

JOÃO PAULO DI CUNTO

Anisotropia magnética e separação de perdas em aços elétricos de grão orientado (GO)

São Paulo

2022

JOÃO PAULO DI CUNTO

Anisotropia magnética e separação de perdas em aços elétricos de grão orientado (GO)

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Fernando José Gomes
Landgraf

São Paulo

2022

Ficha catalográfica

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de AGOSTO de 2022.

Assinatura do autor:

João Paulo Di Cunto

Assinatura do orientador:

Paulo José

Di Cunto, João Paulo

Anisotropia magnética e separação de perdas em aços elétricos de grão orientado (GO). São Paulo, 2022.

107 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Aço elétrico 2. Propriedades magnéticas 3. Histerese magnética 4. Textura cristalográfica. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

“Revelemo-nos mais por atos do que por palavras,
dignos de possuir este grande país.”

**Dr. Theodomiro Carneiro Santiago – Fundador do
Instituto Eletrotécnico e Mecânico de Itajubá (IEMI)
(1883-1936)**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Fernando José Gomes Landgraf, orientador deste trabalho e cujos entusiasmo e amizade infindáveis se tornaram peça-chave para a conclusão deste projeto.

Aos meus pais Hilda e Francesco (in memoriam) por me mostrarem sempre o melhor caminho e me permitirem chegar até aqui.

À Ana Carolina, pela compreensão nos momentos de minha ausência e apoio nas horas mais difíceis.

Ao meu irmão Julio Cesar, por ser um exemplo de irmão e engenheiro, uma grande referência pessoal e profissional.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, em particular nas figuras de Ramon Valls Martin e Diego Joriro Nazarre, pela grande ajuda e prestatividade na realização dos ensaios deste trabalho.

À Aperam South America por incentivar e permitir dedicar parte de meu tempo hábil de trabalho para este projeto.

Aos meus colegas Daniel, Adriano e Mateus do “Grupo de Estudos de Materiais Magnéticos” pelo compartilhamento do conhecimento e pelas nossas interessantes reuniões de Sextas-Feiras na Escola Politécnica.

À Darlan Coelho, pela grande amizade e por compartilhar os fins de semana de estudo para as provas da PMT-Poli.

RESUMO

Aços elétricos de grão orientado (GO) são utilizados principalmente em núcleos magnéticos de transformadores. Tais núcleos são construídos objetivando-se minimizar as perdas magnéticas e maximizar a indução magnética do material através a magnetização do material na direção paralela à laminação (DL) (i.e., paralelamente à direção de alta permeabilidade) em detrimento à direção transversal à laminação (DT), uma vez que os aços elétricos de grão orientado (GO) tratam-se de materiais altamente anisotrópicos. No entanto, sabe-se que existem partes do núcleo magnético do transformador nas quais existem parcelas significativas de material magnetizadas em direções fora da direção de laminação (DL), como por exemplo na direção transversal à laminação (DT). Uma melhor compreensão das perdas magnéticas e dos mecanismos de magnetização dos aços elétricos de grão orientado (GO) tanto na direção paralela à laminação (DL) quanto na direção transversal à laminação (DT) pode ser de grande valia para a seleção adequada de materiais e para a otimização do projeto do transformador.

O presente trabalho investiga a relação entre a textura cristalográfica dos aços elétricos de grão orientado (GO) e suas diferentes perdas magnéticas (i.e., perdas totais, parasitas, histeréticas e anômalas) tanto para amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) quanto para as cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

Através do método de separação de perdas magnéticas faz-se uma análise detalhada das perdas totais, parasitas, histeréticas e anômalas em diferentes graus de aços elétricos de grão orientado regulares (RGO) e de aços elétricos de grão orientado de alta permeabilidade (HGO) em amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) e transversalmente à direção de laminação (DT). As curvas de histerese destas amostras são construídas, analisadas e comparadas sob o aspecto de sua forma, dimensão e no que toca à fenomenologia de seus processos de magnetização e desmagnetização.

Palavras-chaves: Aço elétrico, perda magnética, indução magnética, textura cristalográfica, propriedades magnéticas, histerese magnética.

ABSTRACT

Grain oriented electrical steel (GOES) are mainly used on magnetic cores of transformers. Such cores are built aiming to minimize the magnetic losses and maximize the material's magnetic induction by magnetizing the material in parallel to the rolling direction (RD) (i.e., parallel to the high permeability direction) in detriment to the transverse direction (TD), since the grain oriented electrical steel (GOES) are highly anisotropic materials. However, it is known that there are parts in the transformer's magnetic core where there are significant portions of material magnetized in a direction other than the rolling direction (RD), such as the transverse direction (TD). A better understanding of the magnetic losses and the magnetization mechanisms of grain oriented electrical steels (GOES) both in the rolling direction (RD) and the transverse direction (TD) can be of great value to the proper selection of materials and to optimizing the transformer design.

The present paper investigates the relationship between the crystallographic texture of the grain oriented electrical steels (GOES) and its different magnetic losses (i.e., total loss, eddy loss, hysteresis loss and anomalous loss) both for the samples cut in parallel to the rolling direction (RD) and for the cut transversely to the rolling direction (TD).

By making use of the loss separation model, a detailed analysis of the total, eddy, hysteretic and anomalous losses is carried out in different steel grades of conventional grain oriented electrical steels (CGO) and high permeability grain oriented electrical steels (HGO) in samples cut in parallel to the rolling direction (RD) and transversely to the rolling direction (TD). The hysteresis loops of these samples have been drawn, analyzed and compared as regarding of its shape, size and in terms of the phenomenology of its magnetization and demagnetization processes.

Keywords: Electrical steel, magnetic loss, magnetic induction, crystallographic texture, magnetic properties, hysteresis loop.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Layout de um típico sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (“Energês - A Linguagem da Energia (Senai)”, 2022).22**
- Figura 2: Corte transversal de um transformador (“Siemens Energy - Transformers”, 2022).23**
- Figura 3: Esboço das linhas de fluxo em parte de um núcleo magnético do tipo EI em um transformador trifásico (ARAI; MIZOKAMI; YABUMOTO, 2011).24**
- Figura 4: Comparação entre as texturas presentes nos aços elétricos GNO e nos aços elétricos GO (HAYAKAWA, 2021).27**
- Figura 5: Modelo aproximado das rotas de produção dos aços elétricos de grão-orientado convencional (RGO) – Rota via MnS - e do aço elétrico de alta permeabilidade (HGO) – Rota via AlN (MOSES, 1990).31**
- Figura 6: Histórico do desenvolvimento dos aços elétricos GO da NSC mostrando a redução da espessura do material e seu impacto na redução das perdas magnéticas do mesmo (XIA; KANG; WANG, 2008).33**
- Figura 7: Detalhe da textura altamente anisotrópica presente em aços elétricos de grão-orientado, a textura do tipo Goss (CÂNDIDO, 2014).37**
- Figura 8: Curvas de magnetização com o campo H aplicado em 3 diferentes direções cristalinas de um monocristal (LANDGRAF, 2002).37**
- Figura 9: Curvas de histerese medidas no quadro de Epstein de aço elétrico de grão-orientado (GO) Fe(3%massa) Si de espessura 0,30 mm (FIORILLO et al., 2002).39**
- Figura 10: Subdivisão da perda histerética nas componentes de alta indução (acima de $B(\mu_{m\acute{a}x})$) e baixa indução (abaixo de $B(\mu_{m\acute{a}x})$) (LANDGRAF, 2002).40**
- Figura 11: a) Diagrama esquemático do campo de deformação da rede nas**

vizinhanças de uma inclusão com parâmetros de rede menores do que aqueles da matriz original. b) Dobra de uma parede de domínio por uma hipotética inclusão enquanto a parede se move da esquerda para a direita (STEFANITA, 2012).43

Figura 12: Curva de histerese típica de um aço GNO Fe-(3%massa)Si 0,35 mm de espessura, medida sob indução B senoidal controlada com $B_{\text{máx}} = 1,0$ T em diferentes frequências (quase estática, 50 Hz e 400 Hz) (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006).44

Figura 13: Energia acumulada no ramo ascendente da curva de histerese (LANDGRAF, 2002).45

Figura 14: Energia dissipada no ramo descendente da curva de histerese (LANDGRAF, 2002).45

Figura 15: Modelo de domínios de parede de Pry e Bean (PRY; BEAN, 1958). .47

Figura 16: Interações entre os domínios magnéticos de um aço silício GO e as tensões mecânicas localizadas introduzidas no mesmo através do refino a laser. a) Padrão de tensões mecânicas observadas abaixo do revestimento isolante do aço silício GO através do microscópio eletrônico de varredura. b e c) Imagens de alta resolução de um aço silício GO após a remoção de seu revestimento isolante. b) face superior, sobre a qual o refino de laser foi aplicado. c) face inferior, sem refino a laser (HUBERT; SCHAFER, 2008).48

Figura 17: Determinação da massa das amostras de GO efetuada antes da realização dos ensaios no Quadro de Epstein. Fonte: O Autor.52

Figura 18: Quadro de Epstein do Laboratório de Metrologia Elétrica (LME) do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Fonte: O Autor.53

Figura 19: Detalhe do intercalamento das lâminas no Quadro de Epstein (IPT, 2011).53

Figura 20: Disposição dos enrolamentos primário “P” e secundário “S” num

Quadro de Epstein com amostras de aço-silício GO inseridas no mesmo. Adaptado de (CULLITY; GRAHAM, 2008).....	54
Figura 21: Esquema de montagem dos equipamentos localizados no LME-IPT para a realização das medidas propostas no presente trabalho. Na foto: 1) Interface computacional com programa de aquisição de dados; 2) Conjunto de aparatos para obtenção de medidas do Quadro de Epstein; 3) Quadro de Epstein modelo 3266 da Yokogawa; 4) Fonte de potência modelo BOP 50-8M da KEPCO. Fonte: O Autor.....	55
Figura 22: Diagrama de conexões de equipamentos para realização de medidas nas frequências de 50Hz e 60Hz (IPT, 2011).	56
Figura 23: Interface computacional para aquisição de dados do Quadro de Epstein nas frequências de 50Hz e 60Hz. Fonte: O Autor.	56
Figura 24: Diagrama de conexões de equipamentos para realização de medidas em regime quase-estático (0,05Hz) (IPT, 2011).....	57
Figura 25: Interface computacional para aquisição de dados do Quadro de Epstein em regime quase-estático (0,05Hz). Fonte: O Autor.....	57
Figura 26: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 1,0 T das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).	62
Figura 27: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 1,5 T das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).	63
Figura 28: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 1,7 T das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).	64
Figura 29: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 0,5 T das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).	66

Figura 30: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 0,9 T das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).....	67
Figura 31: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 1,3 T das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).....	68
Figura 32: B800 em função das perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}) sob indução de 1,7T e frequência de 50Hz.....	71
Figura 33: Detalhe da textura Goss de um aço elétrico de grão orientado (NA; FLATAU, 2012).....	72
Figura 34: B800 em função das perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT}) sob indução de 1,3T e frequência de 50Hz.....	73
Figura 35: Três tipos de domínios observados durante o processo de magnetização do GO na DT. O padrão “dente de serra” (a,e) observado até 0,3 x saturação, seguido pelo padrão “coluna” (b,f) até o início das rotações de magnetização (~0,7 x saturação). Em campos mais altos (c,d) é observado o desenvolvimento do padrão “ramificação”. Os modelos e), f) e g) representam as seções transversais através das faixas brancas indicadas em a), b) e c). Notar que as direções [100] e [0-10] estão no plano da figura e) e fora dos planos das figuras f) e g). O modelo g) mostra o padrão “ramificação” mais simples, aproximadamente como em c).....	75
Figura 36: B800 em função das perdas parasitas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{pDL}) sob indução de 1,7T e frequência de 50Hz.....	76
Figura 37: B800 em função das perdas parasitas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{pDT}) sob indução de 1,3T e frequência de 50Hz.....	77

Figura 38: B800 em função das perdas histeréticas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{hDL}) sob indução de 1,7T e frequência de 50Hz.....	78
Figura 39: B800 em função das perdas histeréticas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{hDT}) sob indução de 1,3T e frequência de 50Hz.....	79
Figura 40: B800 em função das perdas anômalas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{aDL}) sob indução de 1,7T e frequência de 50Hz.....	80
Figura 41: B800 em função das perdas anômalas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{aDT}) sob indução de 1,3T e frequência de 50Hz.....	81
Figura 42: Perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.	82
Figura 43: Perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.	83
Figura 44: Perdas parasitas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{pDL}) e transversalmente à direção de laminação (P_{pDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.	84
Figura 45: Perdas histeréticas (P_{hDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).....	85
Figura 46: Perdas histeréticas (P_{hDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).....	86
Figura 47: Perdas anômalas (P_{aDL}) em função da Indução Magnética (B) sob	

frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).....	87
Figura 48: Perdas anômalas (P_{aDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DL).....	88
Figura 49: Relação P_h/P_a em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).....	89
Figura 50: Relação P_h/P_a em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).....	90
Figura 51: Relação P_a/P_p em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).....	91
Figura 52: Relação P_a/P_p em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).....	92
Figura 53: Relação P_h/P_p em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).....	94
Figura 54: Relação P_h/P_p em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).....	95
Figura 55: Exemplos de separação de perdas em diferentes materiais magnéticos sob frequência de 50Hz e Indução Magnética máxima de 1,25 T (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006).....	96
Figura 56: Participação relativa das perdas parasita, histerética e anômala na perda total sob induções máximas de 1,0 T, 1,5 T e 1,7 T e frequência de 50 Hz, direção longitudinal (DL).....	97
Figura 57: Participação relativa das perdas parasita, histerética e anômala na perda total sob induções máximas de 0,5 T, 0,9 T e 1,3 T e frequência de 50 Hz, direção transversal (DT).....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estimativa das perdas energéticas associadas aos aços elétricos no ano de 2016. Adaptado de (MOSES et al., 2019a).....	21
Tabela 2: Quadro comparativo entre características de inibidores “inerentes” e inibidores “adquiridos”. Adaptado de (XIA; KANG; WANG, 2008).	35
Tabela 3: Composição química típica dos aços silício GO estudados, em %. Fonte: Certificado de Composição Química do fabricante. Fonte: Fabricante do aço silício GO das amostras.	50
Tabela 4: Propriedades magnéticas típicas das amostras de aço silício GO utilizadas segundo catálogo do fabricante. Propriedades obtidas segundo instruções da norma IEC 60404-2. Fonte: Catálogo do fabricante.	50
Tabela 5: Propriedades mecânicas e fator da laminação típicos das amostras de aço silício GO utilizadas segundo catálogo do fabricante. Propriedades obtidas segundo instruções da norma IEC 60404-2. Fonte: Catálogo do fabricante.....	51
Tabela 6: B800 e Perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}).....	58
Tabela 7: B800 e Perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT})	58
Tabela 8: Perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}).	59
Tabela 9: Perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT}).	59
Tabela 10: Perdas parasitas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{pDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.	60
Tabela 11: Perdas parasitas das amostras cortadas transversalmente à direção	

de laminação (P_{pDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.	60
Tabela 12: Perdas histeréticas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{hDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.	61
Tabela 13: Perdas histeréticas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{hDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.....	65
Tabela 14: Perdas anômalas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{aDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz.	69
Tabela 15: Perdas anômalas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{aDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.	70
Tabela 16: Valores referenciais de B800mín nas normas IEC 60404-8-7 e ASTM A876 versus B800 medido.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Indução magnética (T)
B8	Permeabilidade magnética do aço elétrico quando submetido à um campo magnético de 796 A/m (T)
B _{máx}	Indução magnética máxima (T)
d	Densidade (kg/m ³ ou kg/dm ³)
DL	Direção paralela à de laminação
DT	Direção transversal à de laminação
e	Espessura (mm)
f	Frequência aplicada (Hz)
GNO	Grão não-orientado
GO	Grão orientado
H	Campo magnético (A/m)
HGO	Aço elétrico de grão orientado de alta permeabilidade
H _{máx}	Campo magnético máximo (A/m)
I	Corrente elétrica (A)
P _a	Perda anômala (W/kg ou W/m ³)
P _h	Perda histerética (W/kg ou W/m ³)
P _p	Perda parasita (W/kg ou W/m ³)
P _t	Perda magnética total (W/kg ou W/m ³)
R	Resistência elétrica (Ω)
RGO	Aço elétrico de grão orientado regular
t	Tempo (s)
μ _{máx}	Permeabilidade magnética máxima (adimensional)
ρ	Resistividade elétrica (Ω.m)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE SÍMBOLOS	16
1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS.....	25
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3.1. Aços Elétricos.....	26
3.1.1. Aços elétricos de grão não-orientado (GNO).....	26
3.1.2. Aços elétricos de grão orientado (GO).....	27
3.1.3. História, desenvolvimento e tecnologias utilizadas no aço elétrico GO 28	
3.2. Perdas Magnéticas	40
3.2.1. Perda Parasita	41
3.2.2. Perda Histerética	43
3.2.3. Perda Anômala	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1. Materiais.....	49

4.2. Ensaio no Quadro de Epstein.....	52
5 RESULTADOS.....	58
5.1. B800.....	58
5.2. Perdas totais (P_t).....	58
5.3. Perdas parasitas (P_p).....	59
5.4. Perdas histeréticas (P_h).....	60
5.5. Perdas anômalas (P_a).....	69
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	71
6.1. B800.....	71
6.1.1. B800 em função das perdas totais (P_t).....	71
6.1.2. B800 em função das perdas parasitas (P_p).....	76
6.1.3. B800 em função das perdas histeréticas (P_h).....	77
6.1.4. B800 em função das perdas anômalas (P_a).....	79
6.2. Perdas Magnéticas.....	81
6.2.1. Perdas totais (P_t).....	81
6.2.2. Perdas parasitas (P_p).....	83
6.2.3. Perdas histeréticas (P_h).....	85
6.2.4. Perdas anômalas (P_a).....	87
6.3. Relações entre P_p , P_h e P_a	88
6.3.1. Relação P_h/P_a	88

6.3.2.	Relação P_a/P_p	91
6.3.3.	Relação P_h/P_p	93
6.3.4.	Participação % de P_a , P_h e P_p na composição de P_t	96
7	CONCLUSÕES.....	100
8	REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados preliminares divulgados em 2020 pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) o consumo total de energia elétrica no Brasil deve crescer à taxa média de 3,7% anuais entre 2020 e 2030 saltando da projeção atual para o ano de 2020 de 526 TWh para cerca de 756 TWh em 2030, o que representa um crescimento total do consumo de aproximadamente 43% em um intervalo de 10 anos (“Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 - Empresa de Pesquisa Energética/MME”, 2020).

Dentre os materiais utilizados na fabricação de equipamentos elétricos, existe um que marca presença fundamental no mercado de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica: os aços elétricos. Os aços elétricos para fins comerciais podem ser divididos em duas principais famílias: aços elétricos de grão não-orientado (GNO), usados na fabricação de compressores herméticos, motores elétricos e geradores de usinas hidrelétricas, termelétricas e eólicas, além de outras aplicações de menor escala comercial; e aços elétricos de grão orientado (GO), empregados principalmente na fabricação de transformadores, reatores de potência e em certos tipos de geradores elétricos cujo projeto permita o uso eficiente das características magnéticas direcionais do aço.

Estima-se que a demanda mundial de aços elétricos tenha terminado o ano de 2018 um pouco acima das 15,9 milhões de toneladas/ano, sendo que tal demanda deverá crescer a uma taxa média anual de aproximadamente 6% até 2030 podendo alcançar um mercado de USD 35 bilhões/ano traduzidos num consumo de cerca de 24 milhões de toneladas/ano (“Electrical Steel Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast, 2018–2026”, 2018).

Nesse contexto, fica evidente a importância do desenvolvimento e fabricação de equipamentos elétricos com características construtivas e materiais que ofereçam ao sistema elétrico crescentes patamares de eficiência energética, proporcionando assim um melhor aproveitamento da energia disponível para consumo.

O impacto global estimado da ineficiência energética atrelada às perdas magnéticas dos aços elétricos é mostrado na **Tabela 1**. Baseando-se nas premissas de (MOSES et al., 2019a) as perdas energéticas associadas aos aços elétricos representavam aprox. 4,4% da produção mundial de energia elétrica no ano de 2016 que foi cerca de 25.000 TWh.

Tabela 1: Estimativa das perdas energéticas associadas aos aços elétricos no ano de 2016. Adaptado de (MOSES et al., 2019a).

Aço elétrico	Perda magnética média (W/kg)	Fator de utilização aprox.	Volume da produção anual mundial (t)	Perda magnética anual total em novos equipamentos (TWh)	Volume estimado de aço nos equipamentos em uso (t)	Perda magnética anual total nos equipamentos em uso (TWh)	Produção mundial de energia elétrica anual (TWh)	Produção mundial anual de energia elétrica / Perda magnética anual total (%)
GNO	3,0	30%	10.000.000	78,840	50.000.000	394,200	25.000	1,9%
GO	1,3	90%	2.000.000	20,498	60.000.000	614,952		2,5%

Na vasta gama de equipamentos elétricos em operação, os transformadores têm destacada importância no cenário global e desde seu advento por volta de 1885, mudaram drasticamente os sistemas de transmissão e distribuição de energia. Antes de sua invenção, nos primeiros períodos da utilização da energia elétrica, esta era distribuída utilizando-se corrente contínua e em baixos níveis de tensão. Quedas de tensão na rede elétrica limitavam o uso da eletricidade apenas às áreas urbanas com circuitos elétricos de pequena escala. Além disso, todos equipamentos elétricos deveriam ser projetados para um mesmo nível de tensão. Com o uso da corrente alternada e o emprego de transformadores elevadores de tensão, a energia elétrica pôde então ser transmitida em maiores níveis de tensão e menores níveis de corrente, reduzindo as quedas de tensão e as perdas de energia na rede elétrica. Seu uso, permitiu o atendimento economicamente viável de consumidores a centenas de quilômetros de distância da central de geração. Na outra ponta de rede elétrica, transformadores abaixadores de tensão reduzem o nível de tensão para diferentes valores normatizados e prontos para o uso do consumidor (KULKARNI; KHAPARDE,

2017).

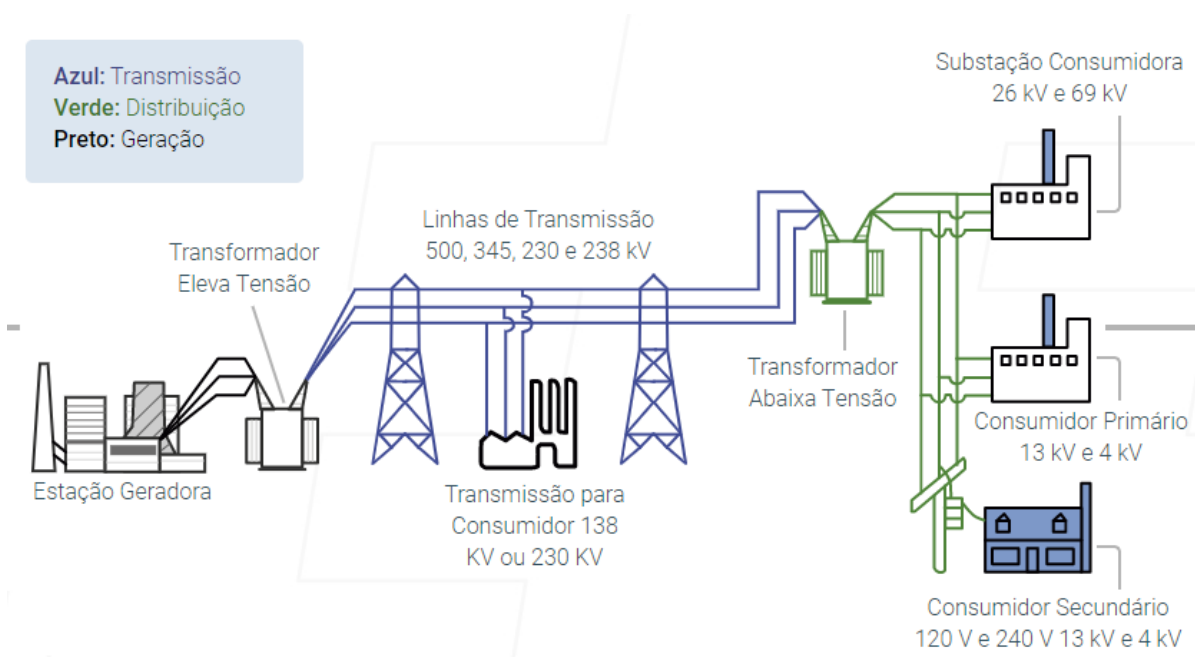


Figura 1: Layout de um típico sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (“Energês - A Linguagem da Energia (Senai)”, 2022).

As perdas de energia nos transformadores costumam ser divididas entre “perdas em carga” e “perdas em vazio” (DEL VECCHIO et al., 2017). As perdas em carga ocorrem quando o transformador está conectado à uma carga de modo que a corrente elétrica flua entre os terminais do transformador. Estas perdas incluem: a) as perdas por efeito Joule (ou perdas I^2R) causadas pela passagem de corrente nos enrolamentos, barramentos e buchas; b) as perdas parasitas nos enrolamentos causadas pelas correntes parasitas induzidas nos condutores pelo fluxo de dispersão; e c) as perdas adicionais causadas pela dispersão do fluxo em outras partes do transformador que não sejam os enrolamentos, tais como o tanque e estrutura metálicas (GEORGILAKIS, 2009).

Já as perdas em vazio, comumente chamadas de “perdas no núcleo” ou simplesmente “perdas magnéticas”, incluem: a) as perdas histeréticas, calculadas pela área interior de um ciclo histerético quase-estático na curva $B \times H$ (normalmente utilizada na descrição de materiais magnéticos) e que representa a quantidade de energia dissipada por ciclo; b) as perdas parasitas no núcleo, que surgem devido às tensões elétricas induzidas no núcleo pela variação da indução magnética, implicando por consequência na circulação de correntes parasitas dentro do núcleo; e c) as perdas anômalas.

O trabalho apresenta um estudo detalhado das componentes da perda em vazio tanto na DL quanto na DT.

Um melhor entendimento dos mecanismos de magnetização dos materiais magnéticos empregados na construção destes equipamentos pode proporcionar novos horizontes para o design e uma melhor relação custo-benefício na escolha dos materiais a serem utilizados na confecção deles.

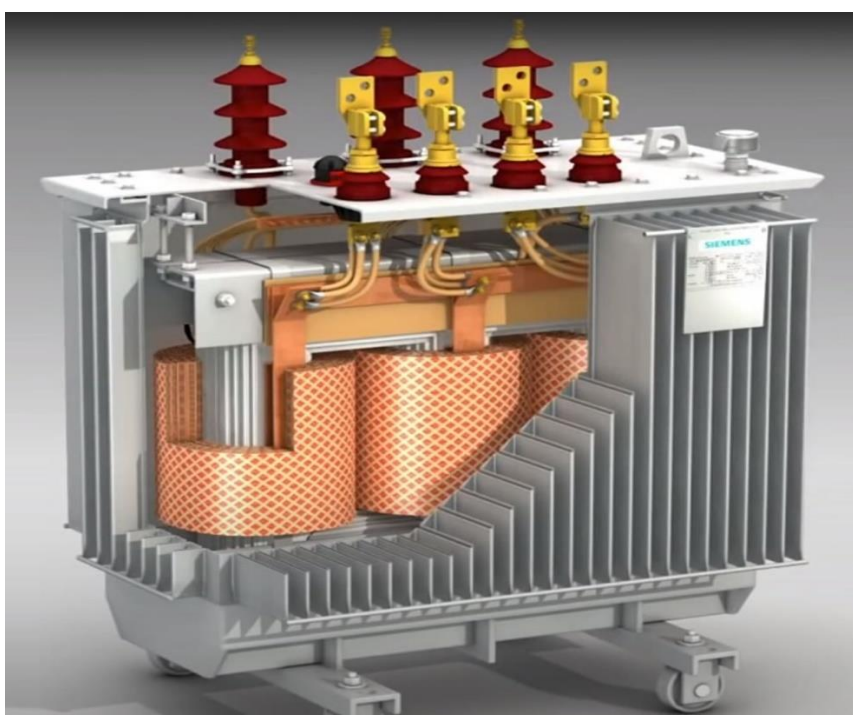


Figura 2: Corte transversal de um transformador (“Siemens Energy - Transformors”, 2022).

No que toca o design e funcionamento dos transformadores elétricos e sua relação com a magnetização dos aços elétricos GO na direção transversal (DT) à direção de laminação da bobina, pouco ainda foi estudado na literatura.

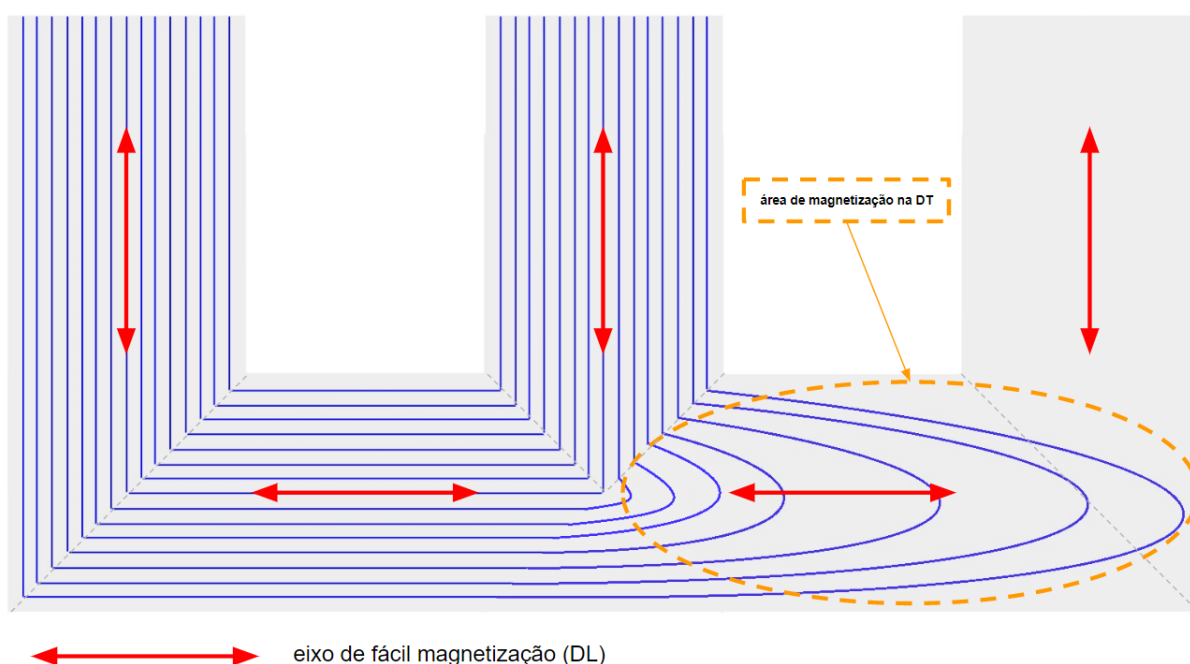


Figura 3: Esboço das linhas de fluxo em parte de um núcleo magnético do tipo EI em um transformador trifásico. Adaptado de (ARAI; MIZOKAMI; YABUMOTO, 2011).

Como mostrado na **Figura 3**, fica evidente a magnetização de partes do núcleo magnético do transformador fora da direção de laminação (DL), em especial nas junções em T e em L das lâminas do núcleo magnético.

Compreender melhor a magnetização dos aços elétricos GO na direção transversal (DT) à direção de laminação da bobina e os mecanismos envolvidos na mesma podem ajudar, por exemplo, a compreender melhor o efeito da magnetostricção nos transformadores elétricos, uma vez que ela está intimamente ligada à magnetização dos aços elétricos na DT. Cabe salientar que a magnetostricção é uma das principais causas de ruídos nos transformadores, que é um grande inconveniente principalmente em ambientes urbanos e sensíveis ao barulho.

2 OBJETIVOS

A presente tese tem como objetivos principais:

1. Verificar a relação entre a textura cristalográfica dos aços elétricos de grão orientado (GO) e suas diferentes perdas magnéticas (i.e., perdas totais, parasitas, histeréticas e anômalas) tanto para amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) quanto para as cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).
2. Construir, analisar e comparar as curvas de histerese de diferentes amostras de aços elétricos de grão orientado regulares (RGO) e de aços elétricos de grão orientado de alta permeabilidade (HGO) destacando o caráter distinto entre as curvas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) e as cortadas transversalmente à direção de laminação (DT) no que tange suas formas, dimensões e processos de magnetização-desmagnetização.
3. Fazendo-se uso do método de separação de perdas magnéticas totais em perdas parasitas, histeréticas e anômalas, realizar em variados níveis de indução e frequência uma avaliação quantitativa e qualitativa de tais perdas, assim como suas interrelações e uma análise fenomenológica dos processos magnéticos envolvidos em cada uma delas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços Elétricos

Os aços elétricos, também conhecidos como aço-silício, são materiais magnéticos moles amplamente utilizados na fabricação de equipamentos elétricos. São ligas de Fe-Si possuindo para fins comerciais normalmente entre 0,2% e 3,5% de Silício em sua composição.

Os aços elétricos costumam ser classificados e comercializados de acordo com a magnitude de suas perdas magnéticas a uma dada frequência e indução magnética. Outras propriedades como permeabilidade magnética e magnetostricção são muito importantes para várias aplicações, mas a perda magnética já é um bom indicativo da qualidade magnética do aço, sendo portanto um fator comum na avaliação de novos produtos (MOSES et al., 2019b).

Atualmente os aços elétricos podem ser divididos em duas grandes famílias: aços elétricos de grão não-orientado (“aços elétricos GNO”) e aços elétricos de grão-orientado (“aços elétricos GO”), fruto de estudo do presente trabalho.

