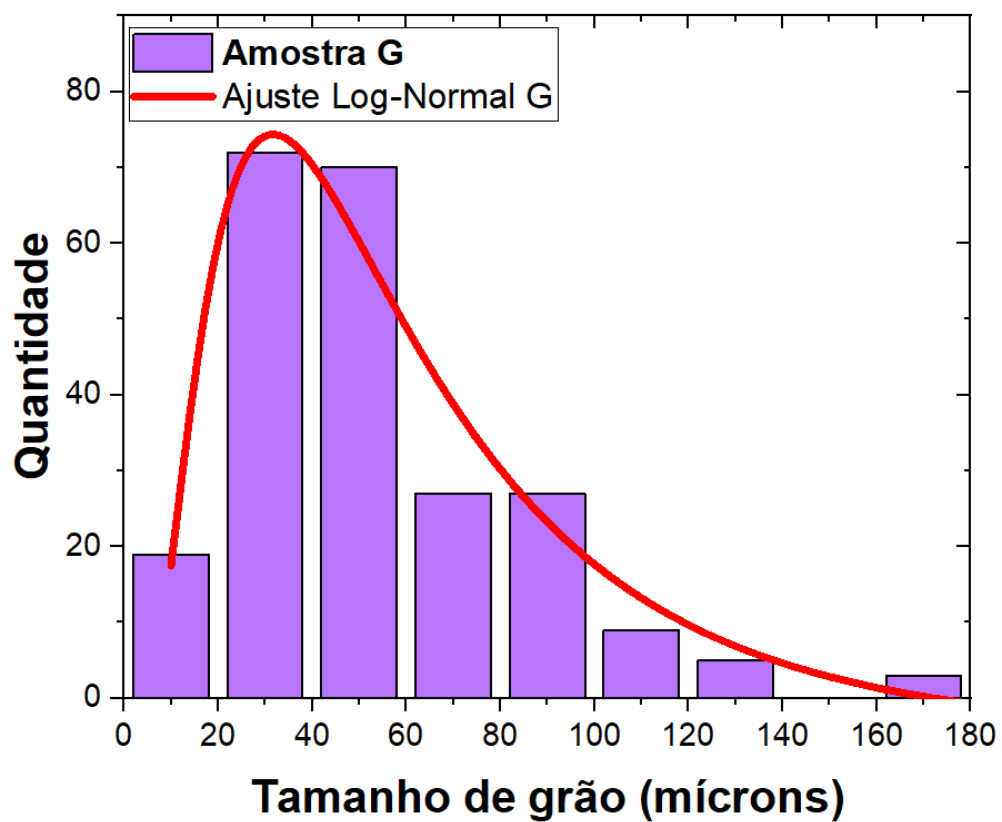
Fonte: autor.

Tabela 9 - Compilação dos valores de ajuste do histograma da amostra E

$u \pm \sigma$ (média – valor fixo) $\pm$ desvio padrão	R^2 (obtido no ajuste)
$67,9 \pm 0,6$	0,85

b.4. Amostra G

Figura 29 - Histograma: Distribuição de tamanho de grãos para amostra G



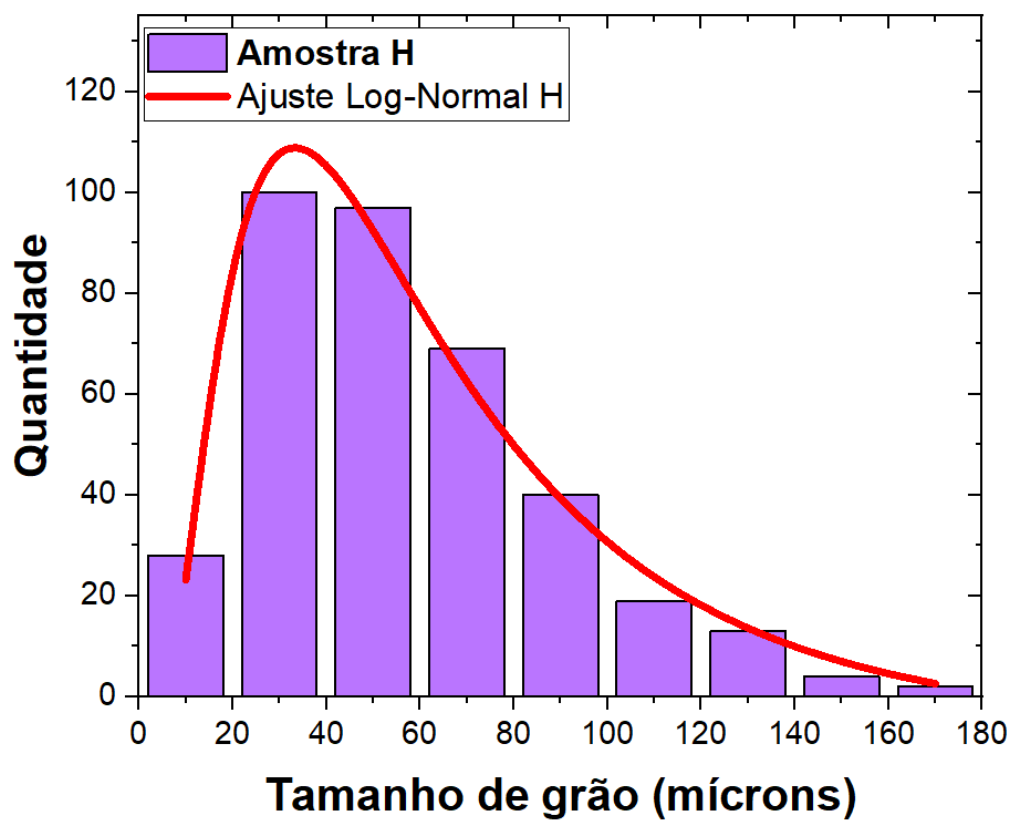
Fonte: autor.

Tabela 10 - Compilação dos valores de ajuste do histograma da amostra G

$u \pm \sigma$ (média – valor fixo) $\pm$ desvio padrão	R^2 (obtido no ajuste)
$53,9 \pm 0,7$	0,96

b.5. Amostra H

Figura 30 - Histograma: Distribuição de tamanho de grãos para amostra H



Fonte: autor.

Tabela 11 - Compilação dos valores de ajuste do histograma da amostra H

$\mu \pm \sigma$ (média – valor fixo) $\pm$ desvio padrão	R^2 (obtido no ajuste)
$57,3 \pm 0,7$	0,98

O ajuste de distribuição log-normal se mostrou aplicável aos histogramas plotados, uma vez que a diversidade de tamanhos de grão apresentou variabilidade de valores e uma distribuição não uniforme em torno da média geral.

c. Considerações sobre os métodos de medição de grão

Para o aço M350-50A foi observado que o valor de tamanho médio de grão da amostra D foi maior que o observado na amostra A, sendo 92,6 e 87,4 microns, respectivamente, quando se contou todas amostras, independente de apresentarem mais de 50 interseções em cada imagem. Quando se considerou as amostras com o mínimo de 50 interseções, a diferença de tamanho de grão entre as amostras D e A, pelo primeiro método foi de apenas 1,22%, de 80,7 e 81,7 microns, respectivamente. Quando se empregou o método de medição dos perímetros, foi observado novamente que a amostra D apresentou maiores valores que a amostra A, 272 e 312, respectivamente, mantendo a mesma tendência observada para o método de Heyn, considerando todas as amostras medidas, independentemente do número total de interseções.

De igual forma, no aço M530-54A foram observados pelos dois métodos de medição, valores que aprontaram para a amostra E como a correspondente ao maior tamanho médio de grão (66 microns) e maior perímetro (243 microns), quando comparado com as amostras G e H, também do mesmo aço. Como apontado anteriormente, as amostras G e H são do mesmo material cortado em sentidos de laminação diferente (longitudinal e transversal), então era esperado que ambas as técnicas apontassem para tamanhos de grão e perímetros próximos um do outro. No método de Heyn, a amostra G (54) e H (58 microns) apresentaram 7,6% de diferença nos valores de tamanho médio de grão, enquanto no método de medição dos perímetros, G (193) e H (198 microns) apresentaram apenas 2,5% de diferença entre os valores.

Ambos métodos empregados, tanto Heyn, quanto medição dos perímetros, apontaram para o aço M350-50A como sendo o de maior tamanho

médio de grão e o de maior perímetro de grão, quando comparado aos valores do M530-54A.

Por fim, foi observada uma correlação entre os diferentes métodos de medição de 0,28 em média. Rodrigues Junior (2010) utilizou duas técnicas de medição de grão diferentes para aços GNO e encontrou um fator de correlação entre elas de 0,36.

5.2 Análise das propriedades magnéticas

Essa seção de resultados de propriedades magnéticas está dividida em cinco partes. Na primeira, b.1, são exibidas as curvas de histerese e os resultados da perda total dos dois aços. A seguir, na parte b.2, é apresentada uma compilação dos valores obtidos nos ajustes matemáticos de separação de perdas, bem como os coeficientes relacionados. Na parte b.3, os gráficos com as perdas separadas e devidos cruzamentos observados. Na parte b.4 são discutidos os valores de remanência e coercividade. Por fim, na parte b.5, os valores referentes a permeabilidade relativa dos aços GNO em estudo.

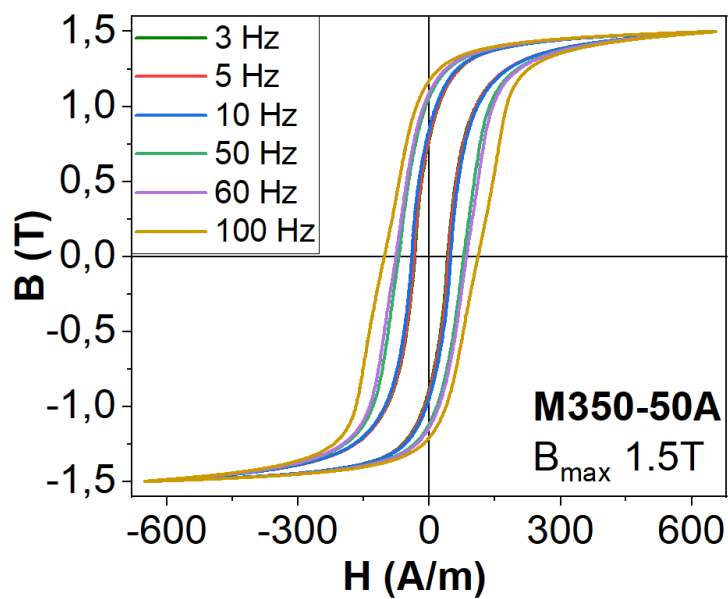
a. Perdas totais

A seguir são mostradas as curvas de histerese a 1,5 T (frequências de 3 a 100 Hz) e 1 T (de 200 a 2000 Hz) para os aços GNO M350-50A e M530-54A. Na sequência é feito um comparativo da perda total nos dois aços.

A Figura 31¹ exibe as curvas de histerese na indução máxima de 1,5 T para as frequências de 3, 5, 10, 50, 60 e 100 Hz para o aço M350-50A.

¹ Para estes gráficos, o equipamento de medida nos retorna valores de Polarização (J), em vez de Indução (B). Entretanto, a diferença de valores entre eles é da ordem de 10^{-5} . Desta forma, mantivemos a letra B nos gráficos desse trabalho, por ser mais usual.

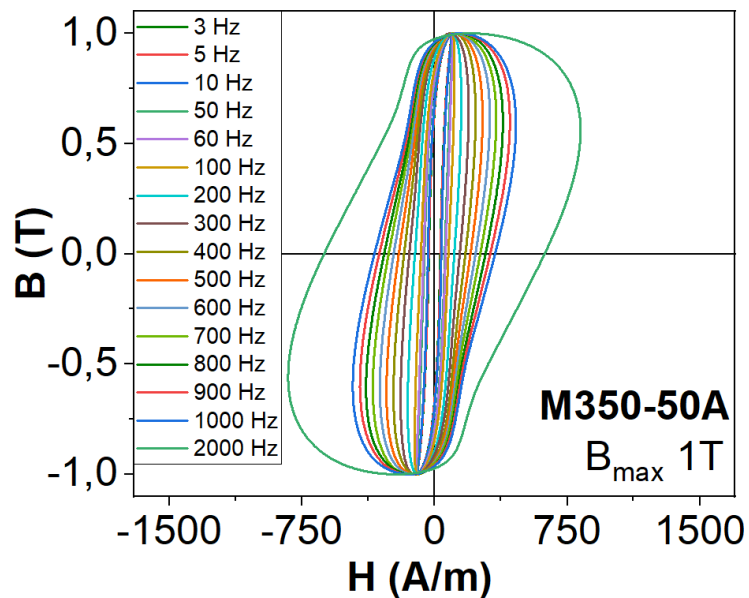
Figura 31 - Curvas de histerese para o aço M350-50A a 1,5 T, de 3 a 100 Hz



Fonte: autor.

A Figura 32 mostra as curvas de histerese na indução máxima de 1 T para todos os valores de frequência, de 3 a 2000 Hz para o aço M350-50A.

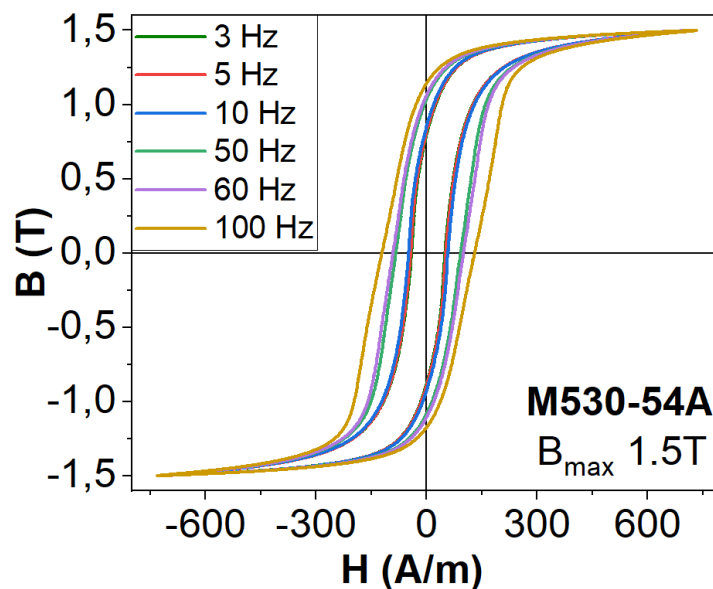
Figura 32 - Curvas de histerese para o aço M350-50A a 1 T, de 3 a 2000 Hz



Fonte: autor.

A Figura 33 traz as curvas de histerese na indução máxima de 1,5 T para as frequências de 3, 5, 10, 50, 60 e 100 Hz para o aço M530-54A.

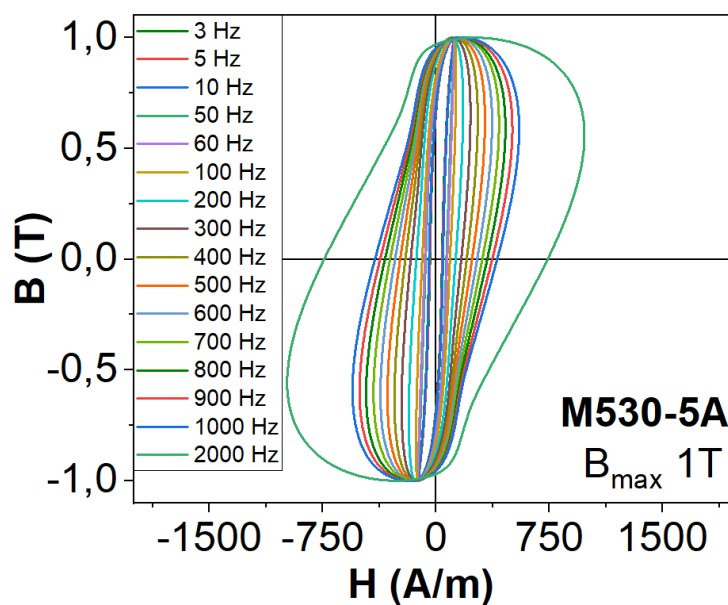
Figura 33 - Curvas de histerese para o aço M530-54A a 1,5 T, de 3 a 100 Hz



Fonte: autor.

A Figura 34 exibe as curvas de histerese na indução máxima de 1 T para todos os valores de frequência, de 3 a 2000 Hz para o aço M530-54A.

Figura 34 - Curvas de histerese para o aço M530-54A a 1 T, de 3 a 2000 Hz



Fonte: autor.

A Tabela 12 aponta os valores de perda total, P_t , em W/kg, para os aços M350-50A e M530-54A, na indução máxima de 1,5 T, para frequências de 3 a 100 Hz.

Tabela 12 - Perda total para os aços GNO na indução de 1,5 T

Frequência (Hz)	Perda total (W/kg) a 1,5 T		Diferença (%)
	M350-50A	M530-54A	
3	0,102	0,121	15,70
5	0,175	0,206	15,05
10	0,377	0,446	15,47
50	2,889	3,321	13,01
60	3,746	4,296	12,80
100	8,032	9,182	12,52

Fonte: autor.

Os valores de perdas para o aço M530-54A se mostraram superiores aos do aço concorrente em todos cenários de frequências analisadas. Isso corrobora com o que foi apontado por Fukuhara et al. (2012), Chaudhury et al. (2007), De Campos, Teixeira e Landgraf (2006), no sentido de que, quanto maior o tamanho de grão, menores serão as perdas magnéticas totais, efeito especialmente observado em aços GNO de tamanho de grão médio até cerca de 100 microns.

Ghosh et al. (2014) observaram que, para a condição de tamanho de grão de 108 a 152 microns, nos aços GNO que apresentavam percentual de Si em sua composição variando de 2,78 a 3,61%, pode ocorrer a correlação inversa, ou seja, aumentar o tamanho de grão do material (pelo processo de recozimento, por exemplo), fará com que as perdas totais aumentem, o que foi percebido de forma mais acentuada nas frequências mais altas, 400 e 1000 Hz, tanto para induções de 1 quanto 1,5 T.

Já Pedrosa, Paolinelli e Cota (2015) analisaram as propriedades magnéticas de um aço GNO com 3,4% de Si em diferentes temperaturas de recozimento, o que proporcionou diferentes tamanhos de grão ao material. Os resultados a 1,5 T e 60 Hz indicaram que de 50 a 200 microns, quanto maior o

tamanho de grão do material, menores foram as perdas totais medidas, enquanto a partir de 230 até próximo de 350 microns, as perdas magnéticas aumentaram.

Como apontado anteriormente, o aço M350-50A apresentou tamanho de grão na ordem de 80 microns e menores perdas que o M530-54A, que possui tamanho de grão em torno de 60 microns. A tabela ainda aponta a diferença percentual entre as perdas no comparativo das frequências. Essas diferenças observadas foram de 12,5%, para a menor diferença percentual, e de 15,7% para a maior diferença. É interessante observar que, para as frequências observadas, quanto maior a frequência de medida, menores foram as diferenças percentuais de perda magnética nos dois aços.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de perda total, em W/kg, para os dois aços em estudo, na indução máxima de 1 T, para frequências de 3 a 2000 Hz.

