



**Joana Filipa Ramos Martelo**

Licenciada em Ciências da Engenharia Eletrotécnica  
e de Computadores

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS  
DE AÇOS ELÉTRICOS EM SERVIÇO E UTILIZANDO O  
MÉTODO DE EPSTEIN**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, Prof. Doutora, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Manuel Camarinha de Matos, FCT/UNL  
Arguente(s): Prof. Doutor João Miguel Murta Pina, FCT/UNL



Determinação das Propriedades Magnéticas de Aços Elétricos em Serviço e Utilizando o Método de Epstein

Copyright © Joana Filipa Ramos Martelo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor



*“A nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo para vencer é tentar mais uma vez”*

**Thomas Edison**



# AGRADECIMENTOS

Ao longo deste percurso foram várias as pessoas que apoiaram, acreditaram e me incentivaram para a realização e conclusão desta dissertação, portanto este agradecimento é para elas. Aos que por lapso não mencionei, peço desde já desculpa, com certeza saberão que os levo comigo no coração.

Em primeiro lugar, gostava de agradecer à Professora Anabela Pronto, minha orientadora, por todos os ensinamentos, conselhos e partilhas. Sem ela, parte do meu percurso, até a nível pessoal, teria sido mais complicado. Agradeço-lhe por todo o apoio e incentivo disponibilizado.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, em especial ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e aos seus professores, pelos meios disponibilizados e por todos os ensinamentos adquiridos, ao longo destes anos.

Aos meus colegas de laboratório, pela simpatia e auxílio nas mais diversas tarefas. Ao senhor Rui Moura da DEC MEDIDA e à equipa de suporte da GOPAL ELECTRONICS pela disponibilidade em me ajudar.

A todos os meus colegas e amigos, que passaram pela minha vida académica e que de algum modo me apoiaram na realização da dissertação, nomeadamente, Ricardo Lampreia, Fábio Oliveira, Hugo Pereira, João Eusébio, Pedro Viegas, Bruno Duarte, Carlos Simão, Catarina Moura e Carlota Maçaneiro.

Aos meus amigos de infância, que me apoiaram, mesmo não estando sempre presentes. Um especial agradecimento à Débora Oliveira, Inês Várzea, Raquel Oliveira e Joana Robalo por tudo o que já passamos juntas. Àqueles que conheci, em tempos recentes e que têm sido uma parte fundamental na realização da dissertação, com o seu apoio e palavras amigas.

À minha família, que tanto em momentos difíceis como em momentos de felicidade, estiveram presentes. Gostava também de agradecer à minha madrinha, que infelizmente não me pode ver concluir o curso.

À memória dos meus avós, que partiram cedo demais, sem me verem concluir o curso. A vocês dedico esta tese. Obrigado por tudo o que fizeram por mim, tudo o que me ensinaram, todos os momentos que partilhámos e que para sempre ficarão na minha memória.

Finalmente, não podia deixar de agradecer às três pessoas mais importantes da minha vida, nos quais me apoio nos momentos mais difíceis, ao Joaquim e aos meus pais. Por toda a paciência, compreensão, amizade e amor ao longo deste período, mesmo quando estava incerta quanto ao meu futuro.

A todos, um muito obrigado!!!



# RESUMO

Os aços elétricos são uns dos materiais mais utilizados, nos mais diversos ramos da indústria. A necessidade deste tipo de material torna incontornável a obrigatoriedade de conhecer/definir as suas propriedades magnéticas. Tais características são contrabalançadas com o objetivo fundamental de obter para os dispositivos que se usam um rendimento cada vez mais elevado, devido às suas utilizações em dispositivos de potência tais como transformadores e máquinas elétricas. Neste trabalho determinam-se as principais propriedades magnéticas de alguns aços elétricos, tais como as perdas magnéticas específicas, as quais são muito importantes para a determinação do rendimento dos dispositivos de potência. Existem diversos tipos de ensaios que podem ser realizados para medição das perdas magnéticas e curvas de magnetização em aços elétricos porém, nesta dissertação apenas se optou por abordar dois desses processos, o método de Epstein – sendo este o método mais aceite pelos diversos comités internacionais de eletrotécnica, apresentando elevada reprodutibilidade nas medições magnéticas – e, o processo no qual se medem as propriedades magnéticas do material usando um núcleo de transformador. Comparam-se assim as características magnéticas de vários aços elétricos obtidas com o aparelho de Epstein com aquelas que se obtém para os mesmos materiais mas ao funcionarem como núcleos de transformadores.

**Palavras-chave:** Aços Elétricos, Propriedades Magnéticas, Método de Epstein, Núcleo de Transformador.



# ABSTRACT

Electrical steels are one of the most used materials in a wide range of industry areas. The need for this type of material makes unavoidable the obligation to know/define its magnetic properties. Such features are counterbalanced with the main objective, which is, to get for the devices that are used an increasingly higher performance due to its use in power devices such as transformers and electric machines. In this document, the main magnetic properties of some electrical steels such as the specific magnetic power losses, which are very important to determining the power devices efficiency, are determined. There are several types of tests that can be performed to measure the magnetic losses and its magnetization curve in electrical steels, however in this dissertation it is chosen only to address two of these cases, the Epstein method – which is the most widely accepted method by the various international electrotechnical committees, with high reproducibility in magnetic measurements – and the process in which it gets directly the magnetic properties from a transformer core. Thereby the magnetic characteristics of several electrical steels obtain by Epstein apparatus are compared with those obtained for the same materials but when in work as transformers cores.