3.1.1. Aços elétricos de grão não-orientado (GNO)

São comumente utilizados em núcleos magnéticos de pequeno, médio e grande porte. Entre suas principais aplicações encontram-se motores de passo, compressores herméticos de freezers e geladeiras, geradores, veículos elétricos, máquinas de solda, além de outras aplicações em menor escala. São aços com estrutura cristalina sem orientação pronunciada, onde objetivam-se propriedades magnéticas semelhantes para qualquer que seja a direção no plano da chapa em que o material é magnetizado. Nos aços elétricos GNO, a textura baseada em fibras $\langle 100 \rangle$ é tida como uma textura ideal, pois na realidade outros dois eixos de fácil magnetização $\langle 001 \rangle$ estão presentes no plano da chapa (HAYAKAWA, 2021).

Os aços elétricos GNO podem ser fornecidos prontos para o uso (estado “totalmente processado”) ou ainda em um estado “semiprocessado” onde o cliente

realiza o recozimento final do produto de forma a se desenvolver totalmente as propriedades magnéticas do aço. A vasta maioria dos aços elétricos GNO são usados em máquinas elétricas rotativas onde propriedades magnéticas isotrópicas são desejadas (MOSES et al., 2019b).

3.1.2. Aços elétricos de grão orientado (GO)

Presentes em núcleos de transformadores de força, distribuição, corrente e potência, assim como em hidrogeradores, turbogeradores e alguns reatores de potência. São aços com estrutura cristalina orientada em uma direção definida, anisotrópicos, e apresentam excelentes propriedades magnéticas na direção de laminação. A textura dos aços elétricos GO é caracterizada por uma textura $\{110\}\langle 001\rangle$ (textura Goss) nítida, onde o eixo de fácil magnetização $\langle 001\rangle$ é paralelo à direção do campo magnético aplicado na chapa (HAYAKAWA, 2021).

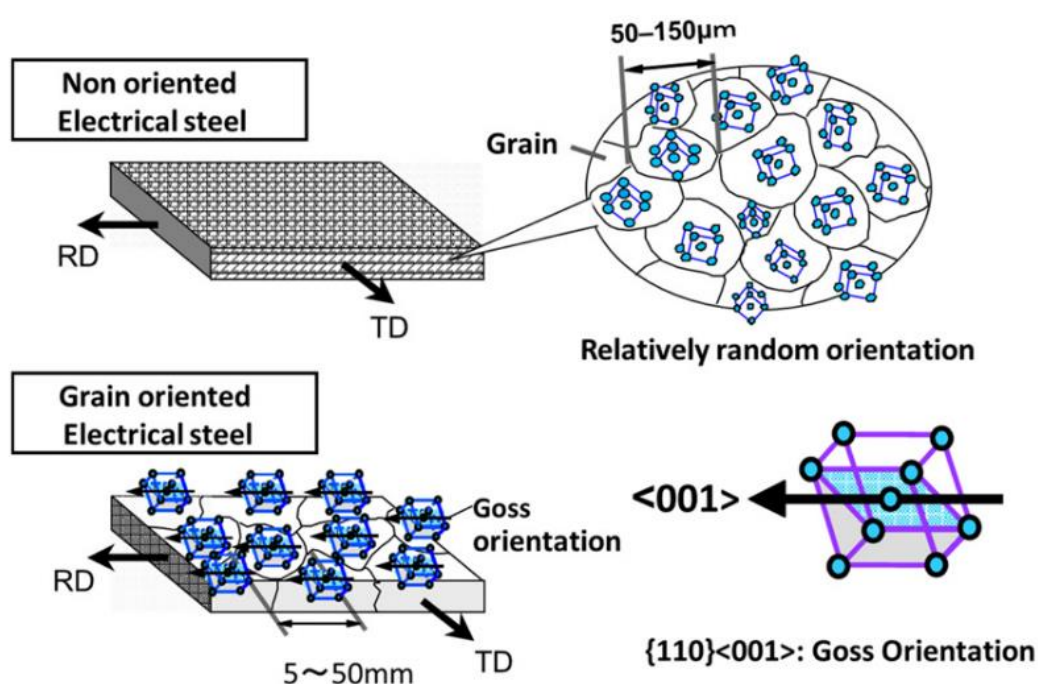


Figura 4: Comparação entre as texturas presentes nos aços elétricos GNO e nos aços elétricos GO (HAYAKAWA, 2021).

3.1.3. História, desenvolvimento e tecnologias utilizadas no aço elétrico GO

Desde o seu surgimento no começo do século passado até chegar à impressionante demanda mundial acima, importantes progressos científicos nos campos da siderurgia e do eletromagnetismo contribuíram para um rápido avanço tecnológico dos aços para fins elétricos, facilitando e ampliando cada vez mais sua utilização.

Em 1900, baseando nos estudos de E. Gumlich na Alemanha e de W. Barret, W. Brown e R. Hadfield na Grã-Bretanha, obteve-se pela primeira vez uma liga de Fe-Si com o intuito de utilizá-la em equipamentos elétricos. Notou-se que a adição de Si em uma liga de aço, aumentava substancialmente sua resistividade, o que conseqüentemente diminuía as perdas magnéticas por correntes parasitas (LOBANOV; RUSAKOV; REDIKUL'TSEV, 2011a).

Um pouco depois, em 1903, R. Hadfield patenteia a composição magnética (HADFIELD, 1903) e licencia a produção de Fe-Si na Alemanha, inicialmente com o intuito de se aproveitar as boas propriedades mecânicas da liga, principalmente para a confecção de rolamentos.

Em 1907, Pierre Weiss sugere que um material ferromagnético consiste em “pequenas regiões microscópicas” (chamadas “domínios”) que já se encontram espontaneamente magnetizadas (XIA; KANG; WANG, 2008).

Quase vinte anos depois, em 1926, K. Honda e S. Kaya, conseguem um importante avanço para a metalurgia, conseguindo-se pela primeira vez descrever o efeito da anisotropia magnética de um monocristal de ferro, i.e., as diferenças na intensidade da magnetização através das diferentes direções cristalográficas e o fato do eixo <001> ser o “eixo de fácil magnetização”. Isto possibilitou formular o conceito básico o controle das propriedades magnéticas dos aços.

Na patente americana no. 1965559, publicada em 03 de Julho de 1934, o engenheiro americano Norman Goss propõe um método para produção de aços elétricos, que viria se tornar a base para todas as variantes modernas de produção de

aços elétricos GO. O método propõe a fabricação de um aço laminado a frio utilizando-se de duas etapas de laminação a frio com um recozimento intermediário e um final de alta temperatura.

Partindo-se da patente de 1934 de Norman Goss, em 1940 a empresa americana Armco (hoje AK Steel) desenvolve um processo de descarbonetação contínua na presença de hidrogênio umedecido. Neste processo, o reaquecimento das placas é feito a aprox. 1400°C anteriormente a laminação a quente. Depois da laminação à frio, o material passa por um recozimento de recristalização secundária em caixa a aproximadamente 1200°C. A base do processo de Goss é recozer a lâmina de Fe-Si em aprox. 1200°C de forma a induzir a recristalização secundária gerando grãos maiores com textura [001](110) de forma predominante, devido à presença de MnS como inibidor do crescimento de outros tipos de textura. Os primeiros aços elétricos de grão-orientado produzidos pela empresa possuíam 0,32 mm de espessura e perdas magnéticas de aprox. 1,5 W/kg em 1,5T/50Hz.

Um dos mais importantes avanços na tecnologia de produção dos aços elétricos, particularmente dos aços elétricos GO, foi feito em 1968 com o lançamento do ORIENTCORE HI-B da Nippon Steel Corporation (NSC). Este novo tipo de aço elétrico GO de alta permeabilidade, tomando-se como base os processos de produção descritos nas patentes americanas no. 3159511 de S. Taguchi e A. Sakakura (1964) e no. 3287183 de S. Taguchi, A. Sakakura e H. Takashima (1966), proporcionou a produção de aços com um desvio médio dos grãos de 3° em relação à orientação ideal [001](110) versus 7° de desvio dos aços produzidos até então pela tecnologia Armco. A indução sob um campo magnético de 800 A/m (B8) foi aumentada de 1,82 T para 1,92 T, obtendo-se uma redução das perdas histeréticas de cerca de 0,19 W/kg em 1,7T/50Hz (XIA; KANG; WANG, 2008).

Desde então os aços elétricos GO passaram a ser classificados em dois tipos principais: aços elétricos GO regulares “RGO” (do inglês “*Regular Grain Oriented Electrical Steel*”) e aços elétricos de alta permeabilidade magnética “HI-B” ou “HGO” (HI-B do inglês “*High-B*”, B significando neste caso a indução magnética e HGO do inglês “*High Permeability Grain Oriented Electrical Steel*”). São duas as principais

diferenças entre eles:

1) Inibidor: No RGO utiliza-se o MnS e no HGO o AlN além do próprio MnS como principais inibidores do crescimento de grão da matriz recristalizada primária.

2) Textura de recristalização primária: o processo de produção do RGO envolve duas etapas de laminação à frio com um recozimento de recristalização intermediário entre elas. Já no processo de produção do HGO, utiliza-se uma única etapa de laminação à frio com uma forte redução de espessura de cerca de 87%, comparada à redução final de cerca de 50% do processo produtivo do RGO. Associado à essas diferenças destas reduções finais da laminação à frio, no aço RGO as componentes majoritárias da textura são $\{110\}\langle 001\rangle$ e $\{111\}\langle 112\rangle$. De outra maneira, $\{110\}\langle 001\rangle$ é uma componente minoritária e $\{111\}\langle 112\rangle$ uma componente majoritária no HGO (XIA; KANG; WANG, 2008).

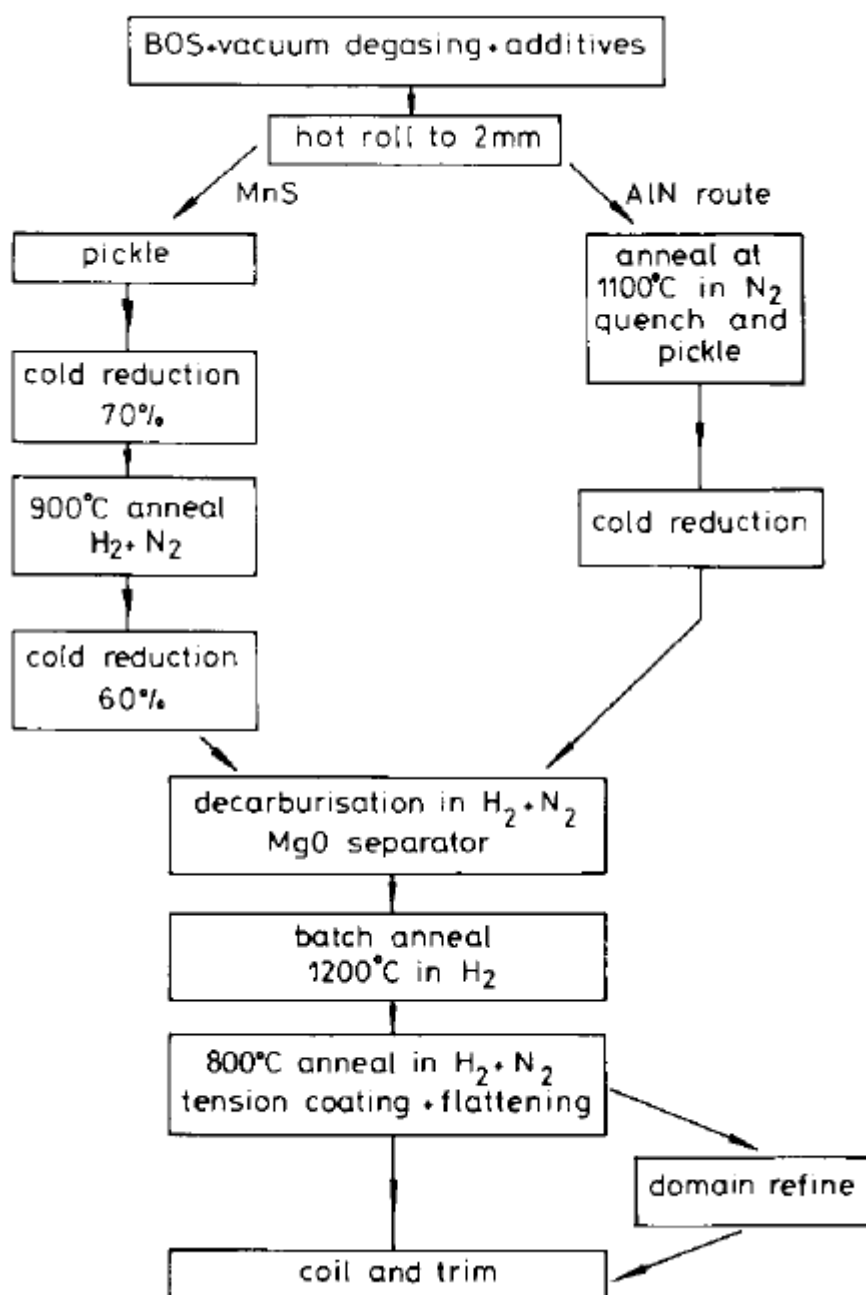


Figura 5: Modelo aproximado das rotas de produção dos aços elétricos de grão-orientado convencional (RGO) – Rota via MnS - e do aço elétrico de alta permeabilidade (HGO) – Rota via AlN (MOSES, 1990).

É importante salientar que atualmente tanto o RGO quanto o HGO ainda marcam presença ampla no mercado de aços elétricos, no entanto, a medida em que aumenta a demanda mundial por equipamentos elétricos mais eficientes (ou seja, no caso específico dos aços elétricos, aços com menores perdas magnéticas), a tendência é que o RGO deixe de ser produzido.

As perdas magnéticas consistem basicamente na soma das perdas histeréticas, perdas por correntes parasitas e perdas anômalas. Existe uma contradição básica entre as maneiras de controlá-las: As perdas magnéticas totais foram reduzidas com o advento do HGO, uma vez que as perdas histeréticas diminuem sensivelmente com a melhoria da orientação dos grãos com relação à $\{110\}\langle 001\rangle$. Por outro lado, o tamanho de grão do HGO é maior, resultando em maiores domínios magnéticos, que por sua vez acabam por gerar maiores níveis de correntes parasitas enquanto as paredes de domínios movem-se de um lado para o outro quando sob efeito de um campo alternado.

Sabe-se também que as correntes parasitas diminuem com a redução da espessura da lâmina de Fe-Si, e por isso, desde a produção dos primeiros aços elétricos GO, aços com espessuras cada vez menores vêm sendo desenvolvidos, partindo-se dos iniciais 0,35 mm (anos 30), passando-se por 0,32 mm, 0,30 mm, 0,27 mm, 0,23 mm, chegando-se à menor espessura produzida até hoje, 0,15 mm (produzida em laboratório pela NSC, sem uso comercial até o momento).

Um importante avanço foi feito em 1982 pela NSC ao conseguir produzir de forma estável os aços elétricos GO de espessura 0,23 mm, superando a instabilidade metalúrgica relativa à recristalização secundária em tal diminuta espessura.

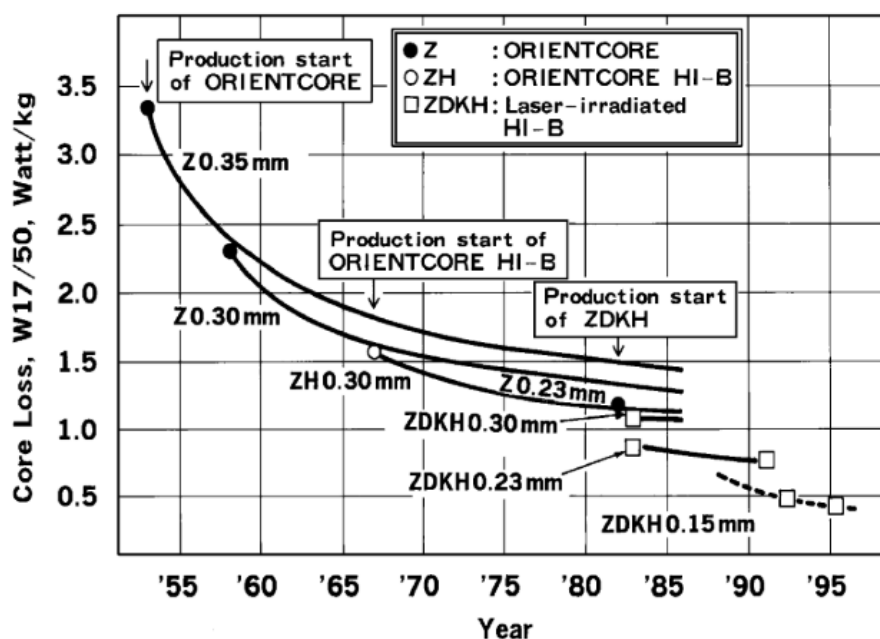


Figura 6: Histórico do desenvolvimento dos aços elétricos GO da NSC mostrando a redução da espessura do material e seu impacto na redução das perdas magnéticas do mesmo (XIA; KANG; WANG, 2008).

Neste mesmo ano, a mesma empresa foi responsável por mostrar ao mundo talvez a mais importante técnica de refino dos domínios magnéticos em escala comercial: o refino magnético por raios laser. Esta técnica se mostrou muito atrativa devido à sua eficiência, fácil implementação, natureza não-invasiva e relativo baixo dano ao revestimento superficial. Desde então, muitos fabricantes adotaram a técnica de refino magnético por raios laser em suas linhas de produção. Sob condições ótimas, a irradiação por laser pode proporcionar uma diminuição das perdas magnéticas de até 10% em 1,7T/50Hz, se comparadas as perdas com o mesmo tipo de aço sem a aplicação da técnica. Cabe lembrar que, embora seja vantajosa técnica e economicamente, o refino magnético por raios laser apresenta duas desvantagens: a primeira é o dano ao revestimento superficial do aço pela irradiação à laser; a segunda é a deterioração das perdas magnéticas quando o material é recozido a temperaturas superiores a 550°C, portanto, não devendo ser empregados em transformadores de núcleo enrolado, cujos núcleos devem ser recozidos para a diminuição do estresse residual causado durante a confecção dos mesmos.

Existem dois grandes inconvenientes com os processos de produção dos aços elétricos: 1) A alta temperatura de recozimento das placas; e 2) O longo e complicado

processo produtivo.

Um ponto crítico do processo convencional é que a placa deve ser reaquecida a temperaturas muito altas (~1400°C) para dissolver totalmente os sulfetos de manganês formados na solidificação de forma a assegurar, no processamento posterior, a formação de precipitados finos como inibidores de crescimento de grão no recozimento final. Durante o reaquecimento da placa, a contínua oxidação da superfície forma uma escoria líquida que escorre e se acumula do fundo do forno. Assim, o forno deve ser reparado a cada certo intervalo de produção, o que acaba sendo um inconveniente e aumenta os custos de produção.

Para diminuir a influência desses inconvenientes, hoje em dia praticamente todos os produtores estão buscando processos produtivos mais enxutos e econômicos. Assim, dado à existência de movimentos globais de proteção ao meio ambiente e economia de energia cada vez mais relevantes, um dos principais focos de melhoria no processo produtivo tem sido a diminuição da quantidade de energia empregada no mesmo.

Nos últimos anos diversos métodos têm surgido nesta direção, particularmente através do emprego da técnica chamada de reaquecimento de placas a baixa temperatura. Nela, dado que o AlN possui temperaturas de dissolução e precipitação menores do que o MnS, AlN é empregado como inibidor ao invés do MnS ou da combinação MnS+AlN. Estes novos métodos podem ser classificados em duas categorias na escala industrial (XIA; KANG; WANG, 2008):

O primeiro método procura adicionar elementos inibidores no aço líquido como usual, mas em proporções modificadas, para que assim eles possam ser levados à solução pelo menos parcialmente durante o reaquecimento das placas à baixa temperatura, e se tornarem precipitados durante a laminação à quente ou o recozimento das tiras a quente. Tais inibidores, já presentes nas tiras a quente, são chamados inibidores “inerentes”.

O segundo método consiste em evitar a formação de inibidores na área quente.

Os inibidores são formados pela nitretação das tiras a frio. Os inibidores gerados desta maneira são chamados de inibidores “adquiridos”. A nitretação é feita na linha de recozimento de descarbonetação através da injeção de amônia na atmosfera do forno.

Tabela 2: Quadro comparativo entre características de inibidores “inerentes” e inibidores “adquiridos”. Adaptado de (XIA; KANG; WANG, 2008).

Tipo de formação de inibidores	Temperatura de aquecimento das placas (°C)	Formação de inibidores	
		Área quente	Área fria
Inerente	1250-1400	<ul style="list-style-type: none"> - Teores dos elementos inibidores (Al, N) são modificados para diminuir a temperatura de solubilidade. - Os inibidores precipitam durante a laminação a quente ou durante o aquecimento das tiras a quente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortalecer a inibição, com altos teores de nitrogênio na atmosfera durante o recozimento em caixa
Adquirido	1150-1200	<ul style="list-style-type: none"> - Promovida precipitação de algumas partículas de modo a formar-se uma fraca inibição de crescimento de grão. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa temperatura de nitretação (750°C) com adição de NH₃ depois da descarbonetação. - O inibidor é formado pela afinidade do Al com o N, formando AlN durante a fase de aquecimento no recozimento em caixa.

As patentes americanas US5082509 e US6432222 são duas das importantes patentes em nome da NSC que tratam da técnica do reaquecimento de placas a baixa temperatura que utilizam os chamados inibidores “adquiridos” (YOU; PARK, 2018).

Hoje em dia muitos produtores vêm realizando estudos individuais com os diferentes tratamentos termoquímicos empregados na produção dos aços GO de forma a poderem produzir tal aço sem ter que comprar patentes ou licenças da NSC. Julgando-se pelo surgimento recente de patentes e artigos científicos, pode-se verificar que os aços elétricos GO vêm sendo produzidos em escala comercial ou em lotes pilotos através do uso da nitretação desde 2008, notadamente pela POSCO

(Coréia do Sul), BaoWu (China) e ThyssenKrupp (Alemanha).

Sabe-se que atualmente a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica quase sempre é feita utilizando-se de tensão e corrente elétricas alternadas (AC) em baixas frequências, tipicamente 50 ou 60 Hz. Quando transformadores elétricos operam nestas frequências, correntes parasitas são geradas em seu núcleo magnético. Ao adicionar-se Si para a formação de ligas metálicas junto do Fe, nota-se um claro aumento na resistência elétrica da liga, conforme mais Si é adicionado, chegando-se a quadruplicar a resistência elétrica da liga quando se tem 3%Si em peso na mesma. O Si também tem um efeito na redução da magnetostricção e da anisotropia magnetocristalina. Além disso, as ligas Fe-Si normalmente são utilizadas em forma de chapas, tipicamente com espessuras entre 0,2 mm e 0,7 mm. Costuma-se limitar o teor máximo de Si nas ligas, pois o mesmo causa perda de ductilidade, que dificulta a laminação a frio das chapas. Recentemente, tem sido desenvolvida uma técnica que permite a produção de chapas contendo até 6%Si pela reação de deposição do vapor químico (CVD) de SiCl_4 para enriquecer as chapas depois de laminadas, no entanto, a vasta maioria dos aços elétricos produzidos comercialmente possuem teor de Si entre 3% e 4% (RAABE, 2022).

No caso específico dos aços elétricos para aplicação em transformadores elétricos, o núcleo magnético do transformador é construído de tal forma que o fluxo magnético se dá majoritariamente na direção longitudinal da chapa, assim, é desejável produzir um aço no qual a permeabilidade magnética em tal direção tenha um comportamento superior. Isto é alcançado através de processos (Armco ou NSC) que envolvem etapas de laminação a quente, laminação a frio e vários recozimentos em atmosfera controlada que vem a produzir chapas texturizadas, conhecidas como aços GO, com direção [001] no sentido da laminação. As direções cristalinas do tipo <001> são as direções de fácil magnetização e, portanto, de maior permeabilidade magnética. Desta maneira, os aços elétricos GO são caracterizados por uma textura muito forte, a textura (110)<001>, também conhecida como textura Goss (LANDGRAF, 2002).

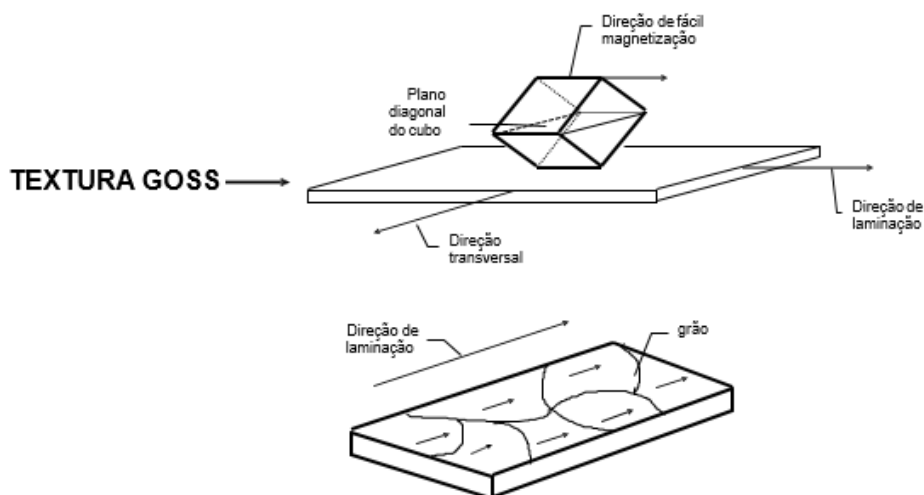


Figura 7: Detalhe da textura altamente anisotrópica presente em aços elétricos de grão-orientado, a textura do tipo Goss (CÂNDIDO, 2014).

O valor da magnetização de saturação é constante em todas as direções em que se aplica o campo magnético: a saturação é atingida quando os "momentos magnéticos atômicos" estão todos alinhados numa só direção, ou seja, o material todo é um único monodomínio. A Figura 4 mostra que o campo necessário para a atingir varia significativamente: na direção $\langle 100 \rangle$ atinge-se a saturação com campos muito baixos. Nas direções $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$ exige-se campos muito mais altos (LANDGRAF, 2002).

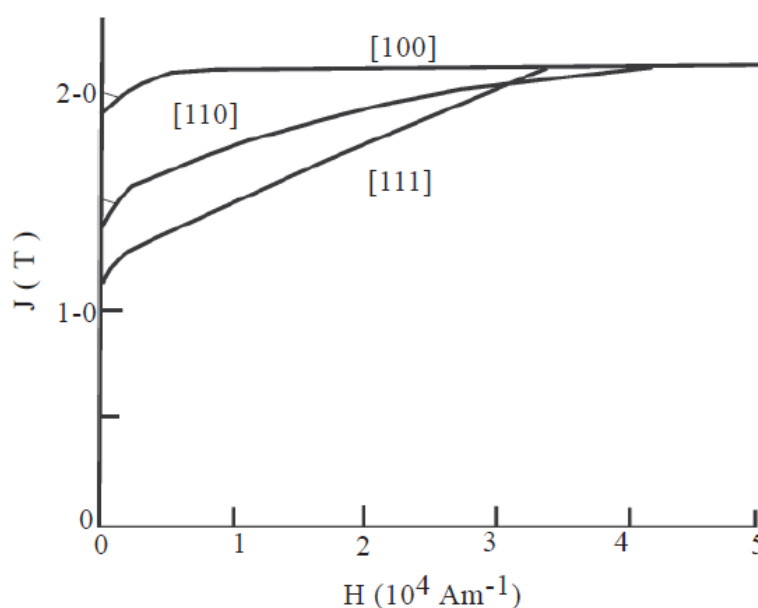


Figura 8: Curvas de magnetização com o campo H aplicado em 3 diferentes direções cristalinas de um monocristal (LANDGRAF, 2002).

Os aços elétricos GO e GNO, por serem materiais ferromagnéticos, apresentam uma resposta complexa quando submetidos à campos magnéticos externos que alternadamente crescem e decrescem (LACHISSERIE, TREMOLET DE; GIGNOUX; SCHLENKER, 2005). O processo cíclico de magnetizar e desmagnetizar o material a uma certa frequência leva à ocorrência da histerese pois a magnetização não é um processo reversível. Devido à existência da histerese magnética e da circulação de correntes elétricas parasitas induzidas pela variação do fluxo magnético no interior do material, o processo de inversão da magnetização ocorre com dissipação de energia, ou seja, com "perdas magnéticas", também conhecidas como "perdas no ferro" (LANDGRAF, 2002).

Como mencionado anteriormente, dada a crescente importância da temática da eficiência energética dos equipamentos elétricos, as perdas magnéticas (geralmente muito maiores que as perdas no cobre) se configuram como o principal parâmetro técnico de seleção e controle desses materiais. A análise da curva $B \times H$, se mostra muito conveniente para a determinação destas perdas magnéticas, assim como o comportamento do material sob a influência de diferentes campos magnéticos. A área interna dessa curva é a energia dissipada por ciclo, em unidades de energia/volume, e.g. J/m^3 .

A **Figura 9** mostra a comparação das curvas de histerese de dois conjuntos de amostras de um aço elétrico HGO Fe-(3%massa) Si 0,30 mm de espessura:

- Conjunto 1: Neste conjunto, as amostras utilizadas foram cortadas na direção de laminação da bobina ("RD", do inglês "Rolling Direction");

- Conjunto 2: Neste conjunto, as amostras utilizadas foram cortadas na direção transversal ao sentido de laminação da bobina ("TD", do inglês "Transversal Direction").

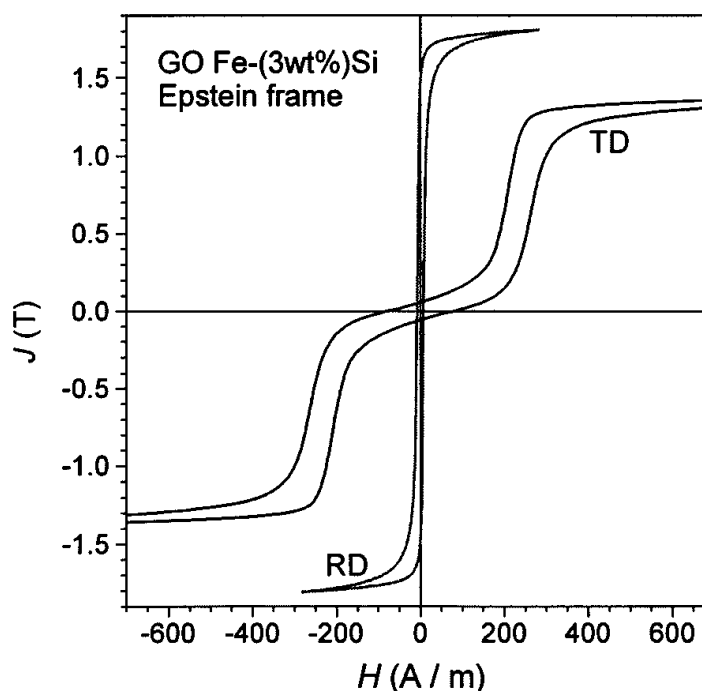


Figura 9: Curvas de histerese medidas no quadro de Epstein de aço elétrico de grão-orientado (GO) Fe(3%massa) Si de espessura 0,30 mm (FIORILLO et al., 2002).

Na **Figura 9** é interessante notar uma vez mais na forte anisotropia apresentada pelo aço elétrico GO.

Também pode se observar que a notável forma sigmoidal das curvas de histerese sugerem a existência de diferentes mecanismos de dissipação de energia na medida em que o campo magnético externo aplicado cresce e decresce.

Em 1997, um grupo multidisciplinar, reuniu-se em torno do Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos do IPT para estudar diferentes teorias acerca de tais mecanismos de dissipação de energia, e propuseram-se a examinar-se uma outra hipótese inovadora: poderia a subdivisão da área de histerese em dois campos, um de altas induções (acima do joelho da curva) e outro de baixas induções (a região em torno do campo coercivo) (LANDGRAF, 2002) contribuir para a compreensão dos mecanismos de dissipação de energia?

Baseando-se na indicação de B.D. Cullity de que a inflexão da permeabilidade máxima definiria os campos de predominância de movimentos de parede abaixo dele e rotação de domínios acima dele (LANDGRAF et al., 1999). o “critério de corte”

escolhido pelo grupo multidisciplinar para separar as componentes de alta indução e as componentes de baixa indução foi o ponto da curva $B \times H$ no qual a permeabilidade é máxima, como mostrado na **Figura 10**.

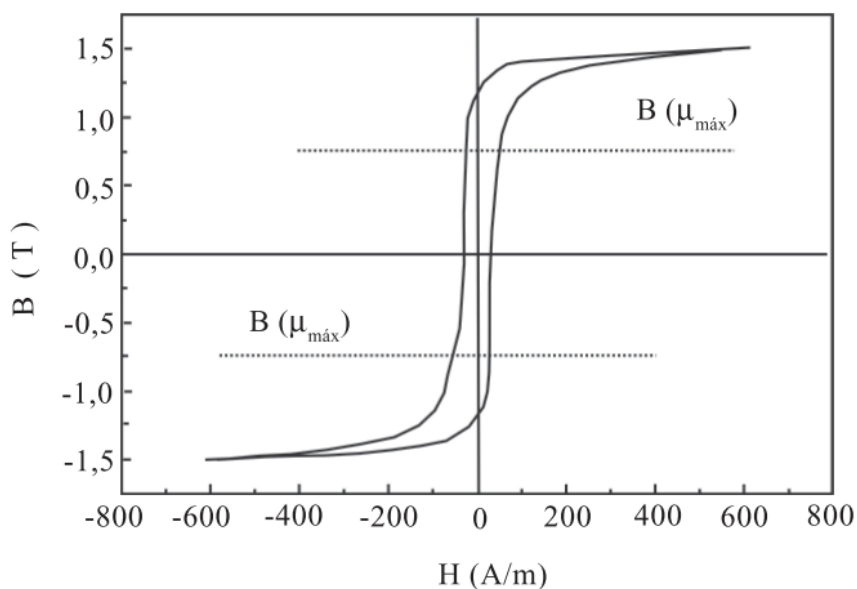


Figura 10: Subdivisão da perda histerética nas componentes de alta indução (acima de $B(\mu_{\text{máx}})$) e baixa indução (abaixo de $B(\mu_{\text{máx}})$) (LANDGRAF, 2002).