Nessas condições foi observado novamente que os valores de perda total do aço M530-54A são maiores do que o outro aço em estudo, e as diferenças percentuais entre os valores variaram entre 13,86 e 18,18%. Entretanto, dessa vez, diferente do cenário para 1,5 T, não foi percebida a diminuição sucessiva dos valores de diferença percentual com o aumento da frequência, tal como observado na condição de indução máxima anterior.

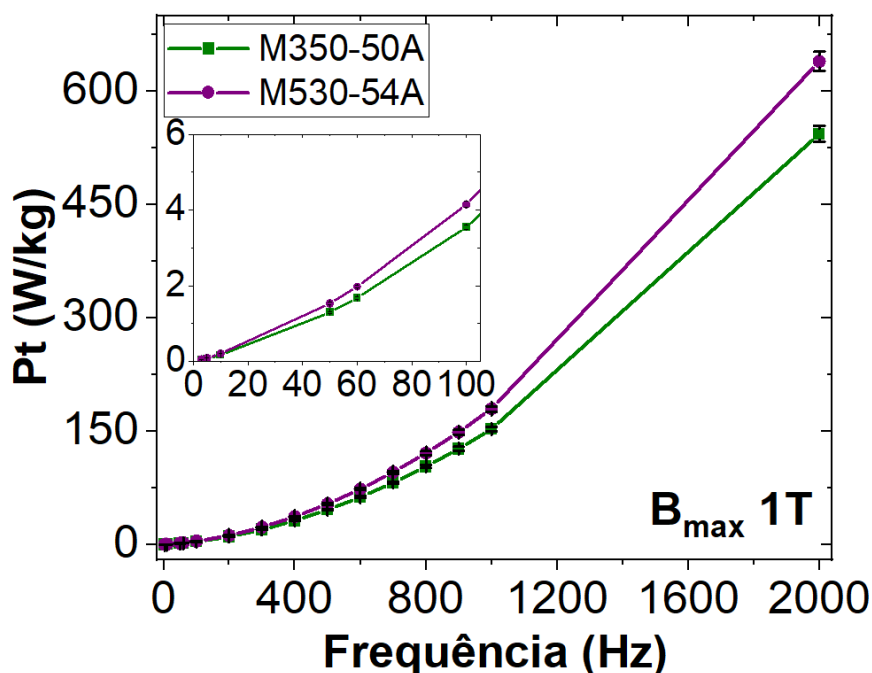
Tabela 13 - Perda total para os aços GNO na indução de 1 T

Frequência (Hz)	Perda total (W/kg) a 1 T		Diferença (%)
	M350-50A	M530-54A	
3	0,045	0,055	18,18
5	0,078	0,095	17,89
10	0,169	0,206	17,96
50	1,298	1,533	15,33
60	1,679	1,977	15,07
100	3,547	4,145	14,43
200	10,177	11,814	13,86
300	19,542	22,717	13,98
400	31,487	36,635	14,05
500	45,881	53,462	14,18
600	62,614	73,151	14,40
700	81,658	95,502	14,50
800	103,010	120,747	14,69
900	126,536	148,504	14,79
1000	152,510	179,381	14,98
2000	543,215	639,086	15

Fonte: autor.

A Figura 35 mostra graficamente a evolução das perdas totais em relação a frequência para a indução de 1 T, nas frequências de 3 a 2000 Hz. Os valores foram acrescidos da barra de erro de 2% (desvio experimental do equipamento) e na inserção são destacados os valores para as frequências de 3 a 100 Hz.

Figura 35 - Gráfico da perda total para os dois aços na indução de 1 T, para as frequências de 3 a 2000 Hz

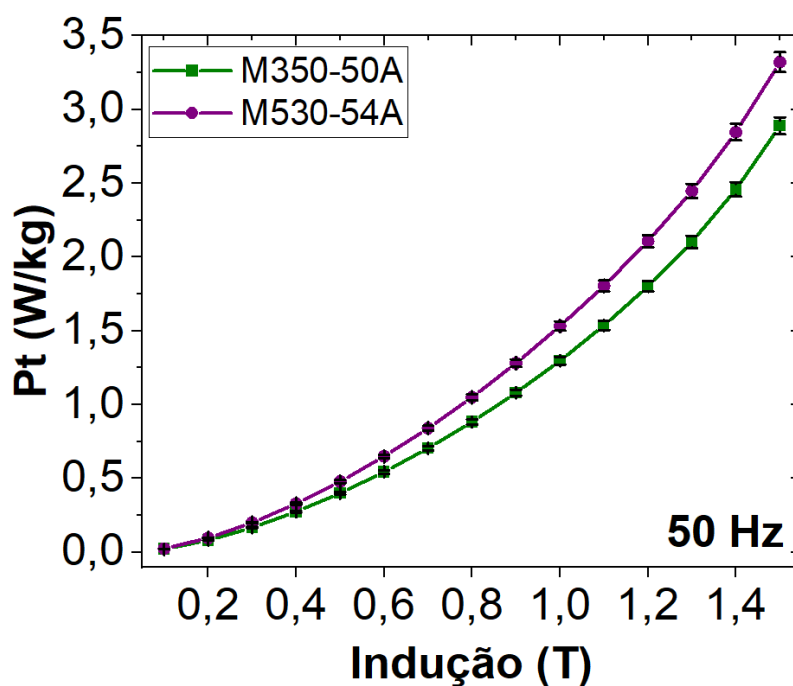


Fonte: autor.

Ao analisar a evolução das perdas totais dos dois aços de acordo com o aumento da frequência, é possível perceber que o aço M530-54A, de tamanho médio de grão 59 microns, foi o que apresentou valores superiores desse parâmetro em todos os cenários observados quando comparado ao aço M350-50A. No cenário de 2000 Hz, a P_t do aço M530-54A, em roxo é equivalente a 639 W/kg, enquanto para o outro aço, igual a 543 W/kg, o que representa uma diferença percentual de 15% entre eles.

Quando se analisa a perda total em função da indução magnética, trabalhando com valores de 0,1 a 1,5 T, numa frequência de 60Hz, o comparativo se dá conforme mostrado na Figura 36.

Figura 36 - Gráfico da perda total para os dois aços na frequência de 60 Hz, para as induções de 0,1 a 1,5 T



Fonte: autor.

Nessas condições, é observado também a prevalência de maiores valores de perda total para o aço M530-54A em todos os cenários. Na condição de 1,5 T, o valor de P_t para esse aço foi de 4,30 W/kg, enquanto para o aço M350-50A, de 3,75 W/kg, o que representa uma diferença percentual de 12,8%, como apontado anteriormente na Tabela 12.

Paltanea et al. (2019) estudaram a eficiência dos aços elétricos GNO aplicados em motores elétricos e como suas propriedades magnéticas eram afetadas pelas diferentes técnicas de corte. Nas análises de perdas em função da indução para o aço GNO M300-35A, foram obtidas curvas características semelhantes ao comportamento da apresentada, com as mesmas tendências.

Por fim, a Tabela 14 apresenta o comparativo das perdas totais medidas comparando-as com o valor de referência do catálogo da fabricante.

Tabela 14 - Comparativo dos valores de referência com os valores medidos de P_t

Aço	Indução (T)	Frequência (Hz)	Perda total (W/kg)		Diferença (%)
			Medida no <i>Brockhaus</i>	Catálogo Aperam 2015	
M350-50A	1	50	1,30	1,33	2,3
	1	60	1,68	1,72	2,3
	1,5	50	2,89	2,94	1,7
	1,5	60	3,75	3,82	1,8
M530-54A	1	50	1,53	1,53	-
	1	60	1,98	1,95	1,5
	1,5	50	3,32	3,31	0,3
	1,5	60	4,30	4,27	0,7

Fonte: Aperam South America (2015) e autor.

Os resultados comparados apontaram para valores semelhantes e coincidentes dentro da margem de erro experimental de 2%, quando comparado os valores medidos e os de referência.

b. Ajuste matemático para separação das perdas

Como descrito na revisão bibliográfica, o valor de coeficiente da perda parasita, C_p , pode ser calculado pelo método de separação de perdas de Bertotti. Para o cálculo, os valores das variáveis considerados estão apontados na Tabela 15. Os valores de resistividade elétrica foram informados pela empresa fabricante do material.

Tabela 15 - Valores considerados para as variáveis no cálculo de C_p

Aço	Espessura (m)	Resistividade elétrica ($\Omega.m$)	Densidade (kg/m^3)
M350-50A	$5,0 \times 10^{-4}$	$3,477 \times 10^{-7}$	7750
M530-54A	$5,4 \times 10^{-4}$	$3,457 \times 10^{-7}$	

Fonte: autor.

A seguir, tendo como referência os valores apresentados na tabela anterior, foram calculados os valores de C_p referentes a cada uma das induções (0,1 a 1,5 T) para cada um dos aços. Os valores obtidos estão compilados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores obtidos no cálculo de C_p

Indução (T)	C_p M350-50A (J.s/kg)	C_p M530-54A (J.s/kg)
0,1	$1,50 \times 10^{-6}$	$1,80 \times 10^{-6}$
0,2	$6,00 \times 10^{-6}$	$7,20 \times 10^{-6}$
0,3	$1,35 \times 10^{-5}$	$1,62 \times 10^{-5}$
0,4	$2,40 \times 10^{-5}$	$2,88 \times 10^{-5}$
0,5	$3,75 \times 10^{-5}$	$4,49 \times 10^{-5}$
0,6	$5,40 \times 10^{-5}$	$6,47 \times 10^{-5}$
0,7	$7,36 \times 10^{-5}$	$8,81 \times 10^{-5}$
0,8	$9,61 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-4}$
0,9	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-4}$
1	$1,50 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-4}$
1,1	$1,82 \times 10^{-4}$	$2,18 \times 10^{-4}$
1,2	$2,16 \times 10^{-4}$	$2,59 \times 10^{-4}$
1,3	$2,54 \times 10^{-4}$	$3,04 \times 10^{-4}$
1,4	$2,94 \times 10^{-4}$	$3,52 \times 10^{-4}$
1,5	$3,38 \times 10^{-4}$	$4,05 \times 10^{-4}$

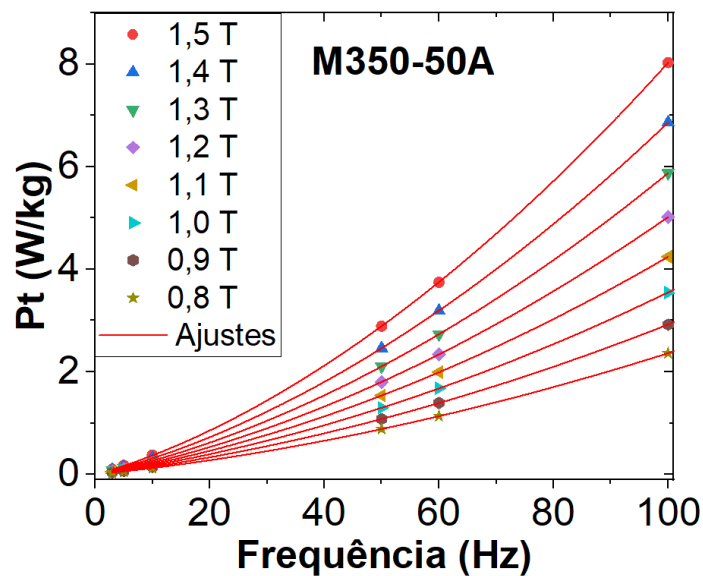
Fonte: autor.

Assim, conhecendo os valores do coeficiente de perda parasita referentes a uma indução específica naquele aço, o próximo passo foi a realização dos ajustes matemáticos para separação de perdas para se obter os coeficientes C_h e C_e . As duas próximas seções apresentam os valores obtidos nos ajustes para cada aço, separadamente.

b.1. Ajustes para obtenção de C_h e C_e no aço M350-50A

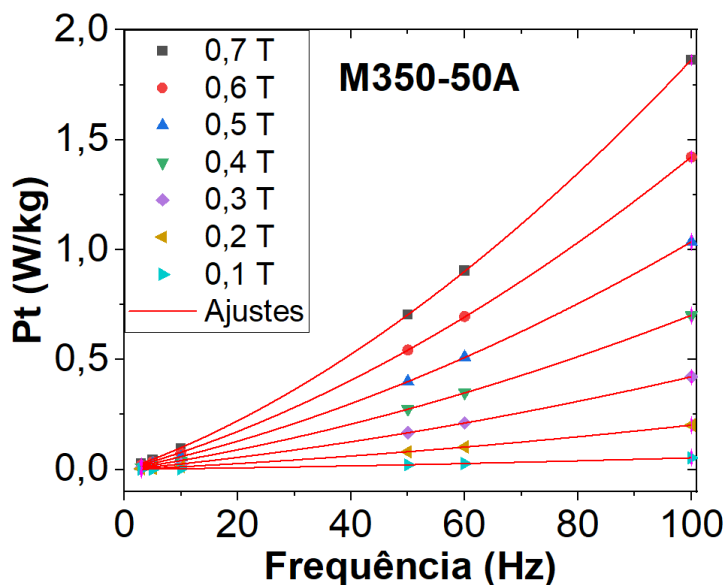
Utilizando o software *OriginPro*, foram inseridos os valores de C_p , a fim de se realizar um ajuste matemático para cada indução, de 0,1 a 1,5 T, obtendo diversos valores referentes a C_h e C_e . As imagens dos ajustes realizados para o aço M350-50A, são compiladas a seguir, na Figura 37 (1,5 a 0,8 T) e na Figura 38 (0,7 a 0,1 T) onde P_t , no eixo y, está expressa em W/kg.

Figura 37 - Imagens dos ajustes matemáticos para o aço M350-50A, de 1,5 a 0,8 T



Fonte: autor.

Figura 38 - Imagens dos ajustes matemáticos para o aço M350-50A, de 0,7 a 0,1 T



Fonte: autor.

A Tabela 17 agrega todos os valores obtidos nos ajustes para os coeficientes C_h e C_e no aço M350-50A.

Tabela 17 - Valores obtidos de C_h e C_e no ajuste – aço M350-50A

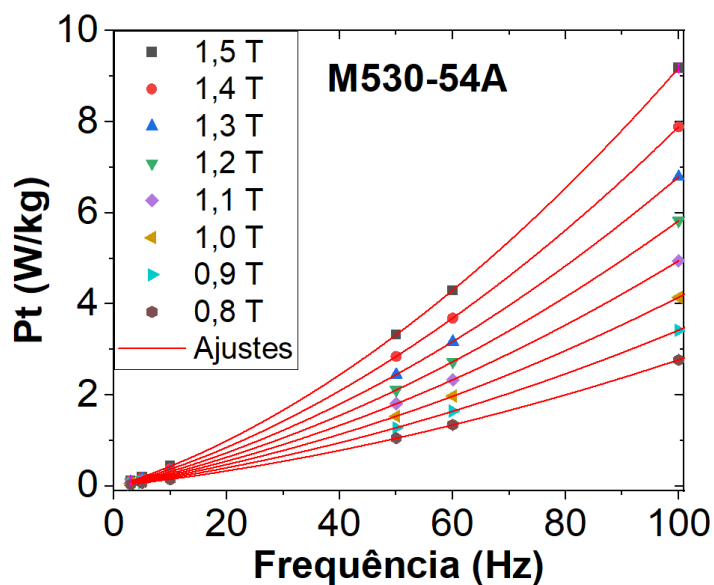
Indução (T)	Coeficientes obtidos pelo ajuste ± incertezas		R^2
	C_h (J/kg)	C_e (J.s ^{0,5} /kg)	
0,1	$(2,88 \pm 0,03) \times 10^{-4}$	$(9,4 \pm 0,3) \times 10^{-6}$	1
0,2	$(1,000 \pm 0,008) \times 10^{-3}$	$(3,37 \pm 0,09) \times 10^{-5}$	1
0,3	$(2,00 \pm 0,03) \times 10^{-3}$	$(6,9 \pm 0,3) \times 10^{-5}$	0,999
0,4	$(3,50 \pm 0,06) \times 10^{-3}$	$(1,12 \pm 0,06) \times 10^{-4}$	0,999
0,5	$(4,90 \pm 0,09) \times 10^{-3}$	$(1,6 \pm 0,1) \times 10^{-4}$	0,999
0,6	$(6,0 \pm 0,2) \times 10^{-3}$	$(2,3 \pm 0,1) \times 10^{-4}$	0,999
0,7	$(8,0 \pm 0,2) \times 10^{-3}$	$(3,0 \pm 0,2) \times 10^{-4}$	0,999
0,8	$(1,00 \pm 0,02) \times 10^{-2}$	$(3,9 \pm 0,2) \times 10^{-4}$	0,999
0,9	$(1,18 \pm 0,02) \times 10^{-2}$	$(5,2 \pm 0,2) \times 10^{-4}$	0,999
1	$(1,36 \pm 0,01) \times 10^{-2}$	$(6,8 \pm 0,2) \times 10^{-4}$	1
1,1	$(1,500 \pm 0,007) \times 10^{-2}$	$(8,90 \pm 0,08) \times 10^{-4}$	1
1,2	$(1,70 \pm 0,01) \times 10^{-2}$	$(1,10 \pm 0,01) \times 10^{-3}$	1
1,3	$(1,97 \pm 0,02) \times 10^{-2}$	$(1,40 \pm 0,02) \times 10^{-3}$	1
1,4	$(2,30 \pm 0,03) \times 10^{-2}$	$(1,60 \pm 0,03) \times 10^{-3}$	1
1,5	$(2,75 \pm 0,04) \times 10^{-2}$	$(1,90 \pm 0,04) \times 10^{-3}$	1

Fonte: autor.

b.2. Ajustes para obtenção de C_h e C_e no aço M530-54A

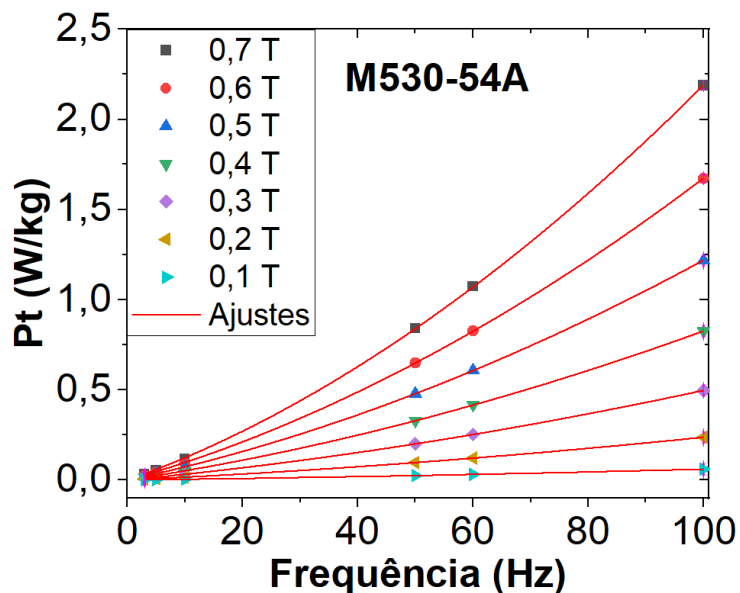
Os ajustes de separação de perda no aço M530-54A seguiram a mesma metodologia empregada para o aço anterior. Na Figura 39 (1,5 a 0,8 T) e na Figura 40 (0,7 a 0,1 T) são mostradas as imagens referentes a esses ajustes.