**Keywords:** Electrical Steels, Magnetic Properties, Epstein Apparatus, Transformer Core.



# ÍNDICE DE MATÉRIAS

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Organização da Dissertação.....	3
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução .....	5
2.2	Perspetiva Histórica.....	5
2.3	Aparelhos que caracterizam aços elétricos .....	10
2.3.1	Quadro de Epstein – QE.....	10
2.3.2	Teste em Forma de Anel .....	13
2.3.3	Single Sheet Tester – SST .....	14
2.3.4	Comparação Bibliográfica.....	15
<b>3</b>	<b>Fundamentos teóricos</b>	<b>21</b>
3.1	Materiais Magnéticos .....	21
3.2	Materiais Ferromagnéticos .....	22
3.2.1	Efeitos da temperatura no ferromagnetismo .....	23
3.2.2	Curva de Primeira Magnetização .....	24
3.2.3	Ciclo de Histerese Magnética .....	26
3.3	Materiais Magnéticos Macios.....	28
3.3.1	Aços de Baixo Carbono .....	29
3.3.2	Aços de Grão Não Orientado (GNO).....	29
3.3.3	Aços de Grão Orientado (GO).....	31
3.4	Perdas Magnéticas .....	33
3.4.1	Perdas por Histerese .....	34
3.4.2	Perdas por Correntes de Foucault Clássicas .....	35
3.4.3	Perdas por Correntes de Foucault Excedentes.....	36
3.4.4	Efeitos da microestrutura nas perdas magnéticas dos aços elétricos....	36
3.5	Transformador monofásico em vazio.....	38
3.5.1	Princípio de funcionamento do transformador.....	38
3.5.2	Equações gerais .....	39
3.5.3	Esquema equivalente de Steinmetz .....	40
3.5.4	Ensaio do transformador.....	42

<b>4</b>	<b>Métodos usados na determinação das propriedades magnéticas</b>	<b>45</b>
4.1	Quadro de Epstein .....	45
4.1.1	Constituição do quadro de Epstein.....	46
4.1.2	Diretrizes normativas para os ensaios.....	49
4.1.3	Especificações do modelo EP-350 .....	52
4.2	Transformador Monofásico em Vazio .....	56
4.2.1	Especificações do transformador .....	59
<b>5</b>	<b>Procedimento Experimental, Resultados Obtidos e Discussão</b>	<b>61</b>
5.1	Características dos aços elétricos utilizados .....	61
5.2	Quadro de Epstein .....	62
5.3	Núcleo de Transformador .....	66
5.3.1	Chapa de características dos transformadores .....	66
5.3.2	Montagem experimental e lista de material .....	67
5.3.3	Núcleo de Transformador T1 e T2 em Vazio.....	68
5.4	Comparação de resultados.....	73
5.4.1	QE1 e T1 .....	73
5.4.2	QE2 e T2 .....	77
5.5	Resumo dos valores obtidos.....	81
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>85</b>
6.1	Conclusões .....	85
6.2	Trabalho futuro.....	86
	<b>Bibliografia</b>	<b>89</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Percentagem de mercado de materiais magnéticos macios para 2015. Adaptado de (Sievert 2015)	7
Figura 2.2 (a) Circuito magnético do aparelho de Epstein com um enrolamento, (b) Vista exterior. Retirado de (Korzunin, Chistyakov e Rimshev 2000)	10
Figura 2.3 Representação esquemática de núcleos em forma de anel. (a) Laminado, (b) Fita enrolada, (c) Pó sintetizado. Retirado de (Angrisani, et al. 2010, 239)	13
Figura 2.4 Teste de folha única norma IEC 60404-2 (a) Descrição elementos do SST; (b) Equipamento e amostras típicas	15
Figura 2.5 Caminho magnético efetivo para diferentes tipos de materiais. Adaptado de (Marketos, Zurek e Moses 2007)	16
Figura 2.6 Influência da frequência no caminho magnético efetivo do QE. Adaptado de (Marketos, Zurek e Moses 2007)	17
Figura 2.7 Variação da permeabilidade relativa com a frequência e a densidade de fluxo máxima. Adaptado de (Marketos, Zurek e Moses 2007)	17
Figura 3.1 (a) Efeito da temperatura na magnetização de um material ferromagnético. Adaptado de (Pinho 2009). (b) Ferromagnetismo. Retirado de (Pronto 2010)	23
Figura 3.2 Curva de Primeira Magnetização. Adaptado de (Pronto 2010)	24
Figura 3.3 Curva de magnetização de diferentes materiais. Retirado de (Cullity e Graham 2009)	25
Figura 3.4 Ciclo de histerese magnética. Adaptado de (Pronto 2010)	26
Figura 3.5 Ciclos de histerese: (1) Materiais Magneticamente Macios; (2) Materiais Magneticamente Duros	27
Figura 3.6 Processo de desmagnetização cíclico. Retirado de (Cullity e Graham 2009)	28
Figura 3.7 Textura de Goss. Retirado de (Cullity e Graham 2009)	31
Figura 3.8 Representação convencional das perdas magnéticas num transformador	33
Figura 3.9 Ciclo de histerese - cálculo de $P_h$	34
Figura 3.10 Variação de algumas propriedades intrínsecas do ferro em função do teor de silício. Retirado de (Littmann 1971)	37
Figura 3.11 Esquema de um transformador monofásico. Adaptado de (Pronto 2010)	39
Figura 3.12 Esquema elétrico equivalente de Steinmetz reduzido ao primário em regime alternado	41
Figura 3.13 Esquema elétrico equivalente de Steinmetz reduzido do secundário em regime AC	42
Figura 3.14 Esquema equivalente de Steinmetz simplificado – ensaio em circuito aberto	43
Figura 4.1 Vista frontal, Vista lateral esquerda, Vista superior e Vista geral do Aparelho de Epstein	45
Figura 4.2 Quadro de Epstein – esquema da planta	46