Os estudos realizados pelo grupo multidisciplinar assim como grande parte da literatura, têm como base a utilização de materiais de características notadamente isotrópicas, e.g. aços de baixo carbono ou aços elétricos GNO.

O presente trabalho pretende investigar estes fenômenos em um material notadamente anisotrópico como o aço elétrico GO e como isto afeta o projeto e funcionamento dos equipamentos elétricos nos quais eles são utilizados, particularmente os transformadores elétricos.

3.2. Perdas Magnéticas

Embora as perdas magnéticas nos transformadores correspondam a uma pequena fração da potência transformada (normalmente menos do que 0,5% em grandes transformadores de força), elas podem provocar o sobreaquecimento de partes localizadas do transformador, comprometendo sua operação. Assim, é

importante compreender como estas perdas surgem e calculá-las da forma mais precisa possível para que, se necessário, medidas possam ser tomadas durante a etapa de *design* do equipamento de forma a reduzir tais perdas à um nível em que o sistema de refrigeração do transformador possa suportar (DEL VECCHIO et al., 2017).

Para um melhor entendimento e descrição dos fenômenos envolvidos na perdas magnéticas, atualmente é comum efetuar-se a separação da perda magnética total (P_t) em três componentes: perda parasita (P_p), perda histerética (P_h) e perda anômala (P_a) (ZIRKA et al., 2005; CHWASTEK, 2010). Estas três componentes costumam por vezes serem agrupadas como “perdas estáticas” (é o caso da perda histerética) e “perdas dinâmicas” (a soma das perdas parasita e anômala) (DE CAMPOS, 2016).

Dessa maneira, a perda magnética total (P_t) pode ser descrita da seguinte maneira (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006; BAGHEL et al., 2015):

$$P_t = P_p + P_h + P_a \quad (\text{Equação 1})$$

A decomposição em três componentes reflete o reconhecimento de três escalas espaciais no processo de magnetização: a escala macroscópica ligada à geometria da amostra e associada com as perdas parasitas (P_p); a escala microscópica na qual ocorre a fixação das paredes de domínio devido à imperfeições na rede cristalina e associada às perdas histeréticas (P_h); e a escala mesoscópica a nível do domínio magnético, associada às perdas anômalas (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006).

Vale ressaltar que esta abordagem para a separação da perda magnética total nas três diferentes componentes de perda é válida para amostras submetidas à magnetização a qualquer ângulo em relação à direção de laminação (PLUTA, 2020).

A seguir é feito um aprofundamento qualitativo acerca de cada uma destas importantes componentes.

3.2.1. Perda Parasita

As perdas parasitas (P_p), também chamadas de “perdas parasitas clássicas” ou

ainda de “perdas clássicas”, ocorrem por conta das correntes parasitas produzidas no material devido às tensões elétricas induzidas nele em resposta ao fluxo alternado pelo qual é submetido o mesmo (KULKARNI; KHAPARDE, 2017) e sua magnitude pode ser dada por (LANDGRAF, 2007):

$$P_p = \frac{(B_{\text{máx}} \times \pi \times e \times f)^2}{6 \times \rho \times d} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo $B_{\text{máx}}$ é indução máxima, e é espessura da amostra, f é a frequência aplicada, ρ é resistividade elétrica e d é a densidade do material. É importante notar que a **Equação 2** é válida partindo-se da premissa de que a indução B seja considerada da forma senoidal. Também é importante notar que a **Equação 2** não contém parâmetros que descrevam a lei de magnetização do material, assim de acordo com a tal, todos materiais devem se comportar da mesma maneira, se a geometria da amostra e as propriedades elétricas da mesma são consideradas constantes, premissas estas assumidas no presente trabalho. Tais premissas derivam de uma terceira premissa também assumida neste texto: a de que a taxa de variação da indução no tempo (dB/dt) é aproximadamente uniforme em toda a amostra. Neste trabalho foram considerados os valores de catálogo $e = 0,27$ mm, $\rho = 48 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$, $d = 7,65$ kg/dm³.

Pela **Equação 2** nota-se que a redução da espessura e o aumento da resistividade do material são duas alternativas efetivas para se alcançar a redução das perdas parasitas no mesmo. O conteúdo de Si adicionado nos aços elétricos tem como principal objetivo o aumento da resistividade elétrica das chapas, contribuindo assim para a redução das correntes parasitas produzidas no mesmo (ODA; OKUBO; TAKATA, 2016). Além disso, o acréscimo de Si também age reduzindo a anisotropia magnética e a magnetostricção do aço, porém diminuindo a magnetização de saturação e a permeabilidade do material, além de fazê-lo mais frágil. Tal efeito sobre a fragilidade do aço restringe o conteúdo máximo de silício nos aços elétricos disponíveis comercialmente à 3,4%Si. Nos aços elétricos GO, o conteúdo de Si costuma estar entre 2,9% e 3,2% (MOSES, 1990). A adição de 3%Si aumenta a resistividade de 10 $\mu\Omega\text{cm}$, típico do ferro puro, para 45 $\mu\Omega\text{cm}$ (LANDGRAF, 2007).

No que toca a redução da espessura do material, tal medida tem sido de fato uma das principais estratégias da indústria para a redução das perdas magnéticas nos aços elétricos GO, partindo-se das espessuras de 0,50 mm e 0,35 mm dos primeiros aços GO produzidos décadas atrás, chegando-se ao limite físico e tecnológico de atual com os aços GO de espessura 0,15 mm (LOBANOV; RUSAKOV; REDIKUL'TSEV, 2011b).

3.2.2. Perda Histerética

As perdas histeréticas (P_h) referem-se à perda de energia causada pela rápida movimentação das paredes de domínio quando se livram das barreiras que dificultam seu movimento. Precipitados finos e inclusões no aço elétrico podem impedir o movimento destas paredes, por esta razão, reduz-se ao limite a presença de elementos como C, N, O, S, entre outros que formam precipitados e inclusões no aço elétrico (ODA; OKUBO; TAKATA, 2016).

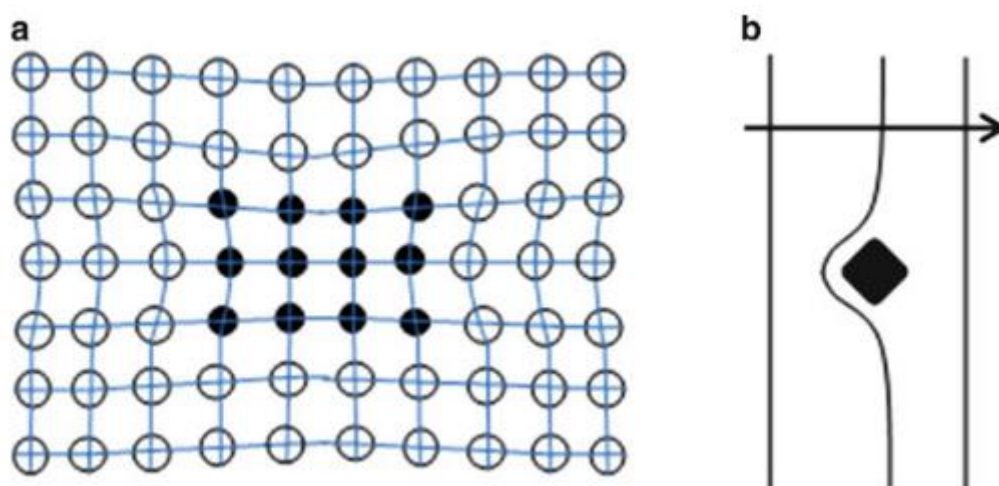


Figura 11: a) Diagrama esquemático do campo de deformação da rede nas vizinhanças de uma inclusão com parâmetros de rede menores do que aqueles da matriz original. b) Dobra de uma parede de domínio por uma hipotética inclusão enquanto a parede se move da esquerda para a direita (STEFANITA, 2012).

Entre os processos que contribuem para dissipação de energia durante a histerese quase estática, podemos destacar: i) formação/aniquilação de paredes de domínio; ii) rotações irreversíveis de domínios; iii) eliminação dos domínios de fechamento com paredes de 90°; iv) fenômeno do deslocamento das paredes de domínio. Tais

processos acontecem a cada ciclo de histerese oferecendo portanto subsídios para a dependência direta de f pelas perdas histeréticas (P_h) como mostra a **Equação 3**, na qual H é o campo magnético no qual o material é submetido e B a indução aplicada no mesmo (DE CAMPOS, 2016).

$$P_h = f \oint H dB \quad (\text{Equação 3})$$

Observando-se a **Figura 12** é possível notar a relação direta entre as diferentes frequências (f , em Hz) aplicadas no material e suas respectivas curvas de histerese B versus H , cujas áreas internas equivalem à energia dissipada pelo material a cada ciclo, dada em J/m^3 .

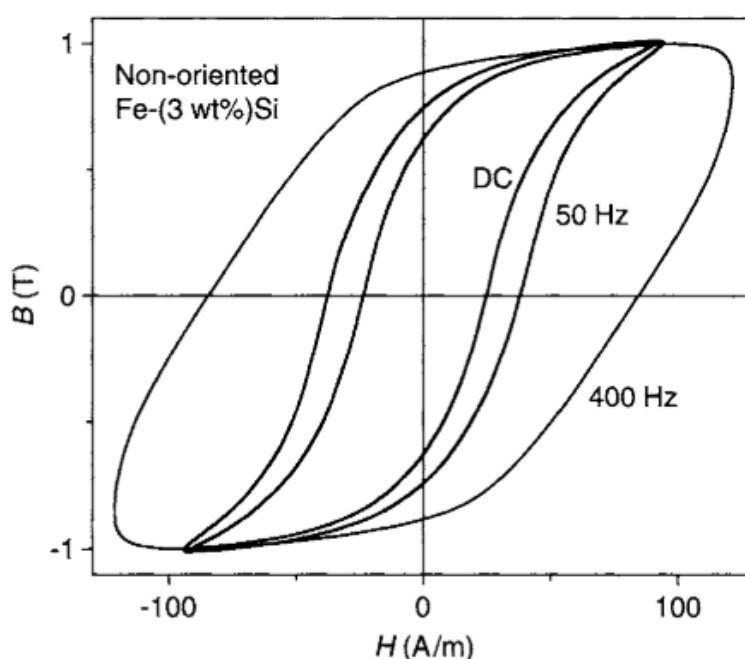


Figura 12: Curva de histerese típica de um aço GNO Fe-(3%massa)Si 0,35 mm de espessura, medida sob indução B senoidal controlada com $B_{\text{máx}} = 1,0$ T em diferentes frequências (quase estática, 50 Hz e 400 Hz) (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006).

A energia acumulada na magnetização do material até a indução máxima é dada pela área $B \times H$, conforme mostra a **Figura 13**. Após atingir a indução máxima, o ramo descendente devolve parte da energia gasta na magnetização, principalmente pelo retorno da magnetização às direções $\langle 100 \rangle$, por rotação reversível, que não é dissipativa. Entretanto, como o ramo descendente da curva não volta exatamente

sobre o ramo ascendente, existe uma energia efetivamente dissipada, que é a diferença entre as duas áreas, como mostra a **Figura 14** (LANDGRAF, 2002).

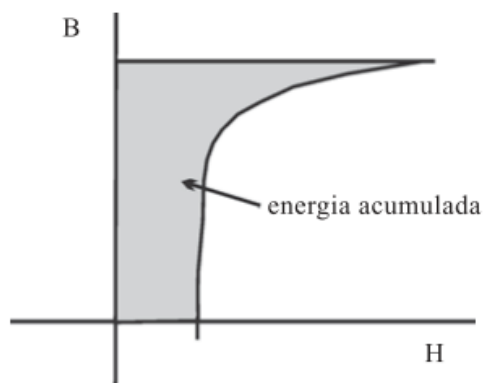


Figura 13: Energia acumulada no ramo ascendente da curva de histerese (LANDGRAF, 2002).

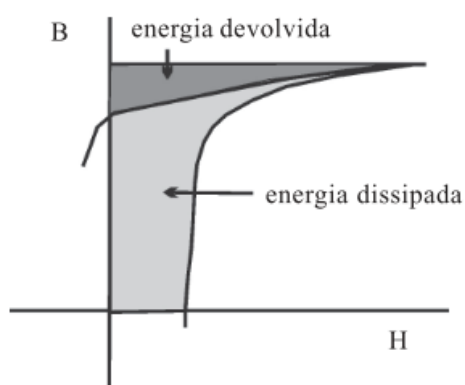


Figura 14: Energia dissipada no ramo descendente da curva de histerese (LANDGRAF, 2002).

A partir da **Equação 3**, é possível inferir que multiplicando-se a área interna da curva B x H (i.e., a energia dissipada por ciclo) pela frequência f aplicada e dividindo-se este produto pela densidade d do material, chega-se ao valor da perda histerética (P_h) em W/kg, como mostra a **Equação 4**:

$$A\left[\frac{W}{kg}\right] = (A\left[\frac{J}{m^3}\right] \cdot f[Hz]) / d\left[\frac{kg}{m^3}\right] \quad (\text{Equação 4})$$

3.2.3. Perda Anômala

As perdas anômalas (P_a), por vezes chamadas de “perdas de excesso”, estão intimamente ligadas às micro correntes parasitas de alta frequência que circulam nos

arredores das paredes de domínio movimentam-se durante o processo de magnetização do material (AHMED, 2007). Elas surgem pois o cálculo das perdas parasitas ignora a presença dos domínios e do movimento das paredes de domínio. Existe uma discrepância substancial entre as perdas parasitas (P_p) medidas e os valores calculados, a diferença entre estes valores é a chamada perda anômala (P_a) e seu valor pode ser tão grande quanto ou ainda maior do que a perda parasita calculada (CULLITY; GRAHAM, 2008).

Assim, verifica-se que a soma das perdas parasitas (P_p) e das perdas histeréticas (P_h) calculadas é menor do que a perda total (P_t) medida, sendo, portanto, esta diferença igual ao valor das perdas anômalas (P_a), como mostra a **Equação 5**.

$$P_a = P_t - (P_p + P_h) \quad (\text{Equação 5})$$

Ou ainda,

$$P_a = P_t - P_p - P_h \quad (\text{Equação 6})$$

A separação das perdas anômalas (P_a) é útil para analisar os efeitos da microestrutura uma vez que, por definição, admite-se que as perdas parasitas não dependem da microestrutura (DE CAMPOS, 2016).

As perdas anômalas não podiam ser muito bem explicadas até o surgimento do modelo de domínios de parede de Pry e Bean em 1958 (PRY; BEAN, 1958). Neste modelo, as perdas anômalas são tidas como diretamente proporcionais ao espaçamento das paredes de domínio $2L$ e inversamente proporcionais à espessura do material d (PRY; BEAN, 1958; TANG, 2015), como mostra a **Figura 15** seguir:

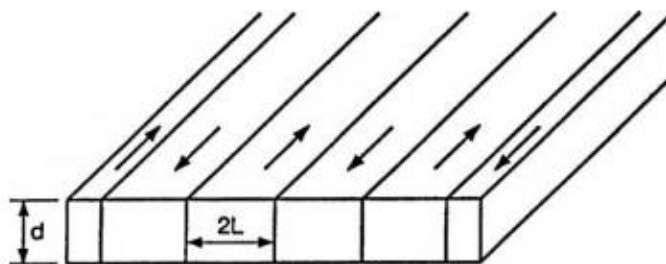


Figura 15: Modelo de domínios de parede de Pry e Bean (PRY; BEAN, 1958).

Em um transformador de núcleo magnético em aço silício GO operando em condições normais, as perdas parasitas (P_a) podem corresponder a cerca de metade da perda total (P_t) do material (KULKARNI; KHAPARDE, 2017).

Sabe-se há anos que a inserção de tensões mecânicas nos aços elétricos tem como efeito a subdivisão dos domínios magnéticos diminuindo assim o espaçamento das paredes de domínio e, portanto, reduzindo as perdas anômalas (TANG, 2015). Uma tecnologia amplamente utilizada na fabricação de aços silício GO de forma a se tirar proveito de tal conhecimento é a chamada “gravação a laser” ou “refino a laser” no qual feixes de laser de alta potência são incididos sobre a superfície do material com o intuito de se formar zonas localizadas de tensão mecânica no material. A perda magnética de um aço silício GO refinado a laser é geralmente entre 5 a 8% menor do que a perda magnética deste aço caso o mesmo não fosse submetido ao refino a laser (MOSES, 1990).

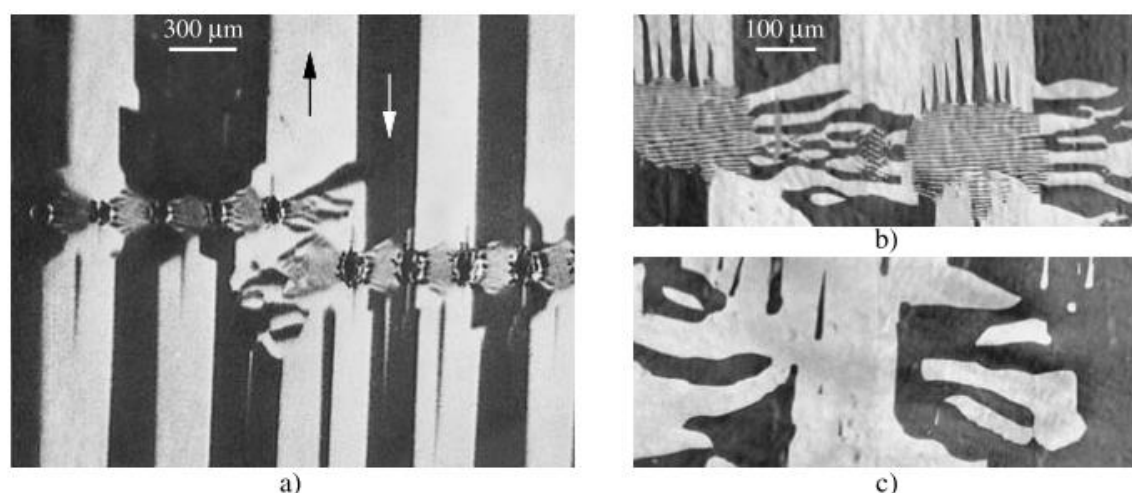


Figura 16: Interações entre os domínios magnéticos de um aço silício GO e as tensões mecânicas localizadas introduzidas no mesmo através do refino a laser. a) Padrão de tensões mecânicas observadas abaixo do revestimento isolante do aço silício GO através do microscópio eletrônico de varredura. b e c) Imagens de alta resolução de um aço silício GO após a remoção de seu revestimento isolante. b) face superior, sobre a qual o refino de laser foi aplicado. c) face inferior, sem refino a laser (HUBERT; SCHAFER, 2008).

É importante ressaltar que o uso dos aços silício GO com refino a laser baseado na inserção de tensões mecânicas localizadas é recomendado somente em transformadores de núcleo empilhado. Nos transformadores de núcleo enrolado não se recomenda o uso deste tipo de material pois as tensões mecânicas inseridas através do refino a laser desapareceriam após o processo de recozimento empregado nos transformadores de núcleo enrolado (HUBERT; SCHAFER, 2008). Nos últimos anos, novas técnicas de refino de domínios “à prova de calor” (“à prova de recozimento”) têm sido inventadas (AMES; BREZNAK, 1990; PARK et al., 2020) e já se encontram disponíveis no mercado em escala comercial (JFE STEEL, 2016; POSCO, 2021).

Atualmente, técnicas de refino a laser constituem-se em uma das estratégias para a redução da perda total dos aços silício GO através justamente da redução das perdas anômalas (KUBOTA; FUJIKURA; USHIGAMI, 2000).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Para o presente trabalho foram selecionadas amostras de aços silício GO de quatro produtos diferentes de uma grande usina siderúrgica asiática fabricados em conformidade com a norma IEC 60404-8-7 (*Specifications for individual materials – Cold-rolled grain-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully-processed state*) na espessura de catálogo de 0,27 mm. Após a produção do aço, foram cortadas das bobinas-mãe 128 amostras em forma de lâminas para realização dos testes no quadro de Epstein de acordo com os procedimentos descritos na norma ASTM A 343/343M (*Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame*), medindo 30 mm de largura por 300 mm de comprimento.

Posteriormente ao corte, as amostras passaram por um recozimento final a 850°C durante um período de 90 minutos, de forma a se aliviar as tensões mecânicas geradas nas lâminas em decorrência do corte.

Estas amostras foram agrupadas em 08 grupos distintos:

- **Grupo de amostras 01:** 16 Lâminas de M95-27P5 cortadas paralelamente à direção de laminação;
- **Grupo de amostras 02:** 16 Lâminas de M95-27P5 cortadas transversalmente à direção de laminação;
- **Grupo de amostras 03:** 16 Lâminas de M110-27P5 cortadas paralelamente à direção de laminação;
- **Grupo de amostras 04:** 16 Lâminas de M110-27P5 cortadas transversalmente à direção de laminação;
- **Grupo de amostras 05:** 16 Lâminas de M110-27S5 cortadas paralelamente à direção de laminação;
- **Grupo de amostras 06:** 16 Lâminas de M110-27S5 cortadas transversalmente à direção de laminação;

- **Grupo de amostras 07:** 16 Lâminas de M130-27S5 cortadas paralelamente à direção de laminação;
- **Grupo de amostras 08:** 16 Lâminas de M130-27S5 cortadas transversalmente à direção de laminação;

Ainda que o processo produtivo e a composição química final do aço sejam deixados à critério do fabricante (TIRLER, 2016), as amostras de aço utilizadas neste trabalho seguem rigorosamente as especificações técnicas contidas na norma japonesa JIS-C-2553 e suas normas internacionais equivalentes (e.g. ASTM A876, IEC 60404-8-7, entre outras) e apresentando tipicamente a seguinte composição química:

Tabela 3: Composição química típica dos aços silício GO estudados, em %. Fonte: Certificado de Composição Química do fabricante. Fonte: Fabricante do aço silício GO das amostras.

C	Si	Mn	P	S
≤0.01	2.80~3.50	≤0.20	≤0.04	≤0.02

Com relação às propriedades magnéticas e elétricas, de acordo com o fabricante, os valores típicos das amostras estudadas são:

Tabela 4: Propriedades magnéticas típicas das amostras de aço silício GO utilizadas segundo catálogo do fabricante. Propriedades obtidas segundo instruções da norma IEC 60404-2. Fonte: Catálogo do fabricante.

Produto	Espessura (mm)	Densidade (kg/dm ³)	Resistividade ρ de $\Omega \cdot m$ ($\times 10^{-8}$)	Perdas Magnéticas, Máx. (W/kg)				Densidade de Fluxo Magnético, Mín. sob B8 (T)
				em 1,5T/50Hz	em 1,7T/50Hz	em 1,5T/60Hz	em 1,7T/60Hz	
M95-27P5	0,27	7,65	48	0,70	0,93	0,92	1,23	1,91
M110-27P5				0,78	1,03	1,01	1,37	1,90
M110-27S5				0,76	1,05	1,01	1,37	1,85
M130-27S5				0,82	1,22	1,07	1,55	1,84

Neste trabalho os valores de espessura (e), densidade (d) e resistividade elétrica (ρ) das amostras foram assumidos como constantes e tais como a **Tabela 4**. Já sobre os valores das propriedades mecânicas e ao fato de laminação o fabricante informa:

Tabela 5: Propriedades mecânicas e fator da laminação típicos das amostras de aço silício GO utilizadas segundo catálogo do fabricante. Propriedades obtidas segundo instruções da norma IEC 60404-2. Fonte: Catálogo do fabricante.

Produto	Resist. à Tração (N/mm ²)		Limite de Escoamento (N/mm ²)		Elongação (%)		Dureza Hv1	Fator de Laminação (%)
	DL	DT	DL	DT	DL	DT		
M95-27P5	361	415	337	367	18	42	182	98
M110-27P5								
M110-27S5	344	385	322	340	11	44	182	98
M130-27S5								

Note que os valores da **Tabela 4** foram medidos em lâminas cortadas paralelamente à direção de laminação (DL). Estes mesmos valores não são comumente medidos e catalogados para lâminas cortadas transversalmente à direção de laminação (DT), sendo este tema um dos principais interesses do presente trabalho.

Além das amostras de aço silício GO, a seguir são listados os outros equipamentos e materiais utilizados na parte prática deste trabalho:

- Quadro de Epstein de 25 cm com bobina mútua de compensação e capacidade para 0,5 kg, marca Yokogawa, modelo 3266;
- 02 Multímetros 6 ½ dígitos, marca Hewlett Packard, modelo 3401A;
- Wattímetro, marca Yokogawa, modelo 2533E-AC;
- Fluxímetro, marca Walker Scientific, modelo MF-3D;
- 02 Fontes de potência, marca Kepco, modelo BOP 50-8M;
- Gerador de funções, marca Hewlett Packard, modelo 33210A;
- Sistema programável de medida de corrente – amplificador, marca Tektronix, modelo AM 5030 e ponte de corrente, marca Tektronix, modelo A6302;
- Osciloscópio digital, marca Hewlett Packard, modelo 54602B;
- Retificador eletrônico de precisão, marca Globalmag, modelo RP1;
- Bobina de compensação mútua desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
- Resistor de 5 Ω / 1.250 W, marca Eletele;

- Balança de precisão marca Mettler Toledo, modelo XS205;
- Microcomputador com os programas de aquisição de dados: Hmut4_VEE85 e EpsQE_VEE85, desenvolvidos com VEE Pro 8.5 (Agilent).

O esquema de montagem e o diagrama de conexões dos equipamentos são descritos a seguir.

4.2. Ensaio no Quadro de Epstein

O método padrão para medição das perdas magnéticas dá-se através do Quadro de Epstein, que simula a operação de um transformador em vazio. Este método é padronizado por diversas organizações nacionais e internacionais (CULLITY; GRAHAM, 2008).

Antes do início efetivo dos ensaios no Quadro de Epstein, foram determinadas as massas de cada uma das 128 amostras de forma a calcular a massa total de cada um dos 8 grupos de amostra estudados, pois as perdas no Quadro de Epstein são dadas em W/kg, sendo assim a massa total das lâminas ensaiadas um parâmetro fundamental na determinação das perdas magnéticas no ensaio.



Figura 17: Determinação da massa das amostras de aço silício GO efetuada antes da realização dos ensaios no Quadro de Epstein. Fonte: O Autor.

Após a determinação da massa das amostras, efetuaram-se as medições no Quadro de Epstein no qual, cada um dos 08 grupos de amostras foi testado. No Quadro de Epstein, as 16 lâminas de cada grupo de amostra são inseridas de forma intercalada em cada uma das quatro solenoides dispostas em forma de quadrado presentes no equipamento (cf. **Figura 18** e **Figura 19**). Cada solenoide possui um enrolamento secundário interno e um enrolamento primário externo. Os quatro enrolamentos primários “P” são conectados em série, da mesma maneira com que os quatro enrolamentos secundários “S” também são (**Figura 20**).



Figura 18: Quadro de Epstein do Laboratório de Metrologia Elétrica (LME) do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Fonte: O Autor.



Figura 19: Detalhe do intercalamento das lâminas no Quadro de Epstein (IPT, 2011).

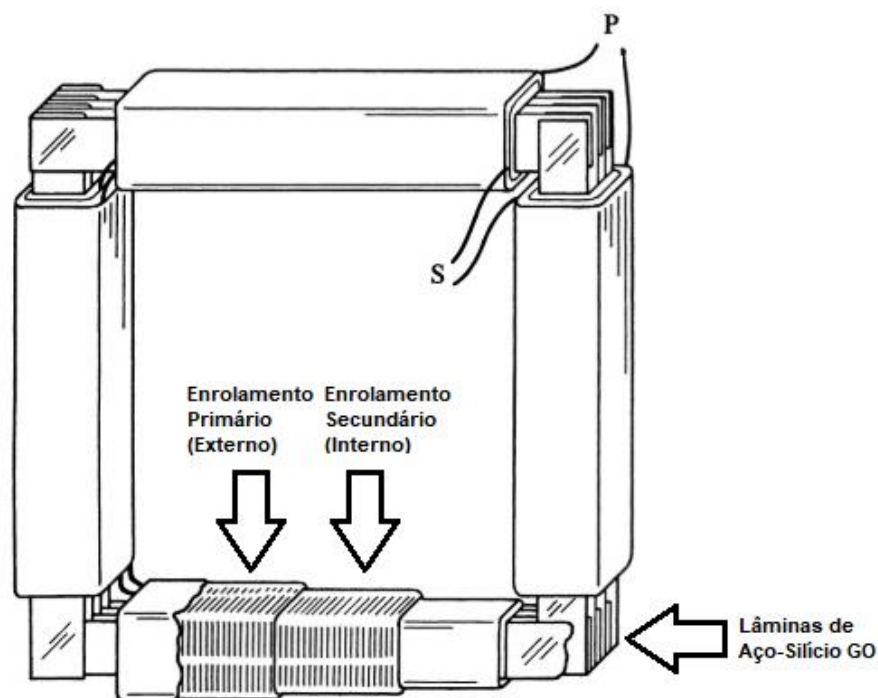


Figura 20: Disposição dos enrolamentos primário “P” e secundário “S” num Quadro de Epstein com amostras de aço-silício GO inseridas no mesmo. Adaptado de (CULLITY; GRAHAM, 2008).

Em todos os 08 grupos de amostra, foram levantadas as curvas de histerese magnética $B \times H$, determinados os valores de B_{800} (i.e., a indução magnética em Tesla alcançada pelo grupo de amostras quando submetido à um campo magnético de 796 A/m , como explicado em 5.1) e os valores das perdas magnéticas totais (P_t) para diferentes níveis de indução máxima ($B_{\text{máx}}$) em regime de corrente alternada sob as frequências de 50 Hz (“Regime de frequência”) e de $0,05 \text{ Hz}$ (“Regime quase-estático”). Os esquemas de montagem e diagramas esquemáticos de ambos os ensaios são mostrados mais adiante (**Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25**).

Os valores $B_{\text{máx}}$ utilizados nos ensaios foram meticulosamente escolhidos de forma a se manter a forma senoidal do sinal evitando assim valores de indução localizados dentro da zona de saturação magnética das amostras. Nas amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) foram aplicados os valores de $B_{\text{máx}}$ $1,0 \text{ T}$, $1,5 \text{ T}$ e $1,7 \text{ T}$, já nas amostras transversalmente à direção de laminação (DT) foram aplicados os valores de $B_{\text{máx}}$ $0,5 \text{ T}$, $0,9 \text{ T}$ e $1,3 \text{ T}$.

Os desvios-padrão dos ensaios realizados estão em sincronia com os valores encontrados na norma ASTM A 343/343M (*Standard Test Method for Alternating-*

Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame), sendo 0,7% para os valores das perdas magnéticas totais e 0,12% para os valores de B800.

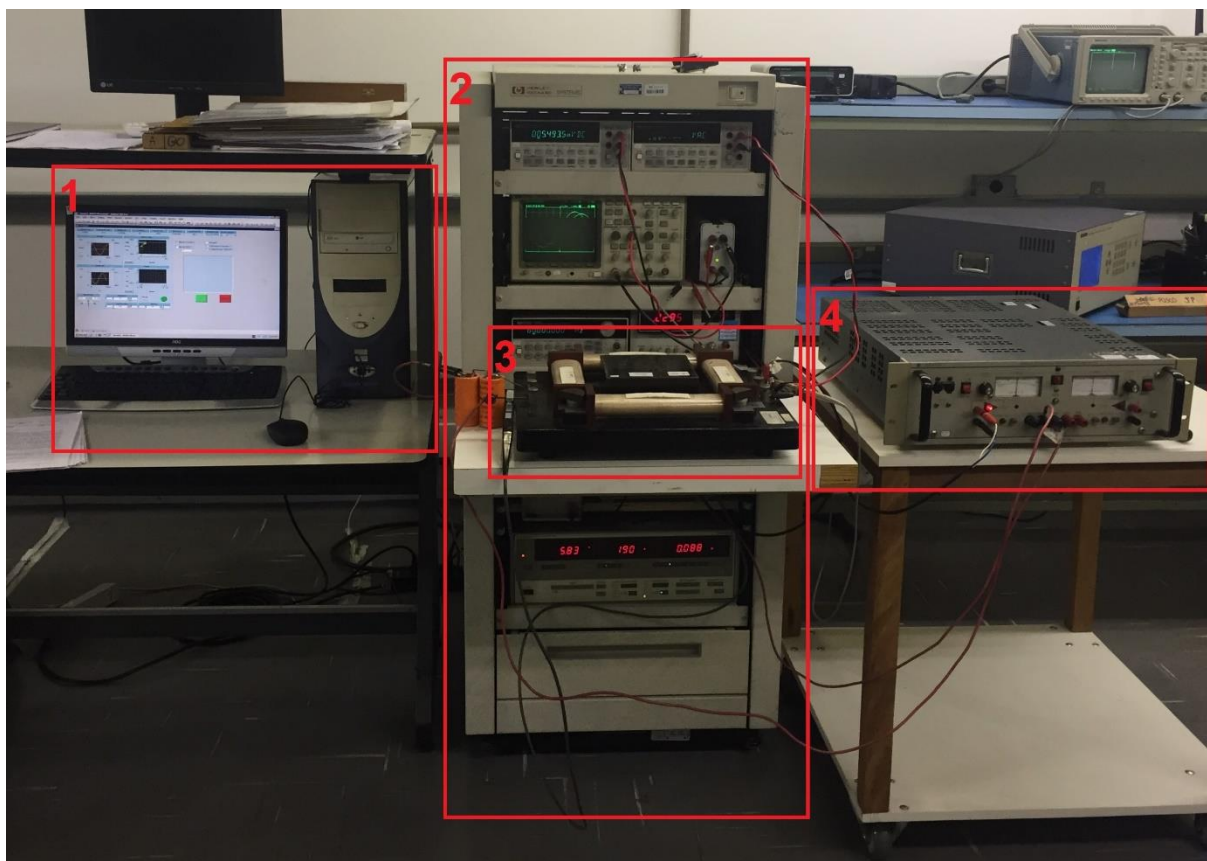


Figura 21: Esquema de montagem dos equipamentos localizados no LME-IPT para a realização das medidas propostas no presente trabalho. Na foto: 1) Interface computacional com programa de aquisição de dados; 2) Conjunto de aparatos para obtenção de medidas do Quadro de Epstein; 3) Quadro de Epstein modelo 3266 da Yokogawa; 4) Fonte de potência modelo BOP 50-8M da KEPCO. Fonte: O Autor.