Figura 39 - Imagens dos ajustes matemáticos para o aço M530-54A, de 1,5 a 0,8 T



Fonte: autor.

Figura 40 - Imagens dos ajustes matemáticos para o aço M350-50A, de 0,7 a 0,1 T



Fonte: autor.

A Tabela 18 compila os valores obtidos nos ajustes para os coeficientes C_h e C_e no aço M530-54A.

Tabela 18 - Valores obtidos de C_h e C_e no ajuste – aço M530-54A

Indução (T)	Coeficientes obtidos pelo ajuste ± incertezas		R ²
	C_h (J/kg)	C_e (J.s ^{0,5} /kg)	
0,1	$(3,41 \pm 0,02) \times 10^{-4}$	$(7,9 \pm 0,3) \times 10^{-6}$	1
0,2	$(1,00 \pm 0,01) \times 10^{-3}$	$(2,7 \pm 0,1) \times 10^{-5}$	1
0,3	$(2,8 \pm 0,04) \times 10^{-3}$	$(5,3 \pm 0,4) \times 10^{-5}$	0,999
0,4	$(4,50 \pm 0,08) \times 10^{-3}$	$(8,5 \pm 0,8) \times 10^{-5}$	0,999
0,5	$(6,4 \pm 0,1) \times 10^{-3}$	$(1,3 \pm 0,1) \times 10^{-4}$	0,999
0,6	$(8,0 \pm 0,2) \times 10^{-3}$	$(1,8 \pm 0,2) \times 10^{-4}$	0,999
0,7	$(1,10 \pm 0,02) \times 10^{-2}$	$(2,4 \pm 0,2) \times 10^{-4}$	0,999
0,8	$(1,30 \pm 0,02) \times 10^{-2}$	$(3,3 \pm 0,3) \times 10^{-4}$	0,999
0,9	$(1,50 \pm 0,02) \times 10^{-2}$	$(4,5 \pm 0,3) \times 10^{-4}$	0,999
1	$(1,70 \pm 0,02) \times 10^{-2}$	$(6,2 \pm 0,2) \times 10^{-4}$	1
1,1	$(1,900 \pm 0,009) \times 10^{-2}$	$(8,4 \pm 0,1) \times 10^{-4}$	1
1,2	$(2,17 \pm 0,01) \times 10^{-2}$	$(1,10 \pm 0,01) \times 10^{-3}$	1
1,3	$(2,49 \pm 0,02) \times 10^{-2}$	$(1,30 \pm 0,02) \times 10^{-3}$	1
1,4	$(2,89 \pm 0,03) \times 10^{-2}$	$(1,50 \pm 0,03) \times 10^{-3}$	1
1,5	$(3,40 \pm 0,04) \times 10^{-2}$	$(1,70 \pm 0,05) \times 10^{-3}$	1

Fonte: autor.

Além dos valores dos coeficientes obtidos nos ajustes de separação de perda, outro fator de validação dos mesmos são um R² próximo de 1, o que foi alcançado em todos os casos para ajustes de 3 a 100 Hz. Ainda, como pôde ser visto nas imagens compiladas, a curva de ajuste coincidiu com todos os pontos experimentais.

Foram ainda, realizadas tentativas de ajustes para a escala de frequência de 3 a 2000 Hz e para 3 a 400 Hz, ambos até 1 T, porém, nenhum desses cenários apresentou resultados de ajuste, coeficientes, R^2 e/ou ajuste da curva com os dados experimentais de forma satisfatória.

A separação de perdas na mesma faixa de frequências, até 100 Hz, foi estudada por Pluta (PLUTA, 2010) para aços GO e GNO, incluindo o M530-50A, semelhante ao aqui estudado, porém de menor espessura. O autor observou que para o cenário de 1,5 T, os aços GNO apresentaram C_h na ordem de grandeza de 10^{-2} , o que corroborou com o coeficiente obtido nos ajustes apresentados, de 0,0275 para o M350-50A e de 0,0340 para o M530-54A.

Os autores Novak et al. (2017) analisaram as perdas magnéticas nos aços M350-50A e M530-54A através do modelo de separação de perdas de Steinmetz, que também considera coeficientes que multiplicam as perdas, de maneira semelhante ao método estudado nesse trabalho, e encontraram valores do coeficiente da perda por histerese de 0,0132 para o M350-50A e de 0,0229 para o M530-54A, mesma ordem de grandeza encontrada nos ajustes desse trabalho.

Rodrigues Junior (2010) encontrou valores de R^2 entre 0,95 e 0,99 ao realizar a separação de perdas para aços GNO.

Na literatura são encontradas outras metodologias de separação de perdas magnéticas, como o método de Steinmetz e modelos de redes neurais, sendo que o método de Bertotti, segundos os ajustes realizados, se mostrou adequado quando utilizadas frequências mais baixas, de 3 a 100 Hz (CHEN et al., 2022; HE; KIM; KOH, 2022; KOPRIVICA; DIVAC, 2021; NOVAK et al., 2017; PLUTA, 2010, 2013, DLALA, 2009).

c. P_h , P_p e P_e e seus comportamentos

Encontrados os valores de C_h e C_e , juntamente com os coeficientes da perda parasita, calculado anteriormente, foi possível calcular os valores de perda por histerese, parasita e em excesso, e ainda, foi possível observar como cada uma dessas perdas se comportavam conforme o aumento da indução e da frequência em cada um dos aços. São apontadas também as discussões

observadas entre as propriedades magnéticas e o tamanho de grão dos dois aços estudados nesse trabalho.

c.1. P_h , P_p e P_e e comportamentos para o aço M350-50A

A Tabela 19 exibe os valores das perdas magnéticas separadas para o aço M350-50A, organizadas de acordo com as induções de 0,1 a 1,5 T para a frequência de 50 Hz.

Tabela 19 - Valores encontrados para P_h , P_p e P_e a 50 Hz – aço M350-50A

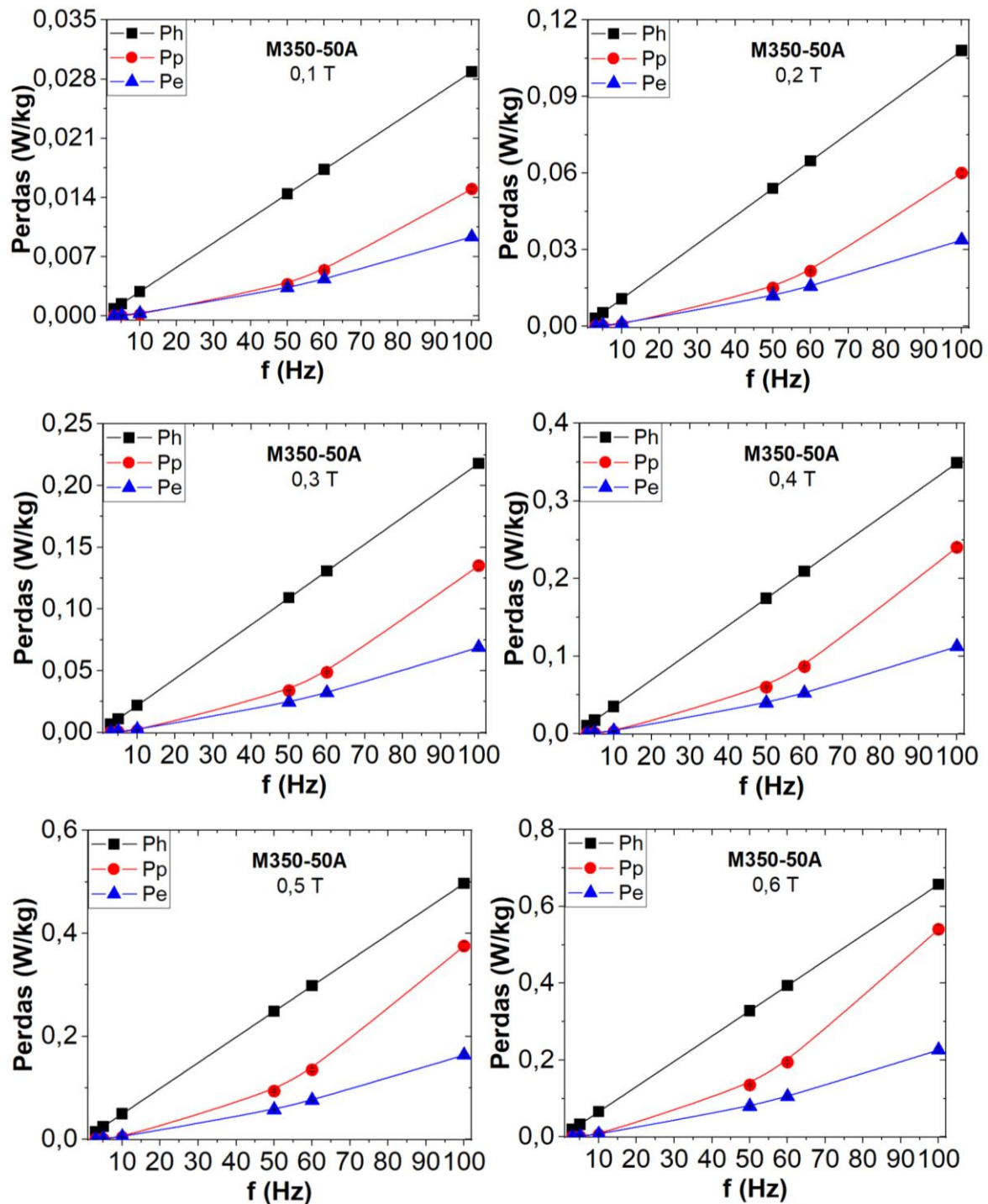
Indução (T)	Perdas magnéticas (W/kg)		
	por histerese	parasita	em excesso
0,1	0,014	0,004	0,003
0,2	0,054	0,015	0,012
0,3	0,109	0,034	0,024
0,4	0,175	0,060	0,040
0,5	0,249	0,094	0,058
0,6	0,329	0,135	0,080
0,7	0,414	0,184	0,107
0,8	0,502	0,240	0,141
0,9	0,592	0,304	0,185
1	0,681	0,375	0,242
1,1	0,770	0,454	0,315
1,2	0,865	0,540	0,400
1,3	0,990	0,634	0,481
1,4	1,161	0,736	0,566
1,5	1,375	0,844	0,672

Fonte: autor.

Com esses valores foi possível traçar os gráficos com as perdas separadas para todas induções nas frequências de 3 a 100 Hz. Os gráficos estão compilados na Figura 41 (0,1 a 0,6 T), Figura 42 (0,7 a 1,2 T) e na Figura

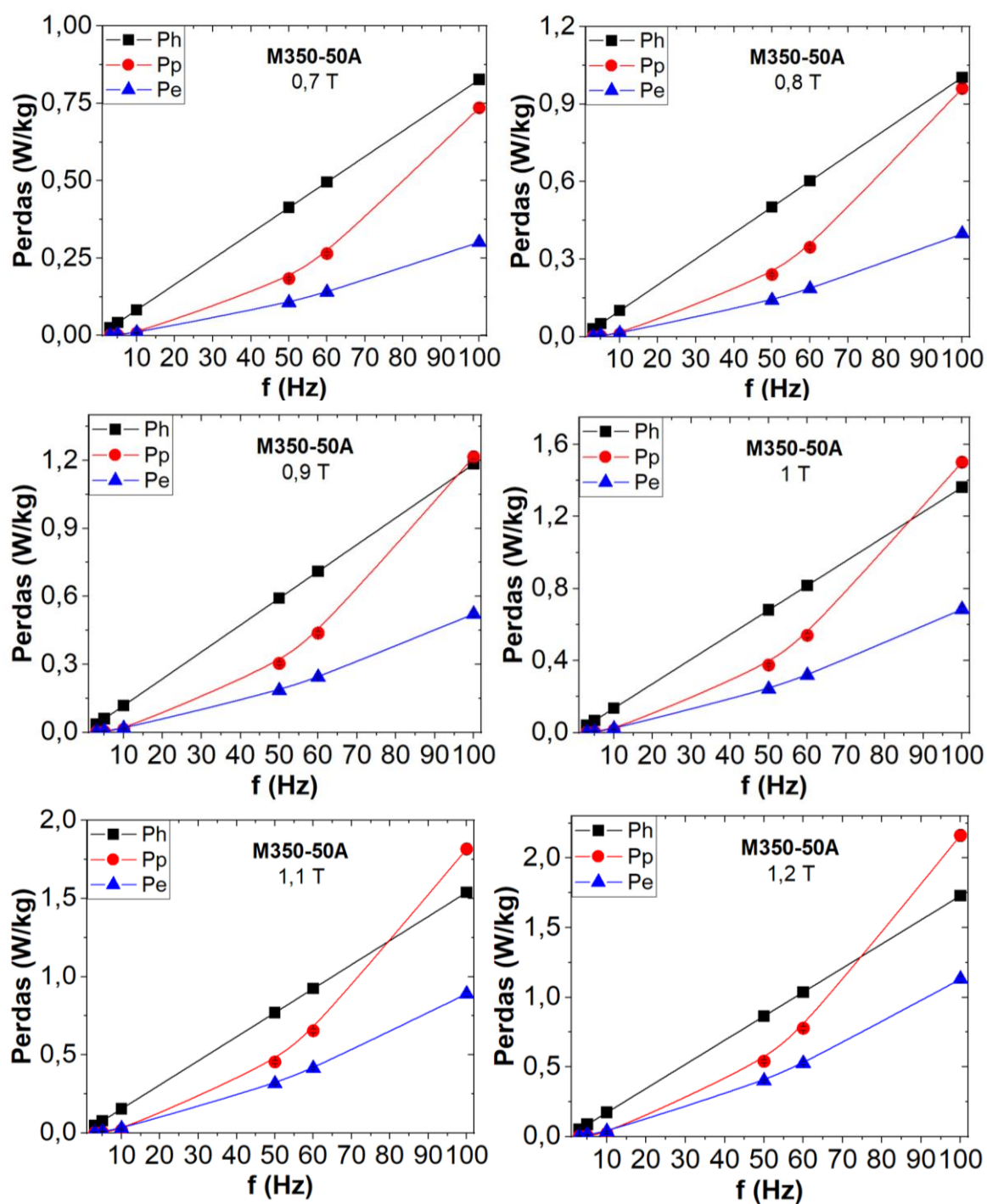
43 (1,3 a 1,5 T). Foi incluída a barra de erro de 2% nos dados das perdas. As linhas são guias para os olhos.

Figura 41 - Gráficos de P_h , P_p e P_e versus frequência para o aço M350-50A, de 0,1 a 0,6 T



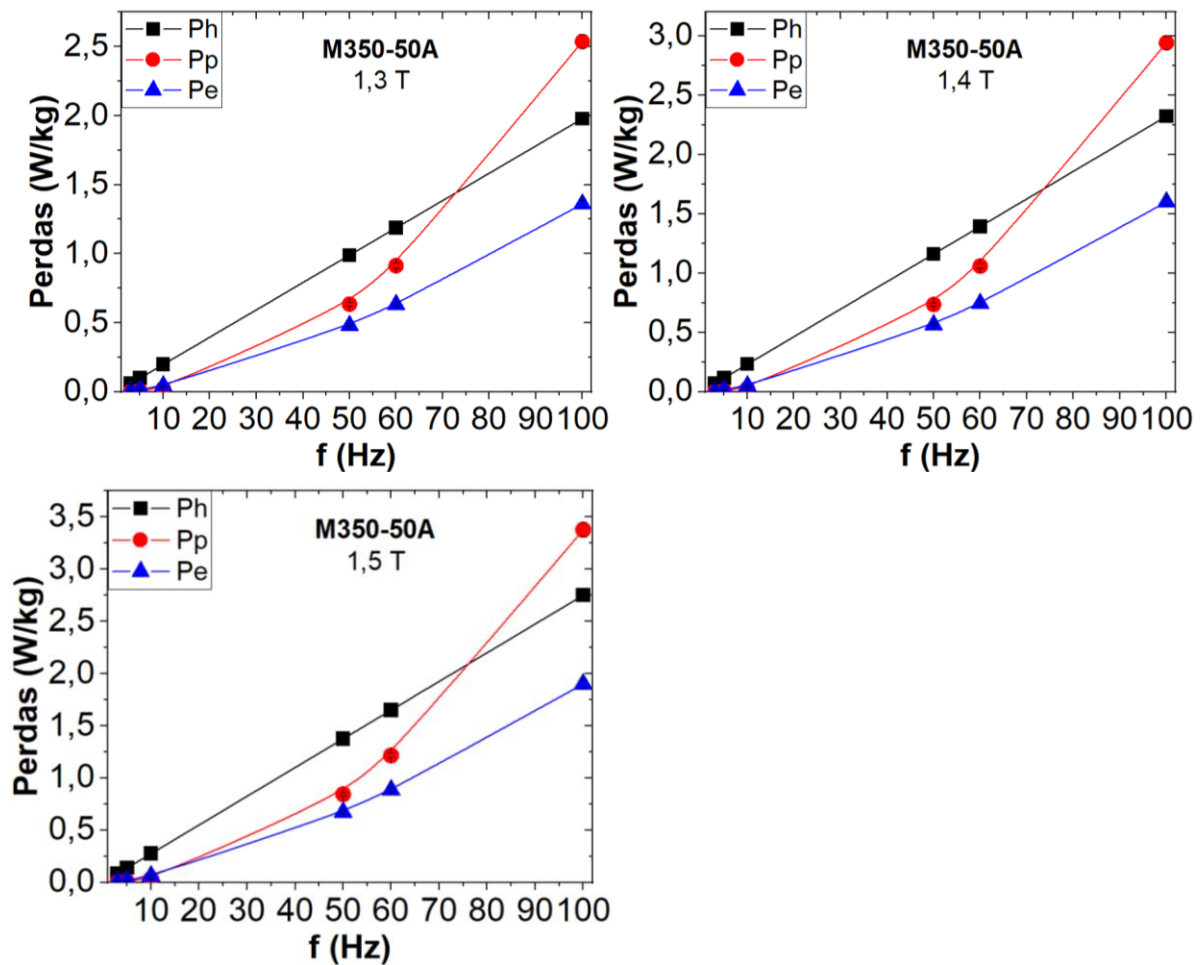
Fonte: autor.

Figura 42 - Gráficos de P_h , P_p e P_e versus frequência para o aço M350-50A, de 0,7 a 1,2 T



Fonte: autor.

Figura 43 - Gráficos de P_h , P_p e P_e versus frequência para o aço M350-50A, de 1,3 a 1,5 T



Fonte: autor.

Foi observado que, para as induções de 0,1 a 0,8 T, houve predominância da perda por histerese, destacada em preto nos gráficos. Em seguida, as perdas parasitas, em vermelho, e as perdas em excesso, em azul, a menor das três. À medida que é aumentada a indução, observa-se a aproximação da perda parasita em relação a perda por histerese, aumentando de forma mais intensa que P_h conforme o aumento da indução magnética.