Figura 4.3 Quadro de Epstein. (a) Forma de inserir amostras para ensaio (b) empilhamento das chapas	48
Figura 4.4 Esquema de ligação entre o quadro de Epstein, o EP-350 e o PC	52
Figura 4.5 Esquema elétrico do quadro de Epstein. Retirado de (IST 2005)	55
Figura 4.6 Fluxograma da realização de ensaios no quadro de Epstein	56
Figura 4.7 Montagem para o ensaio em corrente alternada do transformador monofásico em vazio	57
Figura 4.8 Núcleos ferromagnéticos usados nos ensaios. Retirado de (Pronto 2010)	59
Figura 4.9 Dimensões dos núcleos ferromagnéticos T1 e T2. Retirado de (Pronto 2010)	60
Figura 4.10 Bobinas utilizadas nos ensaios	60
Figura 5.1 Ensaio do quadro de Epstein	62
Figura 5.2 Comparação entre as curvas de magnetização inicial para QE1e QE2	63
Figura 5.3 Variação da permeabilidade magnética relativa máxima em função da densidade de campo máximo para QE1 e QE2	64
Figura 5.4 Curvas de excitação em função da densidade de fluxo máxima para QE1 e QE2	65
Figura 5.5 Perdas magnéticas totais para QE1 e QE2	65
Figura 5.6 Montagem experimental para determinação das perdas magnéticas totais	67
Figura 5.7 Ciclos de histerese de T1 e T2 para $B_m = 1,6$ T e $f = 50$ Hz	69
Figura 5.8 Comparação entre as curvas de magnetização inicial para T1 e T2	69
Figura 5.9 Variação da permeabilidade magnética relativa máxima em função da indução de fluxo máxima para T1 e T2	70
Figura 5.10 Curvas de excitação em função da densidade de fluxo máxima para T1 e T2	71
Figura 5.11 Perdas magnéticas totais para T1 e T2	72
Figura 5.12 Comparação das curvas de magnetização inicial para aços de GNO	73
Figura 5.13 Comparação entre as curvas de permeabilidade magnética relativa máxima para os aços de GNO, em função do campo de indução máxima	74
Figura 5.14 Comparação entre as curvas de potência magnetizante obtidas para os aços de GNO, em função da indução máxima	75
Figura 5.15 Comparação das perdas magnéticas totais para QE1 e T1	76
Figura 5.16 Variação das perdas magnéticas totais para QE1 e T1	76
Figura 5.17 Comparação das curvas de magnetização inicial para aços de GO	77
Figura 5.18 Comparação entre as curvas de permeabilidade magnética relativa máxima para os aços de GO, em função do campo de indução máxima	78
Figura 5.19 Comparação entre as curvas de potência magnetizante obtidas para os aços de GO, em função da indução máxima	79
Figura 5.20 Comparação das perdas magnéticas totais para QE2 e T2	80
Figura 5.21 Variação das perdas magnéticas totais para QE2 e T2	81
Figura 5.22 Variação da permeabilidade magnética relativa máxima em função do campo de indução máximo para os aços QE1, QE2, T1 e T2	82
Figura 5.23 Comparação das perdas magnéticas totais para QE1, QE2 T1 e T2	83

Figura 5.24 Comparação da variação das perdas magnéticas totais para os aços de grão não orientado e para os aços de grão orientado\_\_\_\_\_ 84



# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Datas históricas referentes as materiais magnéticos, eletromagnetismo e máquinas elétricas. Adaptado de (Santos 2005).	6
Tabela 2.2 Produção mundial de chapas de aço elétrico ao longo dos anos. Retirado de (Knoema 2017)	8
Tabela 2.3 Propriedades magnéticas dos materiais macios. Adaptado de (Pinho 2009)	8
Tabela 2.4 Aplicações típicas para os vários tipos de aços elétricos. Adaptado de (Moses 1990)	9
Tabela 2.5 Parte I – Comparação de normas referentes ao quadro de Epstein.	12
Tabela 2.6 Parte II – Comparação de normas referentes ao quadro de Epstein	12
Tabela 2.7 Parte I – Exemplos de perdas em aços elétricos através de diferentes configurações.	19
Tabela 2.8 Parte II – Exemplos de perdas em aços elétricos através de diferentes configurações.	20
Tabela 4.1 Percentagem típica das perdas por correntes de Foucault.	53
Tabela 4.2 Classe de precisão dos instrumentos de medição no EP-350	54
Tabela 4.3 Equações utilizadas pelo EP-350. Adaptado de (Gopal Electronics s.d.)	55
Tabela 5.1 Especificações dos aços elétricos usados no QE de 25 cm	61
Tabela 5.2 Especificações dos aços elétricos utilizados. Retirado de (Pronto 2010)	62
Tabela 5.3 Valores relativos aos ensaios com o quadro de Epstein	66
Tabela 5.4 Chapa de características dos transformadores	66
Tabela 5.5 Valores relativos aos ensaios com os transformadores monofásicos	72
Tabela 5.6 Valores relativos aos ensaios com o aço de GNO	77
Tabela 5.7 Valores relativos aos ensaios com o aço de GO	81
Tabela 5.8 Valores relativos aos ensaios realizados para os aços QE1 e T1 (GNO), QE2 e T2 (GO)	82



# LISTA DE SIGLAS

AC	Regime alternado sinusoidal
AT	Autotransformador
DC	Regime contínuo
GNO	Grão não orientado
GO	Grão orientado
GOC	Grão orientado convencional
GOEP	Grão orientado de elevada permeabilidade
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MMD	Materiais magneticamente duros
MMM	Materiais magneticamente macios
OSC	Osciloscópio digital
P. M.	Potência Magnetizante
QE	Quadro de Epstein
RD	<i>Rolling direction</i> – Direção de laminagem
SST	<i>Single Sheet Tester</i> – Teste de folha única
T1	Núcleo de aço de grão não orientado (0,50 mm)
T2	Núcleo de aço de grão orientado (0,35 mm)
TD	<i>Transverse direction</i> – Direção transversal
TE	Transformador sob ensaio



# LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Designação	Unidade
$B$	Intensidade do campo de indução magnética ou densidade de fluxo magnético	T
$\mathbf{B}$	Vetor campo de indução magnética	T
$B_m$	Intensidade do campo de indução magnética máximo ou densidade de fluxo magnético máximo	T
$B_{mat}$	Indução magnética no material ou densidade de fluxo magnético no material	T
$B_s$	Indução magnética de saturação ou densidade de fluxo magnético de saturação	T
$B_r$	Indução magnética remanescente ou densidade de fluxo magnético remanescente	T
$C$	Constante de Curie	K
$dl$	Comprimento elementar	m
$d_m$	Densidade do material	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$e$	Espessura das chapas	m
$E$	Energia dissipada	J
$f$	Frequência	Hz
$f.e.m.$	Força eletromotriz	V
$f.m.m.$	Força magnetomotriz	A · e
$H$	Intensidade do campo magnético	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
$\mathbf{H}$	Vetor campo magnético	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
$H_m$	Campo magnético máximo	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
$H_c$	Campo magnético coercivo ou coercividade	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
$H_C$	Campo magnético crítico	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
$i_1$	Corrente elétrica no primário do transformador	A
$i_1''$	Corrente elétrica no primário, referida ao secundário	A
$i_2$	Corrente elétrica no secundário do transformador	A
$i_2'$	Corrente elétrica no secundário, referida ao primário	A
$I$	Intensidade de corrente elétrica	A

Símbolo	Designação	Unidade
$l$	Comprimento das chapas	m
$\ell_m$	Caminho magnético do quadro de Epstein	m
$\ell_{m_{SST}}$	Caminho magnético do teste de folha única	m
$\mathcal{L}$	Comprimento do condutor	m
$m$	Razão de transformação do transformador	Adim.
$m_{ef}$	Massa efetiva do quadro de Epstein	Kg
$m_{tot}$	Massa total do conjunto de chapas do quadro de Epstein	Kg
$\mathbf{M}$	Vetor magnetização	$A \cdot m^{-1}$
$M_s$	Magnetização de saturação	$A \cdot m^{-1}$
$N$	Número de espiras	Adim.
$N_1$	Número de espiras da bobina do primário	Adim.
$N_2$	Número de espiras da bobina do secundário	Adim.
$p$	Potência	W
$P_{cl}$	Perdas específicas por correntes de Foucault clássicas	$W \cdot Kg^{-1}$
$P_{exc}$	Perdas excedentes específicas	$W \cdot Kg^{-1}$
$P_h$	Perdas por histerese específicas	$W \cdot Kg^{-1}$
$P_t$	Perdas magnéticas totais específicas	$W \cdot Kg^{-1}$
$R_m$	Resistência de perdas em série	$\Omega$
$R_m''$	Resistência de perdas em série, referida ao secundário	$\Omega$
$R_1$	Resistência elétrica da bobina do primário	$\Omega$
$R_1''$	Resistência elétrica do primário referida ao secundário	$\Omega$
$R_2$	Resistência elétrica da bobina do secundário	$\Omega$
$R_2'$	Resistência elétrica do secundário referida ao primário	$\Omega$
$R_{Fe}$	Resistência de perdas no ferro	$\Omega$
$R_{Fe}''$	Resistência de perdas no ferro, referida ao secundário	$\Omega$
$\mathcal{R}_m$	Relutância magnética do material	$H^{-1}$
$S$	Área de secção transversal	$m^2$
$S_{Fe}$	Secção transversal do núcleo de ferro	$m^2$

Símbolo	Designação	Unidade
$S_{FeQE}$	Secção transversal do quadro de Epstein	m <sup>2</sup>
$T$	Temperatura absoluta	K
$T_C$	Temperatura de Curie	K
$u_1$	Tensão primário do transformador	V
$u_1''$	Tensão no primário, referido ao secundário	V
$u_2$	Tensão no secundário do transformador	V
$\bar{U}_1$	Amplitude complexa da tensão no primário	V
$\bar{U}_1''$	Amplitude complexa da tensão no primário, referida ao secundário	V
$U_2$	Tensão no secundário do transformador	V
$U_{2ef}$	Tensão elétrica eficaz no secundário	V
$U_{2medido}$	Tensão elétrica medida no secundário	V
$\bar{U}_2$	Amplitude complexa da tensão do secundário	V
$\bar{U}_2'$	Amplitude complexa da tensão no secundário, referida ao primário	V
$v$	Número de chapas por braço do quadro de Epstein	Adim.
$V_{ol}$	Volume do material	m <sup>3</sup>
$w$	Largura das chapas do quadro de Epstein	m
$X_{Fe}$	Reatância de perdas no ferro	$\Omega$
$X_{Fe}''$	Reatância de perdas no ferro, referida ao secundário	$\Omega$
$X_m$	Reatância de perdas em série	$\Omega$
$X_m''$	Reatância de perdas em série, referida ao secundário	$\Omega$
$X_{11}$	Reatância de dispersão no primário	$\Omega$
$X_{11}''$	Reatância de dispersão no primário, referido ao secundário	$\Omega$
$X_{22}$	Reatância de dispersão no secundário	$\Omega$
$X_{22}'$	Reatância de dispersão no secundário, referido ao primário	$\Omega$
$\bar{Z}_c$	Amplitude complexa da impedância de carga	$\Omega$
$\bar{Z}_c'$	Amplitude complexa da impedância de carga, referida ao primário	$\Omega$

<b>Símbolo</b>	<b>Designação</b>	<b>Unidade</b>
$\Delta l$	Varição do comprimento segundo a direção do campo aplicado	m
$\varepsilon$	Força eletromotriz induzida	V
$\lambda$	Magnetostricção linear do material	Adim.
$\mu$	Permeabilidade magnética absoluta	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vázio	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
$\mu_m$	Permeabilidade magnética máxima	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa	Adim.
$\rho$	Resistividade elétrica do material	$\Omega \cdot \text{m}$
$\phi$	Fluxo magnético simples	Wb
$\phi_{Fe}$	Fluxo magnético simples no ferro	Wb
$\phi_p$	Fluxo magnético principal ou no ferro	Wb
$\psi_d$	Fluxo magnético ligado de dispersão	Wb
$\psi_t$	Fluxo magnético ligado total	Wb
$\chi_m$	Susceptibilidade magnética	Adim.
$\omega$	Frequência angular	$\text{s}^{-1}$

# 1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação aborda o tema das propriedades magnéticas dos aços elétricos usados em dispositivos de potência, comparando as propriedades magnéticas obtidas para o aço usando o aparelho de Epstein e com um núcleo de transformador monofásico.