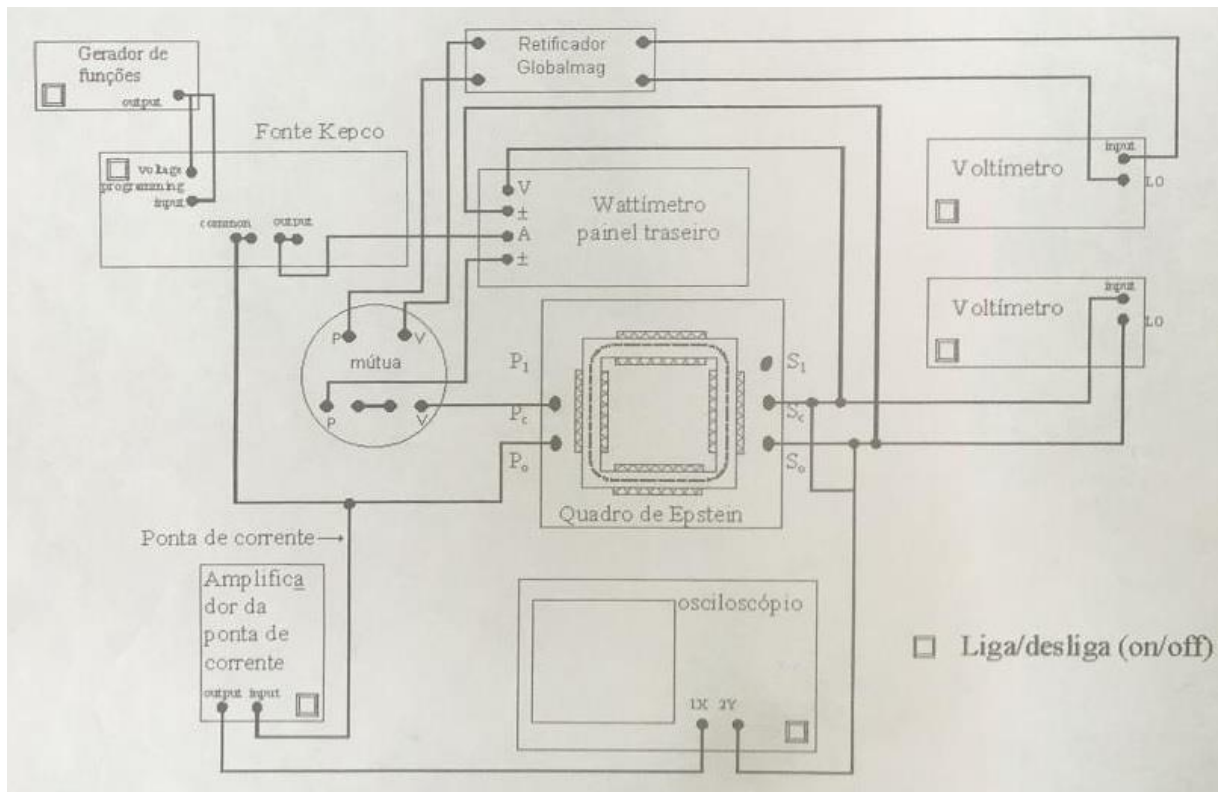


Figura 22: Diagrama de conexões de equipamentos para realização de medidas nas frequências de 50Hz e 60Hz (IPT, 2011).

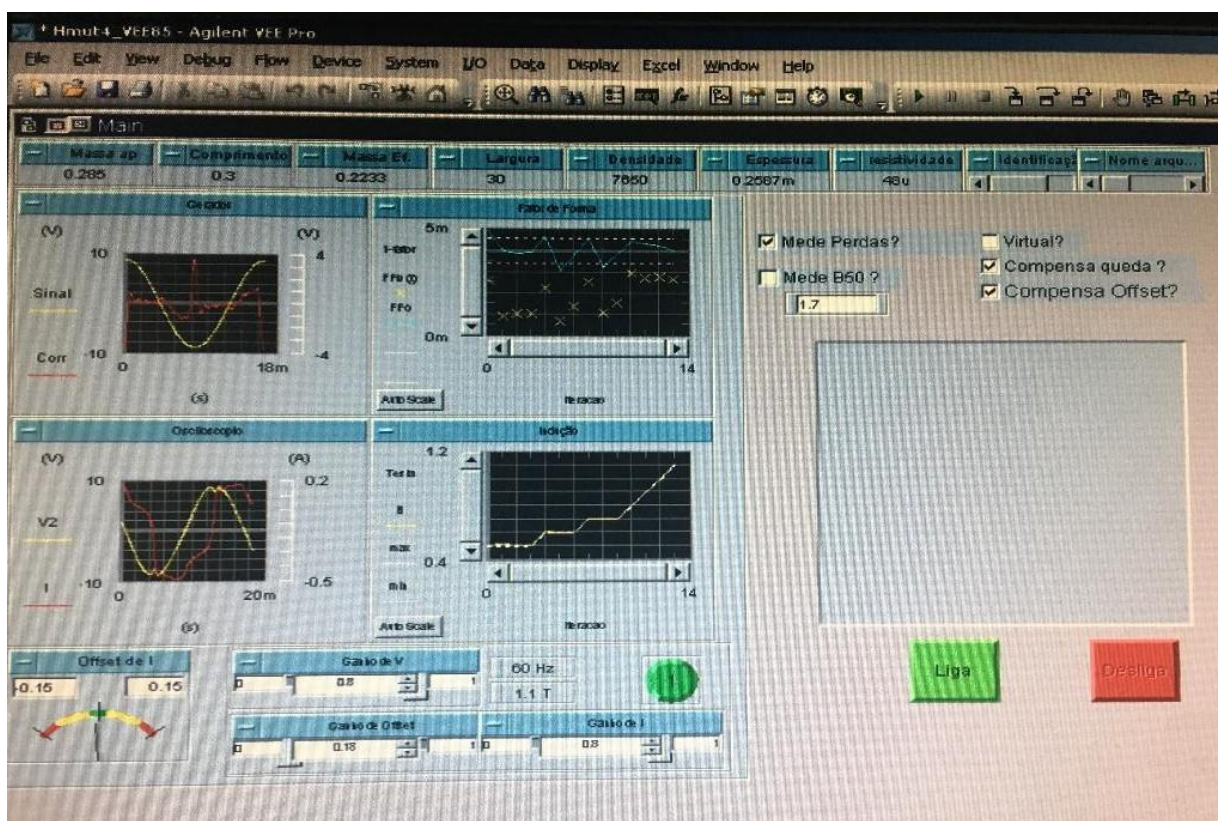


Figura 23: Interface computacional para aquisição de dados do Quadro de Epstein nas frequências de 50Hz e 60Hz. Fonte: O Autor.

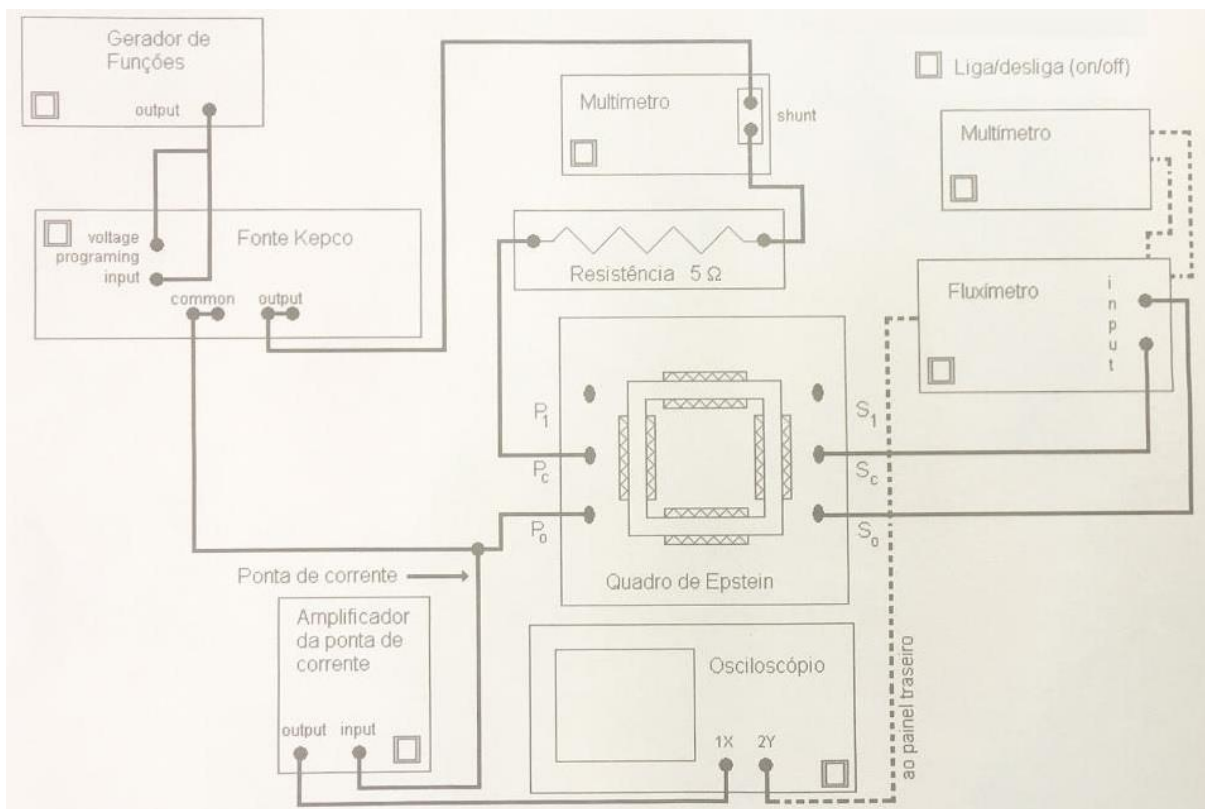


Figura 24: Diagrama de conexões de equipamentos para realização de medidas em regime quase-estático (0,05Hz) (IPT, 2011).

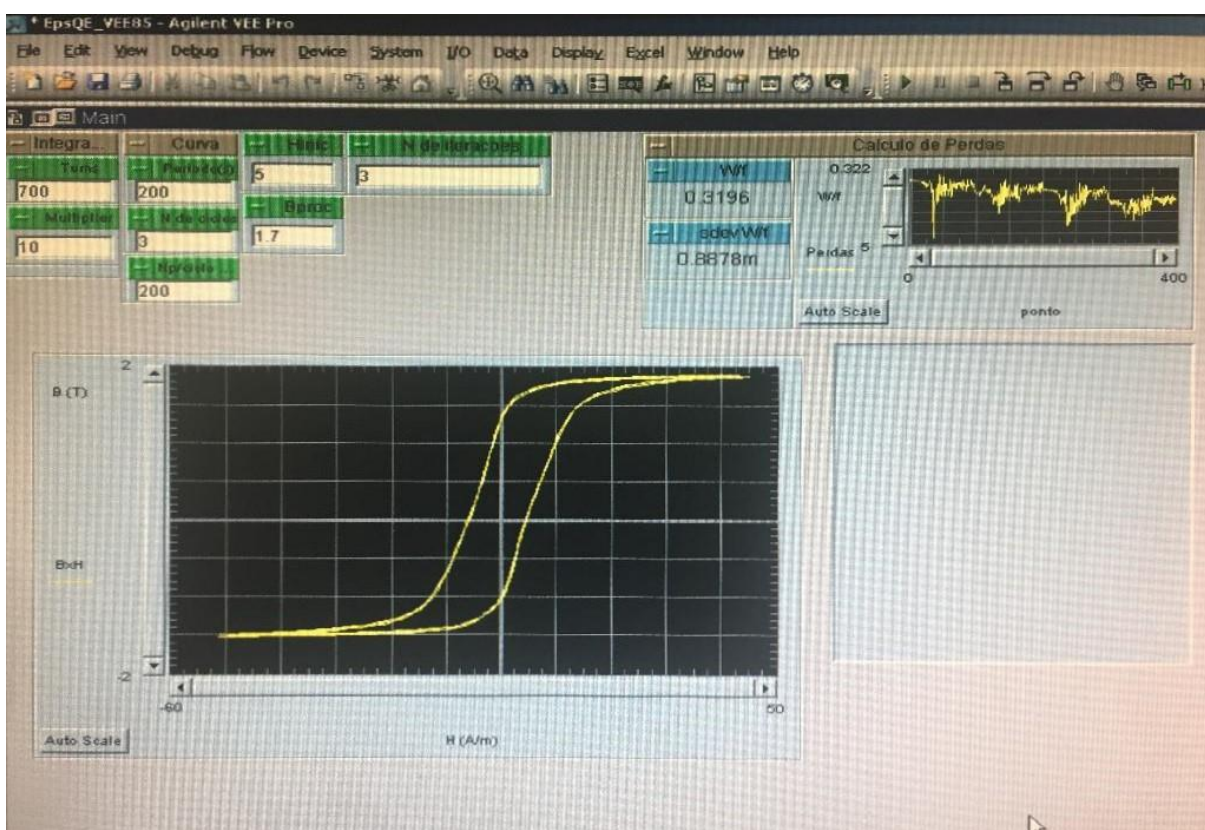


Figura 25: Interface computacional para aquisição de dados do Quadro de Epstein em regime quase-estático (0,05Hz). Fonte: O Autor.

5 RESULTADOS

5.1. B800

A permeabilidade magnética de aços elétricos de grão orientado (GO), tipicamente medida sob um campo magnético de 796 A/m (condição de ensaio comumente chamada de B8 ou ainda B800), fornece uma medição da qualidade da orientação dos grãos na direção (110)[001] do sentido de laminação (SCHOEN; HUPPI, 2005). Assim, decidiu-se pela medição deste parâmetro tanto nas amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) quanto nas amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT) para que fosse verificada a possível existência de uma relação entre os valores de B800 e P_t . Os valores de B800 e P_{tDL} podem ser encontrados na **Tabela 6**:

Tabela 6: B800 e Perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL})

Valores de B800 e P_{tDL} em 1,7T/50Hz				
Amostra	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
B800 (T)	1,938	1,926	1,909	1,907
Pt (W/kg)	0,869	0,916	0,944	0,983

De maneira análoga, os valores de B800 e P_{tDT} podem ser encontrados na **Tabela 7**:

Tabela 7: B800 e Perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT})

Valores de B800 e P_{tDT} em 1,3T/50Hz				
Amostra	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
B800 (T)	1,355	1,359	1,347	1,358
Pt (W/kg)	2,613	2,665	2,633	2,777

5.2. Perdas totais (P_t)

Utilizando-se do Quadro de Epstein, foram obtidos os valores das perdas totais (P_t) de cada conjunto de amostra de acordo com o procedimento descrito no item 4.2. Foram medidos os valores das perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}) e das amostras cortadas transversalmente à direção de

laminação (P_{tDL}).

Na **Tabela 8** são mostrados os valores de P_{tDL} na frequência de 50 Hz.

Tabela 8: Perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}).

P_{tDL} (W/kg) com $f=50\text{Hz}$				
$B_{\text{máx}}$ (T)	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
1.0	0,279	0,298	0,307	0,319
1.5	0,652	0,668	0,689	0,718
1.7	0,869	0,916	0,944	0,983

Na **Tabela 9** são mostrados os valores de P_{tDT} na frequência de 50 Hz:

Tabela 9: Perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT}).

P_{tDT} (W/kg) com $f=50\text{Hz}$				
$B_{\text{máx}}$ (T)	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
0.5	0,722	0,750	0,720	0,811
0.9	1,506	1,540	1,492	1,621
1.3	2,613	2,665	2,633	2,777

5.3. Perdas parasitas (P_p)

Os valores das perdas parasitas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{pDL}) e das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{pDT}) foram determinados através da **Equação 2**:

$$P_p = \frac{(B_{\text{max}} \times \pi \times e \times f)^2}{6 \times \rho \times d}$$

Uma vez que as perdas parasitas (P_p) dependem exclusivamente da indução máxima ($B_{\text{máx}}$), espessura da amostra (e), frequência aplicada (f), resistividade elétrica (ρ) e densidade do material (d), os valores calculados para cada uma das induções máximas consideradas são iguais para as oito amostras estudadas, não importando sua qualidade magnética. Como já mencionado anteriormente, neste trabalho foram considerados os valores de catálogo $e = 0,27 \text{ mm}$, $\rho = 48 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ e $d = 7,65 \text{ kg/dm}^3$,

ainda que os valores de e , ρ e d possam efetivamente variar em cada uma das amostras estudadas.

Na **Tabela 10** são mostrados os valores calculados das perdas parasitas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{pDL}) na frequência de 50 Hz.

Tabela 10: Perdas parasitas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{pDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.

P_{pDL} (W/kg) com $f=50\text{Hz}$				
$B_{\text{máx}}$ (T)	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
1.0	0,082	0,082	0,082	0,082
1.5	0,184	0,184	0,184	0,184
1.7	0,236	0,236	0,236	0,236

De maneira similar à **Tabela 10**, a **Tabela 11** mostra os valores calculados das perdas parasitas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{pDT}) na frequência de 50 Hz.

Tabela 11: Perdas parasitas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{pDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.

P_{pDT} (W/kg) com $f=50\text{Hz}$				
$B_{\text{máx}}$ (T)	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
0.5	0,020	0,020	0,020	0,020
0.9	0,066	0,066	0,066	0,066
1.3	0,138	0,138	0,138	0,138

5.4. Perdas histeréticas (P_h)

As perdas histeréticas foram obtidas através do cálculo da área interna da curva de histerese magnética (curva $B \times H$) do ensaio quase-estático realizado no Quadro de Epstein com $f = 0,005$ Hz. Esta área tem como unidade J/m^3 e para transformá-la em W/kg , usa-se a **Equação 4** a seguir:

$$A\left[\frac{W}{kg}\right] = (A\left[\frac{J}{m^3}\right] \cdot f[Hz]) / d\left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Os valores calculados para as perdas histeréticas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{hDL}) foram os seguintes:

Tabela 12: Perdas histeréticas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{hDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.

P_{hDL} (W/kg) com $f=50\text{Hz}$				
$B_{m\acute{a}x}$ (T)	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
1.0	0,069	0,086	0,083	0,092
1.5	0.152	0.177	0.179	0.204
1.7	0,227	0,273	0,286	0,327

A seguir são mostradas as curvas de histerese quase-estáticas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) sob indução máxima ($B_{m\acute{a}x}$) de 1,0 T (**Figura 26**), 1,5 T (**Figura 27**) e 1,7 T (**Figura 28**), nas quais foram obtidos os valores de P_{hDL} em J/m^3 .

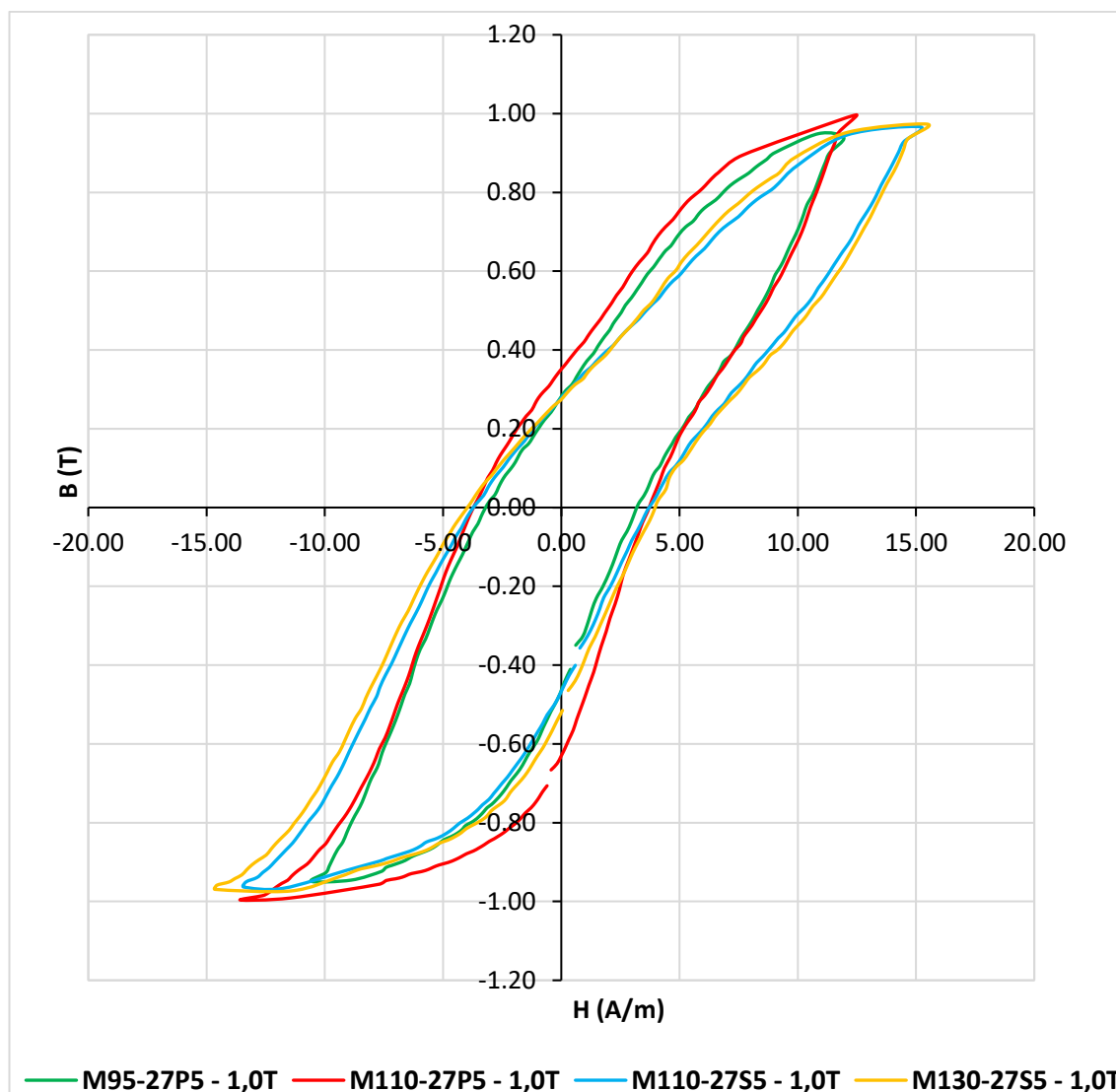


Figura 26: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 1,0 T das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).

Na **Figura 26** nota-se que conforme se aumenta a indução aplicada, as amostras de HGO (M95-27P5 e M110-27P5) destacam-se das amostras de RGO (M110-27S5 e M130-27S5) mostrando uma maior permeabilidade incremental, ou seja, as amostras de HGO (destacadas com a seta tracejada nas **Figuras Figura 26, Figura 27 e Figura 28**), exigem que seja aplicado um campo magnético relativamente menor do que o aplicado nas amostras de RGO (destacadas com a seta contínua nas **Figuras Figura 26, Figura 27 e Figura 28**) para que se alcance a indução máxima de 1,0 T.

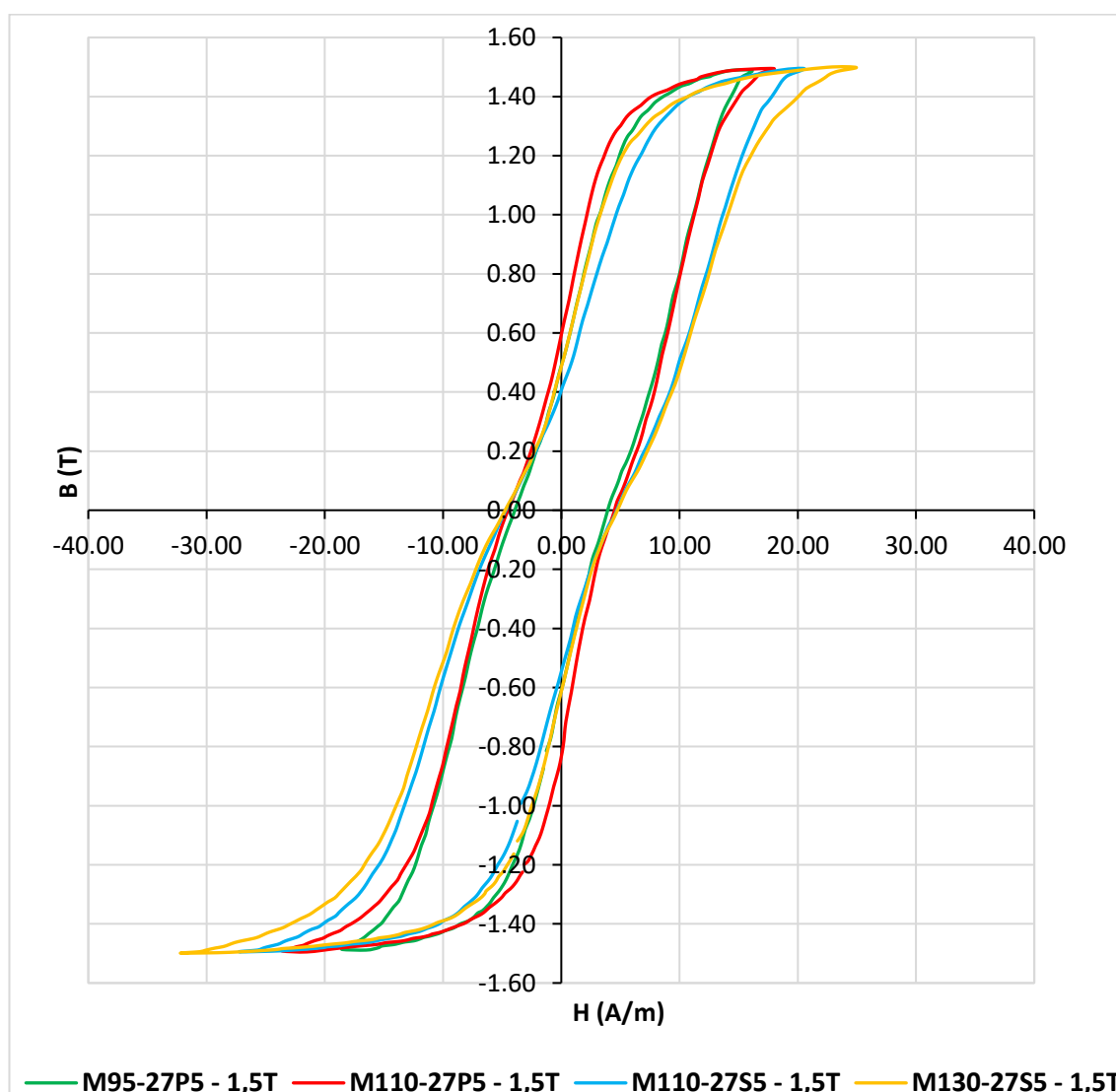


Figura 27: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{\text{máx}}$) de 1,5 T das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).

Este comportamento diferenciado entre aços HGO e RGO aparece novamente na **Figura 27** que mostra a curva de histerese das amostras submetidas à uma indução máxima de 1,5 T. Isto também fica explícito quando se aplica nas amostras uma indução máxima de 1,7 T (**Figura 28**), evidenciando uma vez mais o caráter distinto entre aços HGO e RGO durante o processo de magnetização e desmagnetização das amostras na direção de laminação (DL).

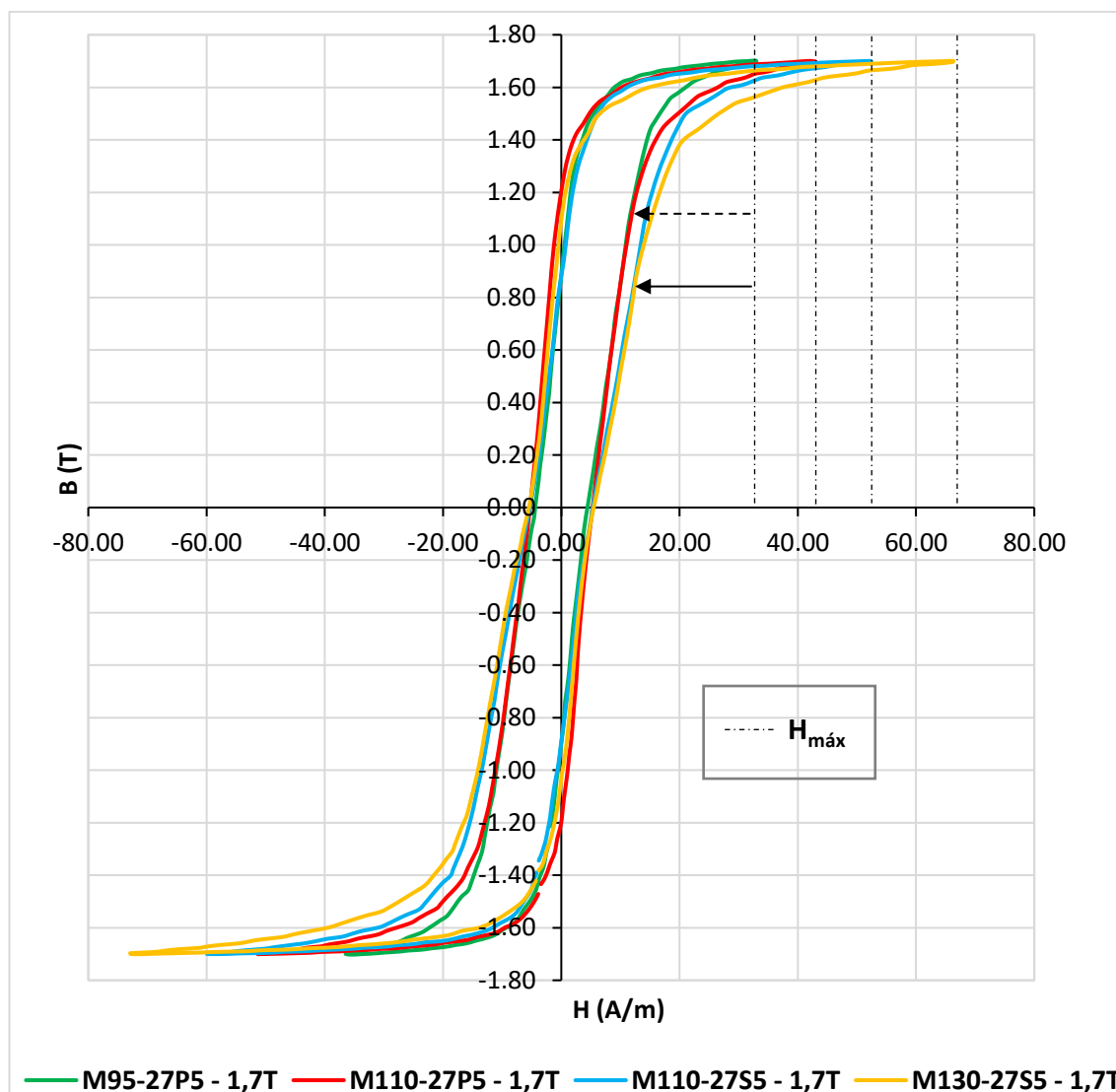


Figura 28: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{\text{máx}}$) de 1,7 T das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).

Nas Figuras Figura 26, Figura 27 e Figura 28, observa-se que durante o processo de magnetização (trecho da curva no quadrante 1 entre $B=0$ e $B=B_{\text{máx}}$), as amostras com menores valores de perdas histeréticas atingem com maior facilidade o valor da indução máxima (i.e. aplicando-se um menor campo magnético).

Nota-se também uma relação direta entre o campo magnético máximo aplicado para se chegar na indução máxima desejada ($H_{\text{máx}}$) e os valores das perdas histeréticas (P_h) de cada amostra, quanto maior o campo necessário para atingir o valor da indução máxima ($B_{\text{máx}}$) maior foi a perda histerética (P_h) apresentada.

De forma similar aos ensaios feitos nas amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) para a obtenção de P_{hDL} , os valores das perdas histeréticas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{hDT}) foram obtidos

através do cálculo da área interna da curva de histerese magnética (curva B x H) do ensaio quase-estático realizado no Quadro de Epstein com $f = 0,005$ Hz, transformando-se posteriormente estes valores em J/m^3 para W/kg através da **Equação 4**. Os resultados de P_{hDT} obtidos foram os seguintes:

Tabela 13: Perdas histeréticas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{hDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.

P_{hDT} (W/kg) com $f=50$ Hz				
$B_{máx}$ (T)	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
0.5	0,246	0,354	0,258	0,295
0.9	0,500	0,569	0,469	0,539
1.3	1,053	1,123	1,022	1,151

A seguir são mostradas as curvas de histerese das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT) sob indução máxima de 0,5 T (**Figura 29**), 0,9 T (**Figura 30**) e 1,3 T (**Figura 31**).