Ao se atingir a indução de 0,9 T, ocorreu o cruzamento da perda parasita com perda por histerese, e a partir desse momento, para todas induções, até 1,5 T, essa perda, P_p , se torna a dominante. Novamente P_e foi a menor das perdas para essa faixa de induções.

c.2. P_h , P_p e P_e e comportamentos para o aço M530-54A

A Tabela 20 mostra os valores encontrados para as perdas magnéticas separadas no aço M530-54A, na frequência de 50 Hz. Novamente esses dados são organizados de acordo com as induções, de 0,1 a 1,5 T.

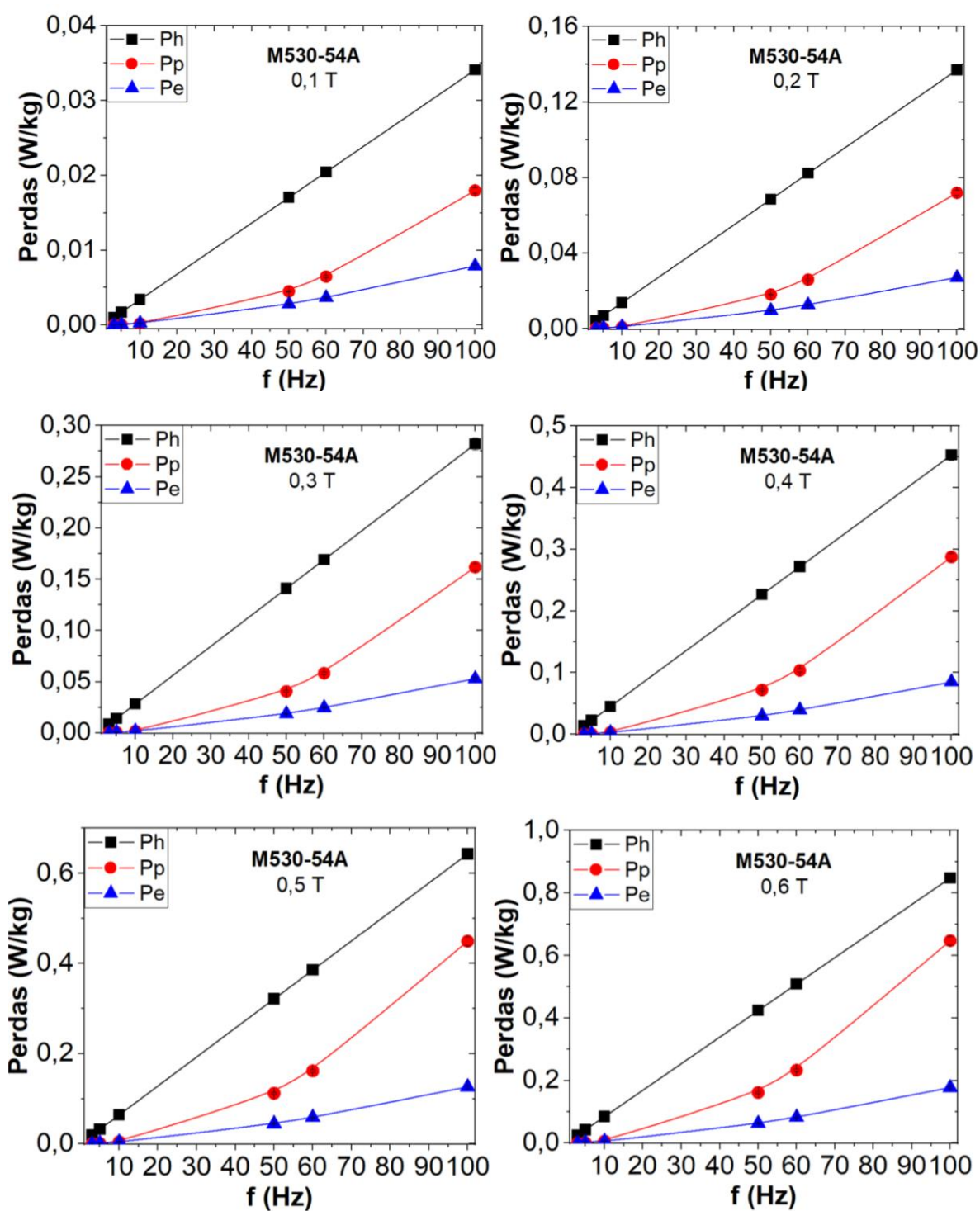
Tabela 20 - Valores encontrados para P_h , P_p e P_e a 50 Hz – aço M530-54A

Indução (T)	Perdas magnéticas (W/kg)		
	por histerese	parasita	em excesso
0,1	0,017	0,004	0,003
0,2	0,069	0,018	0,010
0,3	0,141	0,040	0,019
0,4	0,227	0,072	0,030
0,5	0,322	0,112	0,045
0,6	0,424	0,162	0,063
0,7	0,533	0,220	0,086
0,8	0,645	0,288	0,118
0,9	0,757	0,364	0,161
1	0,867	0,449	0,217
1,1	0,968	0,544	0,296
1,2	1,087	0,647	0,375
1,3	1,243	0,760	0,449
1,4	1,448	0,881	0,520
1,5	1,699	1,011	0,615

Fonte: autor.

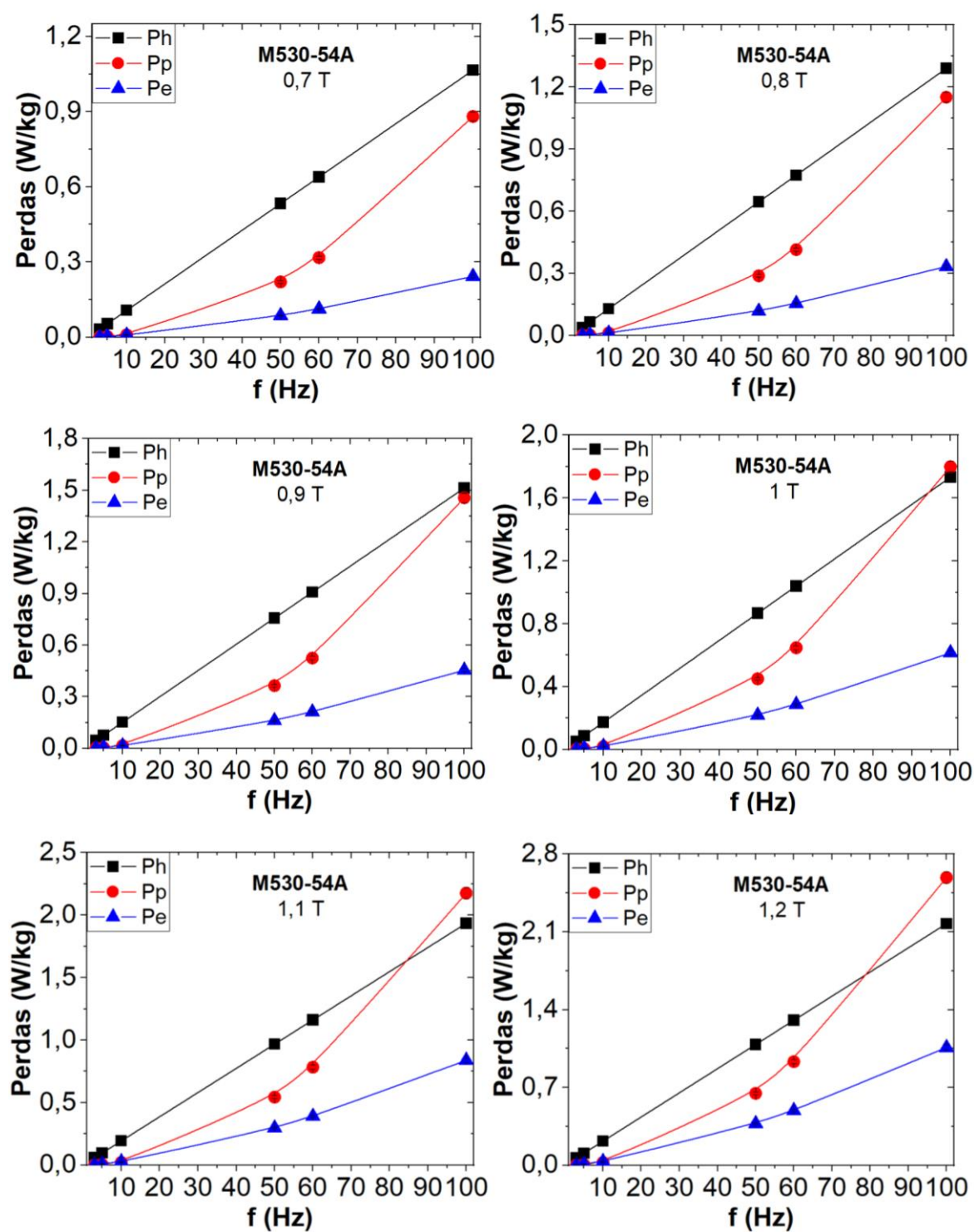
Dispondo desses juntamente com os dados das perdas separadas para as demais frequências, foram plotados os gráficos de perda (W/kg) *versus* frequência (Hz) para cada uma das induções. A Figura 44 mostra os valores para induções entre 0,1 a 0,6 T, a Figura 45 de 0,7 a 1,2 T e a Figura 46 de 1,3 a 1,5 T.

Figura 44 - Gráficos de P_h , P_p e P_e versus frequência para o aço M530-54A, de 0,1 a 0,6 T



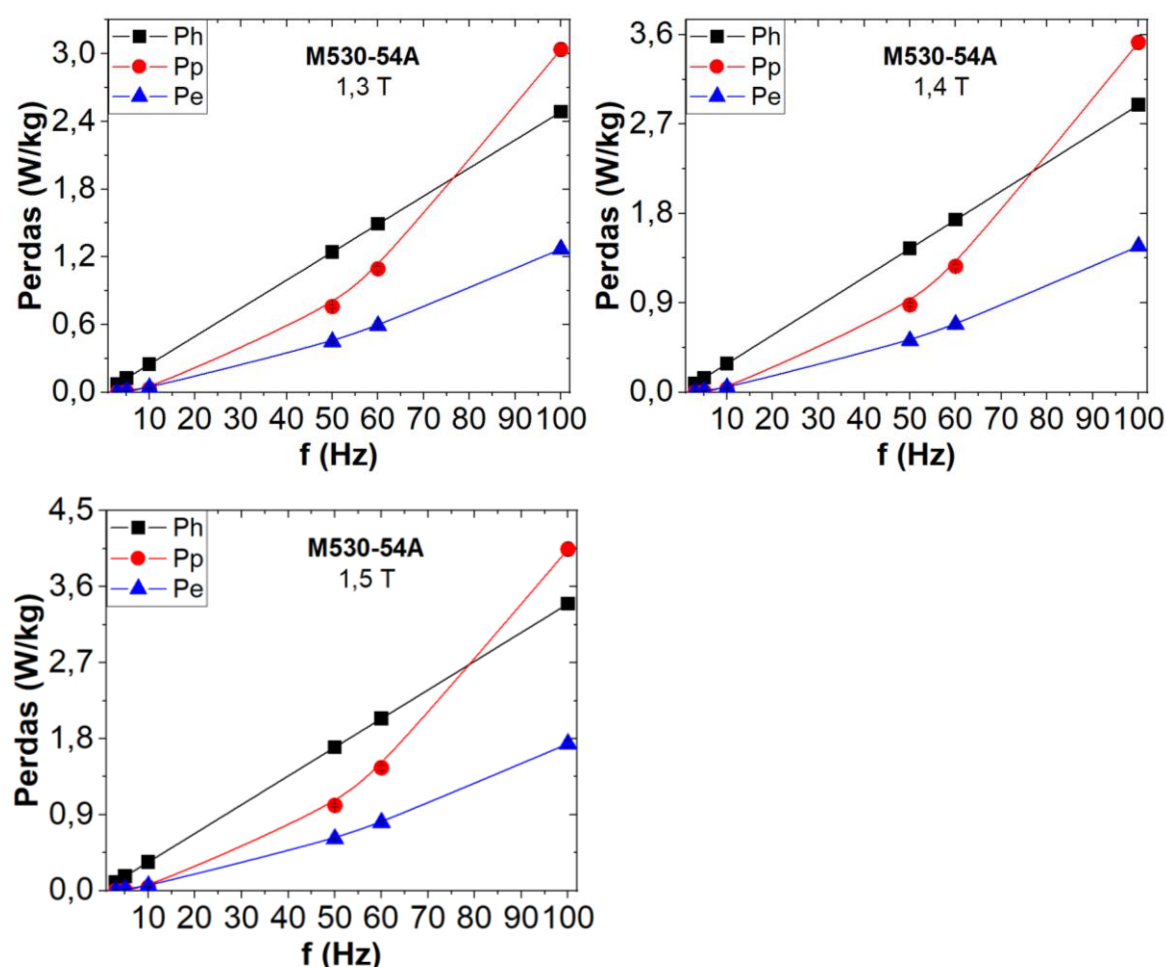
Fonte: autor.

Figura 45 - Gráficos de P_h , P_p e P_e versus frequência para o aço M530-54A, de 0,7 a 1,2 T



Fonte: autor.

Figura 46 - Gráficos de P_h , P_p e P_e versus frequência para o aço M530-54A, de 1,3 a 1,5 T



Fonte: autor.

Com relação aos cruzamentos das perdas, foi constatado o mesmo observado anteriormente para o outro aço, que para as induções de 0,1 a 0,8 T, há dominância da perda por histerese, e em segundo plano, as perdas parasitas, seguidas das perdas em excesso. À medida que é aumentada a indução, é observada a aproximação da perda parasita em relação a histerética, sendo que P_p aumenta de forma mais intensa que P_h conforme o aumento da indução magnética.

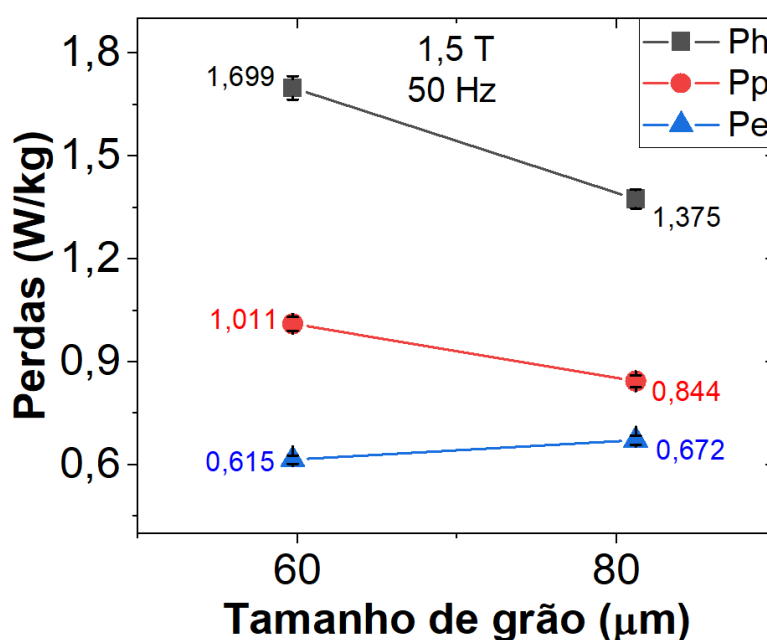
Por fim, na indução de 0,9 T, há o cruzamento da perda parasita com perda por histerese, e a partir desse momento, para todas induções, até 1,5 T, essa perda, P_p , se torna a mais significativa. Mais uma vez as perdas em excesso foram as menores para todas induções estudadas.

Os resultados indicam que os mecanismos associados a P_p predominam em induções acima de 0,9 T, mas estudos são necessários para melhor entendimento. Uma explicação para o aumento da perda parasita ser mais intenso que a histerética vem do fato que a P_p é mais impactada pelo aumento da frequência, sendo que quando há um aumento desse parâmetro, bem como da indução, seus valores crescem de forma mais significativa. No ajuste de separação de perdas pelo método de Bertotti, a frequência que é multiplicada pelos coeficientes das perdas, e cada um deles tem um índice relativos a frequência, sendo a frequência elevada ao quadrado multiplicada por C_p e elevada a um, quando multiplicada por C_h . Isso aponta para uma dependência maior da frequência para P_p quando comparada a P_h .

c.3. P_h , P_p , P_e e P_d em função do tamanho de grão

Os gráficos desse tópico apresentam barra de erro de 2% em todos os dados. A Figura 47 mostra um gráfico com a relação das perdas separadas em função do tamanho de grão. Para tal, foi considerado o tamanho médio de grão do aço M350-50A como sendo 81 microns e do M530-54A como 59 microns, médias dos resultados obtidos pelos métodos de medição de grão.

Figura 47 - P_h , P_p e P_e em função do tamanho de grão para 1,5 T e 50 Hz



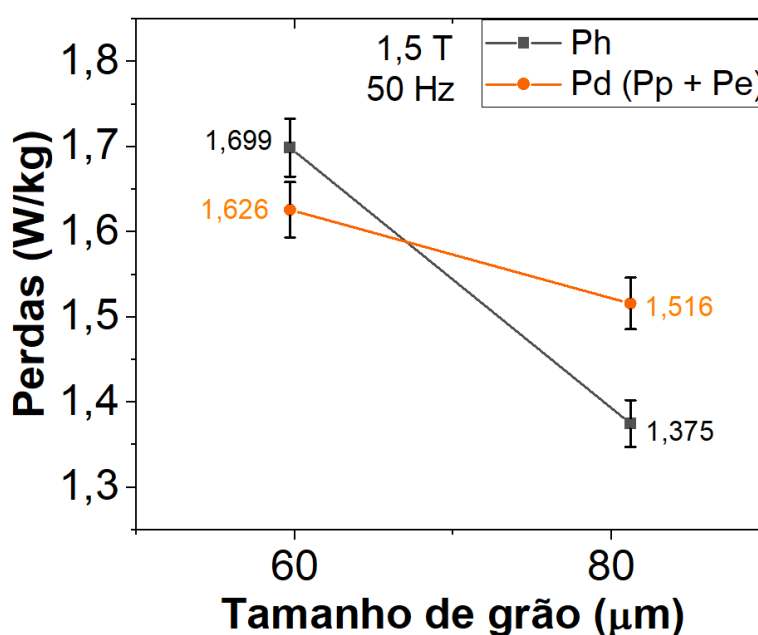
Fonte: autor.

Ao construir esse gráfico de perdas separadas em função do tamanho de grão, foi percebido que, na condição de 1,5 T e 50 Hz, o aumento do tamanho de grão culminou na redução das perdas por histerese e parasita e fez com que a perda em excesso aumentasse cerca de 8,5%. Esse aumento da perda em excesso foi percebida por Almeida et al. (2013). Rodrigues Junior (2010) também encontrou resultados semelhantes na condição de 1 e 1,5 T e relatou que a análise das perdas anômalas é complicada pois os mecanismos que regem essa perda ainda não são totalmente esclarecidos na literatura.

As demais perdas, P_h e P_p apresentaram a mesma tendência e reduziram conforme o aumento do grão, 19,1 e 16,5%, respectivamente.

Também foi plotado o gráfico das perdas em função do tamanho de grão para valores da perda dinâmica, P_d , (somatório da parasita mais excesso), e os resultados obtidos são apresentados na Figura 48.