No primeiro capítulo encontra-se descrita a motivação que levou à realização desta dissertação, bem como os objetivos que se pretendem atingir. De seguida, realiza-se uma descrição sucinta dos temas apresentados ao longo dos diferentes capítulos. Por último, apresentam-se as contribuições originais que levaram à realização desta investigação.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Atualmente, a eficiência energética é dos assuntos mais debatidos a nível mundial. A importância de um correto dimensionamento dos dispositivos de potência e dos seus constituintes apresenta um ramo de grande interesse e estudo. A existência de equipamentos sustentáveis que operem de forma eficiente e sejam ecologicamente viáveis é um dos objetivos que se procura atingir tanto a nível de académico como industrial.

Existe assim uma necessidade de construir dispositivos de potência que apresentem rendimentos mais elevados, ou seja, com menores perdas associadas e por outro lado que apresentem inferiores custos de operação. Para tal, o conhecimento e determinação das propriedades magnéticas que caracterizam os aços elétricos é importante para o rendimento otimizado dos sistemas de energia.

Um dos principais constituintes dos dispositivos de potência são os aços elétricos. Materiais cujas características apresentam qualidades essenciais ao funcionamento destes equipamentos. Os aços elétricos apresentam grande relevância para a indústria mundial, sendo utilizados fundamentalmente em motores elétricos e transformadores, onde o rendimento energético das máquinas depende da permeabilidade e das perdas magnéticas (Cardoso 2005).

A escolha para uma determinada aplicação do material correto é uma parte importante na construção de dispositivos de potência, visto as suas propriedades estarem diretamente relacionadas com a eficiência dos dispositivos.

A necessidade de caracterização das propriedades magnéticas dos aços elétricos é fundamental e tal não seria possível sem instrumentos que permitissem a realização destas medições. Aparece então, no início do século XX um equipamento denominado quadro de Epstein, concebido para resolver a controvérsia existente entre produtores e consumidores de aços elétricos (Korzunin, Chistyakov e Rimshev 2000).

Existem vários tipos de ensaios normalizados que realizam medições de perdas magnéticas em aços elétricos laminados, nomeadamente o ensaio realizado com o quadro de Epstein, o

*Single Strip Tester* e métodos que utilizam transformadores com núcleo toroidal ou em forma de anel. Porém o aparelho de Epstein com as suas vantagens é de longe o instrumento mais utilizado na obtenção de medidas padrão e com normas internacionais aceites (Mthombeni, Pillay e Strnat 2007). No quadro de Epstein as lâminas de aço elétrico são inseridas de modo a formarem um circuito magnético fechado, sendo exigido um número mínimo de 12 lâminas e sempre uma quantidade de lâminas múltipla de quatro.

O *Single Strip Tester* consiste num equipamento onde se introduz apenas uma lâmina/amostra de teste e no qual o circuito magnético é fechado por um núcleo interno ao equipamento (Meurer 2005). Contudo uma desvantagem deste tipo de ensaios é a falta de representatividade das propriedades do material, devido ao número reduzido de amostras de teste comparativamente com a quantidade que se utiliza nos demais ensaios.

Nos testes em toroide também conhecidos por testes em anel, as amostras são envolvidas por enrolamentos homogêneos. Apresenta as vantagens de ter uma geometria semelhante a máquinas rotativas, baixo custo e facilidade em montar.

O quadro de Epstein exhibe uma reprodutibilidade das medições magnéticas bastante aceitável comparativamente aos demais ensaios, sendo essa uma das razões para continuar a ser utilizado mundialmente como equipamento padrão na caracterização de aços elétricos. Este instrumento de medição apresenta diversas vantagens, entre as quais a elevada precisão das medições magnéticas, amplas gamas de frequências de magnetização e de intensidades de campo magnético e a facilidade no processamento de dados. As suas desvantagens são o processo moroso de inserção das amostras no equipamento, a assunção que o campo magnético aplicado é uniforme ao longo das amostras o qual não acontece na realidade, o sobreaquecimento do enrolamento de magnetização e a necessidade de cortar amostras de aço elétrico relativamente estreitas impedindo assim a sua posterior utilização (Korzunin, Chistyakov e Rimshev 2000).

Assim sendo, a caracterização dos aços elétricos é realizada maioritariamente através do aparelho de Epstein, sendo os valores obtidos através deste instrumento utilizados como referência.

Ocorre portanto a necessidade de verificar se existe ou não, coerência entre os valores tabelados e os obtidos em uso geral. Nomeadamente, pretende-se comparar as perdas magnéticas e as curvas de magnetização obtidas através de ensaios com o quadro de Epstein e com núcleos de transformador que se encontram em serviço, de modo a aferir se os valores fornecidos pelos produtores de aços elétricos são confiáveis.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo central desta dissertação é aferir se os valores obtidos pelo método padrão de obtenção das características magnéticas é ou não confiável, perante as medições adquiridas através de ensaios realizados sobre instrumentos utilizados em empresas. Procura-se portanto, conferir se ao seguir os valores estipulados se induz em erro os utilizadores de equipamentos que já se encontram em serviço, fazendo com que por sua vez os custos de operação sejam diferentes dos esperados.

Pretende-se medir as propriedades magnéticas de dois conjuntos de aços elétricos para que seja possível caracterizá-los através do método de Epstein e posteriormente comparar estas medições com as que se retiram diretamente de um núcleo de um transformador monofásico feito do mesmo material, e para o qual se obtém o ciclo de histerese e a característica de primeira magnetização. A análise é feita de modo a que seja possível determinar se existem ou não, diferenças entre os valores obtidos pelos dois métodos.