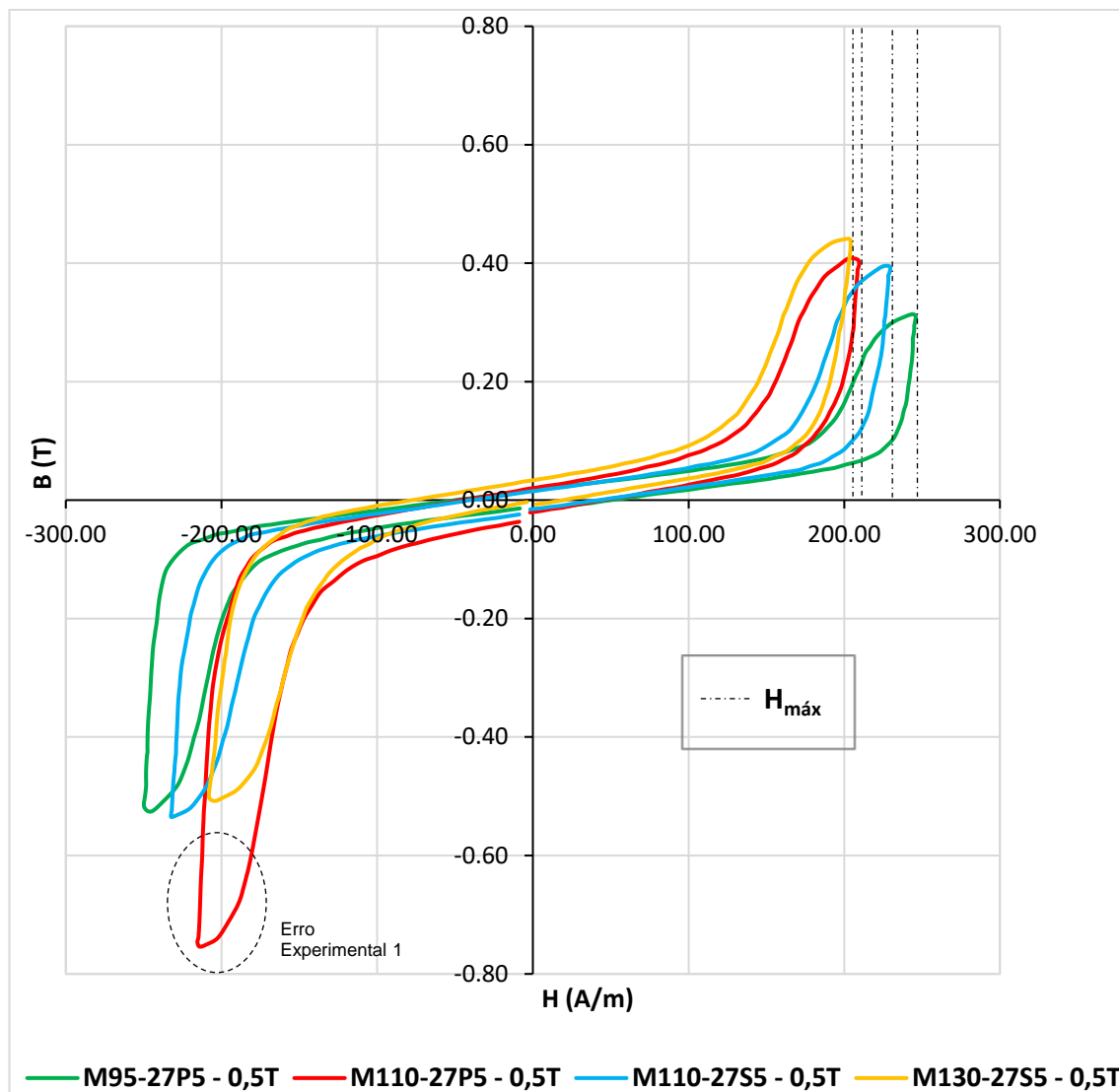


Figura 29: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{\text{máx}}$) de 0,5 T das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

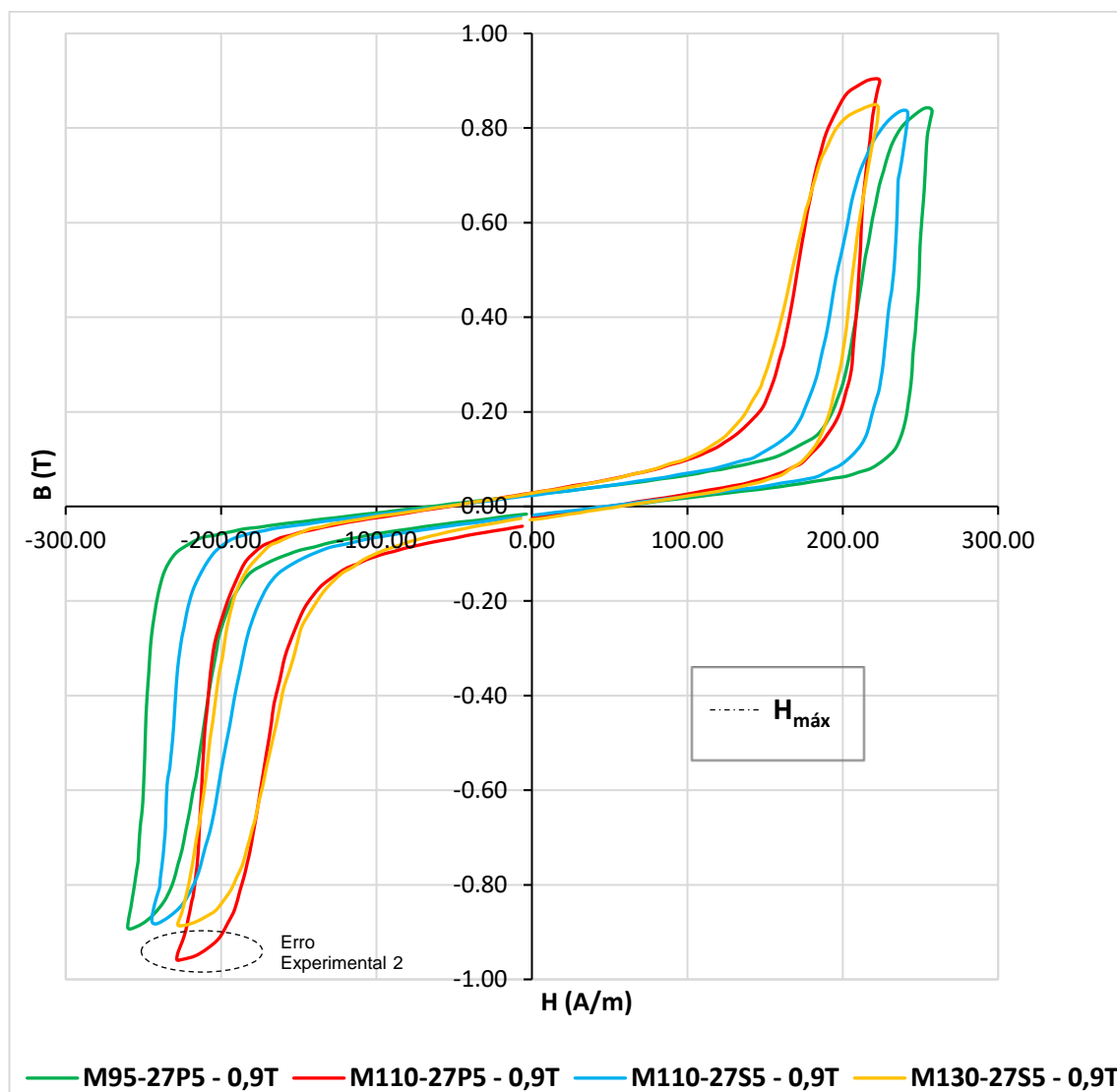


Figura 30: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 0,9 T das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

Na **Figura 31**, devido ao $H_{máx}$ do experimento ter alcançado valores próximos à 600 A/m, foi necessário mudar a escala das abscissas para os valores mínimo/máximo de -800/+ 800 A/m, diferente dos valores adotados nas **Figuras Figura 29** e **Figura 30** de mínimo/máximo de -300/+300 A/m;

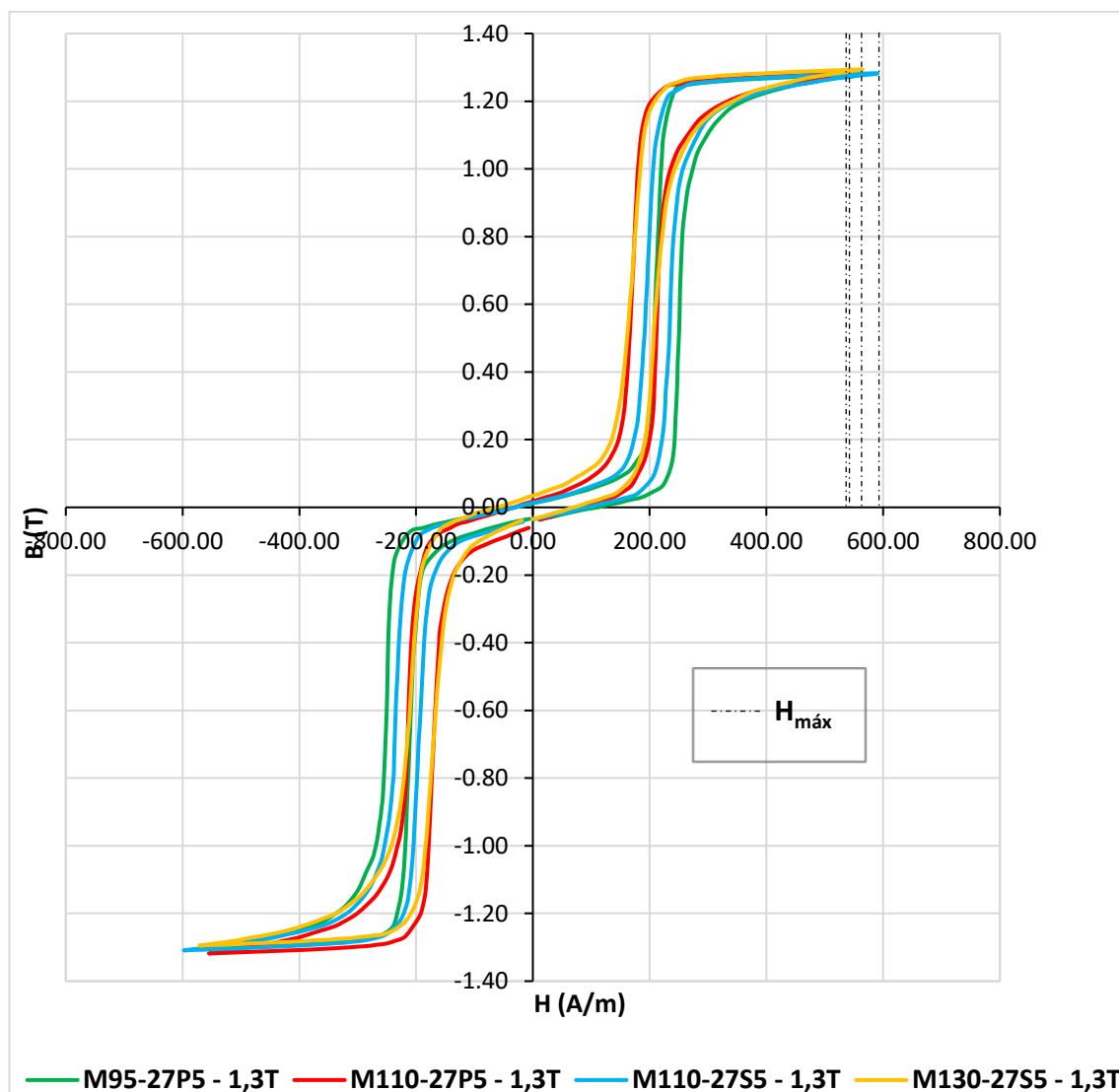


Figura 31: Curva de histerese magnética quase-estática sob indução máxima ($B_{máx}$) de 1,3 T das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

Acerca dos valores de P_{hDT} , vale notar o provável erro experimental observado nas curvas de histerese da amostra M110-27P5 para induções máximas de 0,5 T (**Figura 29**) e de 0,9 T (**Figura 30**), o que implica num maior valor de $P_{hM110-27S5}$ do que o esperado, uma vez que este valor é diretamente proporcional ao valor da área interna da curva de histerese magnética. Assim, deve-se considerar $P_{hM130-27S5} > P_{hM110-27S5}$, tanto para indução máxima de 0,5 T quanto para indução máxima de 0,9 T, respectivamente pontos 1 e 2 na **Figura 46**.

Posto isso, ao se confrontar o valor do campo magnético máximo ($H_{máx}$) aplicado para se alcançar a indução máxima do ensaio em cada uma das amostras nas **Figuras Figura 29, Figura 30 e Figura 31** com os valores das perdas histeréticas (P_h) obtidos a partir da área interna da curva de histerese magnética (curva $B \times H$) do

ensaio quase-estático de cada uma destas amostras, não é possível estabelecer nenhuma espécie de relação proporcional ou inversamente proporcional entre tais valores. Para indução máxima de 0,5 T (**Figura 29**) os valores de $H_{m\acute{a}x}$ mostram $H_{m\acute{a}xM95-27P5} > H_{m\acute{a}xM110-27S5} > H_{m\acute{a}xM110-27P5} > H_{m\acute{a}xM130-27S5}$ e em contrapartida $P_{hM95-27P5} < P_{hM110-27S5} < P_{hM110-27P5} < P_{hM130-27S5}$. De maneira similar, para indução máxima de 0,9 T (**Figura 30**) os valores de $H_{m\acute{a}x}$ mostram $H_{m\acute{a}xM95-27P5} > H_{m\acute{a}xM110-27S5} > H_{m\acute{a}xM110-27P5} \approx H_{m\acute{a}xM130-27S5}$ sendo que $P_{hM110-27S5} < P_{hM95-27P5} < P_{hM110-27P5} < P_{hM130-27S5}$. Por fim, para indução máxima de 1,3 T (**Figura 31**) os valores de $H_{m\acute{a}x}$ mostram $H_{m\acute{a}xM110-27S5} > H_{m\acute{a}xM130-27S5} > H_{m\acute{a}xM110-27P5} \approx H_{m\acute{a}xM95-27P5}$ enquanto $P_{hM110-27S5} < P_{hM95-27P5} < P_{hM110-27P5} < P_{hM130-27S5}$.

5.5. Perdas anômalas (P_a)

As perdas anômalas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{aDL}) e das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{aDT}) foram determinadas através da **Equação 6**:

$$P_a = P_t - P_p - P_h$$

Levando-se em conta os resultados de P_t , P_h e P_p já calculados neste trabalho, os valores obtidos para as perdas anômalas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{aDL}) foram os seguintes:

Tabela 14: Perdas anômalas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{aDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz.

P_{aDL} (W/kg) com $f = 50$ Hz				
$B_{m\acute{a}x}$ (T)	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
1.0	0,129	0,131	0,143	0,145
1.5	0,316	0,307	0,326	0,330
1.7	0,406	0,407	0,421	0,420

Já os valores calculados para as perdas anômalas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{aDT}) foram:

Tabela 15: Perdas anômalas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{aDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.

P_{aDT} (W/kg) com $f=50\text{Hz}$				
$B_{\text{máx}}$ (T)	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
0.5	0,455	0,376	0,441	0,495
0.9	0,940	0,905	0,957	1,016
1.3	1,423	1,404	1,473	1,488

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. B800

Nesta seção são analisados os valores das induções magnéticas (“B”, dado em T) e das diferentes perdas magnéticas (“ P_t ”, “ P_p ”, “ P_a ” e “ P_h ”, dadas em W/kg) obtidas quando as amostras são submetidas à um mesmo campo magnético, neste caso igual a 800 A/m, medida esta corriqueiramente chamada de B800 e utilizada de forma ampla pela indústria como um dos parâmetros de aferição da qualidade magnética de um material.

6.1.1. B800 em função das perdas totais (P_t)

O valor de B800 pode ser considerado como uma medição da textura cristalográfica do material favorável à maiores valores de magnetização pois, de maneira análoga, assim afirma a literatura acerca do B50, e.g. (FUKUHARA et al., 2011). Ora, B800 e B50 diferenciam-se meramente pela intensidade do campo magnético aplicado. Portanto, a análise dos valores de B800 pode de fato fornecer um bom indicativo acerca da textura cristalográfica de cada amostra estudada.

Dessa maneira, para um melhor entendimento, os valores de B800 e P_{tDL} da **Tabela 6** foram plotados na **Figura 32**:

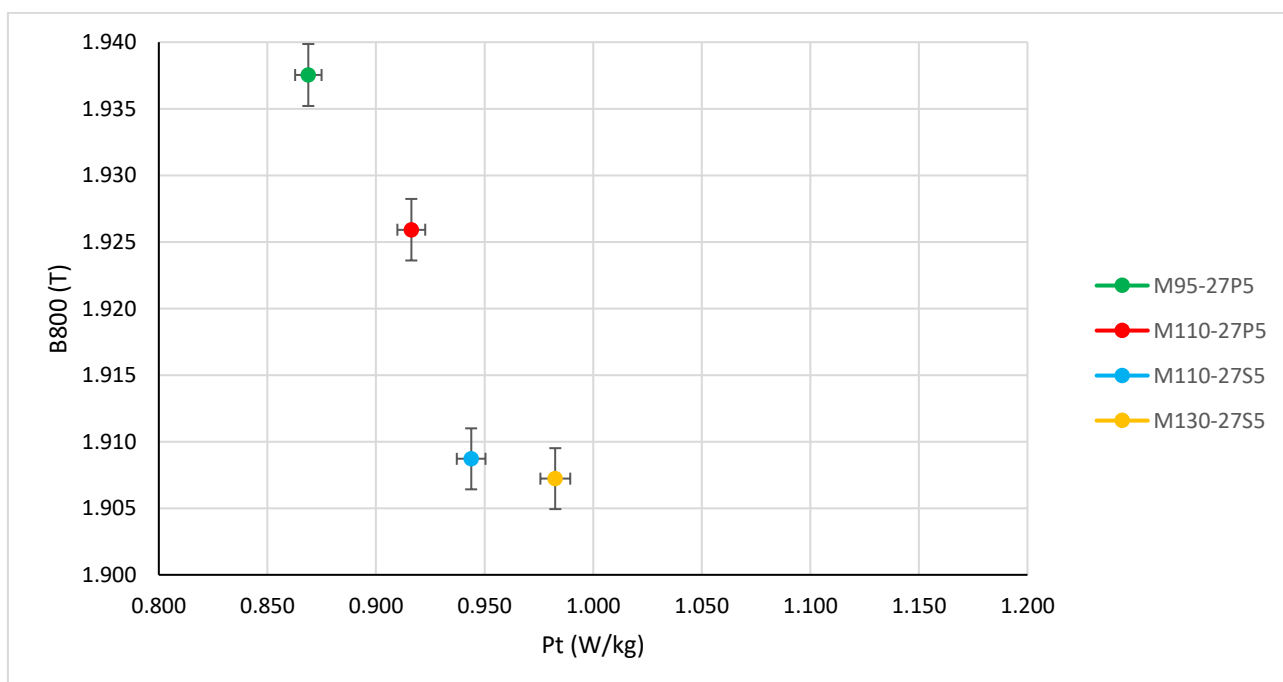


Figura 32: B800 em função das perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}) sob indução de 1,7T e frequência de 50Hz.

Tudo indica que a amostra do aço M95-27P5 apresenta menor perda magnética (0,869 W/kg) devido à sua “melhor textura”, i.e., uma textura na qual a somatória vetorial da orientação dos grãos do material mais se parece com a direção [001] da textura Goss (110)<001> (direção de laminação), traduzida no valor mais alto de B800 alcançado pelas amostras estudadas: 1,9375 T.

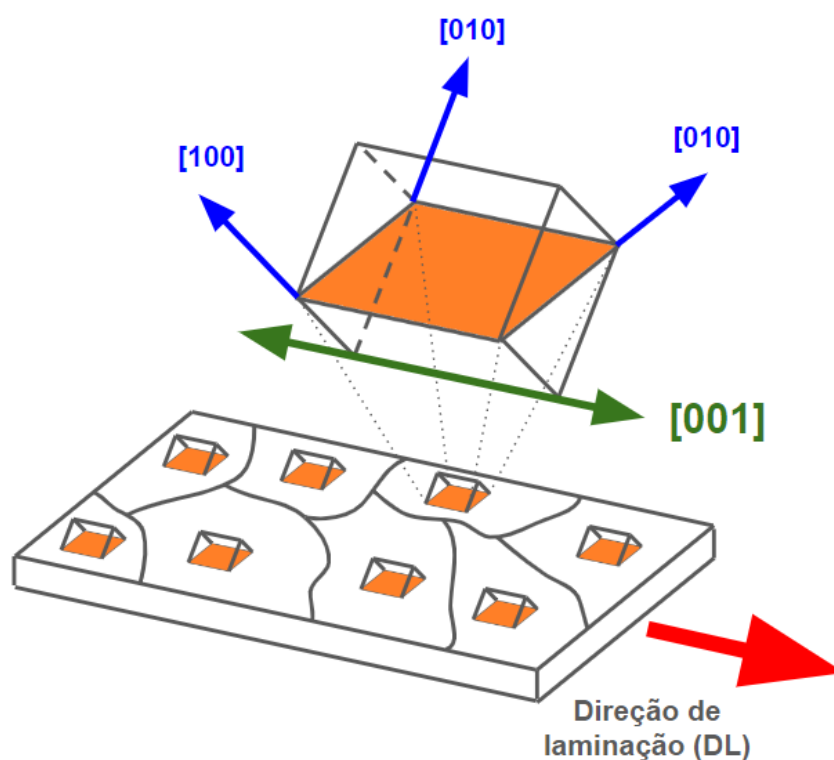


Figura 33: Detalhe da textura Goss de um aço elétrico de grão orientado. Adaptado de (NA; FLATAU, 2012).

Verifica-se que a amostra do aço M110-27P5 apresenta a segunda menor perda magnética (0,916 W/kg) e o segundo maior B800 (1,926 T), a amostra do aço M110-27S5 a terceira menor perda magnética (0,944 W/kg) e o terceiro maior B800 (1,909 T) e por fim a amostra do aço M130-27S5 a mais alta perda magnética (0,983 W/kg) e o pior valor de B800 (1,907 W/kg), fornecendo indícios de uma proporcionalidade inversa entre P_{iDL} e B800.

É possível notar que embora duas das amostras sejam classificadas pelo fabricante como HGO (M95-27P5 e M110-27P5) e outras duas como RGO (M110-27S5 e M130-27S5), a variação percentual dos valores de B800 nas quatro amostras mostrou uma variação de 0,03T entre o maior valor (1,938 T) e o menor valor (1,907

T) medidos. Essa variação, apesar de percentualmente pequena (1,59%), é significativa e representa uma diferença de grau de orientação. Do ponto de vista das principais normas internacionais (IEC 60404-8-7 e ASTM A876), os valores de B800 mínimos exigidos são significativamente inferiores aos medidos no presente experimento, como mostra a **Tabela 16**:

Tabela 16: Valores referenciais de B800mín nas normas IEC 60404-8-7 e ASTM A876 versus B800 medido.

Referência	M95-27P5	M110-27P5	M110-27S5	M130-27S5
B800mín na IEC 60404-8-7 (T)	1,850	1,880	1,800	1,780
B800mín na ASTM A876 (T)	1,880	1,880	1,800	1,800
B800 medido (T)	1,938	1,926	1,909	1,907

De maneira similar ao feito com as amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL), para as amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT), a **Figura 34** mostra os valores de B800 e de P_{tDT} :

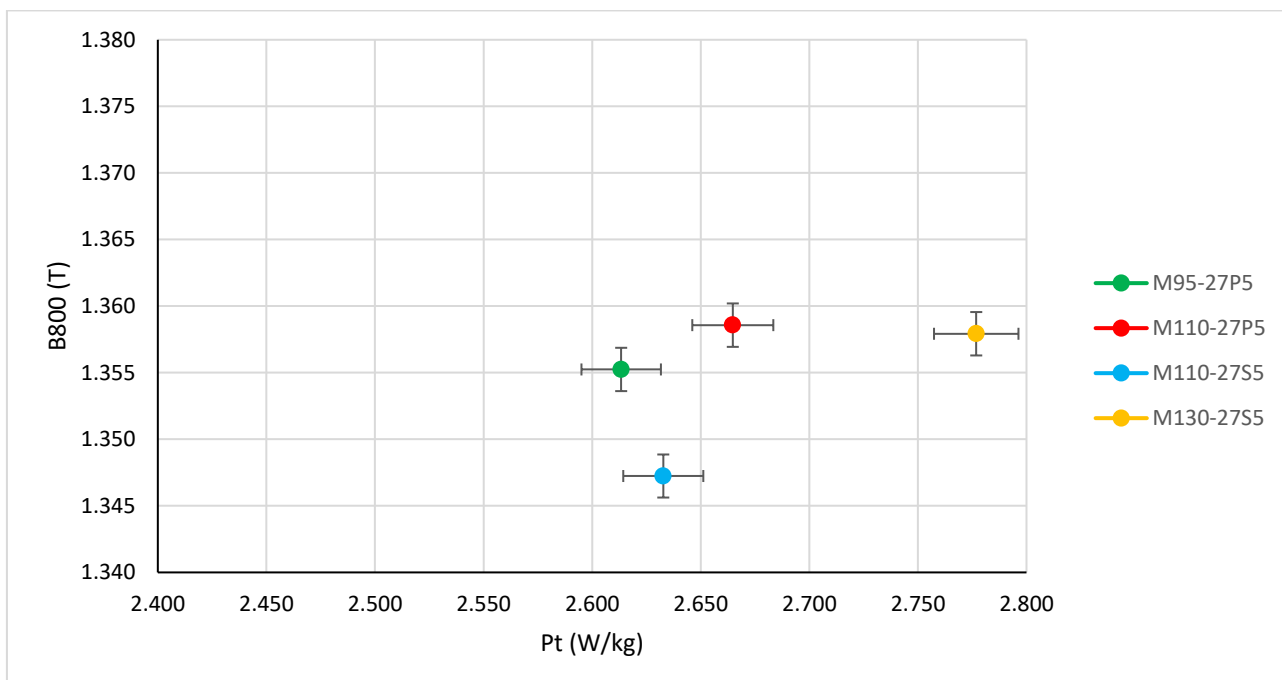


Figura 34: B800 em função das perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT}) sob indução de 1,3T e frequência de 50Hz.

Diferentemente do observado na DL, como evidenciado na **Figura 34**, na DT não parece haver indícios de proporcionalidade (inversa ou direta) entre P_{tDT} e B800. Na

DT, as perdas magnéticas seguiram a seguinte ordem, da menor para a maior: 2,613 W/kg (M95-27P5), 2,633 W/kg (M110-27S5), 2,665 W/kg (M110-27P5) e 2,777 W/kg (M130-27S5). Já as medições de B800 apresentaram os seguintes valores, do menor para o maior: 1,347 T (M110-27S5), 1,355 T (M95-27P5), 1,358 T (M130-27S5) e 1,359 T (M110-27P5).

A variação percentual dos valores de B800 nas quatro amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT) mostra uma variação ainda menor do que o valor de 1,59% observado na DL. Na DT, o menor B800 medido foi de 1,347 T e o maior foi de 1,359 T, o que representa uma variação de apenas 0,01 T, ou uma variação percentual de meros 0,84%.

A diferença dos valores de B800 medidos na DL (valores entre 1,907 T e 1,938 T) e na DT (valores entre 1,347 T e 1,359 T) confirmam o caráter altamente anisotrópico de ligas ferrosas usadas para se alcançar altos níveis de indução magnética tais como a liga Fe-Si do aço elétrico de grão orientado (GO), principalmente em virtude da constante de anisotropia cristalina do Ferro (ARAI; ISHIYAMA, 1994).

Ao se comparar os valores B800 das amostras de aço elétrico de grão orientado cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) e transversalmente à direção de laminação (DT), pode-se afirmar que uma amostra que apresente maior permeabilidade magnética na direção DL, não implica necessariamente que ela apresentará um maior valor de permeabilidade magnética na direção DT. Tampouco pode-se afirmar ao contrário, ou seja, que uma amostra que apresente maior permeabilidade magnética na direção DL implicará na mesma apresentando um menor valor de permeabilidade magnética na direção DT. Isto reforça a informação apresentada no item **6.2.1** acerca da complexidade com que os domínios magnéticos evoluem durante o processo de magnetização do GO na DT (FIORILLO et al., 2002).

A **Figura 35** mostra um dos modelos mais atuais acerca de tal processo de magnetização na DT onde o campo magnético é aplicado transversalmente ao eixo de fácil. O modelo, defendido em (HUBERT; SCHAFFER, 2008), traz à luz a ocorrência de três padrões de domínios, a saber:

1) Padrão de domínio do tipo “dente de serra” (*saw-tooth pattern*): observado em induções até 0,3 x o valor da saturação do material;

2) Padrão de domínio do tipo “coluna” (*column pattern*): observado até o aparecimento das rotações de magnetização, a aproximadamente 0,7 x o valor da saturação do material;

3) Padrão de domínio do tipo “ramificação” (*branching pattern*): observado em campos mais altos, com valores acima dos campos onde são observados os padrões de domínios do tipo “coluna”.

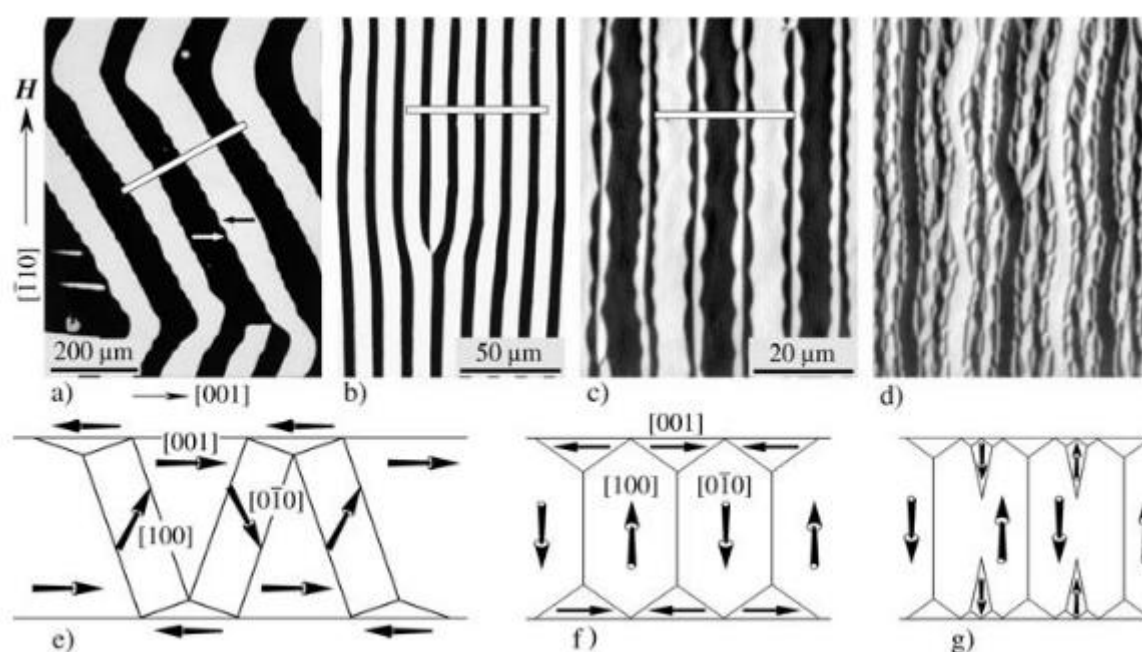


Figura 35: Três tipos de domínios observados durante o processo de magnetização do GO na DT. O padrão “dente de serra” (a,e) observado até 0,3 x saturação, seguido pelo padrão “coluna” (b,f) até o início das rotações de magnetização (~0,7 x saturação). Em campos mais altos (c,d) é observado o desenvolvimento do padrão “ramificação”. Os modelos e), f) e g) representam as seções transversais através das faixas brancas indicadas em a), b) e c). Notar que as direções [100] e [0-10] estão no plano da figura e) e fora dos planos das figuras f) e g). O modelo g) mostra o padrão “ramificação” mais simples, aproximadamente como em c) (HUBERT; SCHAFFER, 2008).