Figura 48 - P_h e P_d em função do tamanho de grão para 1,5 T e 50 Hz



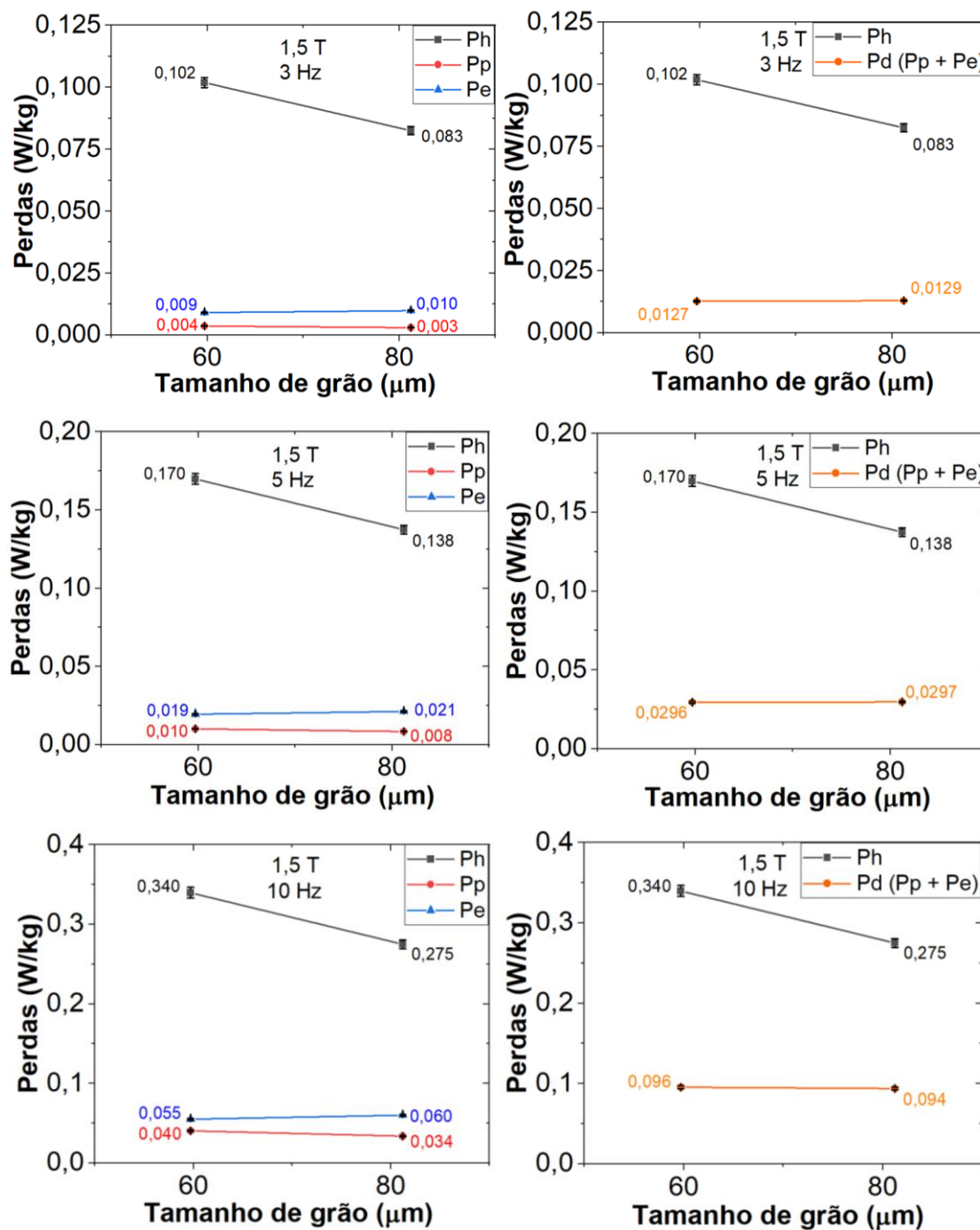
Fonte: autor.

Quando somados os valores das perdas parasita (que declinou com o aumento do tamanho de grão) e em excesso (aumentou juntamente com o tamanho de grão) para obtenção das perdas dinâmicas, a tendência geral observada foi de diminuição de P_d em relação ao aumento do tamanho de grão.

No comparativo, P_p na situação anterior havia reduzido 16,5% ao se passar de um tamanho de grão de 59,7 para 81,2 microns. Já P_d , apresentou redução de apenas 6,8% no mesmo cenário. Sendo assim, foi observada que a perda parasita diminui a uma taxa maior do que a perda em excesso aumenta, fazendo com que a perda dinâmica observada nessa primeira condição, a 1,5 T e 50 Hz reduza.

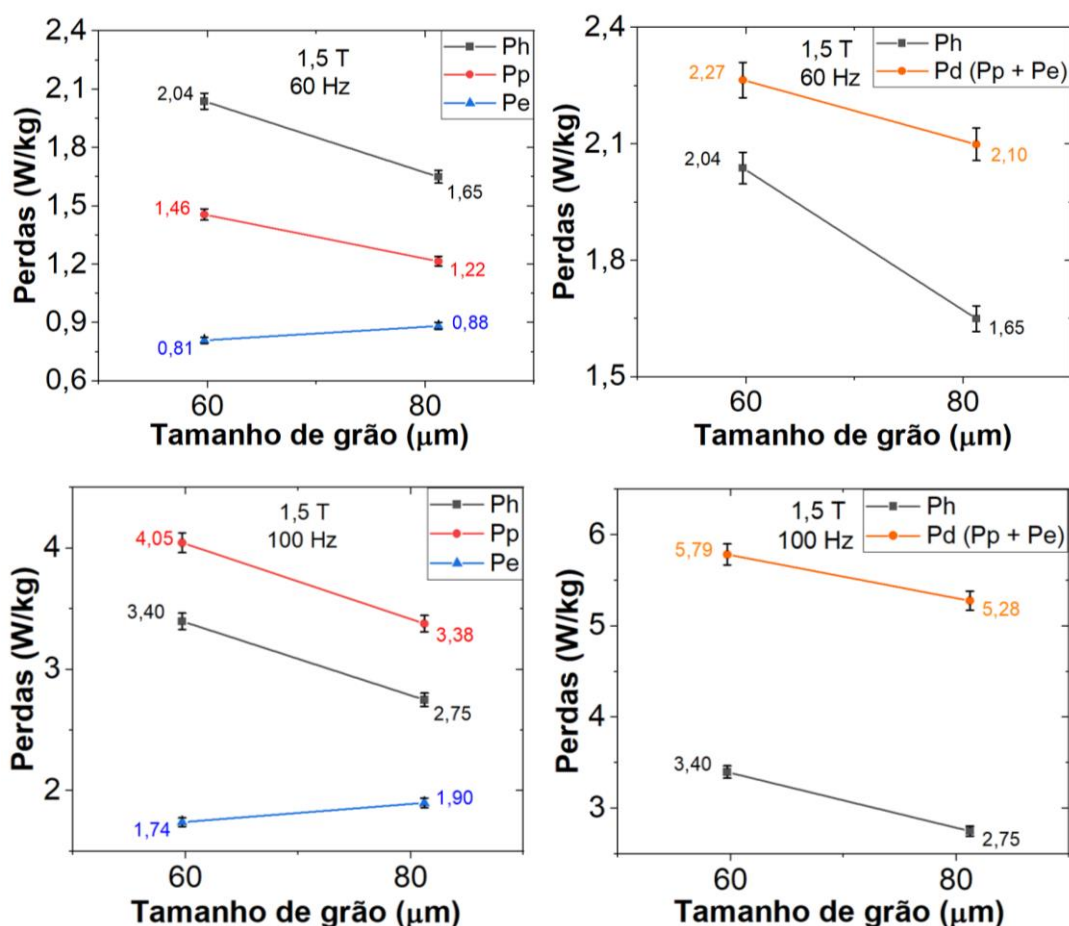
Para investigar o efeito da frequência sobre o comportamento das perdas e o tamanho de grão, foi variado esse parâmetro de 3 a 100 Hz. A seguir são apresentados gráficos para as frequências de 3, 5, 10 Hz (Figura 49), e a 60 e 100 Hz (Figura 50), todos para indução de 1,5 T. Do lado esquerdo, os gráficos de P_h , P_p e P_e *versus* tamanho de grão, e do direito, P_h e P_d *versus* tamanho de grão.

Figura 49 - Gráficos de P_h , P_p e P_e (à esquerda) e P_h e P_d (à direita) *versus* tamanhos de grão para os dois aços nas frequências de 3, 5 e 10 Hz a 1,5 T



Fonte: autor.

Figura 50 - Gráficos de P_h , P_p e P_e (à esquerda) e P_h e P_d (à direita) *versus* tamanhos de grão para os dois aços nas frequências de 60 e 100 Hz a 1,5 T



Fonte: autor.

Analisando os valores apresentados nos gráficos, na condição de 1,5 T, para as frequências de 3 e 5 Hz é observada a redução de P_h com o aumento do tamanho de grão de 18,6 e 18,8%, respectivamente, enquanto P_p , P_e , e consequentemente P_d , apresentaram valores equivalentes dentro da margem de erro independente do aumento do tamanho de grão.

Para a frequência de 10 Hz, P_h foi reduzida em 19,1% quando comparado o aumento de 59 para 81 microns, enquanto P_p aumentou 8,3% e P_e reduziu 15%. Já quando analisada P_d , a redução foi de apenas 2,1%.

O comportamento a 60 e 100 Hz foi semelhante, sendo que P_h reduziu nos dois cenários, coincidentemente 19,1% nas duas condições. P_p também diminuiu nas duas condições, 16,4 e 16,5%, porém, somente para frequência mais alta foi observado que essa perda foi a predominante dentre as três. Já

P_e aumentou nos dois cenários de frequência, sendo que a 60 Hz, a diferença percentual foi de 8% enquanto pra 100 Hz, 8,4%. Quando analisadas as perdas dinâmicas, nos dois casos houveram reduções, de 7,5 e 8,8%, respectivamente.

Como dito, esse efeito do aumento da perda em excesso com relação ao aumento do tamanho de grão foi estudado por Almeida et al. (2013), que compararam dois aços GNO de diferentes tamanhos de grão e resistividade. Para a frequência de 60 Hz, entre 59 e 81 microns, o mesmo comportamento de redução de P_h e P_e foi percebido. Os autores observaram que na faixa de frequência em torno de 100 microns, a relação P_h mais P_e em relação ao tamanho de grão apresentou os menores valores de perda, o que é relatado na literatura por outros autores.

Moses et al. (2019) aponta que as previsões teóricas mostram que P_e é proporcional ao espaçamento da parede de domínio, e essa, por sua vez, é proporcional ao tamanho de grão, ou seja, quanto maior o tamanho de grão, maior o valor P_e . É apontado também que grandes tamanhos de grão promovem uma alta permeabilidade e consequentemente baixa P_h .

Chaudhury et al. (2007) ao estudar a relação entre as propriedades magnéticas e os fatores metalúrgicos em aços de grão não-orientado, apontaram que o efeito do tamanho de grão nas perdas pode ser analisado em termos de perda por histerese e dinâmica, com comportamentos distintos entre elas. Quando se estuda e compara aços de uma faixa de tamanho de grão mais diversa, ou seja, um de tamanho médio pequeno e outro grande, um com 40 e outro com 140 microns, por exemplo, fica mais evidente que as perdas por histerese diminuem com o aumento do tamanho de grão, enquanto o efeito oposto é observado para as perdas dinâmicas.

Isso vai em direção ao que foi estudado por Matsumura e Fukuda (1984) quando relataram que o tamanho ideal de grão para esse tipo de material, a fim de que esse apresente as menores perdas é em torno de 100 a 150 microns, faixa de tamanhos que não é contemplada nesse trabalho.

No estudo de Chaudhury et al. (2007), por exemplo, a faixa ideal de tamanho de grão se mostrou entre 100 e 160 microns. Os autores também

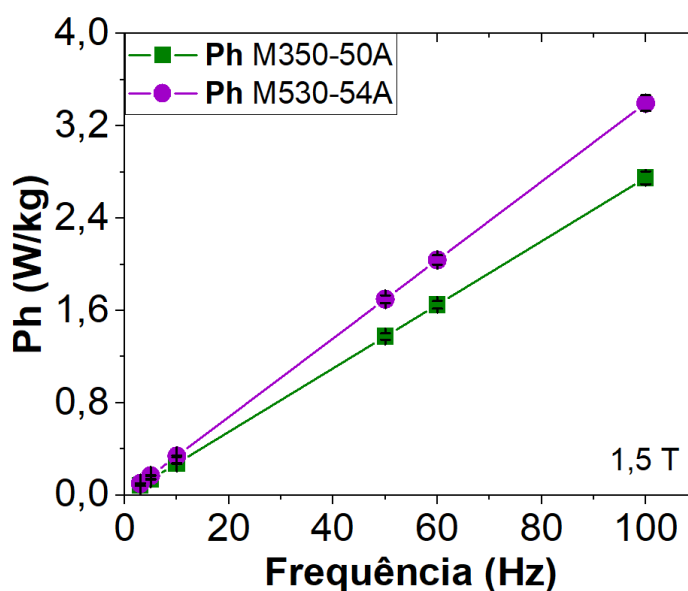
apontaram que a queda nos valores de perda também está relacionada ao percentual de silício no material, além do fator textura. Ao correlacionar essas propriedades, foi percebido que o tamanho de grão, foi, dentre essas três propriedades, a que mais influenciou as perdas magnéticas, seguido do efeito textura e por fim, o teor de silício.

c.4. Comparativo de P_h , P_p , P_e e P_d em função da frequência nos dois aços

Foram plotados gráficos das perdas separadas de acordo com as frequências comparando os dois aços, para observar como cada uma delas evolui. Os três próximos gráficos apontam a evolução de cada uma das perdas magnéticas separadamente e sua evolução de acordo com a frequência, sendo todos eles para a indução de 1,5 T. Nos dados desses gráficos foram inseridos barras de erro de 2%.

A Figura 51 mostra a evolução da perda por histerese nos aços M350-50A (em verde) e M530-54A (em roxo) nas frequências de 3 a 100 Hz.

Figura 51 - P_h em função da frequência comparando os dois aços a 1,5 T



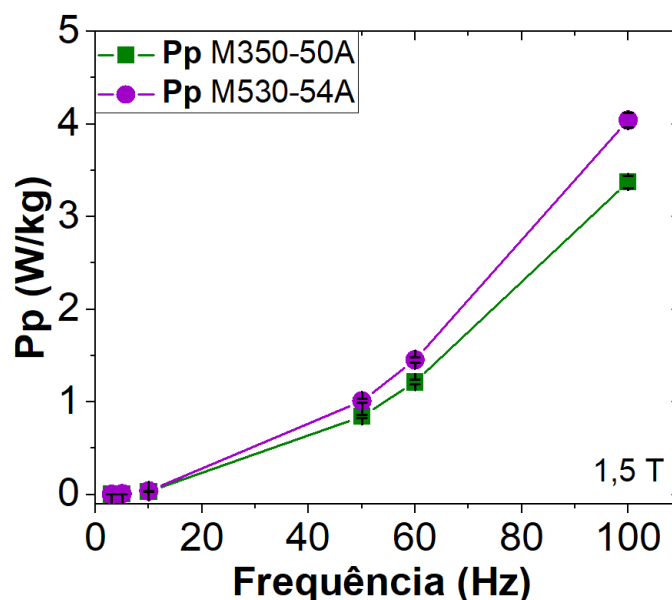
Fonte: autor.

Os resultados mostraram que o aço M530-54A, que possui o menor tamanho de grão, em torno de 60 microns apresentou maiores perdas por

histerese se comparado ao aço M350-50A, de tamanho de grão 80 microns. A literatura diz que ao diminuir o tamanho de grão, são aumentadas as fronteiras de grão, o que proporciona um aumento de pontos de ancoragem de domínios, fazendo com que a movimentação das paredes de domínio seja dificultada quanto menor for o tamanho de grão, fazendo com que a P_h aumente (DE CAMPOS; TEIXEIRA; LANDGRAF, 2006; GHOSH et al., 2014; LANDGRAF; DA SILVEIRA; RODRIGUES-JR., 2011; LEUNING; STEENTJES; HAMEYER, 2019). No cenário de 100 Hz, a diferença percentual entre as perdas por histerese dos dois aços foi de 19,93%.

Na Figura 52 é exibida a evolução das perdas parasitas de acordo com a frequência nos dois aços para a condição de 1,5 T.

Figura 52 – P_p em função da frequência comparando os dois aços a 1,5 T

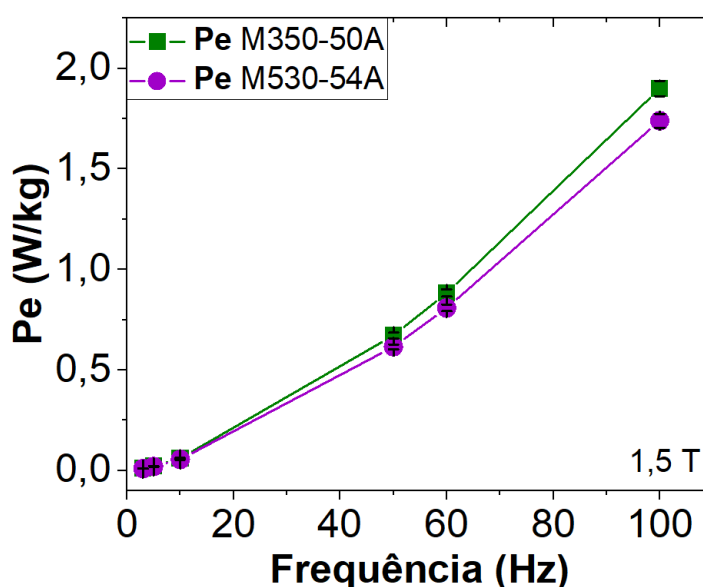


Fonte: autor.

Novamente, as perdas se mostraram maiores para o aço M350-54 em todas as frequências, de 3 a 100 Hz. Na frequência de 50 Hz foi percebida uma inclinação da curva que aumentou de intensidade após 60 Hz. A diferença percentual das perdas por histerese entre os dois aços a 100 Hz foi de 16,5%.

Por fim, na Figura 53 são exibidos graficamente os valores da perda em excesso para os aços M350-50A e M530-54A ainda na indução de 1,5 T.

Figura 53 - P_e em função da frequência comparando os dois aços a 1,5 T



Fonte: autor.

Analisando o gráfico é possível observar que, diferentemente do observado para as perdas anteriores, o aço M350-50A, de maior tamanho de grão, foi o que apresentou as maiores perdas em excesso no comparativo com o aço M530-54A, para todas as frequências analisadas. É de conhecimento também que as perdas em excesso aumentam significativamente em frequências mais altas. No livro de Moses (2019), o autor mostra graficamente como o aumento da frequência aumenta a área central da curva de histerese. Analisando os resultados da perda em excesso em relação a frequência, percebe-se que o aço de maior tamanho de grão, M350-50A, se afasta mais do concorrente à medida que a frequência aumenta, apontando para uma conclusão de que quanto maior o tamanho de grão, mais intenso é o aumento de P_e . A diferença percentual entre as perdas em excesso dos dois aços na frequência de 100 Hz foi de 8,42%.