Relativamente aos objetivos específicos, foram os seguintes:

- ❖ Estudo teórico relativo ao método de Epstein e aos transformadores de potência;
- ❖ Estudo do aparelho de Epstein;
- ❖ Realização de ensaios laboratoriais e análise dos mesmos, de modo a obter dados relativos às características dos aços elétricos com o aparelho de Epstein;
- ❖ Estudo das características dos transformadores presentes em laboratório ( $T_1$  e  $T_2$ );
- ❖ Realização de ensaios laboratoriais de modo a obter o ciclo de histerese e a curva de primeira magnetização dos núcleos;
- ❖ Análise e discussão dos resultados obtidos.

Os ensaios serão realizados com aços de grão não orientado e orientado fornecidos pela mesma empresa, a qual não garante que a proveniência dos mesmos seja do mesmo lote.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Em concordância com o conceito deste primeiro capítulo, e tendo em vista cumprir com os objectivos que foram apresentados anteriormente, esta dissertação está dividida em seis capítulos, que se relacionam com o trabalho realizado ao longo do projecto. São eles:

- ❖ Capítulo 1: Introdução

Tal como foi enunciado, este capítulo serve de introdução ao trabalho desenvolvido, de forma a explicar de forma sucinta, os temas que levaram à realização da dissertação, os objetivos que se pretendem alcançar, passando por uma breve descrição de cada um dos capítulos que a estruturam.

❖ Capítulo 2: Estado da Arte

O estado de arte faz um levantamento de vários estudos desenvolvidos sobre o aparelho de Epstein. Aspectos como o ano em que foi desenvolvido, avanços tecnológicos realizados e assuntos que foram sendo esclarecidos desde a sua criação. Trata também da atualidade referente aos aços elétricos, equipamentos que os caracterizam e que têm por base o mesmo princípio de funcionamento do quadro de Epstein.

❖ Capítulo 3: Fundamentos teóricos

No terceiro capítulo, abordam-se diversos fundamentos teóricos relacionados com o trabalho realizado. Tais como, materiais magnéticos e as suas propriedades, dando especial realce às perdas magnéticas e ao ciclo de histerese, bem como aos aços elétricos.

❖ Capítulo 4: Métodos usados na determinação das propriedades magnéticas

Este capítulo aborda a parte do projeto relativo aos dois métodos de caracterização das propriedades magnéticas utilizados. Primeiramente abordam-se os aspectos relativos ao aparelho de Epstein, tais como a teoria inerente ao seu funcionamento, o equipamento e software utilizado, especificações e características do mesmo. Por fim, é feita referência ao núcleo do transformador e às suas características de funcionamento relevantes ao enquadramento teórico dos ensaios realizados.

❖ Capítulo 5: Procedimento Experimental, Resultados Obtidos e Discussão

Apresenta e analisa os dados referentes aos ensaios laboratoriais referentes ao método de Epstein e aos núcleos dos transformadores. Neste mesmo capítulo é realizada uma discussão sobre os resultados obtidos.

❖ Capítulo 6: Conclusões e trabalho futuro

Por último, apresenta-se uma síntese do trabalho efetuado, sendo retiradas diversas conclusões sobre a existência ou não de conformidade entre as medições realizadas.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia, existe uma necessidade cada vez mais premente de melhor caracterizar os aços elétricos devido à sua utilização cada vez mais recorrente, em muito ligada com o avanço das tecnologias e com o crescimento das economias mundiais. As suas aplicações são diversas e podem ir de motores, a transformadores, ou geradores e por sua vez, estão cada vez mais presentes na maior parte dos nossos equipamentos elétricos e eletrónicos.

Existe portanto uma procura cada vez maior da sociedade, em atingir uma melhor eficiência energética. Onde se pretende que sejam produzidos aços elétricos com melhores propriedades magnéticas ou seja, cujas permeabilidades magnéticas sejam superiores e tenham menores perdas magnéticas associadas. Por outro lado, é necessário determinar se os equipamentos utilizados para medir tais propriedades são os mais indicados, ou se por sua vez existem outros que permitam obter melhores resultados. Tudo isto tendo em conta a relação custo/benefício, visto que equipamentos cujas propriedades sejam incorretamente medidas incorrem numa possível falha na escolha do material, produção e desenvolvimento para determinadas aplicações.

### 2.2 PERSPETIVA HISTÓRICA

O ponto chave para a utilização dos aços elétricos tal como os conhecemos atualmente remonta ao século VI A.C. e ocorreu numa terra denominada Magnésia (Ásia Menor), aquando da descoberta de materiais com propriedades magnéticas, aos quais se deu o nome de magnetites, tendo daí derivado o nome do fenómeno mais importante quando se trata deste tipo de materiais, o magnetismo. Posterior a isso, na Europa aquando da época dos descobrimentos a sua difusão foi em termos de bússolas. Somente nos finais do século XVI, é que William Gilbert descobriu o magnetismo terrestre, a indução magnética e que a magnetite perdia o seu magnetismo natural quando submetida a temperaturas elevadas. Em 1785, Charles Coulomb estabeleceu a lei que caracteriza as forças de atração e repulsão das cargas elétricas (Santos 2005) (Pronto 2012/2013).

O século XIX trouxe diversos contributos para o avanço da tecnologia tal como a conhecemos atualmente, alguns exemplos disso são:

- ❖ Hans Christian Oersted em 1820 estabeleceu a relação entre a eletricidade e o magnetismo.
- ❖ Andre Marie Ampère em 1826 determinou a lei de Ampère.
- ❖ Michael Faraday estipulou a lei da indução magnética no ano de 1831.

- ❖ James Maxwell em 1879 estabeleceu os fundamentos teóricos do eletromagnetismo.
- ❖ Pierre Curie nos finais desse século examinou os efeitos da temperatura nas propriedades magnéticas dos materiais.