O modelo de (HUBERT; SCHAFFER, 2008), ainda que apresente limitações pois considera que o fluxo na transversal ocupa-se somente dos eixos de fácil magnetização, além de desprezar a influência dos campos de dispersão, parece ser uma boa justificativa para o formato sigmoide e o comportamento das curvas de histerese das amostras de aço elétrico cortadas transversalmente à direção de

laminação mostradas nas **Figuras Figura 29, Figura 30 e Figura 31.**

6.1.2. B800 em função das perdas parasitas (P_p)

Como evidenciado pela **Equação 2**, e explicado na seção **5.3**, considerou-se que as quatro amostras de aço cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) possuem as mesmas perdas parasitas quando submetidas à mesma indução máxima ($B_{máx}$) e mesma frequência (f), o que para valores de $B_{máx} = 1,7$ T e $f = 50$ Hz, resulta em uma $P_{pDL} = 0,236$ W/kg, como mostrado na **Figura 36.**

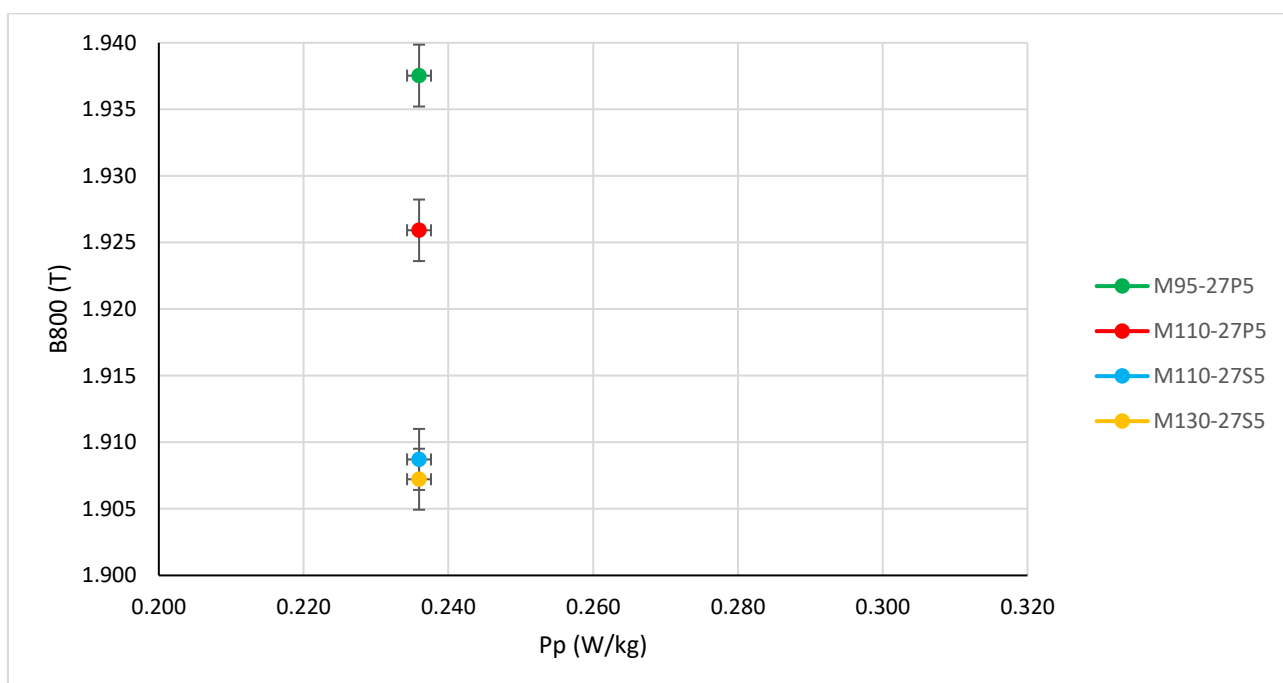


Figura 36: B800 em função das perdas parasitas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{pDL}) sob indução de 1,7T e frequência de 50Hz.

Assim, não faz sentido no presente trabalho a tentativa de se estabelecer alguma espécie de correlação entre B800 (e em última instância, a textura do aço) e suas perdas parasitas, pois estão na verdade relacionadas diretamente com a espessura e a resistividade da amostra (TUROUSKI; TUROUSKI, 2014), podendo ser considerada uma medida isotrópica (PLUTA, 2020).

Como as perdas parasitas independem da orientação, por princípio (LANDGRAF, 2007), o mesmo vale para as amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT). No caso do qual o ensaio foi feito com $B_{máx} = 1,3$ T e $f = 50$ Hz, chega-se a $P_{pDT} = 0,138$ W/kg, como mostrado na **Figura 37.**

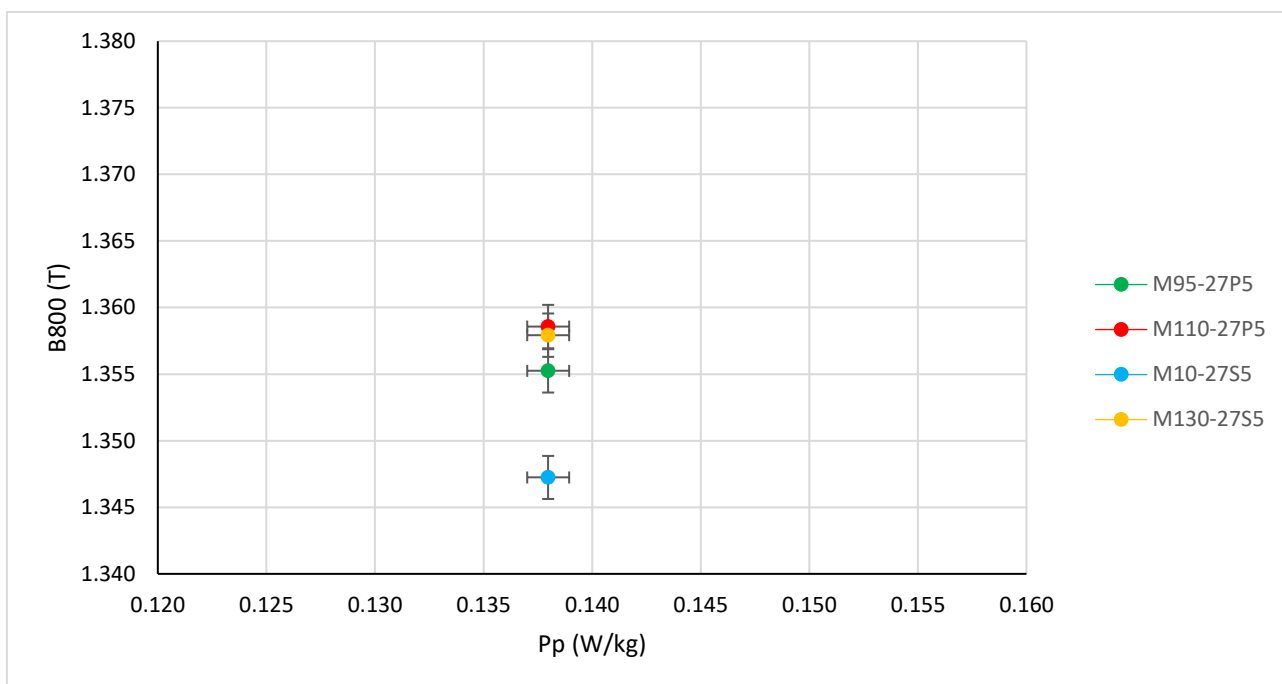


Figura 37: B_{800} em função das perdas parasitas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{pDT}) sob indução de 1,3T e frequência de 50Hz.

6.1.3. B_{800} em função das perdas histeréticas (P_h)

Como mencionado em 6.1.1, a medição do B_{800} pode ser um bom indicativo da textura cristalográfica do material. Além disso, sabe-se que as perdas histeréticas (P_h) são fortemente dependentes da textura Goss do aço elétrico (PLUTA, 2016). De fato, os ensaios realizados com as amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL), vem a confirmar tais premissas, como mostra a **Figura 38**:

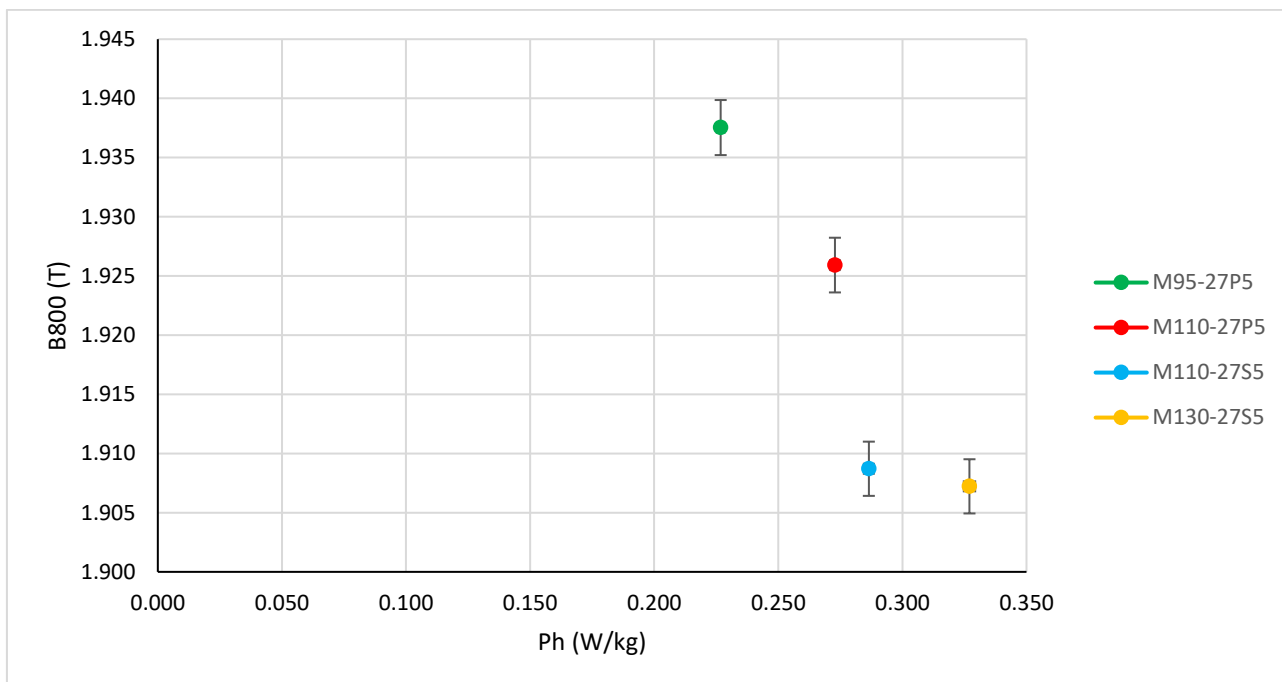


Figura 38: B800 em função das perdas histeréticas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{hDL}) sob indução de 1,7T e frequência de 50Hz.

A **Figura 38** mostra que na DL, os aços com menores perdas histeréticas possuem maior B800, ou seja, $P_{hM95-27P5} < P_{hM110-27P5} < P_{hM110-27S5} < P_{hM130-27S5}$ e $B800_{M95-27P5} > B800_{M110-27P5} > B800_{M110-27S5} > B800_{M130-27S5}$.

Nota-se também na mesma figura que embora as quatro amostras possuam perdas histeréticas (P_h) similares, as duas das amostras classificadas pelo fabricante como HGO (M95-27P5 e M110-27P5) possuem notadamente maiores valores de B800 em face aos valores de B800 medidos nas outras duas amostras de RGO (M110-27S5 e M130-27S5).

O mesmo ensaio feito com as amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT) não mostra um comportamento similar ao observado com as amostras na DL. Ao se confrontar os valores de P_{hDT} versus os valores medidos de B800, verifica-se que $P_{hM110-27S5} < P_{hM95-27P5} < P_{hM110-27P5} < P_{hM130-27S5}$ e $B800_{M110-27S5} > B800_{M95-27P5} > B800_{M110-27P5} > B800_{M130-27S5}$, como mostra a **Figura 39**:

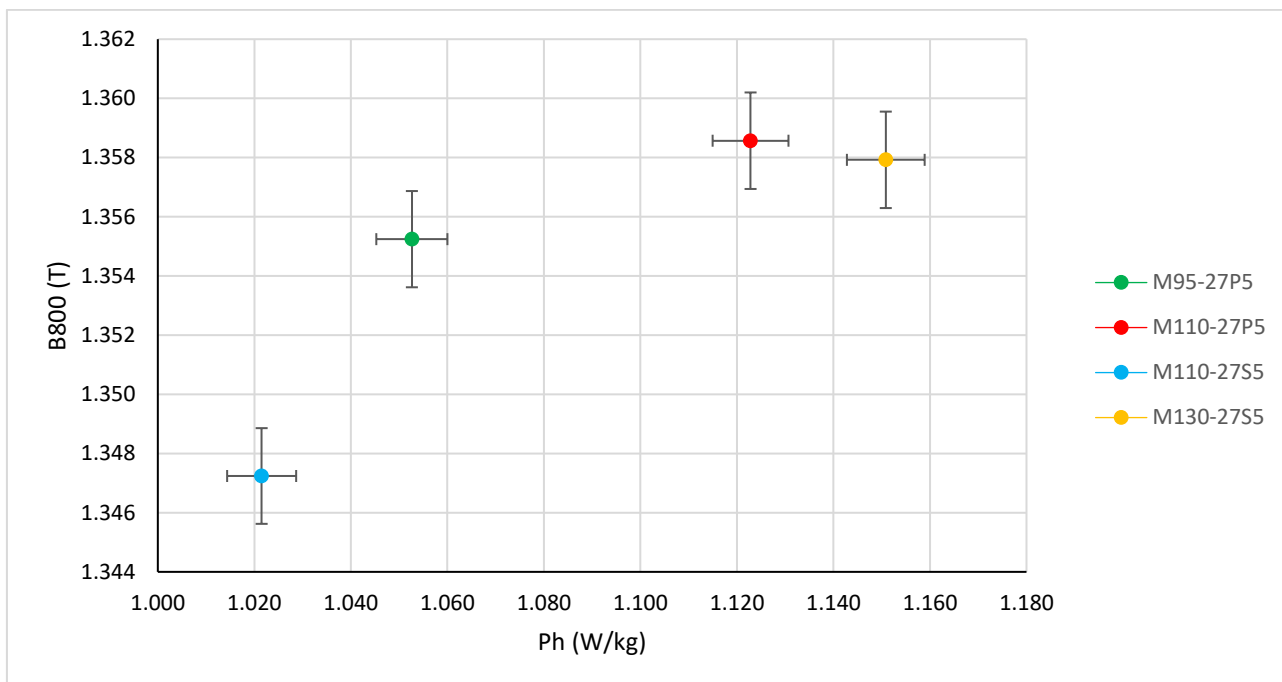


Figura 39: B800 em função das perdas histeréticas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{hDT}) sob indução de 1,3T e frequência de 50Hz.

Neste caso, não é possível fazer distinção entre o comportamento das amostras de HGO e o das amostras de RGO, comprovando o caráter complexo e não-linear da anisotropia magnética dos aços elétricos de grão orientado (GO).

6.1.4. B800 em função das perdas anômalas (P_a)

De forma similar às perdas histeréticas (P_h), as perdas anômalas (P_a) também estão intimamente ligadas à microestrutura (PLUTA, 2020), porém efeitos relativos à existência de domínio e de paredes de domínio na microestrutura do aço afetam fortemente os valores das perdas anômalas (P_a) (LANDGRAF, 2003), resultando num comportamento diferente de $P_a \times B800$ em comparação à $P_h \times B800$. Para as amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL), diferentemente do mostrado na **Figura 38**, as amostras com menores perdas magnéticas (neste caso perdas anômalas), não possuem necessariamente um maior valor de B800, como mostra a **Figura 40**:

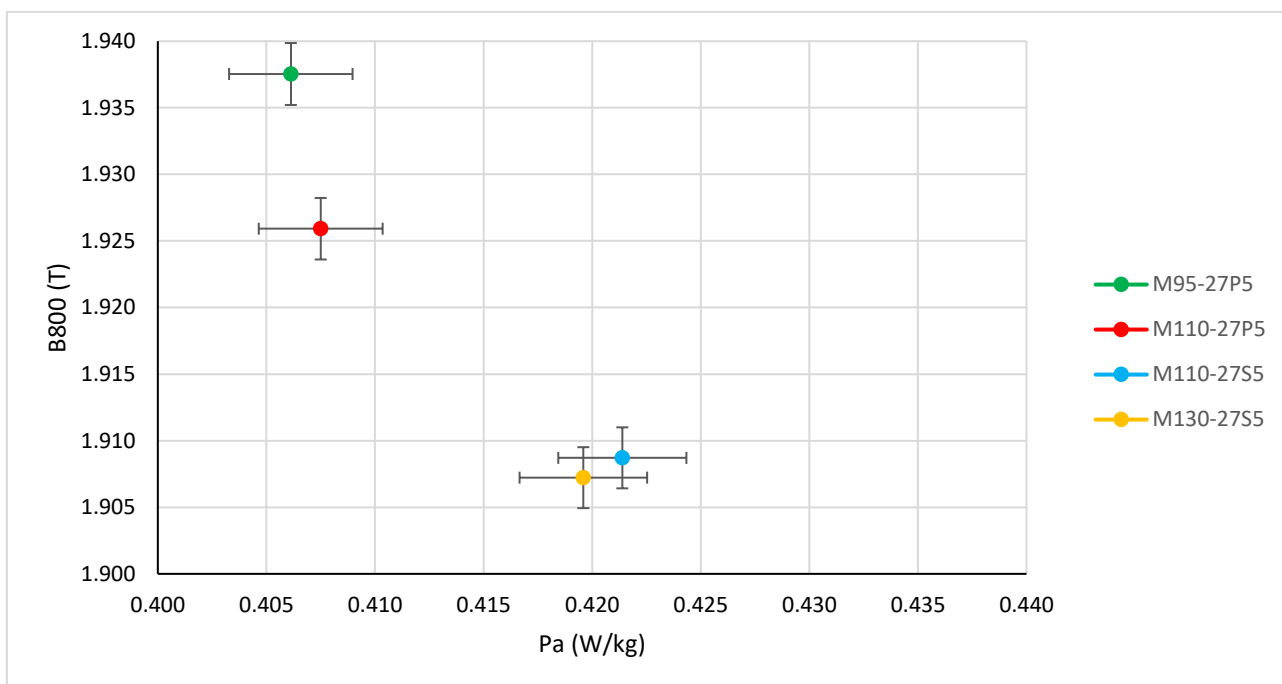


Figura 40: B800 em função das perdas anômalas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{aDL}) sob indução de 1,7T e frequência de 50Hz.

Na **Figura 40** nota-se que em contraponto à válida ordenação $B800_{M95-27P5} > B800_{M110-27P5} > B800_{M110-27S5} > B800_{M130-27S5}$ a ordenação $P_{aM95-27P5} < P_{aM110-27P5} < P_{aM110-27S5} < P_{aM130-27S5}$ não é válida, sendo a sequência correta dada por $P_{aM95-27P5} < P_{aM110-27P5} < P_{aM130-27S5} < P_{aM110-27S5}$, o que ressalta a diferença na maneira pela qual as perdas anômalas se relacionam com a textura do material (i.e. seu B800), se comparada às perdas histeréticas.

Ainda que as medidas de $B800_{M110-27S5}$ e $B800_{M130-27S5}$ encontrem-se dentro da margem de erro do ensaio que é de 1,2% e as medidas $P_{aM110-27S5}$ e $P_{aM130-27S5}$ encontrem-se dentro da margem de erro do ensaio que é de 0,7%, as perdas anômalas das amostras de RGO destacam-se por sua maior magnitude em relação às amostras de HGO.

A **Figura 41** mostra o comportamento de P_a x B800 para as amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT):

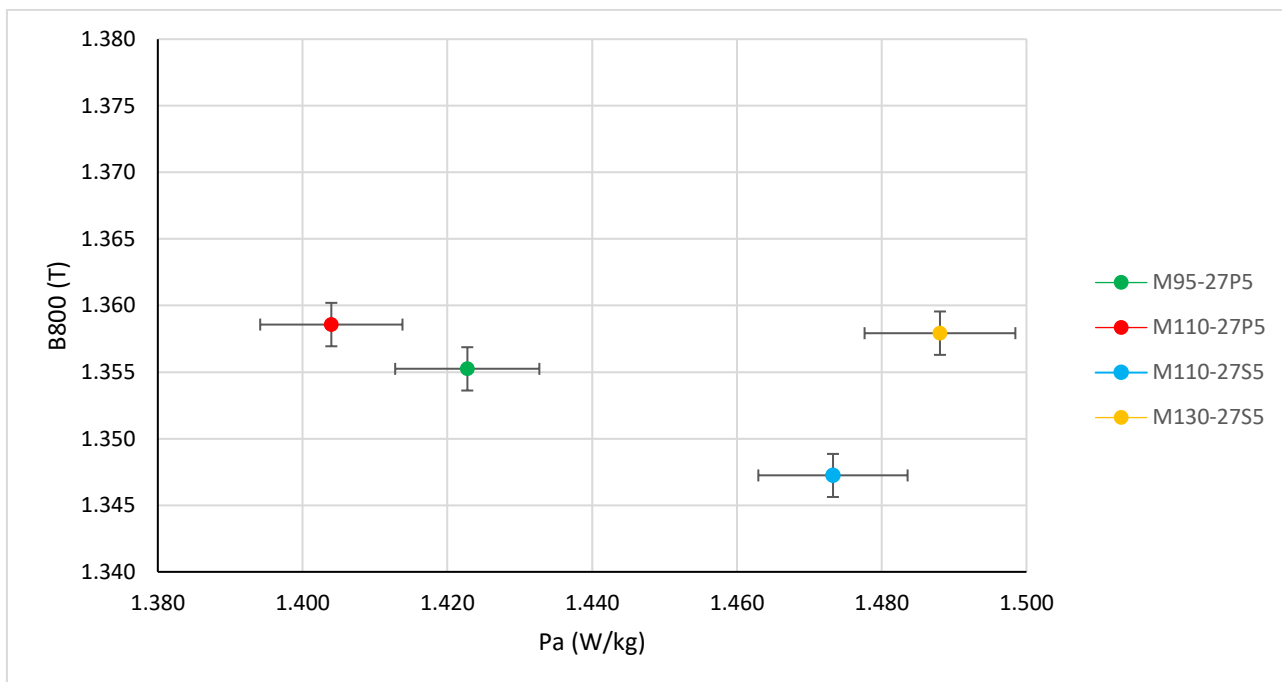


Figura 41: B800 em função das perdas anômalas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{aDT}) sob indução de 1,3T e frequência de 50Hz.

De forma análoga ao ocorrido com o comportamento $P_{hDT} \times B800$, não se verifica uma relação linear direta entre P_{aDT} e B800 pois em contrapartida da válida ordenação $B800_{M95-27P5} > B800_{M110-27P5} > B800_{M110-27S5} > B800_{M130-27S5}$ verificou-se neste ensaio que $P_{aM110-27P5} < P_{aM95-27P5} < P_{aM110-27S5} < P_{aM130-27S5}$. Assim como na DL, os valores de P_{aDT} das amostras de RGO destacam-se por sua maior magnitude em relação às amostras de HGO, ainda que as medidas de $B800_{M110-27S5}$ e $B800_{M130-27S5}$ encontrem-se dentro da margem de erro do ensaio que é de 1,2% e as medidas $P_{aM110-27S5}$ e $P_{aM130-27S5}$ encontrem-se dentro da margem de erro do ensaio que é de 0,7%.

6.2. Perdas Magnéticas

A seguir faz-se a análise crítica das perdas magnéticas calculadas no capítulo 5 da presente tese, são elas: perdas totais (P_t), perdas parasitas (P_a), perdas histeréticas (P_h) e perdas anômalas (P_a).

6.2.1. Perdas totais (P_t)

Para melhor visualização e análise dos valores das perdas totais (P_t) obtidos no Quadro de Epstein, inicialmente os valores das perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}) contidos na **Tabela 8** são explicitados na

Figura 42.

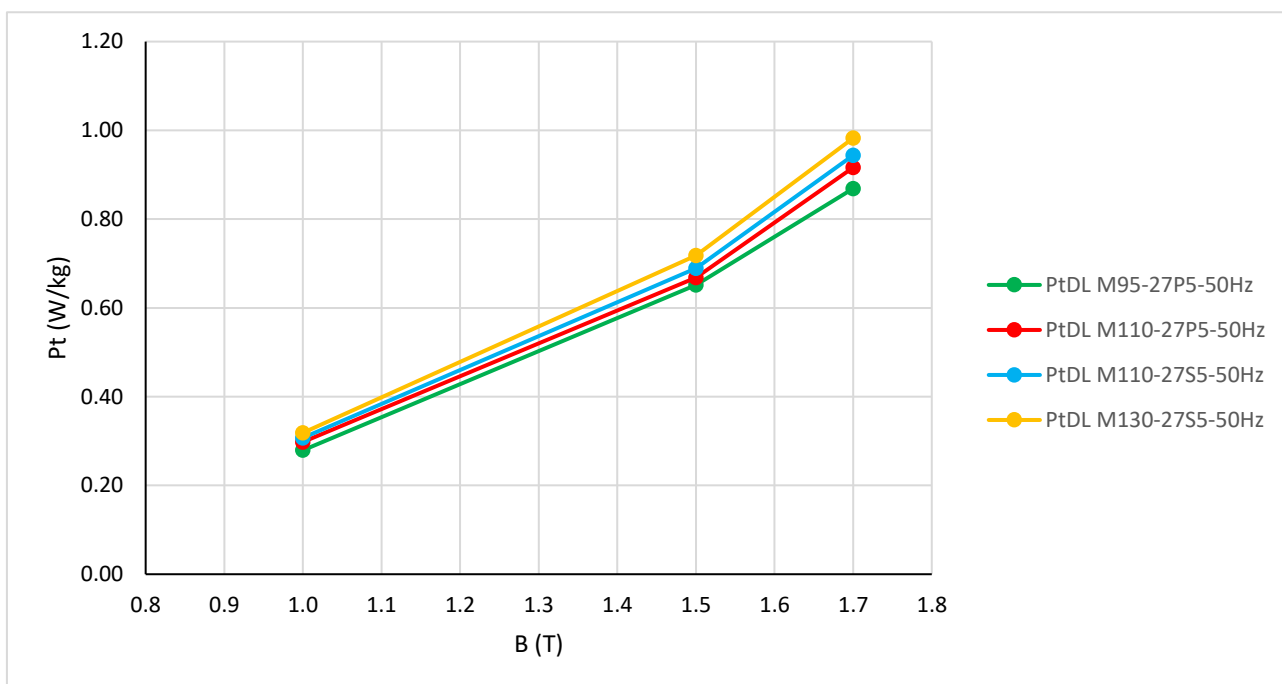


Figura 42: Perdas totais das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.

Nota-se que para todos os níveis de indução medidos (1,0 T, 1,5 T e 1,7 T), os valores das perdas totais mostram que $P_{tDLM95-27P5} < P_{tDLM110-27P5} < P_{tDLM110-27S5} < P_{tDLM130-27S5}$, o que confirma o resultado esperado, uma vez que as perdas totais (P_t) dos aços M95-27P5, M110-27P5, M110-27S5 e M130-27S5 deveriam em tese obedecer ao ordenamento $P_{tDLM95-27P5} < P_{tDLM110-27P5} \cong P_{tDLM110-27S5} < P_{tDLM130-27S5}$.

De maneira similar ao feito com as amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL), para as amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT), os valores das perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT}) contidos na **Tabela 9** são explicitados na **Figura 43**.

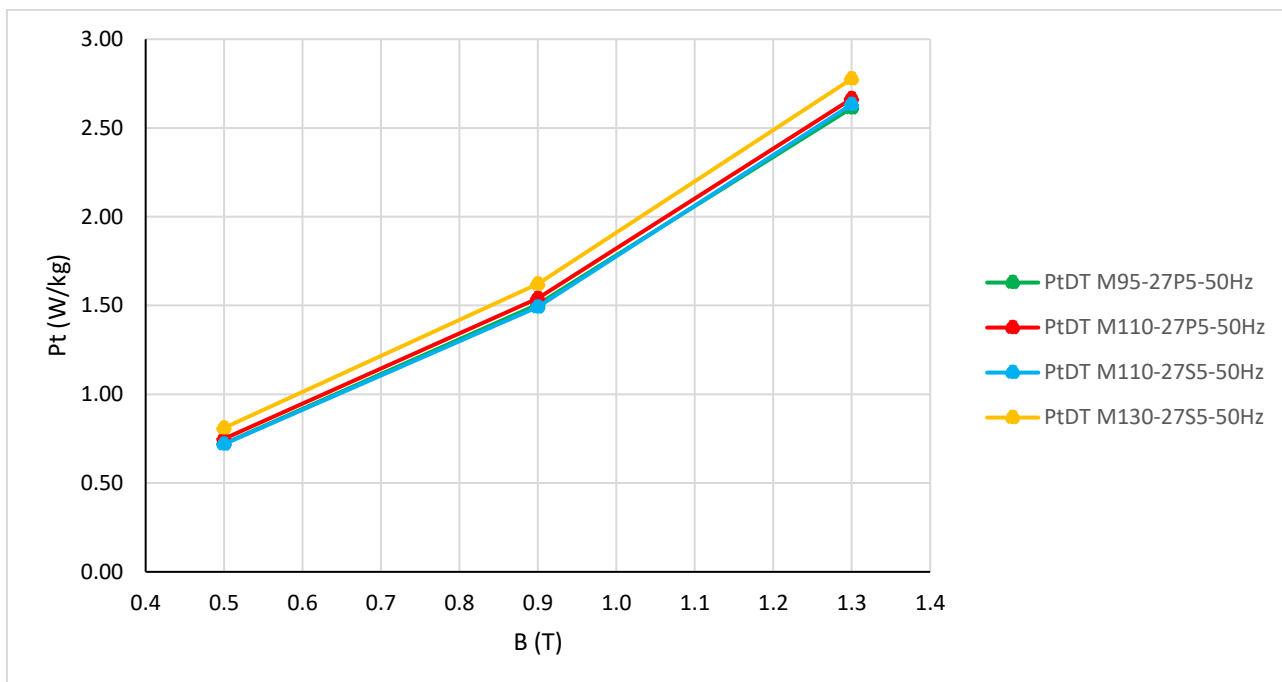


Figura 43: Perdas totais das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.

No caso de P_{tDT} , destaca-se das demais amostras os valores de $P_{tDTM130-27S5}$ com valores de perdas totais nitidamente maiores do que os valores das demais amostras. Nota-se também que diversos valores das perdas de $P_{tDTM95-27P5}$, $P_{tDTM110-27P5}$ e $P_{tDTM110-27S5}$ possuem entre si uma diferença menor do que o valor da margem de erro de 0,7% do experimento, o que em última análise indica um comportamento similar das três amostras na DT, ainda que estas mesmas amostras tenham apresentado comportamentos consideravelmente distintos na DL. Isto pode ser explicado em grande parte pelo processo de magnetização do GO na DT no qual os domínios magnéticos evoluem de maneira muito complexa, o que não ocorre no processo de magnetização na DL quando as paredes de domínio de 180° são basicamente submetidas à um movimento de vai e volta quando colocadas sob um campo magnético alternado (FIORILLO et al., 2002).

6.2.2. Perdas parasitas (P_p)

De maneira similar ao feito com os valores das perdas totais (P_t), os valores das perdas parasitas (P_p) na DL (**Tabela 10**) e DT (**Tabela 6**) foram plotados na **Figura 44**.

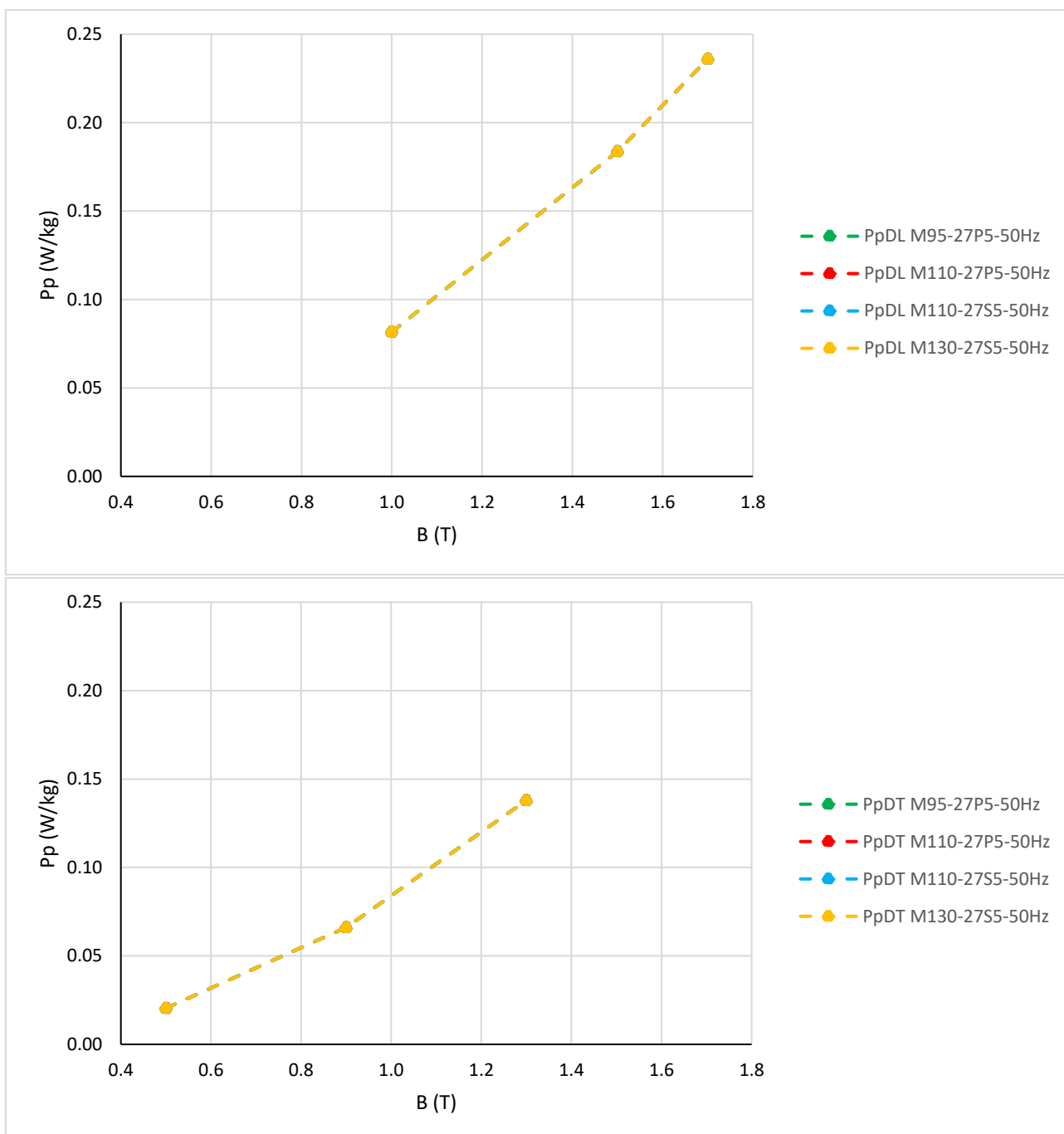


Figura 44: Perdas parasitas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{pDL}) e transversalmente à direção de laminação (P_{pDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50Hz.