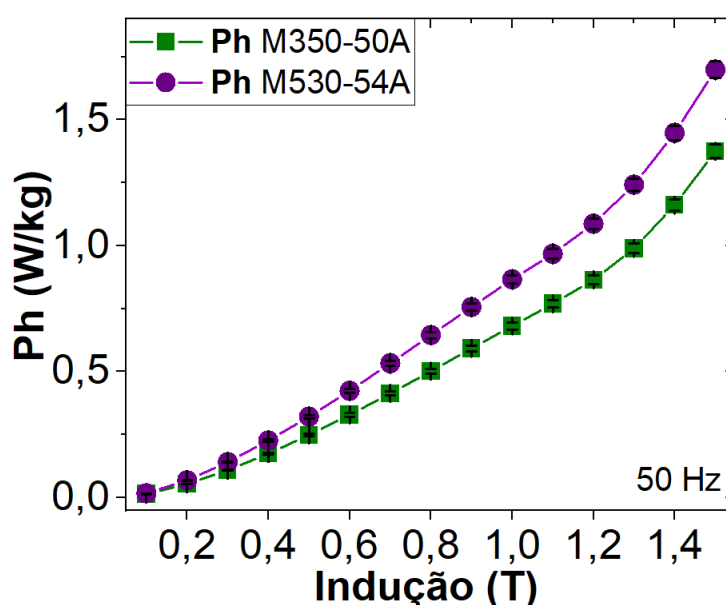
A perda em excesso é apontada na literatura como proveniente de diferentes mecanismos físicos associadas aos domínios magnéticos, como o movimento das suas paredes, nucleação e ainda, a sua aniquilação. É sabido que o aumento da frequência indica uma quantidade maior de mudanças de sentido do campo magnético aplicado em um segundo. Com isso, os domínios magnéticos têm menor tempo para acompanhar essa oscilação, fazendo com

que as perdas, em destaque a em excesso, apresente grande aumento, por estar diretamente ligada aos fenômenos físicos apontados, que atuam nos domínios dos materiais ferromagnéticos (ALMEIDA et al., 2014; ALMEIDA; LANDGRAF, 2019; HE; KIM; KOH, 2022).

c.5. Comparativo de P_h , P_p , P_e e P_d em função da indução nos dois aços

O gráfico da Figura 54 apresenta o comparativo de P_h para os dois aços a uma frequência de 50 Hz, sendo a curva em verde para o aço M350-50A e a roxa para o M530-54A. Nos respectivos valores foram inseridas barra de erro de 2%.

Figura 54 - P_h em função da indução comparando os dois aços a 50 Hz



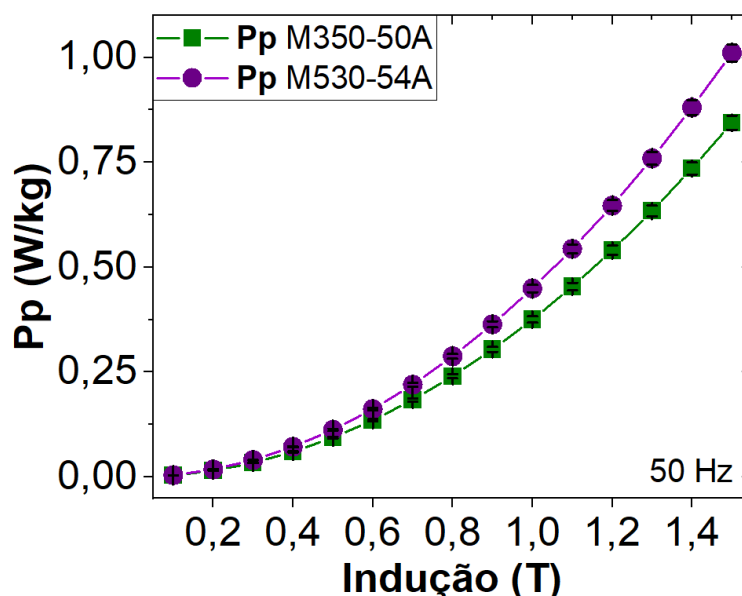
Fonte: autor.

Os valores de P_h para os dois aços foram sempre maiores para o aço de menor tamanho de grão, o M530-54A. Na indução máxima, 1,5 T, P_h representa o valor de 1,70 W/kg para o M350-50A e 1,37 W/kg para o M530-54A, uma diferença percentual de 19,4%. Foi observado que nas regiões de mais alta indução, especialmente acima de 1,2 T, as curvas adquiriram uma inclinação mais acentuada, se comparado ao formato de reta observado nesses valores até 1,1 T.

Rodrigues Junior (2010) ao analisar a perda por histerese em função da indução, notou que aços GNO de tamanho de grão entre 11 e 147 microns apresentaram a mesma tendência de aumento da perda conforme a indução e ainda, quanto menor o tamanho de grão, maior a perda observada, corroborando com a tendência do gráfico mostrado.

A Figura 55 mostra o comportamento das perdas parasitas a 50 Hz.

Figura 55 – P_p em função da indução comparando os dois aços a 50 Hz

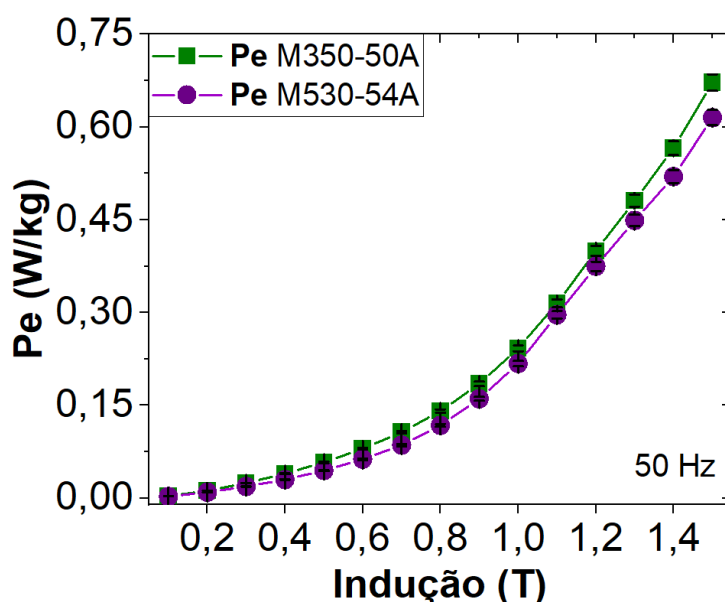


Fonte: autor.

Mais uma vez foi observado que o aço de menor tamanho de grão, M530-54A foi o que apresentou maiores valores de perda parasita em todas as induções analisadas. A 1,5 T, a P_p do aço M530-54A (em roxo) foi de 1,01 W/kg, enquanto a do outro aço, 0,84 W/kg, alcançando uma diferença percentual de 16,8%. Para essa perda, o comportamento das curvas não apresentou a mesma disformidade que a P_h em altas frequências, apresentando uma uniformidade no formato da curva.

Enfim, o gráfico da Figura 56 mostra a evolução da P_e na frequência de 50 Hz.

Figura 56 - P_e em função da indução comparando os dois aços a 50 Hz



Fonte: autor.

Novamente, como já havia sido percebido nos gráficos de $P_e \times f$ (na Figura 53), a perda em excesso do aço de maior tamanho de grão, o M350-50A – em verde, foi maior que a do aço concorrente, destoando do comportamento observado para as perdas anteriores. Os valores de P_e para o aço M350-50A a 1,5 T foram de 0,672 W/kg, enquanto para o outro aço em estudo, 0,615 W/kg, o que representa uma diferença percentual de 8,48%.

É interessante observar que na indução de 1,1 T, os valores de P_e dos dois aços se aproxima, porém não se encontram em nenhum momento, mesmo considerando a barra de erro de 2%. Justamente nessas altas frequências, a curva apresenta um comportamento não tão uniforme, como para P_p , apresentando comportamento semelhante a P_h .

No artigo de Novak et al. (2014) os autores estudaram o comportamento das perdas em relação a indução em aços GNO e também perceberam a relação $P_h > P_p > P_e$ em todos os cenários, como observado nesse estudo. Porém, os autores observaram que a 1,1 T houve uma diminuição da perda em excesso, e que a 1,5 T essa perda apresentou um valor mínimo, o que contrasta com o que está sendo aqui observado.

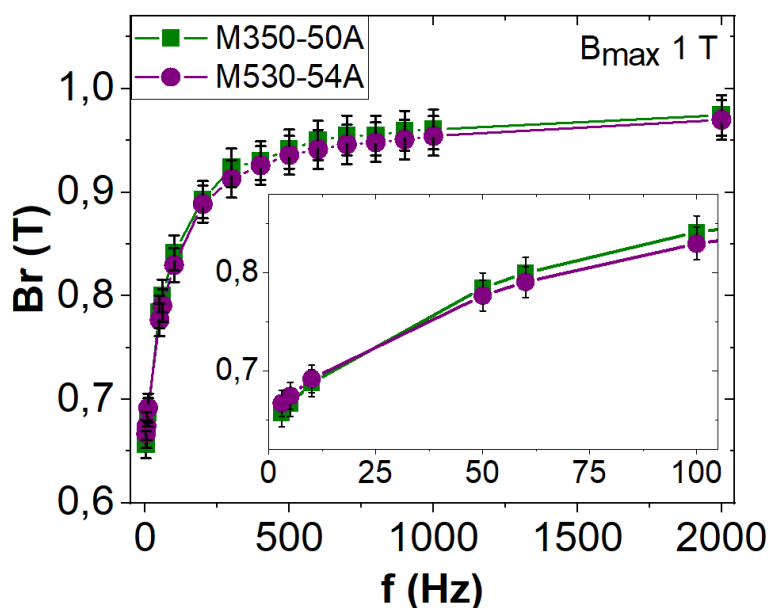
d. Remanência e coercividade

Ainda se tratando do estudo das propriedades magnéticas dos aços M350-50A e M530-54A, são discutidos os resultados observados de remanência e coercividade nas próximas subseções.

d.1. Remanência

Analisando os dados de remanência a 1 T, para as frequências de 3 a 2000 Hz, é possível ter uma visão ampla do comportamento da remanência desses aços numa faixa maior de valores, que são exibidos no gráfico da Figura 57, onde Br representa os valores de remanência, expressa em T, e f , a frequência, em Hz. Foram inseridas barras de erro de 2% nos valores, além de uma inserção no centro do gráfico que mostra a ampliação dos resultados pra faixa de frequências até 100 Hz.

Figura 57 - Gráfico de remanência *versus* frequência a 1 T, de 3 a 2000 Hz



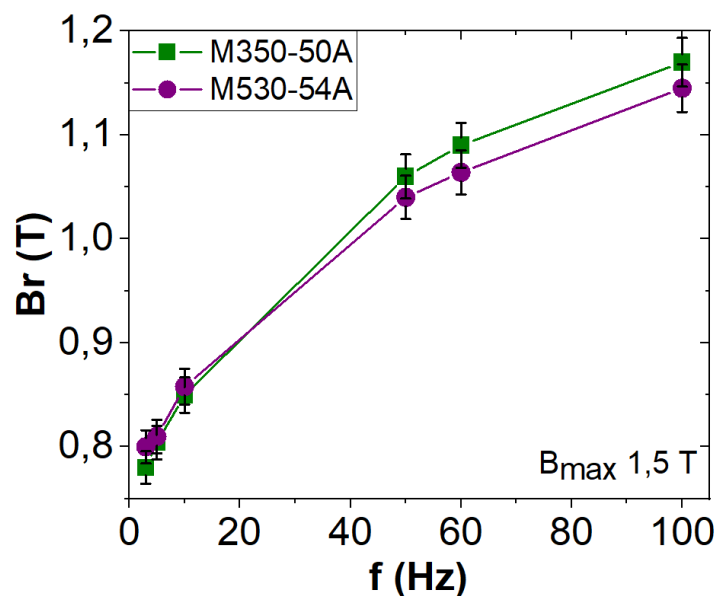
Fonte: autor.

Analisando os dados é possível perceber que, também para esse cenário de indução e frequências, os valores são idênticos dentro da margem de erro, ou seja, a mudança do tamanho de grão pouco afetou nos valores de remanência analisados. Para a frequência de 2000 Hz, o valor de remanência

no aço M350-50A foi de 0,974 T, enquanto para o aço M530-54A foi de 0,970 T, representando uma diferença percentual de apenas 0,46%.

O gráfico da Figura 58 mostra os valores de remanência para os dois aços, numa indução máxima de 1,5 T para frequências de 3, 5, 10, 50, 60 e 100 Hz.

Figura 58 - Gráfico de remanência versus frequência a 1,5 T, de 3 a 100 Hz



Fonte: autor.

Os resultados apontaram que nas frequências de 3, 5 e 10 Hz, os valores de remanência são equivalentes, e se distanciam de 50 Hz até 100 Hz, sendo que nessas três últimas frequências, o aço M350-50A, de maior tamanho de grão, apresentou maiores valores desse parâmetro quando comparado ao aço oposto, porém, é importante destacar que na frequência de 100 Hz, a diferença percentual entre os valores de remanência dos dois aços foi de apenas 2,14%.

Moses et al. (2019) ao analisar aços GNO de composição química e espessura semelhante ao estudado nesse trabalho, observou diferença significativa de valores em forma de *loop* para menores intensidades de campo magnético.

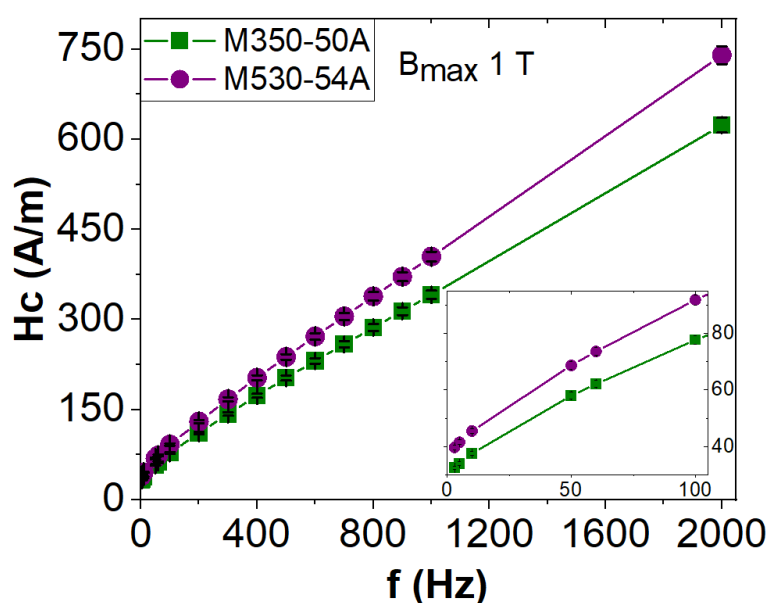
Ao analisar a remanência em função da indução, Landgraf, Emura e De Campos (2008) observaram que um aço GNO 3,2% Si apresentou graficamente uma inclinação na curva de remanência *versus* indução até 1,2 T,

e acima desse valor, o coeficiente de angular da curva muda, apresentando um comportamento linear da remanência para induções mais altas.

d.2. Coercividade

Foram plotados, no gráfico da Figura 59, os valores da coercividade ou campo coercivo (H_c) em relação a frequência para os valores de 3 a 2000 Hz, na indução máxima de 1 T. Foi incluída a barra de erros e uma inserção na lateral direita, que aponta para os valores compreendidos entre 3 e 100 Hz.

Figura 59 - Gráfico de campo coercitivo *versus* frequência a 1 T, de 3 a 2000 Hz

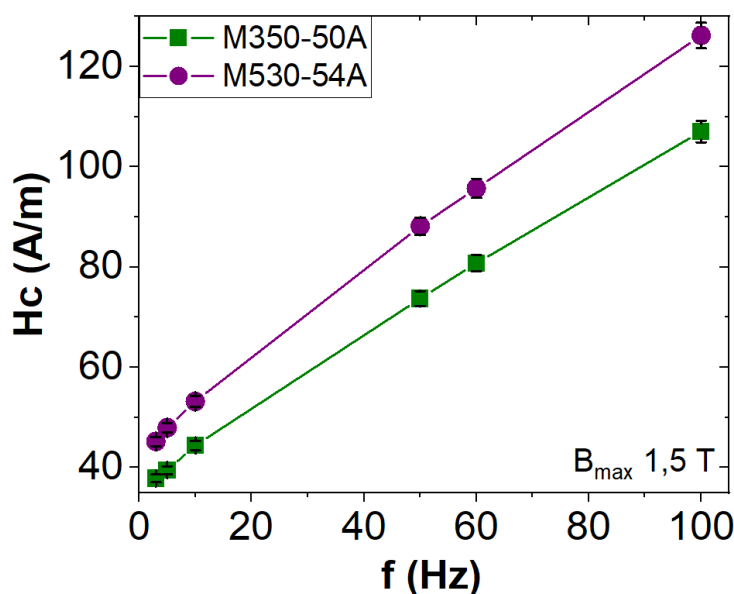


Fonte: autor.

No cenário de 1 T todos os valores de coercividade nos dois aços são distintos para todas as frequências, sendo que o aço M530-54A, em roxo, foi o que apresentou os maiores valores desse parâmetro em todos os cenários. Na frequência de 2000 Hz, o valor da coercividade para o aço M530-54 foi de 740 A/m, enquanto para o aço M350-50A, de 624 A/m, resultando numa diferença percentual de 15,73%.

O gráfico da Figura 60 mostra os valores da coercividade, na indução de 1,5 T, para frequências de 3, 5, 10, 50, 60 e 100 Hz. Novamente foram inseridas barras de erro de 2% em todos os dados.

Figura 60 - Gráfico de campo coercitivo *versus* frequência a 1,5 T, de 3 a 100 Hz

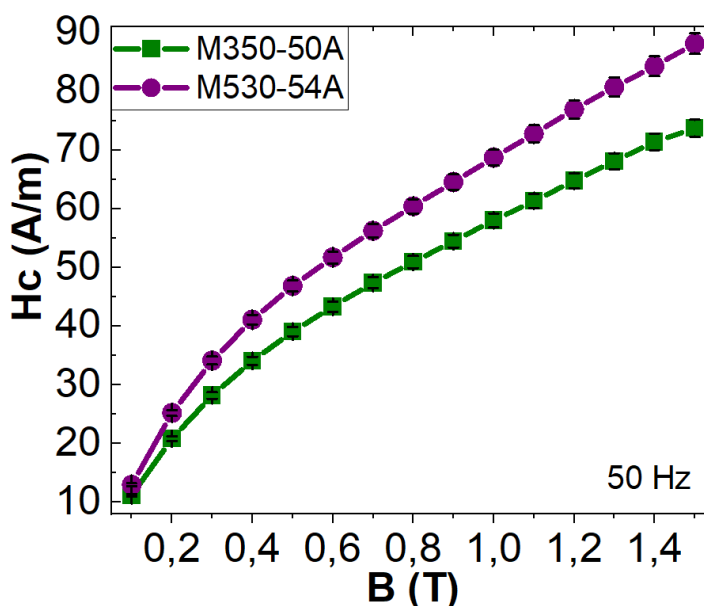


Fonte: autor.