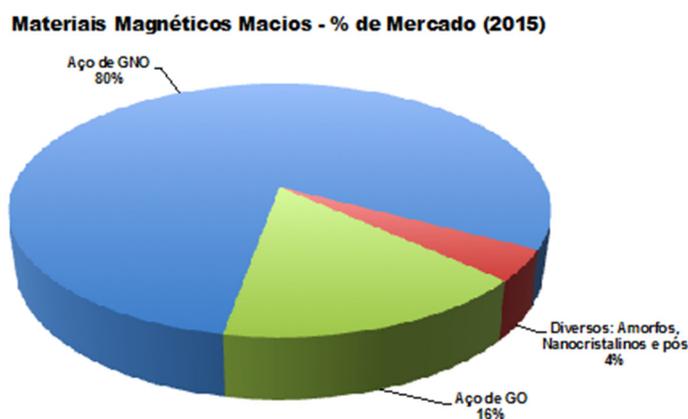
A Tabela 2.1 apresenta uma análise cronológica de alguns dos fenômenos relacionados com os materiais magnéticos, o eletromagnetismo e as máquinas elétricas.

**Tabela 2.1 Datas históricas referentes aos materiais magnéticos, eletromagnetismo e máquinas elétricas. Adaptado de (Santos 2005).**

Materiais Magnéticos	Eletromagnetismo	Máquinas Elétricas
Aço de baixo Carbono	1820 Relação eletricidade e magnetismo (Oersted) 1821 Campo produzido pela corrente elétrica (Ampère) 1826 Lei de Ampère (Ampère) 1831 Lei da Indução magnética (Faraday)	1836 Motor CC (Davenport) 1866 Gerador CC (Siemens) 1867 Gerador CA (Gramme)
1882 Liga Fe-Si GNO (Hadfield)	1879 Fundamento teóricos do eletromagnetismo (Maxwell) 1880 Curva de histerese magnética do Ferro (Warburg)	1884 Protótipo transformador monofásico núcleo fechado 1886 Transformador monofásico corrente alternada (Stanley) 1887 Motor de indução e gerador bifásico 1888 Motor de indução monofásico 1889 Motor de indução trifásico
1900 Aço silício para transformadores GNO (Hadfield)	1896 1º Estudo efeito temperatura propriedades magnéticas dos materiais (Fleming e Dewar) 1900 Quadro de Epstein (Epstein) 1905 Proposta teórica diamagnetismo e paramagnetismo (Langevin) 1906 Proposta teórica ferromagnetismo (Weiss) Descoberta supercondutividade no mercúrio (Karmeling Onnes); 1911 Método diferencial quadro de Epstein (Lonkhuyzen) 1925 Teoria do spin do elétron (Uhlenbeck e Goudsmit) 1931 Observação das paredes de domínio (Bitter)	1919 Motor de passo (Walker)
1933 – 1945 Desenvolvimento das ferrites	1933 Descoberta efeito de Meissner	
1934 Aço silício de GO (Goss)	1934 Teoria dos dois fluidos 1935 Estrutura de domínios (Landau e Lifshitz)	
1937 Estado misto - supercondutores (Shubnikov)	1955 Single Sheet Tester (Leonard)	1937 Motor de histerese (Teare)
1960 Desenvolvimento dos fios supercondutores de NbSn3 1960 Ligas amorfas 1965 Aço GOEP 1970 Íman de SmCo 1983 Íman de NdFeB (Sagawa) 1986 Supercondutores de alta temperatura (Bednorz e Muller) 1988 Ligas nanocristalina (Yoshizawa)	1986 Modelo "Objetos Magnéticos" para perdas magnética (Bertotti)	

Tal como se poderá ver, com mais ênfase no capítulo 3 relativo aos Fundamentos teóricos, os aços elétricos podem ser diferenciados em três categorias, aços de baixo carbono (desde

sempre usados), aços de grão não orientado – GNO (descobertos por Sir Robert Hadfield em 1882), cujas propriedades permitem a sua utilização em estatores e rotores de máquinas rotativas e aços de grão orientado (GO), desenvolvidos em 1934 por Norman P. Goss e cuja direção preferencial de magnetização faz com estes aços sejam os que melhor se adequam a transformadores de potência. Dentro destes últimos os aços de GO, em 1965 foram realizados estudo, que permitiram obter os aços de grão orientado de elevada permeabilidade-GOEP. O estudo efetuado pelo Dr. Johannes Sievert, com foco nas propriedades magnéticas dos aços elétricos, evidencia que a estimativa global de produção de aços elétricos em 2015 tenha sido na ordem dos 13,1 a 18,5 milhões de toneladas por ano (Sievert 2015). A representação relativa às percentagens que cada tipo de material magnético macio tem, é apresentada na Figura 2.1 e, posteriormente a Tabela 2.2 e a Tabela 2.3 mostram a produção mundial ao longo dos anos das chapas de aço elétrico e de valores típicos das propriedades magnéticas de alguns destes tipos de materiais.



**Figura 2.1 Percentagem de mercado de materiais magnéticos macios para 2015.**  
**Adaptado de (Sievert 2015)**

Na Figura 2.1 é possível verificar que a percentagem de materiais magnéticos macios no mercado é liderada pelos aços de grão não orientado que apesar de terem perdas magnéticas superiores, não necessitam de recozimento final comparativamente aos aços de grão orientado. Enquanto que a sua falta de anisotropia faz com que estes materiais sejam indicados para máquinas elétricas rotativas, pois apresentam características independentes da direção de campo magnético aplicado e o seu preço de produção é inferior aos demais materiais.

Na Tabela 2.4 é possível verificar algumas aplicações para os vários tipos de aços elétricos. Relativamente ao ferro comercial, a adição de silício fez com que a permeabilidade e a resistividade aumentassem, o que se traduziu em perdas por histerese e por correntes de Foucault inferiores, respetivamente.