Como já mencionado em 5.3, dado que as perdas parasitas dependem somente de fatores não atrelados à anisotropia cristalina do material, uma vez que os aços ensaiados possuem a mesma espessura (e), resistividade elétrica (ρ) e densidade (d), os valores de P_p estarão relacionados portanto somente com as correntes parasitas induzidas pela variação na indução aplicada no material (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006) e com a velocidade com que esta variação ocorre, i.e. com a frequência (f)

aplicada. Isto explica o porquê aços elétricos GO estudados, embora possuam diferentes qualidades magnéticas, apresentem os mesmos valores de perdas parasitas para uma dada condição de ensaio.

6.2.3. Perdas histeréticas (P_h)

Para melhor visualização, os valores das perdas histeréticas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{hDL}) contidos na **Tabela 12** foram plotados na **Figura 45**.

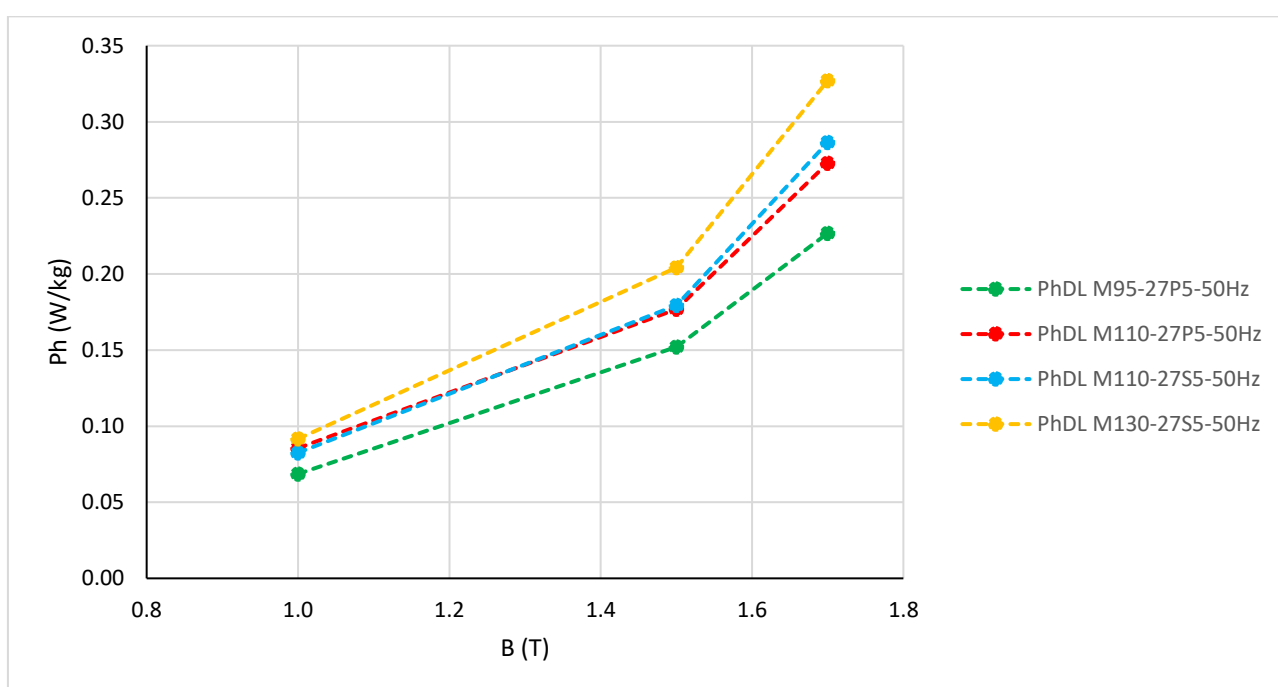


Figura 45: Perdas histeréticas (P_{hDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).

Nota-se que para os dois maiores níveis de indução medidos (1,5 T e 1,7 T), os valores das perdas histeréticas mostram que $P_{hDLM95-27P5} < P_{hDLM110-27P5} < P_{hDLM110-27S5} < P_{hDLM130-27S5}$, o que confirma que para maiores níveis de indução os aços que apresentaram a melhor textura na DL, ou seja, maior B800 (como apresentado em **5.1**) apresentam também as menores perdas histeréticas. Já para a indução de 1,0 T, os valores das perdas histeréticas mostram que $P_{hDLM95-27P5} < P_{hDLM110-27S5} < P_{hDLM110-27P5} < P_{hDLM130-27S5}$, porém com uma diferença absoluta entre os valores de P_h medidos menor do que a mesma quando do ensaio à maiores níveis de indução (1,5 T e 1,7 T). Observa-se que na DL, quanto mais alta a indução máxima aplicada, mais de

destaca o desempenho dos aços elétricos de melhor qualidade magnética, ou seja, a diferença absoluta entre os valores de P_h medidos entre os diferentes aços.

De maneira similar ao feito com as amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL), para as amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT), os valores das perdas histeréticas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{hDT}) contidos na **Tabela 13** são explicitados na **Figura 46**.

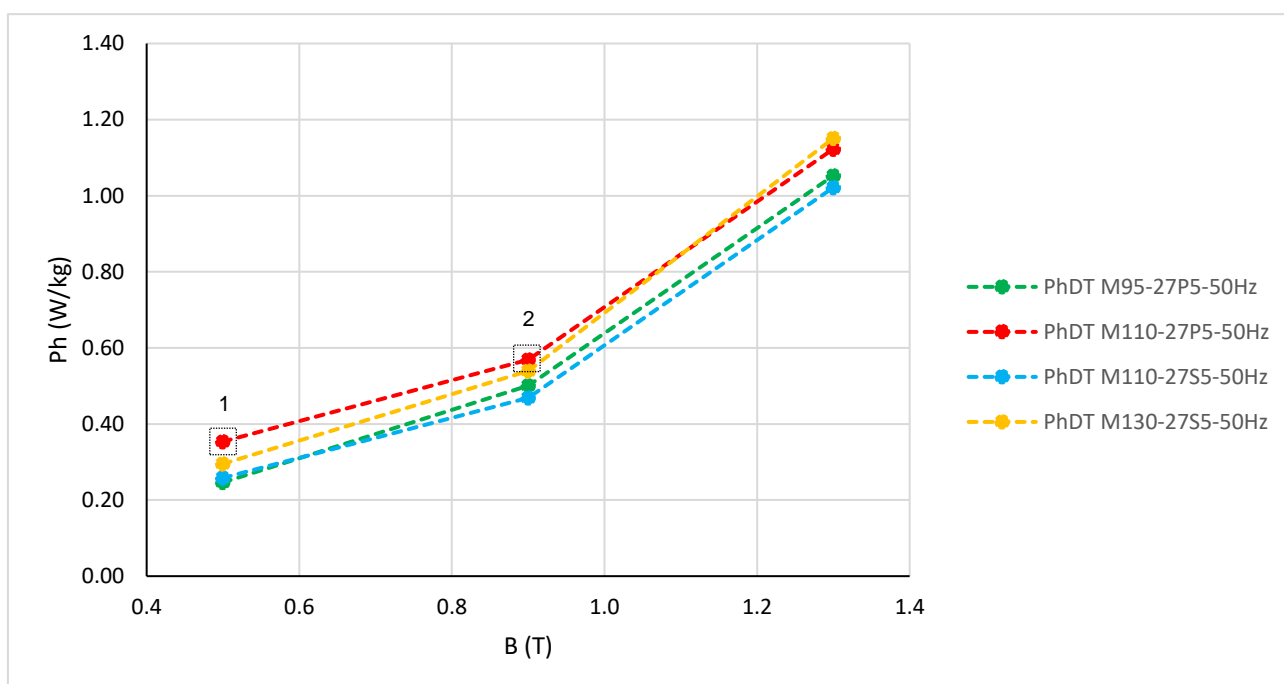


Figura 46: Perdas histeréticas (P_{hDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

No que diz respeito à DT, observa-se na **Figura 46** que as amostras do M95-27P5 (HGO) e M110-27S5 (RGO) possuem nitidamente níveis de P_h menores do que os resultados das amostras M110-27P5 (HGO) e M130-27S5 (RGO). Isto indica que para as amostras analisadas, não existe nenhuma espécie de correlação lógica aparente entre os valores de P_h na DL e P_h na DT, dado que na DL P_h obedeceu ao ordenamento esperado $P_{hM95-27P5} < P_{hM110-27P5} < P_{hM110-27S5} < P_{hM130-27S5}$, ou seja, o fato de o material apresentar uma melhor textura na DL não implica necessariamente em maiores perdas histeréticas na DT.

É importante mencionar que os pontos 1 e 2 destacados na **Figura 46**, refletem

diretamente o provável erro experimental observado nas curvas de histerese da amostra M110-27P5 para induções máximas de 0,5 T (**Figura 29**) e de 0,9 T (**Figura 30**), o que implica num maior valor de $P_{hM110-27S5}$ do que o esperado. Ainda assim, prevalece a análise mencionada no parágrafo anterior.

Ao se observar a magnitude dos valores das perdas histeréticas dos aços GO medidos na DL e na DT, a estreita relação entre a histerese magnética e a anisotropia cristalina do material (PFUTZNER, 1994) (PLUTA, 2020) fica evidente, sendo refletida nas diferentes magnitudes dos valores de P_{hDL} e P_{hDT} .

6.2.4. Perdas anômalas (P_a)

De maneira similar ao feito com os valores das perdas totais (P_t), perdas parasitas (P_p) e perdas histeréticas (P_h), os valores das perdas anômalas (P_a) são plotados a seguir para melhor visualização e análise.

Os valores das perdas anômalas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{aDL}) contidos na **Tabela 14** foram plotados na **Figura 47**.

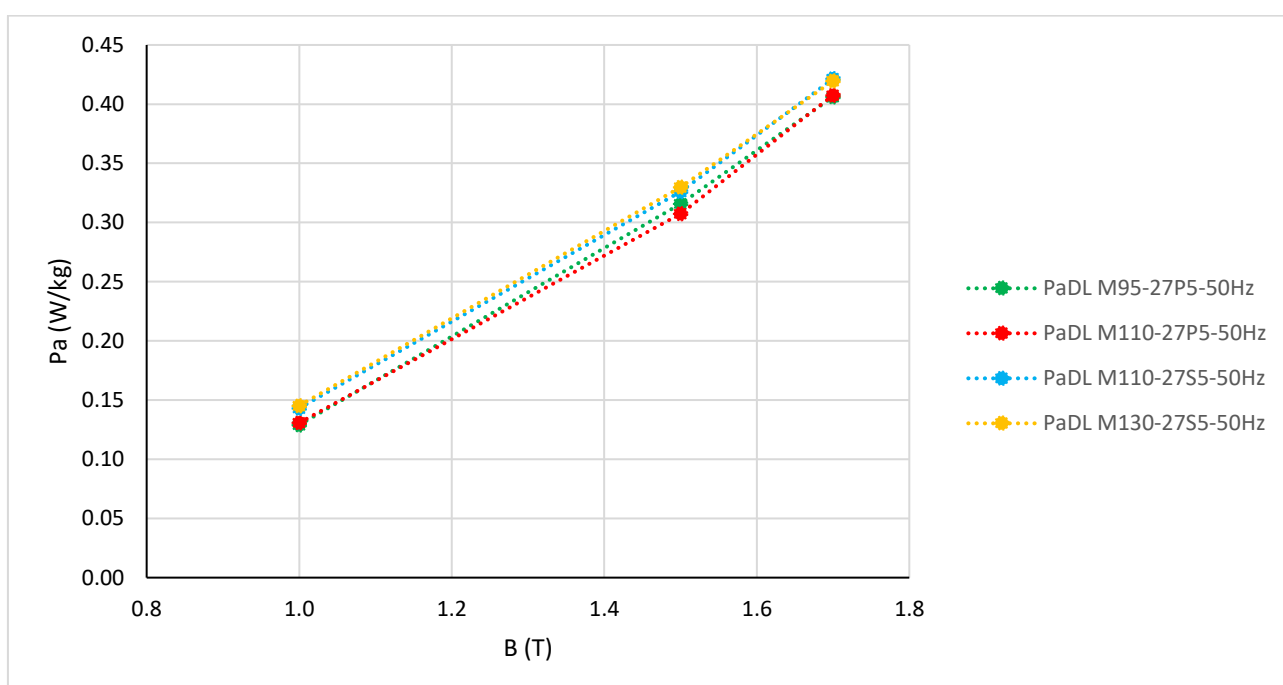


Figura 47: Perdas anômalas (P_{aDL}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).

Já os valores das perdas anômalas das amostras cortadas transversalmente à

direção de laminação (P_{aDT}) contidos na **Tabela 15** foram plotados na **Figura 48**.

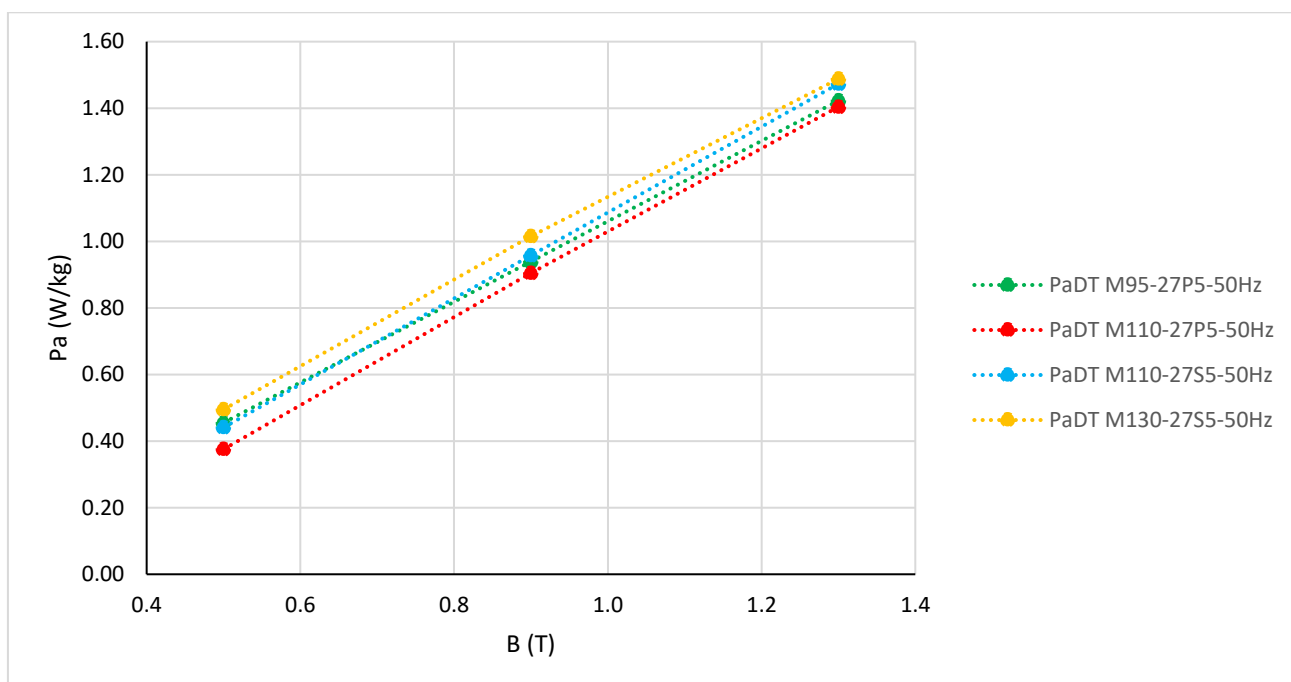


Figura 48: Perdas anômalas (P_{aDT}) em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DL).

Assim como observado por (PLUTA, 2020), nota-se que uma variação significativa nos valores de P_h (P_{hDL} vide **Figura 45** e P_{hDT} vide **Figura 46**) não implica necessariamente num grande aumento de P_a (P_{aDL} vide **Figura 47** e P_{aDT} vide **Figura 48**).

6.3. Relações entre P_p , P_h e P_a

Nesta seção, utilizando-se de razões numéricas simples e valores percentuais, são analisadas as relações entre P_a , P_p , P_h e P_t e a dependência das mesmas em relação à diferentes níveis de indução: 1,0 T, 1,5 T e 1,7 T (amostras cortadas na DL) e 0,5 T, 0,9 T e 1,3 T (amostras cortadas na DT).

6.3.1. Relação P_h/P_a

A relação entre as perdas histeréticas (P_h) e perdas anômalas (P_a) medidas nas amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) é mostrada na **Figura 49**.

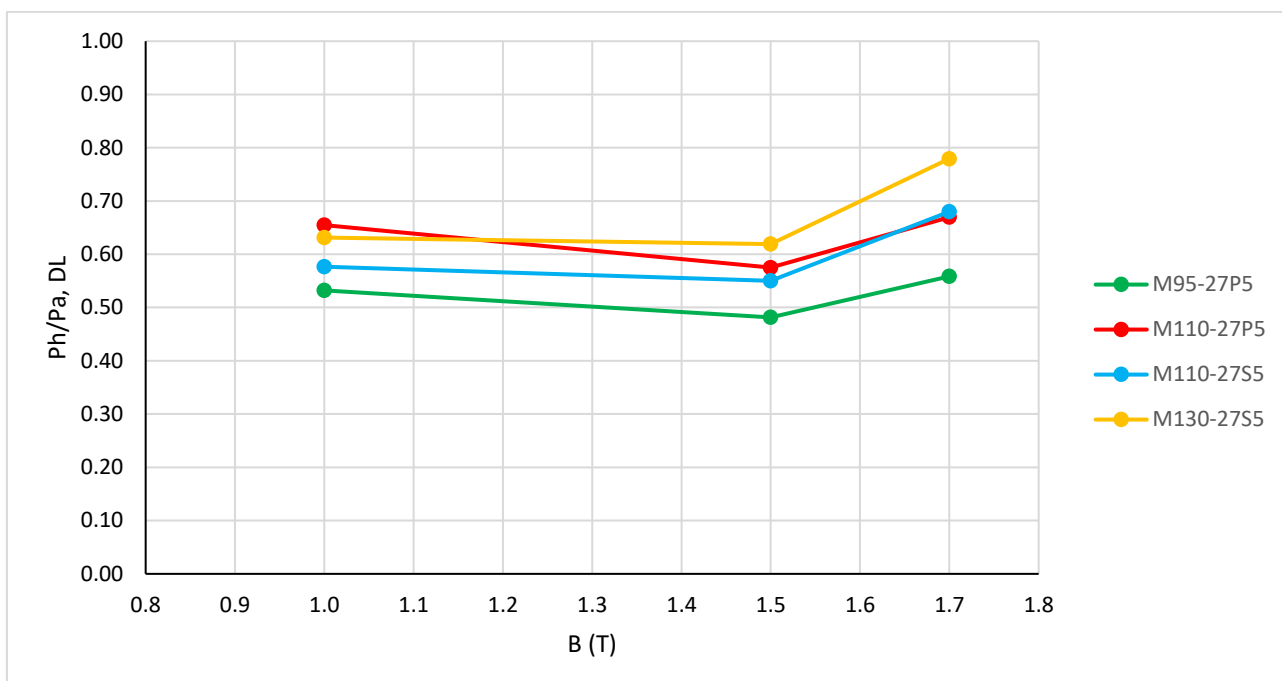


Figura 49: Relação P_h/P_a em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).

Na **Figura 49** pode-se observar que a amostra do M95-27P5 possui destacadamente a menor relação P_h/P_a para qualquer nível de indução aplicado. Já com relação às amostras de M110-27P5, M110-27S5 e M130-27S5, os maiores valores de P_h/P_a dentre elas variam conforme a indução aplicada: em um menor nível de indução (1,0 T) tem-se que P_h/P_a de M110-27S5 é menor do que P_h/P_a de M130-27S5 que por sua vez é menor do que P_h/P_a de M110-27P5. Já para o maior nível de indução aplicado (1,7T) tem-se que P_h/P_a de M110-27P5 é menor do que P_h/P_a de M110-27S5 que por sua vez é menor do que P_h/P_a de M130-27S5. Observando-se a **Figura 47** pode-se notar uma grande similaridade no comportamento das quatro amostras supracitadas no que toca as perdas anômalas (P_a) e seu comportamento nos diferentes níveis de indução ensaiados. Em contrapartida, na **Figura 45** observa-se um comportamento distinto das amostras com relação às perdas histeréticas (P_h) conforme varia o nível de indução aplicado: a partir de 1,5 T, a taxa de variação de P_h em função de B (a inclinação da curva) é nitidamente maior para as duas amostra de aço RGO (M110-27S5 e M130-27S5) se comparada à das duas amostras de aço HGO (M95-27P5 e M110-27P5). Portanto, a diferença de comportamento entre as amostras de RGO e HGO também observada na **Figura 49** deve-se majoritariamente aos valores de P_h . Ora, em escala microscópica, as perdas histeréticas estão relacionadas aos saltos repentinos das paredes de domínios magnéticos ao se livrarem de defeitos

e outros obstáculos contidos no material que ocorrem durante o processo de magnetização (Efeito Barkhausen), sendo a soma da energia dissipada por estes saldos repentinos das paredes de domínio equivalentes à perda histerética observada (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006).

Assim, uma vez que um material com pior qualidade magnética possui em tese uma maior quantidade de defeitos e obstáculos para o livre movimento das paredes de domínio, evidencia-se o comportamento distinto entre um material de má qualidade magnética (RGO) e um de boa qualidade magnética (HGO).

Já a relação entre as perdas histeréticas (P_h) e perdas anômalas (P_a) medidas nas amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT) é mostrada na **Figura 50**.

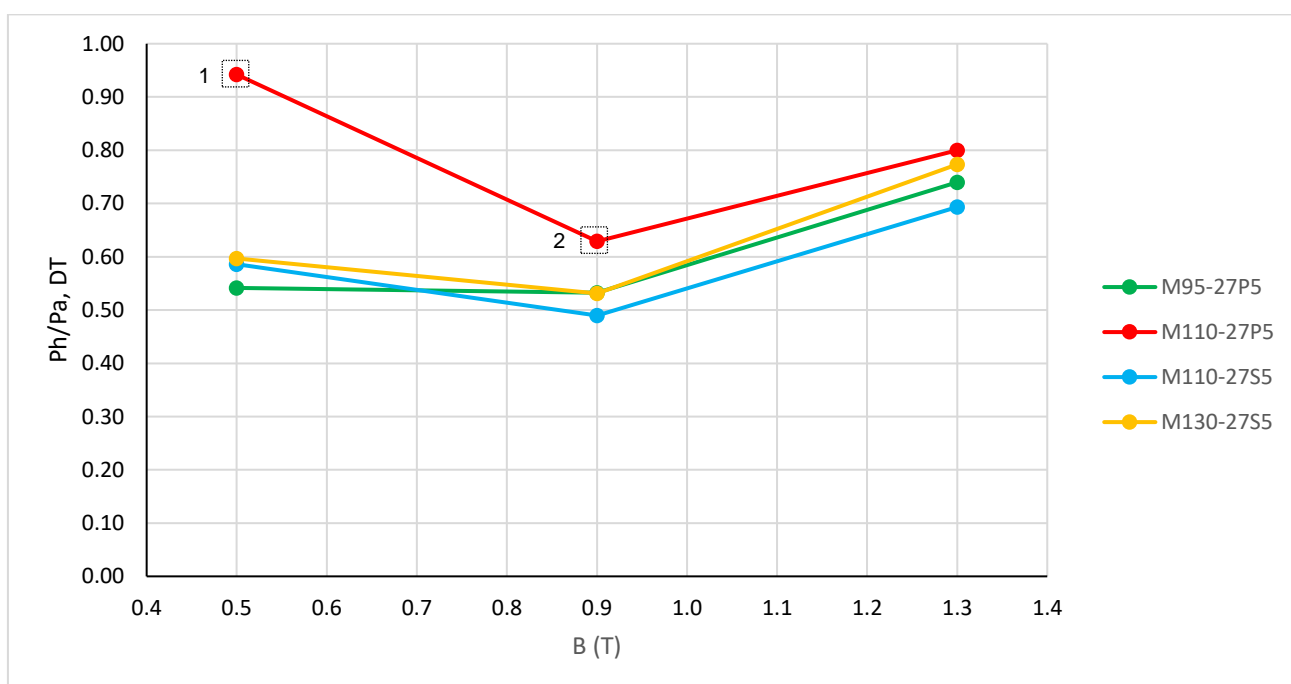


Figura 50: Relação P_h/P_a em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

Mesmo levando-se em conta o impacto que provável o erro experimental na medição de P_{hDT} da amostra M110-27P5 (Pontos 1 e 2 na **Figura 46**) gera nos valores de P_h/P_a explicitados anteriormente (Pontos 1 e 2 na **Figura 50**), observa-se para as amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (TD) que tal relação P_h/P_a caracteriza-se por um comportamento fortemente não-linear em relação ao nível de

indução aplicado (PLUTA, 2020), o que pode ser embasado pelo fato da estrutura dos domínios magnéticos e o movimento das paredes de domínio serem muito sensíveis ao ângulo de deflexão do eixo de fácil magnetização dos cristais a partir do eixo de fácil magnetização resultante da amostra que é a DL (HUBERT; SCHAFER, 2008).

6.3.2. Relação P_a/P_p

A relação entre as perdas anômalas (P_a) e perdas parasitas (P_p) medidas nas amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) é mostrada na **Figura 51**.

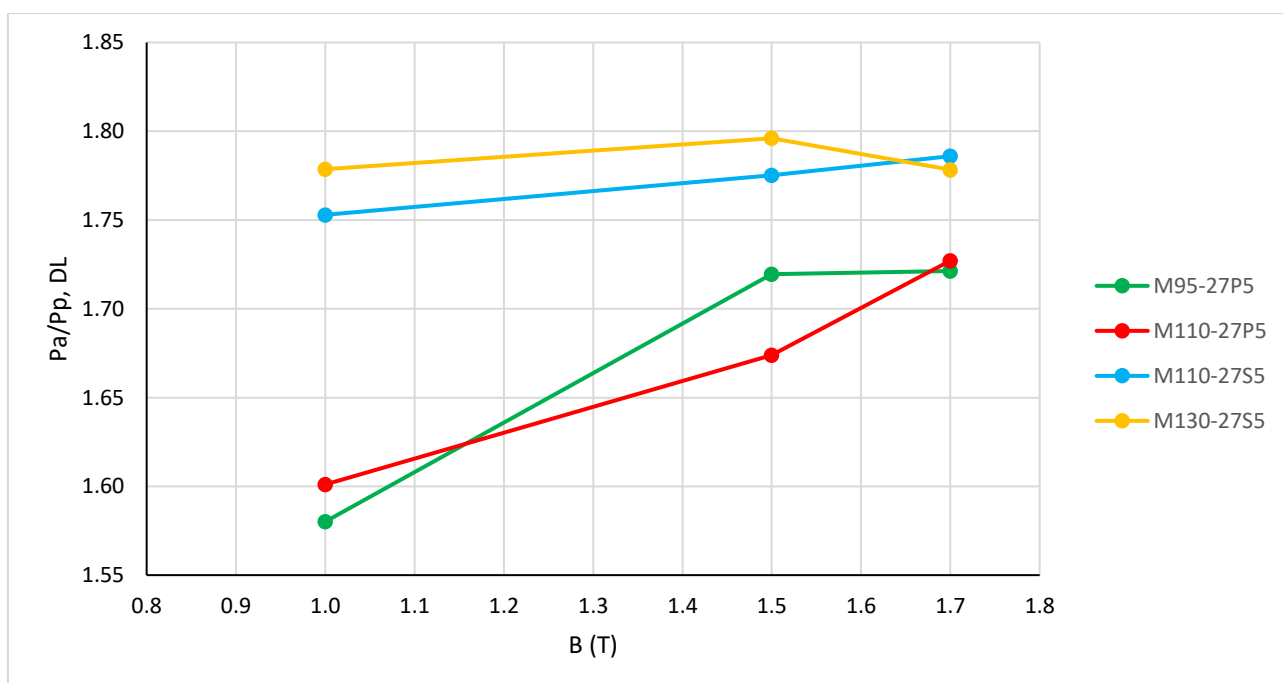


Figura 51: Relação P_a/P_p em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).

No presente trabalho, como explicado em 6.2.2 e apoiado pela **Equação 2**, assumiu-se que todas as amostras estudadas se comportam de maneira idêntica com relação às perdas parasitas (P_p), desde que mantidas constantes suas propriedades elétricas e geométricas, não importando a qualidade magnética das amostras. Dessa maneira, dado que $P_{pDLM95-27P5} = P_{pDLM110-27P5} = P_{pDLM110-27S5} = P_{pDLM130-27S5}$ para cada um dos três níveis de indução estudados na DL (1,0 T, 1,5 T e 1,7 T) a diferenciação nos valores de P_a/P_p apresentados na **Figura 51** são reflexo direto dos resultados de P_a de cada amostra, mostrados na **Figura 47**.

Na **Figura 51** é possível observar que para as duas amostras de RGO (M110-27S5 e M130-27S5) a relação P_a/P_p se mantém praticamente estável com valores entre 1,75 e 1,80, com tal valor possuindo uma leve tendência de aumento conforme de aumenta a indução magnética aplicada de 1,0 T até 1,7 T. Já nas amostras de HGO (M95-27P5 e M110-27P5) é possível observar um aumento dos valores de P_a/P_p entre 1,58 e 1,62 em 1,0 T para valores de aprox. 1,72 em 1,7 T. O comportamento de P_a (e por consequência os valores de P_a/P_p) pode ser relacionado à distribuição estocástica dos campos coercivos locais (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006).

Já a relação entre as perdas anômalas (P_a) e perdas parasitas (P_p) medidas nas amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT) é mostrada na **Figura 52**.

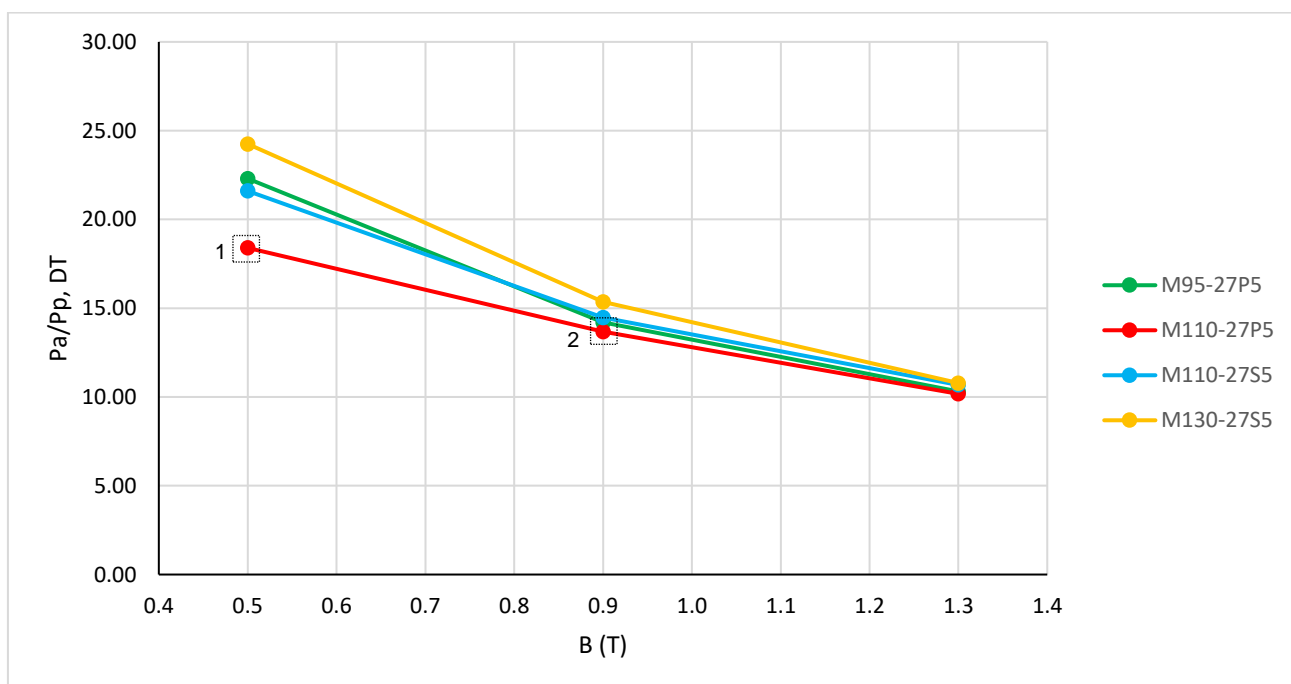


Figura 52: Relação P_a/P_p em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

De forma análoga ao observado na DL, tem-se que $P_{pDTM95-27P5} = P_{pDTM110-27P5} = P_{pDTM110-27S5} = P_{pDTM130-27S5}$, para cada um dos três níveis de indução estudados na DT (0,5 T, 0,9 T e 1,3 T) sendo portanto os valores de P_a/P_p apresentados na **Figura 52** reflexo direto dos resultados de P_a mostrados na **Figura 48**.