Assim como no cenário de 1 T, os resultados indicam que o aço M530-54A, de menor tamanho de grão, apresentou maiores valores de coercividade em todas as frequências analisadas, sendo que a diferença percentual dos valores entre os dois aços a 3 Hz foi de 16,32%, enquanto para a maior frequência, 100 Hz, foi de 15,19%, apontando que os valores foram diferentes para todas as faixas de frequência analisadas.

Por fim, ainda sobre a diferença de valores de coercividade nos aços, foi plotado um gráfico, exibido na Figura 61, que expressa os valores desse parâmetro em relação a indução magnética para a frequência de 50 Hz.

Figura 61 - Gráfico de campo coercitivo *versus* indução a 50 Hz, de 0,1 a 1,5 T



Fonte: autor.

Novamente é notado que os dados são diferentes em todas as faixas de indução analisadas. A 0,1 T, a diferença percentual entre os valores dos dois aços foi de 13,66%, enquanto para 1,5 T, 16,36%.

Paltanea et al. (2019) obtiveram curvas características de coercividade semelhante às apresentadas. Nos aços GNO estudados pelos autores, foi apresentada a mesma tendência de crescimento das curvas H_c *versus* B a 50 Hz.

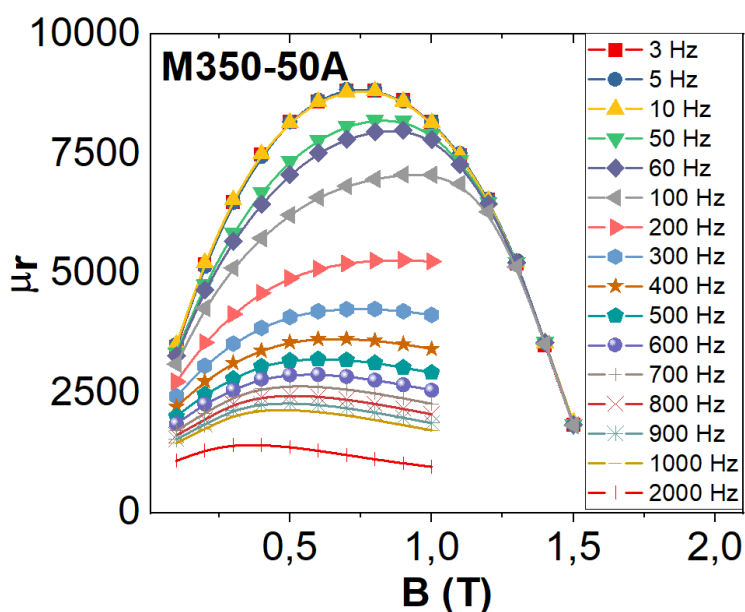
Landgraf, Da Silveira e Rodrigues Junior (2011), ao analisar o efeito do tamanho de grão sobre os valores do campo coercitivo para as induções máximas, verificaram o crescimento linear dos valores de campo coercitivo com o inverso do tamanho de grão e notaram ainda uma diminuição do ritmo de crescimento da curva H_c *versus* B com o aumento da indução, efeito percebido nos dados mostrados.

Portanto, observando os valores mostrados nos gráficos de remanência e coercividade, percebe-se que são mais influenciados pela coercividade, que apresentou variações expressivas entre os aços de diferente tamanho de grão, em torno de 15%, do que pela remanência que apresentou valores semelhantes entre os aços, considerando um desvio experimental de 2%.

e. Permeabilidade relativa

Para concluir as discussões sobre as propriedades magnéticas, são mostrados na Figura 62 os valores da permeabilidade relativa (μ_r) em função do aumento da indução para o aço M350-50A, sendo que, cada linha do gráfico representa uma frequência diferente, de 3 a 2000 Hz. Como apontado anteriormente, os dados coletados de 3 a 100 Hz compreendem as induções de 0,1 a 1,5 T, e de 200 a 2000 Hz, somente valores até 1 T.

Figura 62 - Gráfico de μ_r versus indução de 3 a 2000 Hz para o aço M350-50A



Fonte: autor.

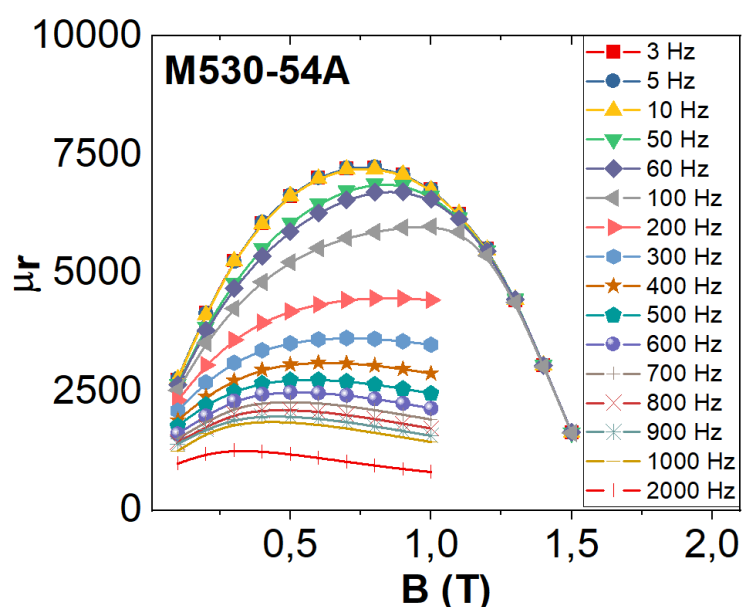
Os resultados indicam que as frequências mais baixas, a de 3 e 5 Hz, proporcionaram o alcance de maiores valores de permeabilidade relativa, atingindo um pico de 8846 (a 5 Hz) para a indução de 0,7 T, com uma redução dos valores de permeabilidade a partir de 0,8 T. Para as frequências de 10 e 50 Hz, a redução só se deu a partir da indução de 0,9 T. Acima dessa indução, os valores de μ_r apresentaram uma ligeira queda, atingindo os menores valores nessas frequências para a indução de 1,5 T.

Nas frequências de 60, 100 e 200 Hz também foram observados valores consideráveis de μ_r , porém a redução se deu somente a partir da indução de 1 T.

Para as frequências mais altas, menor foi o valor de indução onde a μ_r atingia o pico máximo e decaía. A 300 Hz, a redução de μ_r se deu a partir da indução de 0,9 T. A 400 Hz, em 0,8 T. Para as frequências de 500 e 600 Hz em 0,7 T. Nas frequências de 700, 800, 900 e 1000 Hz, a redução de μ_r só foi percebida a partir de 0,6 T. Por fim, para 2000 Hz, maior frequência desse estudo, a queda dos valores de permeabilidade relativa só foi percebida a partir de 0,5 T.

A Figura 63 mostra os resultados da permeabilidade relativa em função da indução magnética para o aço M530-54A.

Figura 63 - Gráfico de μ_r versus indução de 3 a 2000 Hz para o aço M530-54A



Fonte: autor.

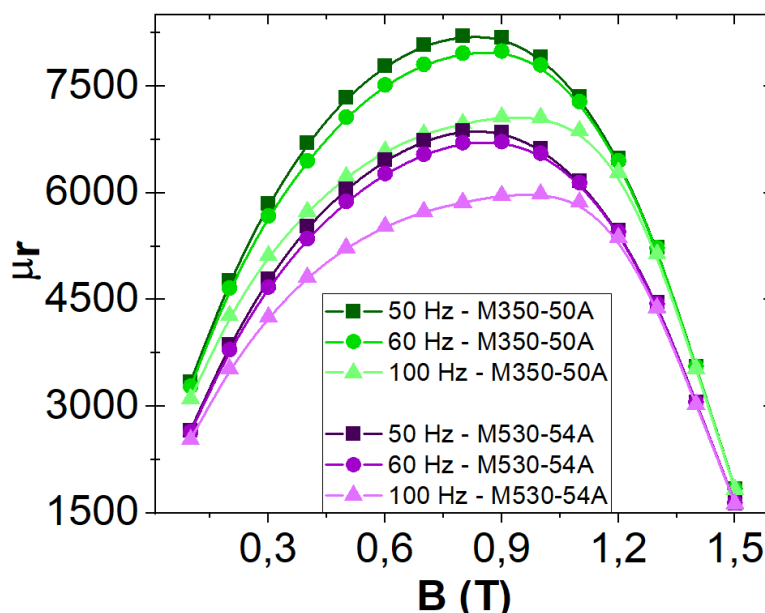
O ponto de mais alto valor para a permeabilidade relativa nesse aço foi de 7245, também para a frequência de 5 Hz, só que dessa vez na indução de 0,8 T (no outro aço, havia sido a 0,7 T). Diferente dos valores do aço anterior, para as frequências mais baixas, de 3 e 5 Hz e agora também para 10 Hz e 50 Hz a redução dos valores de μ_r se deu a partir de 0,9 T (contra 0,8 T pra as duas primeiras frequências do M350-50A).

Na frequência de 60 Hz a redução se deu a partir de 1 T, semelhante ao comportamento do aço anterior, porém, a 100 Hz a redução se deu somente a 1,1 T (1 T no primeiro aço). A 200 Hz a redução se deu somente a partir da indução de 0,9 T (também havia sido 1 T no aço anterior).

Nas frequências mais altas também foram percebidas diferenças nos pontos de redução. A 300 Hz, a redução de μ_r se deu a partir da indução de 0,8 T (antes, a 0,9 T). A 400 Hz, em 0,7 T (0,8 T no anterior). Para a frequência de 500 Hz, houve uma coincidência nos valores de indução onde se observou a redução da permeabilidade relativa, ambos se deram a 0,7 T. Porém, a 600 Hz, que também havia reduzido a partir de 0,7 T, dessa vez, foi observada a redução já a partir de 0,6 T. Nas frequências de 700 e 800 Hz a redução de μ_r só foi percebida a partir de 0,6 T, semelhante ao comportamento do aço concorrente. Dessa vez, 900 e 1000 Hz, que antes já apresentavam redução a 0,6 T, agora começaram a diminuir seus valores de μ_r a partir de 0,5 T. E finalmente, para 2000 Hz, maior frequência em questão, a queda dos valores de permeabilidade relativa já foi percebida a partir de 0,4 T, contra 0,5 T do aço anterior.

Justamente para se ter uma visão gráfica comparativa da diferença dos valores de permeabilidade relativa nos dois aços, foi plotado um gráfico comparando os valores de μ_r em função da indução, agora somente para as frequências de 50, 60 e 100 Hz para os dois aços juntos. Esse gráfico é mostrado na Figura 64.

Figura 64 - Gráfico de μ_r versus indução a 50, 60 e 100 Hz – aços M350-50A e M530-54A



Fonte: autor.

Analisando o comparativo entre as frequências de 50, 60 e 100 Hz, fica claro a superioridade de valores de permeabilidade do aço M350-50A sobre o M530-54A, sendo o aço de maior tamanho de grão, o que apresentou os maiores valores de permeabilidade relativa.

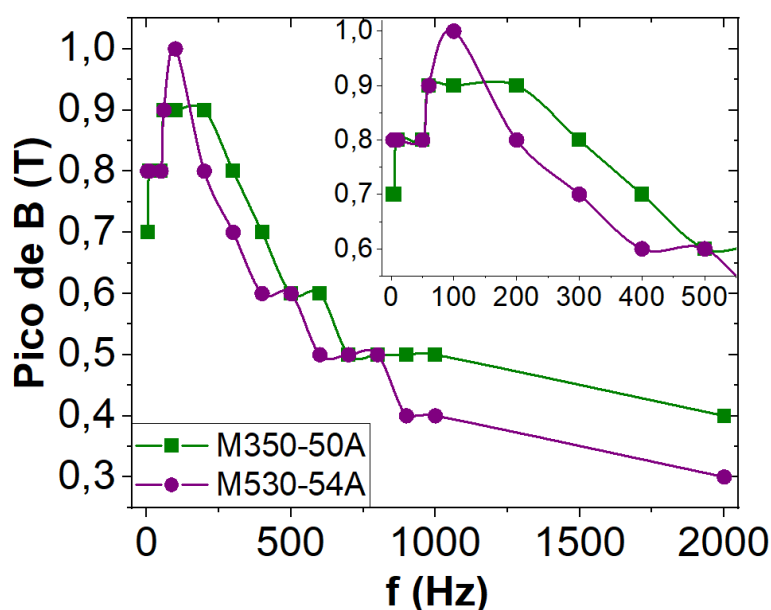
Novak et al. (2014) observaram que os picos dos valores de permeabilidade relativa coincidiram com os picos de perda em excesso nos aços M350-50A e M530-54A. Também foram encontrados valores de picos de permeabilidade maiores para o aço M350-50A do que para o M530.

Paltanea et al. (2019) observaram a mesma tendência de queda nos valores de permeabilidade relativa em aços GNO, sendo que esse efeito foi percebido nas induções próximas a 1 T.

Já Chaudhury et al. (2007) observaram que os aços que possuíam tamanho de grão na faixa entre 80 e 140 microns apresentavam maiores valores de permeabilidade, enquanto aços entre 40 até 80 microns apresentaram menores valores desse parâmetro. Tal efeito percebido pelos autores se mostrou coerente com os dados analisados, tendo em vista que o aço M350-50A, de tamanho de grão 81 microns, apresentou maiores valores desse parâmetro quando comparado ao concorrente, de tamanho médio 59 microns.

Moses et al. (2019) observaram que a permeabilidade diminui com o aumento da frequência, mesmo observado no gráfico da Figura 64, devido ao aumento do efeito pelicular, que é mais pronunciável em altas frequências, quando o fluxo magnético não terá tempo suficiente para atingir seu valor de superfície, ocasionando uma magnetização incompleta. Foi percebida também que os picos de μ_r ocorrem entre 0,5 e 1 T.

A Figura 65 mostra o comportamento dos valores de máximo de indução alcançado em cada uma das frequências para os dois aços. São exibidos valores para as frequências de 3 a 2000 Hz.

Figura 65 - Gráficos dos picos de indução *versus* frequências

Fonte: autor.

Foi observado que comportamento desses parâmetros se deu de maneira similar, com pico de valores de B na frequência de 100 Hz para os dois aços onde B alcançou 1 T para o aço M530-54A e 0,9 T para o outro aço. Ainda, foi observado que o aço M350-50A manteve, a 200 Hz, o mesmo valor de pico de indução que na frequência anterior, o que não aconteceu com o M350-50A, que na frequência de 200 Hz, apresentou um valor de 0,8 T. Após atingir os valores de máximo de B nessas frequências apontadas, os valores diminuíram consideravelmente, sendo que a 2000 Hz, os picos de indução aconteceram a 0,4 T para o M350-50A e a 0,3 T para o aço concorrente. Sendo assim, apesar do aço M350-50A não atingir o valor máximo de indução que o outro aço (0,9 contra 1 T), ele apresentou picos de B maiores nas frequências mais altas estudadas.

Como pôde ser percebido, há um máximo na curva de permeabilidade relativa *versus* B, e este máximo é diferente para cada frequência, de forma que a Figura 65 mostrou a dependência desse máximo com a frequência. Este resultado é interessante pois mostra a indução máxima (ou equivalentemente) ao campo magnético Hmax onde há variação de B. A partir desse valor de H/B a curva passa para um estágio de saturação onde a relação dB/dH se aproxima

de zero. Desta forma, para campos maiores que aquele limiar, não há variação de B .

Por fim, como as perdas magnéticas são limitadoras da permeabilidade do material, entende-se pela relação já estabelecida na literatura, que a permeabilidade total será reduzida quanto maiores forem as perdas magnéticas. O estudo dos valores de permeabilidade relativa em relação a indução e frequência permitiu evidenciar que aços de composição semelhante, ambos de grão não orientados, apresentando diferentes tamanhos de grão performarão de forma diferente. Com isso, é importante conhecer e estudar as propriedades magnéticas desses materiais para se ter uma seleção adequada do material para aplicação do produto ou equipamento ao qual se destina.

6 CONCLUSÕES

O aço M530-54A, de menor tamanho de grão, foi o que apresentou as maiores perdas totais para todas as frequências, de 3 a 2000 Hz, e todas induções analisadas, de 0,1 a 1,5 T. A diferença média dos valores de perda total dos dois aços a 1,5 T foi de 14%, enquanto que, para 1 T, de 15%;

Os valores dos coeficientes C_h , C_p e C_e encontrados nos ajustes de separação de perdas foram satisfatórios, com C_h coincidindo com a mesma ordem de grandeza encontrada por outros dois autores que empregaram a metodologia. Os valores de R^2 tenderam a 1 e as curvas de ajuste fitaram corretamente em todos os pontos para os ajustes com o intervalo frequências de 3 a 100 Hz. Tentativas de ajuste para os intervalos de 3 a 400 e 3 a 2000 Hz até 1 T foram realizadas, mas os resultados do emprego dessa metodologia para frequências mais altas não foram satisfatórios;

O comportamento de P_h , P_p e P_e nos aços M350-50A e M530-54A se demonstrou semelhante, com a predominância de P_h , seguida de P_p e P_e nas induções de 0,1 a 0,8 T. A partir de 0,9 T, P_p se tornou a perda mais significativa e continuou sendo a de maior valor das três, seguida por P_h e P_e até 1,5 T;

Quando estudado o comportamento de cada uma das perdas separadas em relação do tamanho de grão foi percebida a tendência geral de redução das perdas P_h e P_p e aumento de P_e nas frequências de 10, 50, 60 e 100 Hz;

Ao estabelecer um comparativo de P_h , P_p e P_e em relação a frequência para os dois aços, notou-se que P_h foi maior para o aço de menor tamanho de grão, o M530-54A, na indução de 1,5 T, de 3 a 100 Hz, alcançando uma diferença percentual de quase 20% entre a P_h dos dois aços para a mais alta frequência. Também a P_p foi maior para o aço de tamanho de grão 59 microns, porém a diferença a 100 Hz ficou em torno de 16%. Se diferenciando do comportamento das demais perdas, P_e foi maior para o aço de maior tamanho de grão, 81 microns, apresentando uma diferença de pouco mais de 8% na frequência de 100 Hz;

Comparando P_h , P_p e P_e em relação a indução, foi observado que a 50 Hz o comportamento apontou para P_h sendo maior das três perdas em todas induções, seguida de P_p e P_e . No aço M530-54A, de menor tamanho de grão,

P_h e P_p tiveram valores superiores no comparativo com o aço concorrente, enquanto P_e foi maior no aço M350-50A. Na curva de P_h em função da indução, quando foi atingido o valor de 1,2 T, foi observada uma inclinação na reta para os dois aços. Já em P_e *versus* indução, a 1,1 T os valores dos dois aços se aproximaram em relação ao dado anterior e se afastaram novamente à medida que a indução aumentou;

Quando estudada a remanência em função da frequência, o comparativo entre os dois aços apontou para a coincidência de valores tanto na condição de 1,5 T, de 3 a 100 Hz, quanto para 1 T, de 3 a 2000 Hz, sendo que todos os valores foram semelhantes dentro da barra de erros de 2%. A 100 Hz e 1,5 T, a diferença percentual de remanência foi de apenas 2%, enquanto a 1 T e 2000 Hz, somente 0,5%;

As análises dos valores de coercividade mostram que tanto na condição de 1,5 T, 3 a 100 Hz, ou na de 1 T, 3 a 2000 Hz, quanto na de 50 Hz, 0,1 a 1,5 T, os valores dos dois aços foram distintos em todos os cenários, apontando para o aço M530-54 como o que apresentou os maiores valores em comparativo com o M350-50A. Esse cenário confirmou que o aço de menor tamanho de grão foi o que apresentou maiores valores de coercividade, corroborando com a literatura;

Em última análise, a permeabilidade relativa também demonstrou ser uma propriedade que se diferenciou conforme a mudança do tamanho de grão, e foi apresentada em todos os casos como uma curva de concavidade voltada para baixo. O aço M350-50A foi o que apresentou os maiores valores de permeabilidade em relação a indução, alcançando um pico de 8846 a 5 Hz para a indução de 0,7 T. No aço M530-54A, o pico se deu a 0,8 T, a 7245, na mesma frequência. A tendência observada foi de quanto maior a frequência, menores os picos de permeabilidade, o que foi apontado por outros autores em seus estudos;

Enfim, com os resultados dessa dissertação foi possível aprofundar os conhecimentos das propriedades magnéticas dos aços M350-50A e M530-54A, aços de composição semelhante, ambos de grão não orientado, diferentes entre si no tamanho de seus grãos. Através das técnicas de caracterização

adotadas foi possível estabelecer relações sobre a microestrutura e as propriedades magnéticas, de forma que a metodologia de separação de perdas empregada permitiu o estudo do comportamento de cada componente da perda, podendo ao fim desse trabalho, discutir todos esses parâmetros e fazer os devidos apontamentos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do que foi estudado e observado, são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Ampliar a faixa de tamanhos de grão para abranger valores acima de 150 microns, a fim de se ampliar os resultados e a discussão sobre como o tamanho médio de grão afeta as propriedades magnéticas dos aços elétricos de grão não orientado.
- Realizar os ajustes matemáticos para separação de perdas em frequências acima de 100 Hz a fim de observar o comportamento da perda por histerese, parasita e em excesso em altas frequências, especialmente em torno de 400 Hz, frequência comumente empregada em motores de veículos elétricos, que é uma das fortes aplicações desse aço.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, B. et al. Studying behavior of multilayer materials: A 1-D model correlated to magnetic domain walls through complex permeability. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 320, n. 20, p. e708–e711, out. 2008.