A **Figura 52** mostra que a razão P_a/P_h não está atrelada ao tipo de amostra (RGO

ou HGO) pois a sequência dos valores medidos de P_a/P_h em ordem crescente mostra um intercalamento entre os tipos de amostra, por exemplo, para 0,5 T tem-se: 18,40 (M110-27P5) < 21,60 (M110-27S5) < 22,30 (M95-27P5) < 24,25 (M130-27S5). Este intercalamento nos tipos de amostra e a respectiva falta de uma sequência lógica aparente está presente também nos valores de P_a/P_p medidos a 0,9 T e 1,3 T. Na **Figura 52** nota-se que a razão P_a/P_p na DT, ao contrário do evidenciado na DL, diminui com o aumento indução magnética aplicada de 0,5 T até 1,3 T, prevalecendo portanto a maior taxa de variação/aumento de P_p (**Figura 44**) em comparação com a menor taxa de variação de P_a (**Figura 48**), conforme se aumenta a indução aplicada nas amostras. Outro destaque é a grande magnitude da razão P_a/P_h na DT em detrimento da razão P_a/P_h na DL, sendo aquela uma ordem de grandeza acima desta.

Vale ainda ressaltar que o erro experimental na medição de P_h na DT mencionado em **6.2.3** afeta diretamente o valor de P_a/P_p contido na **Figura 52** pois P_a vem da **Equação 6**, no entanto, uma correção de tal erro implicaria em valores de P_h menores do que o considerado nos pontos 1 e 2 da **Figura 46**, o que impactaria na diminuição da inclinação da reta entre os pontos 1 e 2 da **Figura 52**, o que por sua vez contribuiria meramente numa melhor correlação da curva da amostra M110-27P5 com as demais curvas contidas na Figura.

6.3.3. Relação P_h/P_p

A relação entre as perdas histeréticas (P_h) e perdas parasitas (P_p) medidas nas amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) é mostrada na **Figura 53**.

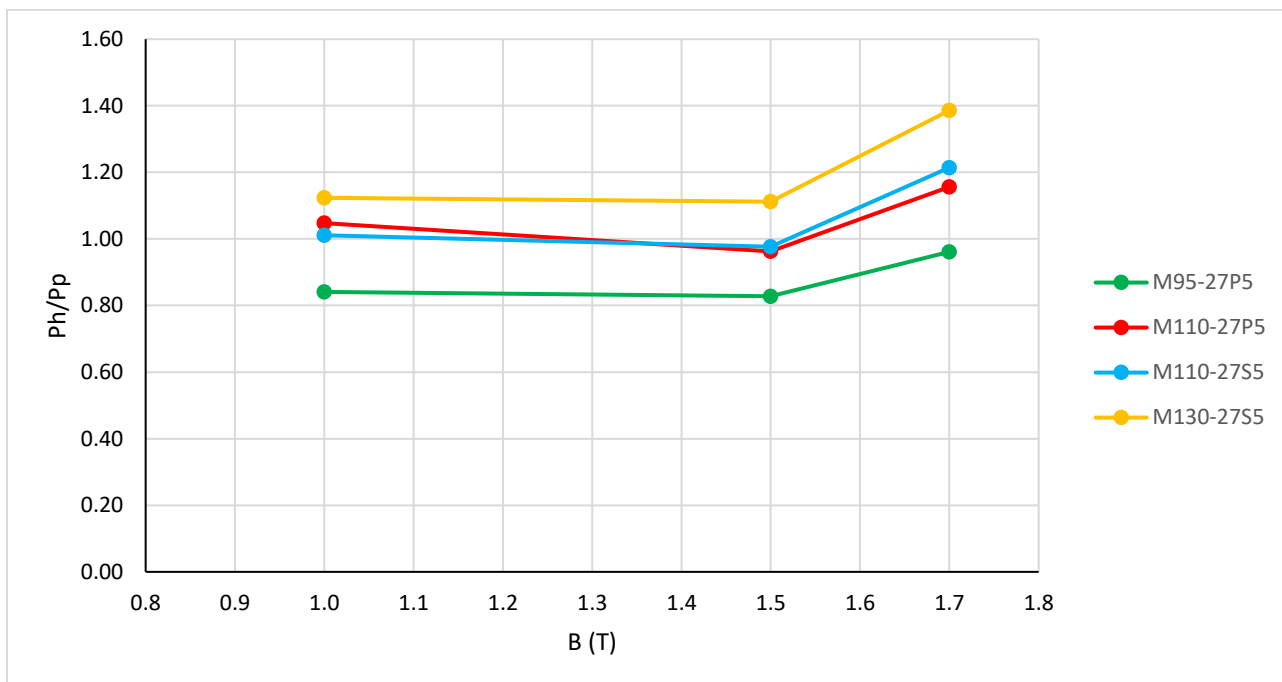


Figura 53: Relação P_h/P_p em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL).

Como mencionado em **6.3.2**, $P_{pDLM95-27P5} = P_{pDLM110-27P5} = P_{pDLM110-27S5} = P_{pDLM130-27S5}$ para os três níveis de indução ensaiados (**Tabela 10**), assim a magnitude da relação P_h/P_p é fruto direto de P_{hDL} (**Tabela 12**) para um determinado nível de indução escolhido.

Na **Figura 54** mostra-se a relação entre as perdas histeréticas (P_h) e perdas parasitas (P_p) medidas nas amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

De forma análoga ao observado na DL, tem-se que $P_{pDTM95-27P5} = P_{pDTM110-27P5} = P_{pDTM110-27S5} = P_{pDTM130-27S5}$, para cada um dos três níveis de indução estudados na DT (0,5 T, 0,9 T e 1,3 T) sendo portanto os valores de P_h/P_p apresentados na **Figura 54** reflexo direto dos resultados de P_h mostrados na **Figura 46**.

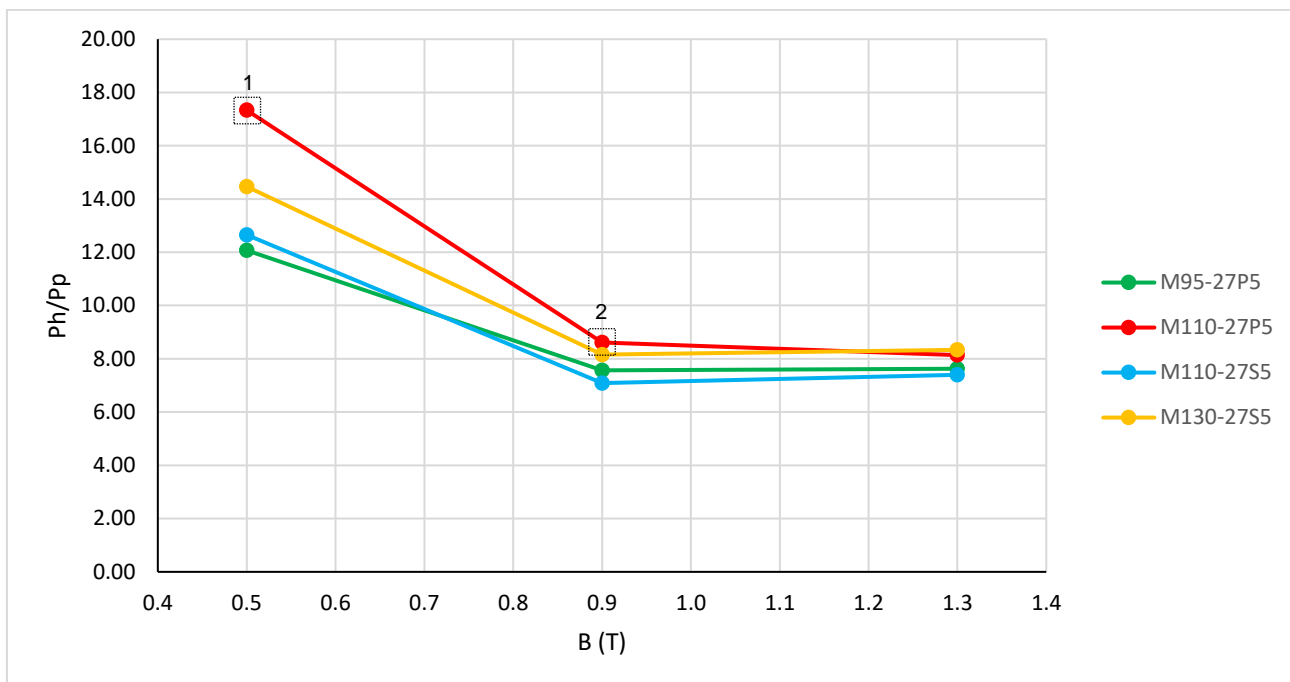


Figura 54: Relação P_h/P_p em função da Indução Magnética (B) sob frequência de 50 Hz das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

É importante lembrar que os pontos 1 e 2 da **Figura 54** remetem ao provável erro experimental mencionado em **6.2.3**, o que implicaria num valor de $P_{hM110-27S5}$ maior do que o esperado. Ainda assim, é possível notar uma considerável diferença entre a ordem de grandeza de P_h/P_p na DL (valores entre 0,828 e 1,386) e na DT (valores entre 7,087 e 17,334), o que traz à luz a importante contribuição de P_{hDT} para as perdas totais na DT (P_{tDT}). As contribuições de P_a , P_h e P_p na composição das perdas totais na DL e na DT são mostrados a seguir (**6.3.4**).

6.3.4. Participação % de P_a , P_h e P_p na composição de P_t

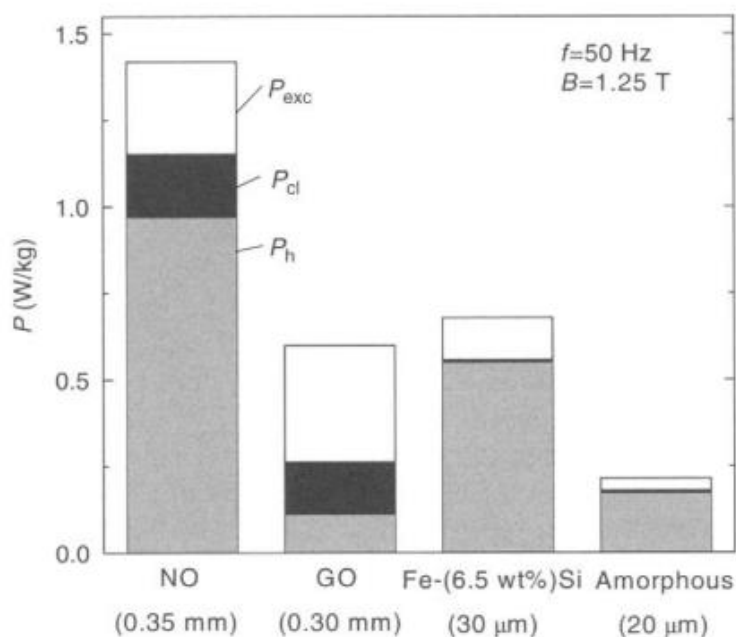


Figura 55: Exemplos de separação de perdas em diferentes materiais magnéticos sob frequência de 50Hz e Indução Magnética máxima de 1,25 T (BERTOTTI; MAYERGOYZ, 2006).

A exemplo do mostrado por Bertotti na **Figura 55**, a seguir é investigada a contribuição relativa das perdas parasita, histerética e anômala para a perda total em cada uma das amostras estudadas, tanto nas amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (DL) quanto nas amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (DT).

Na **Figura 56** são mostradas as contribuições das diferentes perdas na DL sob frequência de 50 Hz e induções máximas de 1,0 T, 1,5 T e 1,7 T. É possível notar que para as quatro amostras estudadas, no ensaio com indução máxima de 1,5 T as perdas anômalas (P_a) atingem sua máxima contribuição relativa e as perdas histeréticas (P_h) sua menor contribuição relativa. Já no ensaio com indução máxima de 1,7 T são as perdas histeréticas (P_h) que atingem sua máxima contribuição relativa e as perdas parasitas (P_p) sua menor contribuição relativa.

Com relação as perdas parasitas (P_p), nota-se que diminuem levemente (~2%) sua participação na composição das perdas totais (P_t) conforme aumenta-se a indução máxima do ensaio de 1,0 T até 1,7 T, efeito este notado nas quatro amostras estudadas na DL.

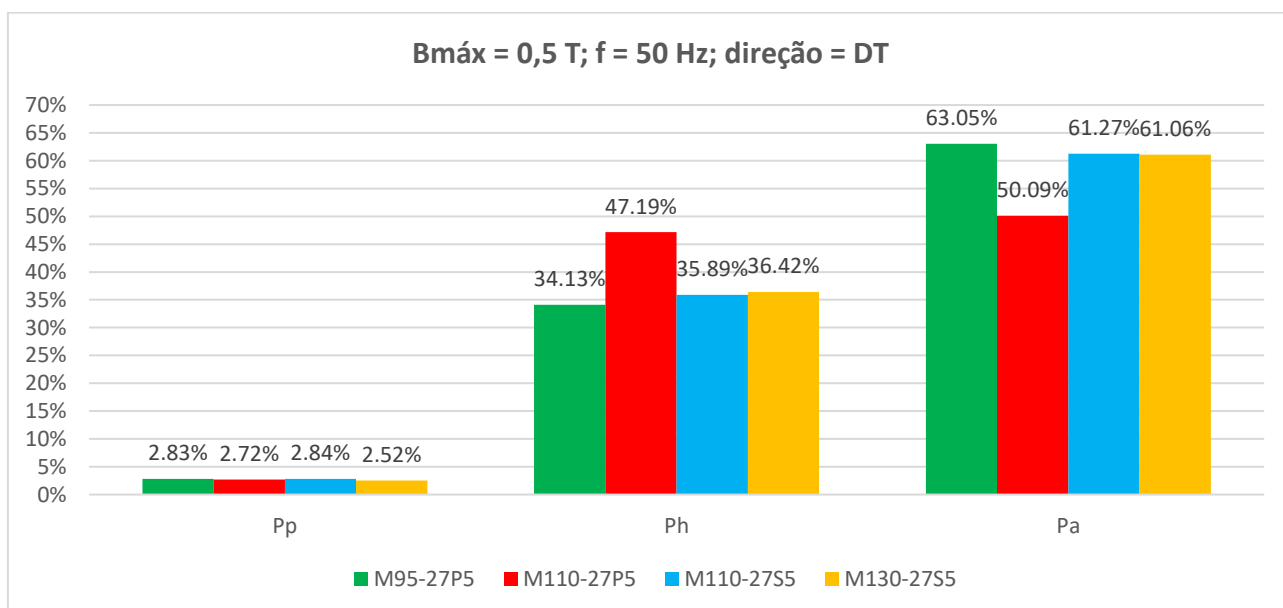


Figura 56: Participação relativa das perdas parasita, histerética e anômala na perda total sob

induções máximas de 1,0 T, 1,5 T e 1,7 T e frequência de 50 Hz, direção longitudinal (DL).

Na **Figura 57** são mostradas as contribuições das diferentes perdas na DT sob frequência de 50 Hz e induções máximas de 0,5 T, 0,9 T e 1,3 T. Antes da análise dos resultados na DT, vale lembrar o provável erro experimental mencionado em **6.2.3**, o que implicaria num valor de $P_{hM110-27S5}$ maior do que o esperado. Dito isto, é possível notar que para as quatro amostras estudadas, no ensaio com indução máxima de 0,9 T as perdas anômalas (P_a) atingem sua máxima contribuição relativa e as perdas histeréticas (P_h) sua menor contribuição relativa. Já no ensaio com indução máxima de 1,3 T são as perdas histeréticas (P_h) que atingem sua máxima contribuição relativa e as perdas parasitas (P_p) sua maior contribuição relativa.

Ao contrário do evidenciado na DL, na DT as perdas parasitas (P_p) aumentam levemente (~2,5%) sua participação na composição das perdas totais (P_t) conforme aumenta-se a indução máxima do ensaio de 0,5 T até 0,9 T, efeito este notado nas quatro amostras estudadas na DT.



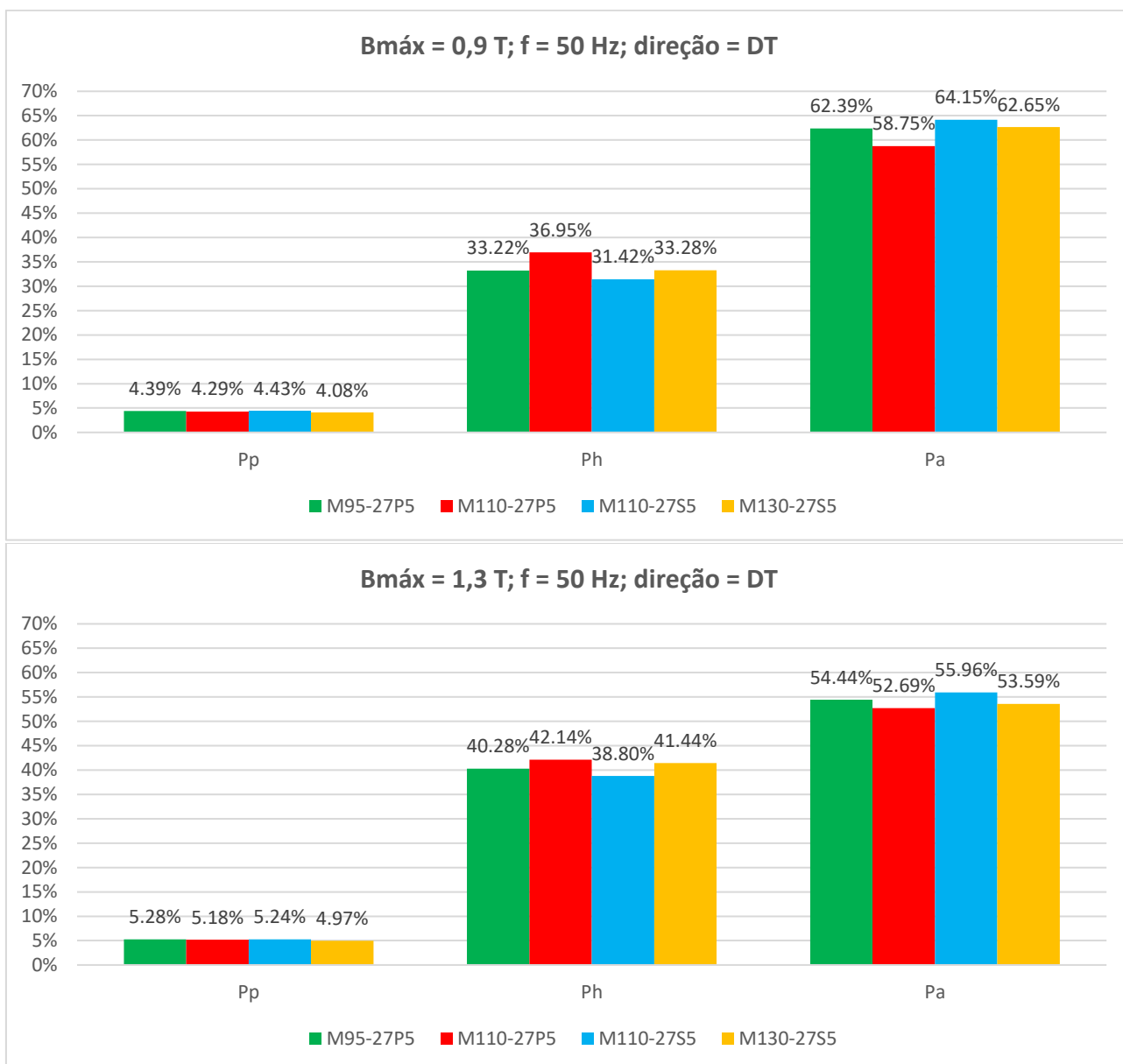


Figura 57: Participação relativa das perdas parasita, histerética e anômala na perda total sob induções máximas de 0,5 T, 0,9 T e 1,3 T e frequência de 50 Hz, direção transversal (DT).

Ora, como explicado em 5.3, no presente trabalho considera-se que para uma mesma indução máxima, todas amostras possuem a mesma perda parasita (P_p). Sabendo-se que as perdas anômalas (P_a) são dadas pela **Equação 6**:

$$P_a = P_t - P_p - P_h$$

Verifica-se que um aumento de P_h , implica diretamente na diminuição de P_a , o que pode explicar em parte os resultados mostrados na **Figura 56** e na **Figura 57**.

7 CONCLUSÕES

A diferença dos valores de B800 medidos na DL (valores entre 1,907 T e 1,938 T) e na DT (valores entre 1,347 T e 1,359 T) confirmam o caráter altamente anisotrópico do aço silício de grão orientado (GO), sendo que na DL os aços HGO mostraram valores de B800 consideravelmente maiores do que as aços RGO (**Figura 32**). A variação dos valores de B800 na DL, da ordem de 0,03T, é indicativa de variação significativa da orientação média das direções [100] dos cristais em relação à DL. A variação dos valores de B800 na DT, da ordem de 0,01 T, é indicativa de pequena variação média das direções [110] dos cristais em relação à DT.

Os resultados obtidos por este trabalho apontam para a existência de uma relação de proporcionalidade inversa entre os valores das perdas magnéticas de potência totais a 50Hz das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{tDL}) e os valores B800 (i.e., a textura cristalográfica do material) em um aço GO. Já com relação às mesmas perdas nas amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{tDT}), não foi percebida nenhuma espécie de relação lógica com os valores medidos de B800, o que comprova o caráter complexo do processo de magnetização do aço GO na DT. Como corolário de tais observações de P_t e B800 na DL, é válido indicar a existência de uma relação direta entre estas duas propriedades e o grau de alinhamento da direção [001] em relação à direção de laminação.

Considerando-se as perdas parasitas (P_p) como uma medida isotrópica relacionada principalmente com a espessura e a resistividade da amostra, não faz sentido estabelecer uma correlação de sua magnitude com o valor de B800 (i.e. a textura do aço).

Já as perdas histeréticas (P_h) e perdas anômalas (P_a) são, em diferentes níveis, fortemente afetadas pela textura do aço, o que pode ser aferido pela medição do B800. P_{hDL} e P_{aDL} apresentam uma relação de proporcionalidade inversa com B800 na DL, o que não ocorre na DT com P_{hDT} e P_{hDL} devido ao caráter complexo e não linear da anisotropia magnética dos aços elétricos de grão orientado (GO).

Com relação às perdas totais (P_t), aços com menores perdas totais na DL (P_{tDL}) não possuem necessariamente menores perdas totais na DT (P_{tDT}).

Já referente às perdas parasitas (P_p), uma vez que dependem somente de fatores não atrelados à anisotropia cristalina do material, adotando-se a premissa de que todos os aços GO estudados possuam a mesma espessura (e), resistividade elétrica (ρ) e densidade (d) (dados de catálogo do fabricante do aço), pode-se verificar tanto na DL quanto na DT que as perdas parasitas foram idênticas para as quatro amostras estudadas, não importando da qualidade magnética do aço GO, dependendo portanto somente da amplitude da variação da indução aplicada no material e a velocidade com que esta variação ocorre (frequência aplicada).

As perdas histeréticas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{hDL}) foram menores para as amostras com maiores valores de B800, indicando uma correlação entre textura cristalográfica do aço GO e suas perdas histeréticas na DL. As perdas histeréticas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{hDT}) não mostraram nenhuma relação lógica nem com os valores de B800, nem com P_{hDL} . Observou-se ainda a estreita relação entre a histerese magnética e a anisotropia cristalina do material, refletida nas diferentes magnitudes dos valores de P_{hDL} e P_{hDT} .

As perdas anômalas das amostras cortadas paralelamente à direção de laminação (P_{aDL}) não mostraram nenhuma relação direta com B800, P_{tDL} , P_{hDL} ou P_{pDL} . Da forma similar, as perdas anômalas das amostras cortadas transversalmente à direção de laminação (P_{aDT}) tampouco mostraram alguma relação direta com B800, P_{tDT} , P_{hDT} ou P_{pDT} .

Observou-se que tanto para DL quanto para DT, verificou-se que uma variação significativa de P_h não implica necessariamente num grande aumento de P_a .

No conjunto de análises das relações entre P_a , P_p e P_h estudadas no item **6.3** deste trabalho, destaca-se a relação P_h/P_a , ficando evidente na DL o comportamento distinto das amostras de aço HGO (M95-27P5 e M110-27P5) e das amostras de aço RGO (M110-27S5 e M130-27S5), sendo que estas apresentam maior dissipação de energia do que as amostras de HGO pelo fato de possuírem em tese uma maior quantidade de defeitos e obstáculos para o livre movimento das paredes de domínio, implicando assim num maior nível de P_h e por consequência num maior valor de P_h/P_a .

No que tange à participação percentual de P_p , P_h e P_a em P_t , na DL P_h tem uma

contribuição percentual muito similar em 1,0 T e 1,5 T, No entanto em 1,7 T P_h sofre um incremento significativo diminuindo dessa maneira a participação de P_a e P_p . Na DT, nota-se que P_h tem uma maior participação em alta indução (1,3 T) e uma menor participação em induções médias (0,9 T), enquanto P_a tem uma menor participação em alta indução (1,3 T) e uma maior participação em induções médias (0,9 T) ao passo que P_p cresce ligeiramente conforme de aumenta a indução aplicada de 0,5 T até 1,3 T.

Os ensaios realizados comprovaram a importância da consideração das perdas anômalas (P_a) no modelo de separação de perdas magnéticas, uma vez que tais perdas responderam na DL por ~45% em média do total de P_{tDL} e por ~57% em média do total de P_{tDT} , sendo em todas as amostras estudadas neste trabalho P_a a maior contribuição percentual de P_t .

8 REFERÊNCIAS

- AHMED, M. **Effect of Harmonics in Iron Losses**. Chalmers University of Technology-Gothenburg, Suécia, 2007.
- ARAI, K. I.; ISHIYAMA, K. **Recent developments of new soft magnetic materials**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 133, n. 1–3, p. 233–237, maio 1994. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0304885394905347>>.
- ARAI, S.; MIZOKAMI, M.; YABUMOTO, M. **Magnetostriction of grain oriented Si - Fe and its domain model**. Electrical Review, n. 9, p. 20–23, 2011. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/287562780_Magnetostriction_of_grain_oriented_Si-Fe_and_its_domain_model>.
- ASTM A876 - Standard Specification for Flat-Rolled, Grain-Oriented, Silicon-Iron, Electrical Steel, Fully Processed Types**. [s.l.] American Society for Testing and Materials, 1992.
- BAGHEL, A. P. S. et al. **Comprehensive modelling of dynamic hysteresis loops in the rolling and transverse directions for transformer laminations**. Physica B: Condensed Matter, v. 462, p. 86–92, abr. 2015. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2015.01.026>>.
- BERTOTTI, G.; MAYERGOYZ, I. **The Science of Hysteresis**. [s.l.: s.n.].
- CÂNDIDO, L. C. **Notas de aula “Aços Especiais – I (MET 410)”**. Escola de .Ouro Preto, UFOP, 2014.
- CHWASTEK, K. **AC loss density component in electrical steel sheets**. Philosophical Magazine Letters, v. 90, n. 11, p. 809–817, 2010.
- CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2.ed. Hoboken, Wiley, 2008 p.
- DE CAMPOS, M. F. **Loss Separation Model: A Tool for Improvement of Soft Magnetic Materials**. Materials Science Forum, v. 869, p. 596–601, ago. 2016. Disponível em: <<https://www.scientific.net/MSF.869.596>>.
- DEL VECCHIO, R. M. et al. **Transformer Design Principles**. 3. ed. Taylor & Francis, 2017.

Electrical Steel Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast, 2018–2026. . [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.transparencymarketresearch.com/electrical-steel-market.html>>.

Energês - A Linguagem da Energia (Senai). Disponível em:

<<https://energes.com.br/diferenca-entre-linha-de-distribuicao-e-transmissao/>>.

Acesso em: 1 abr. 2022.

Empresa de Pesquisa Energética. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 Brasília, MME/EP, 2020.

FIORILLO, F. et al. **Comprehensive model of magnetization curve, hysteresis loops, and losses in any direction in grain-oriented Fe-Si.** IEEE Transactions on Magnetics, v. 38, n. 3, p. 1467–1476, maio 2002. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/999119/>>.

FUKUHARA, M. et al. **Evolution of magnetic properties and crystallographic texture in electrical steel with large plastic deformation.** Journal of Applied Physics, v. 109, n. 7, p. 07A325, abr. 2011. Disponível em:

<<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3560895>>.

GEORGILAKIS, P. S. **Spotlight on Modern Transformer Design**, v.38. Springer, London, 2009.

HAYAKAWA, Y. **Electrical Steels.** Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, v. 2, p. 208–213, 2021.

HUBERT, A.; SCHAFFER, R. **Magnetic Domains - The Analysis of Magnetic Microstructures.** [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2008.

IEC 60404-8-7 - Magnetic materials – Part 8-7: Specifications for individual materials – Cold-rolled grain-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully-processed state. [s.l.] International Electrotechnical Commission, 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DE SÃO PAULO. **Procedimento de Ensaio CME-LME-PE03 - Determinação de Propriedades Magnéticas de Produtos Laminados Planos.** São Paulo, IPT, 2011 p.

DOMAIN Refined grain oriented electrical steel. **JFE Technical Report. Grain-**

Oriented Electrical Steel Sheet. v. 21, n. 21, p. 37–38, 2016.

KUBOTA, T.; FUJIKURA, M.; USHIGAMI, Y. **Recent progress and future trend on grain-oriented silicon steel.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 215, p. 69–73, jun. 2000. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030488530000069X>>.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering.** 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.

LACHISSERIE, TREMOLET DE, E. du; GIGNOUX, D.; SCHLENKER, M. **Magnetism I - Fundamentals.** New York, Springer-Verlag, 2005.

LANDGRAF, F. J. G. et al. **Separating components of the hysteresis loss of non-oriented electrical steels.** Materials Science Forum, v. 302–303, p. 440–445, jan. 1999. Disponível em: <<https://www.scientific.net/MSF.302-303.440>>.

LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos,** p. 109–128, 2002. Disponível em: <[http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/landgraf/nossos artigos em pdf/02Lan recopie .pdf](http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/02Lan%20recopie.pdf)>.

LANDGRAF, F. J. G. **Análise Crítica Do Modelo Das Perdas Em Excesso.** Congresso Anual da ABM, 58., p. 2237–2246, 2003. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/03cam%20abm%20per%20exce.pdf>>.

LANDGRAF, F. J. G. **Microestrutura E Histerese Magnética nos Aços para Fins Eletromagnéticos.** 2007. Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/001659572>>.

LOBANOV, M. L.; RUSAKOV, G. M.; REDIKUL'TSEV, A. A. **Electrotechnical anisotropic steel. Part 1. History of development.** Metal Science and Heat Treatment, v. 53, n. 7–8, p. 326–332, 8 out. 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11041-011-9391-1>>.

LOBANOV, M. L.; RUSAKOV, G. M.; REDIKUL'TSEV, A. A. **Electrotechnical anisotropic steels. Part II. State-of-the-art.** Metal Science and Heat Treatment, v. 53, n. 7–8, p. 355–359, 10 out. 2011. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s11041-011-9397-8>>.

MOSES, A. J. **Electrical steels: past, present and future developments.** **IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education)**, v. 137, n. 5, p. 233–245, 1990. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-a-2.1990.0039>>.

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

MOSES, A. J. et al. **Electrical Steels - Volume 1: Fundamentals and basic concepts.** Institution of Engineering and Technology, London, 2019.

NA, S. M.; FLATAU, A. B. **Surface-energy-induced selective growth of (001) grains in magnetostrictive ternary FeGa-based alloys.** *Smart Materials and Structures*, v. 21, n. 5, 2012.

ODA, Y.; OKUBO, T.; TAKATA, M. **Recent development of non-oriented electrical steel in JFE steel.** *JFE Technical Report*, v. 21, n. 21, p. 7–13, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/318949759_Recent_development_of_grain-oriented_electrical_steel_in_JFE_Steel>.

PFUTZNER, H. **Rotational magnetization and rotational losses of grain oriented silicon steel sheets-fundamental aspects and theory.** *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 30, n. 5, p. 2802–2807, set. 1994. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/312522/>>.

PLUTA, W. A. **Angular Properties of Specific Total Loss Components under Axial Magnetization in Grain-Oriented Electrical Steel.** *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 52, n. 4, 2016.

PLUTA, W. A. **Anisotropy of specific total loss components in Goss textured electrical steel.** *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 499, p. 166270, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166270>>.

POSCO. **Electrical Steel Brochure**, 2021. Disponível em: <<http://product.posco.com/homepage/product/eng/jsp/process/s91p2000710e.jsp>>.

PRY, R. H.; BEAN, C. P. **Calculation of the energy loss in magnetic sheet**

materials using a domain model. Journal of Applied Physics, v. 29, n. 3, p. 532–533, 1958.

RAABE, D. **Electrical steels - Iron-Silicon Transformer Steels.** Disponível em: <<http://www.dierk-raabe.com/electrical-steels-fe-3-si/>>.

Siemens Energy - Transformers. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/br/pt/solucoes/power-transmission/transformadores/transformadores-geafol.html>>.

STEFANITA, C. G. **Magnetism: Basics and applications.** Berlin, Heidelberg, 2012.

TANG, Q. **Investigation of Magnetic Properties of ES and Transformer Core at High Flux Densities.** 2015. University of Manchester, 2015. Disponível em: <<https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:263200&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>>.

TIRLER, W. **Internationaler Stahlvergleich - International Comparison of Steels - Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN).** Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.

TUROUSKI, J.; TUROUSKI, M. **Electric Machine, Transformer, and Power Equipment Design.** Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.

XIA, Z.; KANG, Y.; WANG, Q. **Developments in the production of grain-oriented electrical steel.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 320, n. 23, p. 3229–3233, dez. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885308007695>>.

YOU, D.; PARK, H. **Developmental Trajectories in Electrical Steel Technology Using Patent Information.** Sustainability, v. 10, n. 8, p. 2728, 2 ago. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2728>>.

ZIRKA, S. E. et al. **A viscous-type dynamic hysteresis model as a tool for loss separation in conducting ferromagnetic laminations.** IEEE Transactions on Magnetics, v. 41, n. 3, p. 1109–1111, 2005.