ALMEIDA, A. A. et al. **Efeito do tamanho de grão e frequência de excitação nas perdas anômalas dos aços GNO**. 68º Congresso anual da ABM. Anais...2013.

ALMEIDA, A. A. et al. Anomalous loss hysteresis loop. **Materials Research**, v. 17, n. 2, p. 494–497, 28 fev. 2014.

ALMEIDA, A. A. DE; LANDGRAF, F. J. G. Magnetic Aging, Anomalous and Hysteresis Losses. **Materials Research**, v. 22, n. 3, p. 1–6, 2019.

ALVES, E. M. M.; SILVEIRA, C. C.; DA CUNHA, M. A. 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**, v. 166, n. May, p. 110408, ago. 2020.

AMORIM, D. DE S. C. **Efeito do envelhecimento entre passes durante a laminação a frio sobre as propriedades magnéticas do aço silício de grão orientado de alta permeabilidade**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

ANDRADE, M. L. A. DE; CUNHA, L. M. DA S. **BNDES 50 Anos - Histórias Setoriais: O Setor Siderúrgico**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13314/1/BNDES 50 Anos - Histórias Setoriais_O Setor Siderurgico_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13314/1/BNDES_50_Anos_-_Histórias_Setoriais_O_Setor_Siderurgico_P.pdf)>.

APERAM SOUTH AMERICA. **Aços Elétricos de Grão Orientado e de Grão Não-Orientado**. Brasil: [s.n.]. Disponível em: <<https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/08/Aços-Elétricos-GO-e-GNO-2.pdf>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 5161: Produtos laminados planos de aço para fins elétricos - Verificação das propriedades**Brasil, 1977.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E 112-96: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**Estados Unidos, 1996.

BARROS, G. O desenvolvimento do setor siderúrgico brasileiro entre 1900 e 1940: Crescimento e substituição de importações. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 45, n. 1, p. 153–183, mar. 2015.

BECKLEY, P. **Electrical Steels for rotating machines**. 1. ed. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2002.

BENSON, S. **Grain size, Part II: How metal grain size affects a bending operation.** Disponível em:

<<https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/grain-size-part-ii-how-metal-grain-size-affects-a-bending-operation>>. Acesso em: 6 fev. 2022.

BERNIER, N. et al. EBSD study of angular deviations from the Goss component in grain-oriented electrical steels. **Micron**, v. 54–55, p. 43–51, nov. 2013.

BERRADA, M. et al. Electrical Resistivity Measurements of Fe-Si With Implications for the Early Lunar Dynamo. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 125, n. 7, p. 1–15, 2020.

BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 24, n. 1, p. 621–630, jan. 1988.

BERTOTTI, G.; FIORILLO, F. 7 Magnetic alloys for technical applications. In: H. P. J. WIJN (Ed.). **Magnetic Alloys for Technical Applications. Soft Magnetic Alloys, Invar and Elinvar Alloys**. 1. ed. [s.l.] Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994. p. 253.

BERTOTTI, G.; FIORILLO, F. Magnetic Losses. In: **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 1–13.

BERTOTTI, G.; MAYERGOYZ, I. D. **The Science of Hysteresis: 3-volume set**. 1. ed. [s.l.] Academic Press, 2006. v. 1.

BETZ, B. et al. Frequency-Induced Bulk Magnetic Domain-Wall Freezing Visualized by Neutron Dark-Field Imaging. **Physical Review Applied**, v. 6, n. 2, p. 024024, 30 ago. 2016.

BIROSCA, S. et al. Mechanistic approach of Goss abnormal grain growth in electrical steel: Theory and argument. **Acta Materialia**, v. 185, p. 370–381, fev. 2020.

BUSCHOW, K. H. J.; DE BOER, F. R. **Physics of Magnetism and Magnetic Materials**. 1. ed. Boston, MA: Springer US, 2003.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. R. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2021.

CANALYS. **Global electric vehicle sales up 39% in 2020 as overall car market collapses**. Disponível em: <https://canalys-com-public-prod.s3.eu-west-2.amazonaws.com/static/press_release/2021/EVmediaalert040221.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2021.

CARARA, M. A. **Dinâmica de paredes de domínios magnéticos: Um estudo através da impedanciometria**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

CESAR, M. DAS G. M. M. **Efeito do estiramento da tira durante o recozimento e descarbonetação nas estruturas primária e secundária e nas propriedades magnéticas de um aço 3% Si.** [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.

CHASIOTIS, I. D.; KARNAVAS, Y. L.; SCUILLER, F. Effect of Rotor Bars Shape on the Single-Phase Induction Motors Performance: An Analysis toward Their Efficiency Improvement. **Energies**, v. 15, n. 3, 2022.

CHAUDHURY, A. et al. Low silicon non-grain-oriented electrical steel: Linking magnetic properties with metallurgical factors. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 313, n. 1, p. 21–28, 2007.

CHEN, L. et al. Dynamic Magnetic Hysteresis Modeling Based on Improved Parametric Magneto-Dynamic Model. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 32, n. 6, p. 1–5, set. 2022.

CHERNENKOV, Y. P. et al. An X-ray diffraction study of the short-range ordering in the soft-magnetic Fe–Si alloys with induced magnetic anisotropy. **Physica B: Condensed Matter**, v. 396, n. 1–2, p. 220–230, jun. 2007.

CHIKAZUMI, S. **Physics of Ferromagnetism**. 2. ed. [s.l.] Oxford Science Publications, 1997.

CUI, S.; JUNG, I. H. Critical reassessment of the Fe-Si system. **Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry**, v. 56, n. January, p. 108–125, 2017.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. ed. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2008.

DE CAMPOS, M. F.; TEIXEIRA, J. C.; LANDGRAF, F. J. G. The optimum grain size for minimizing energy losses in iron. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 301, n. 1, p. 94–99, jun. 2006.

DIAS, M. B. S. et al. Power loss reduction of uncoated grain oriented electrical steel using annealing under stress treatment. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 504, n. February, p. 166632, jun. 2020.

DLALA, E. Comparison of Models for Estimating Magnetic Core Losses in Electrical Machines Using the Finite-Element Method. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 45, n. 2, p. 716–725, fev. 2009.

DOBÁK, S. et al. Magnetic Losses in Soft Ferrites. **Magnetochemistry**, v. 8, n. 6, p. 60, 2 jun. 2022.

ENGLER, O.; RANDLE, V. **Introduction to texture analysis: Macrotexture, microtexture, and orientation mapping**. 2. ed. [s.l.: s.n.].

FUKUHARA, M. et al. **Localização do efeito do tamanho de grão e da textura**

cristalográfica na curva de histerese do aço silício. 67º Congresso anual da ABM. **Anais...**Rio de Janeiro: 2012.

GALLAUGHER, M. et al. The effect of easy axis misorientation on the low induction hysteresis properties of non-oriented electrical steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 382, p. 124–133, 2015.

GHOSH, P. et al. Effect of metallurgical factors on the bulk magnetic properties of non-oriented electrical steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 356, p. 42–51, abr. 2014.

GOSS, N. P. **Electrical sheet and method and apparatus for its manufacture and test***Angewandte Chemie International Edition*, **6(11)**, 951–952. United States, 1934. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US1965559A/en>>.

GUIMARÃES, A. P. **Magnetismo e ressonância magnética em sólidos.** 1. ed. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2009.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009.

HE, Z. et al. Anomalous Loss and Hysteresis Loop in Electrical Steel Sheet. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 57, n. 6, p. 1–4, jun. 2021.

HE, Z.; KIM, J.-S.; KOH, C.-S. An Improved Model for Anomalous Loss Utilizing Loss Separation and Comparison With ANN Model in Electrical Steel Sheet. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 58, n. 9, p. 1–5, set. 2022.

HIGUCHI, S. et al. Modeling of Two-Dimensional Magnetic Properties Based on One-Dimensional Magnetic Measurements. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 48, n. 11, p. 3486–3489, nov. 2012.

JUNIOR, D. L. R. Efeito Do Tamanho De Grão E Da Indução Magnética Sobre O Campo Coercivo E Dissipação De Energia Por Histerese Em Aços Para Fins Elétricos. p. 119, 2010.

KOCKS, U. F.; TOMÉ, C. N.; WENK, H. R. **Texture and anisotropy: preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties.** 1. ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1998.

KOPRIVICA, B. M.; DIVAC, S. Analysis and Modeling of Instantaneous Magnetizing Power of Ferromagnetic Cores in the Time Domain. **IEEE Magnetics Letters**, v. 12, p. 1–5, 2021.

LANDGRAF, F. J. G.; DA SILVEIRA, J. R. F.; RODRIGUES-JR., D. Determining the effect of grain size and maximum induction upon coercive field of electrical steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 323, n. 18–19, p. 2335–2339, 2011.

LANDGRAF, F. J. G.; DE CAMPOS, M. F.; LEICHT, J. Hysteresis loss subdivision. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 320, n. 20, p. 2494–2498, out. 2008.

LEUNING, N.; STEENTJES, S.; HAMEYER, K. Effect of grain size and magnetic texture on iron-loss components in NO electrical steel at different frequencies. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 469, p. 373–382, jan. 2019.

LOISOS, G.; MOSES, A. .; BECKLEY, P. Electrical stress on electrical steel coatings. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 254–255, p. 340–342, jan. 2003.

MAGMATTEC. **Núcleos de liga Sendust**. Disponível em: <<https://www.magmattec.com.br/materiais-magneticos-e-aplicacoes/nucleos-de-liga-sendust>>. Acesso em: 4 ago. 2021.

MASUMOTO, H.; YAMAMOTO, T. On a New Alloy “Sendust” and its Magnetic and Electric Properties. **The Journal of the Japan Institute of Metals**, v. 1, n. 3, p. 127–135, 1937.

MATSUMURA, K.; FUKUDA, B. Recent developments of non-oriented electrical steel sheets. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 20, n. 5, p. 1533–1538, set. 1984.

MEHDI, M. et al. The Origins of the Goss Orientation in Non-Oriented Electrical Steel and the Evolution of the Goss Texture during Thermomechanical Processing. **steel research international**, v. 90, n. 7, p. 1800582, 25 jul. 2019.

MEURER, E. J. **Estudo das Perdas Magnéticas Interlaminares em Máquinas Elétricas**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2005.

MOSES, A. et al. **Electrical Steels - Volume 2: Performance and applications**. 1. ed. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2019.

NOVAK, G. et al. Correlation between the excess losses and the relative permeability in fully finished non-oriented electrical steels. **Materiali in tehnologije / Materials and technology**, v. 48, n. 6, p. 997–1001, 2014.

NOVAK, G. et al. Improved model based on the modified Steinmetz equation for predicting the magnetic losses in non-oriented electrical steels that is valid for elevated temperatures and frequencies. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 53, n. 10, 2017.

NOVIKOV, I. **Teoria dos Tratamentos térmicos dos metais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.

NUNES, C. DOS S. et al. Influence of the cutting process, heat treatment, and

maximum magnetic induction on the magnetic properties of highly oriented electrical steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 537, p. 168211, 1 nov. 2021.

OU, J.; LIU, Y.; DOPPELBAUER, M. Comparison Study of a Surface-Mounted PM Rotor and an Interior PM Rotor Made From Amorphous Metal of High-Speed Motors. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 68, n. 10, p. 9148–9159, out. 2021.

OUYANG, G. et al. Review of Fe-6.5 wt% Si high silicon steel - A promising soft magnetic material for sub-kHz application. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 481, n. October 2018, p. 234–250, jul. 2019.

PALTANEA, G. et al. Cutting Technologies Influence on Magnetic Properties of Electrical Steels used in High-Efficiency Motors Manufacturing. **Proceedings 2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2019 and 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2019**, p. 166–171, 2019.

PEDROSA, J. S. M.; PAOLINELLI, S. DA C.; COTA, A. B. Influence of initial annealing on structure evolution and magnetic properties of 3.4% Si non-oriented steel during final annealing. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 393, p. 146–150, nov. 2015.

PLUTA, W. A. Some properties of factors of specific total loss components in electrical steel. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 46, n. 2, p. 322–325, 2010.

PLUTA, W. A. Measurements of magnetic properties of electrical steel sheets for the aim of loss separation. **Journal of Electrical Engineering**, v. 61, n. 7 SUPPL, p. 58–61, 2013.

PUCHÝ, V. et al. Effect of fiber laser treating on magnetic domains in the grain-oriented silicon steel: Imaging domains by bitter, MFM and kerr microscopy. **High Temperature Materials and Processes**, v. 35, n. 7, p. 739–744, 2016.

RODRIGUES, D. L. et al. The Effect of Recovery Annealing on the Magnetic and Mechanical Properties of Nonoriented Electrical Steels. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 50, n. 4, 2014.

RODRIGUES JUNIOR, D. L. et al. **O efeito do tratamento térmico de recuperação sobre as propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não orientado**. 68º Congresso anual da ABM. **Anais...**2013.

SANTOS, J. P. **Influências do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos - O efeito textura**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2005.

SIDOR, J. J. et al. Through process texture evolution and magnetic properties

of high Si non-oriented electrical steels. **Materials Characterization**, v. 71, p. 49–57, set. 2012.

SYUGAEV, A. V. et al. Formation, characterization and protective properties of organic/silicate hybrid shells on flaky Fe-Si-Al particles obtained by wet ball milling. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 622, p. 126692, 2021.

TONG, B. et al. **Stress analysis of motor cores based on the measurement of magnetostriction of non-oriented silicon steel sheet**. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). **Anais...IEEE**, ago. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8056275/>>.

TORRES, W. S. et al. Top-down and bottom-up approaches to obtain magnetic nanoparticle of Fe₃O₄ compound: Pulsed laser deposition and chemical route. **Materials Chemistry and Physics**, v. 290, n. April, p. 126511, out. 2022.

TOTTEN, G. E. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies**. 2. ed. Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group, 2006.

VARGA, L. K.; KOVAC, J. Decomposing the permeability spectra of nanocrystalline finemet core. **AIP Advances**, v. 8, n. 4, p. 047205, abr. 2018.

WAEZLHOLZ. **Aço elétrico de grãos não-orientados em prol da mais alta performance de motores elétricos**. Disponível em: <<https://www.waelzholz.com/pt/segmentos-aplicacoes/materiais-do-futuro/aco-para-rotores-e-estatores.html>>. Acesso em: 5 fev. 2022.

WEISS, P. L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique. **Journal de Physique Théorique et Appliquée**, v. 6, n. 1, p. 661–690, 1907.

YONAMINE, T. et al. **Anisotropia das propriedades magnéticas de aços semi-processados**. 57º Congresso Anual da ABM. **Anais...São Paulo**: 2002.

9 APÊNCICE A: Imagens obtidas durante as caracterizações

Figura A. 1 - Grupo 1 (Amostra A) - Aço GNO M350-50A



Fonte: autor.

Figura A. 2 - Grupo 2 (Amostra D) - Aço GNO M350-50A



Fonte: autor.

Figura A. 3 - Grupo 3 (Amostra E) - Aço GNO M530-54A



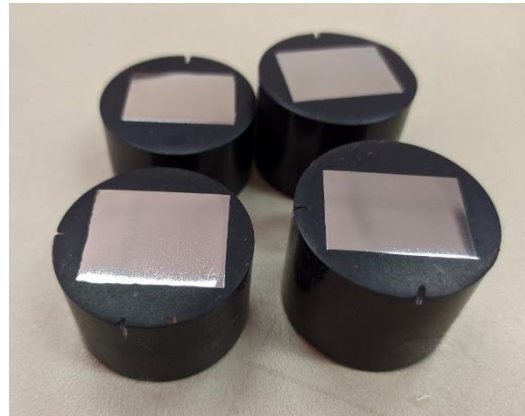
Fonte: autor.

Figura A. 4 - Grupo 4 (Amostras G e H) - Aço GNO M530-54A



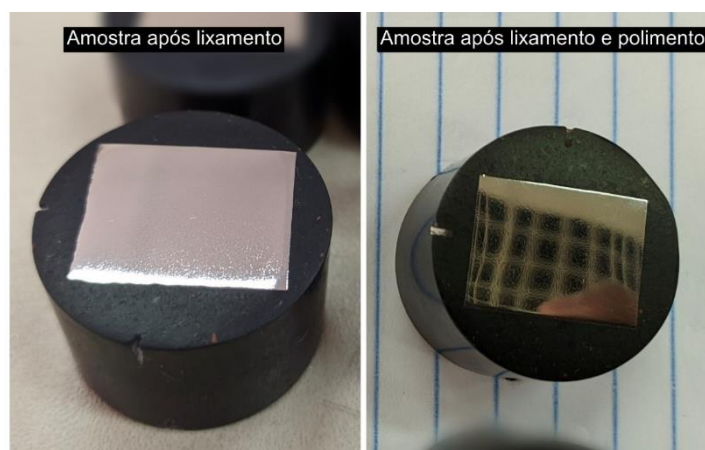
Fonte: autor.

Figura A. 5 - Algumas das amostras após processo de corte, embutimento e lixamento



Fonte: autor.

Figura A. 6 - Comparação do aspecto superficial da amostra lixada com a amostra lixada e polida



Fonte: autor.