**Tabela 2.2 Produção mundial de chapas de aço elétrico ao longo dos anos. Retirado de (Knoema 2017)**

Localização	1995	2000	2005	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Produção de folhas e tiras de aço elétrico (em mil toneladas)										
Mundo	7029	6714	8786	10837	11339	11991	10986	12472	13128	3762
União Europeia *			1970	1948	1347	1429	1181	1154	726	749
França	223	255	249	274	216	205	166	158	184	191
Alemanha	573	631	627	635	515	572	521	475		
Reino Unido	239	234	144	90	71	75	65	59	62	66
Estados Unidos da América	386	480	425	481	305	339	59			
Brasil	101	127	174	213	199	214	188	180	167	164
Índia	106	130	154	161	181	161	158	136	155	
China	745	1300	2607	4573	5717	6284	6194	7761	8852	
Japão	1981	1990	2095	1902	2002	1949	1594	1609	1552	1377
Coreia do Sul	284	540	748	940	1011	991	987	919	902	892

\* 28 Estados pertencentes

**Tabela 2.3 Propriedades magnéticas dos materiais macios. Adaptado de (Pinho 2009)**

Composição do Material (% em peso; restante é ferro)	Permeabilidade relativa inicial, $\mu_r/\mu_0$	Permeabilidade máxima relativa, $\mu_{m\acute{a}x}/\mu_0$	Campo coercivo, $H_c$ $A/m (Oe)$	Campo residual, $B_r$ $Wb/m^2 (G)$	Campo de saturação, $B_s$ $Wb/m^2 (G)$	Condutividade elétrica, $\rho \times 10^{-5} \Omega \cdot m$	Usos
Materiais Magnéticos Macios (MMM)							
Ferro comercial (0,2 impurezas)	250	9 000	≈ 80 (1)	0,77 (7 700)	2,15 (21 500)	10	Relés
Ferro refinado (0,05 impurezas)	10000	200 000	4 (0,05)	---	2,15 (21 500)	10	
Ferro-Silício (4 Si)	1 500	7 000	20 (0,25)	0,5 (5 000)	1,95 (19 500)	60	Transformadores
Ferro-Silício (3 Si)	7 500	55 000	8 (0,1)	0,95 (9 500)	2 (20 000)	50	Transformadores
Ferro-Silício (3 Si)	---	116 000	4,8 (0,06)	1,22 (12 200)	2 (20 100)	50	Transformadores
Ferro Mu (5 Cu, 2 Cr, 77 Ni)	20 000	100 000	4 (0,05)	0,23 (2 300)	0,65 (6 500)	62	Transformadores
Permalloy 78 (78,5 Ni)	8 000	100 000	4 (0,05)	0,6 (6 000)	1,08 (10 800)	16	Relés sensitivos
Supermalloy (79 Ni, 5 Mo)	100 000	1 000 000	0,16 (0,002)	0,5 (5 000)	0,79 (7 900)	60	Transformadores
Permendur (50 Cs)	800	5 000	160 (2)	1,4 (14 000)	2,45 (24 500)	7	Eletroímans

**Tabela 2.4 Aplicações típicas para os vários tipos de aços elétricos.**

**Adaptado de (Moses 1990)**

Aplicação	Aços elétricos de GNO			Aços elétricos de GO	
	0% Silício	Baixo teor de silício	Alto teor de silício	Convencional	Elevada permeabilidade
Motores pequenos	✓✓✓	✓✓			
Balastros	✓✓✓	✓✓			
Motores AC de média potência	✓✓	✓✓✓			
Transformadores de soldadura	✓	✓✓✓	✓✓		
Transformadores de áudio		✓✓✓	✓✓		
Transformador de potência pequeno		✓	✓✓✓	✓✓✓✓	
Máquinas rotativas de elevada potência			✓✓✓	✓✓	
Geradores de potência médios		✓✓✓	✓✓✓	✓	
Transformadores de distribuição				✓✓✓	✓✓✓
Transformador de potência				✓	✓✓✓✓

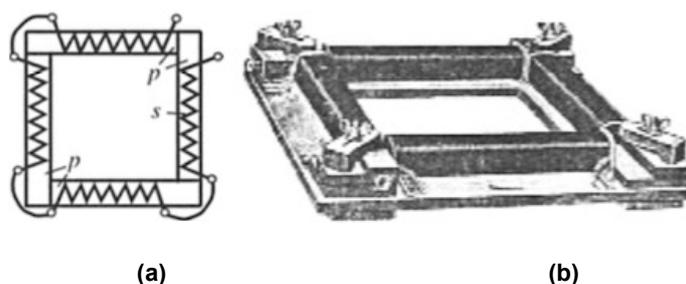
Segundo Korzunin, Chistyakov e Rimshev, foi através do método do wattímetro que mede as perdas magnéticas totais através da magnetização cíclica dos materiais magnéticos, sugerido primeiramente por Dolivo-Dobrovolskii, que se deu uma busca pelo desenvolvimento de instrumentos e técnicas de medição de perdas em materiais ferromagnéticos (Korzunin, Chistyakov e Rimshev 2000). As primeiras medições para obter a característica magnética, foram realizadas com amostras em forma de anel em circuitos abertos. As quais apresentavam desvantagens inerentes relativas à dificuldade de maquinar tais amostras, à forma com seriam introduzidas nos enrolamentos e ao tempo dispendido para realizar as medições. Por outro lado, um circuito magnético aberto tem a desvantagem da falta de uniformidade da magnetização das amostras e dispersão do fluxo magnético no entreferro, o que se traduz em resultados pouco fiáveis. Assim, Epstein em 1900 apresentou uma nova configuração de um circuito magnético fechado cujo intuito era resolver estes problemas – o Quadro de Epstein. Mais tarde foram desenvolvidos outros instrumentos de medida, tais como o teste de folha única ou diferentes tamanhos e configurações do quadro de Epstein, com o intuito de suprir algumas desvantagens deste.

Originalmente proposto com um tamanho de 50 cm de cada lado (Tumanski 2011), o quadro de Epstein tinha quatro bobinas ligadas em série sendo que cada uma estava alinhada com os lados do quadrado, como se pode ver pela Figura 2.2. As bobinas estavam ligadas em série, contendo cada enrolamento um número de espiras. As chapas de aço elétrico que se pretendiam caracterizar eram introduzidas no interior das bobinas e as suas extremidades pressionadas com pesos específicos de madeira. Esta configuração foi mais tarde alterada pelo próprio Epstein, adicionando-lhe outro enrolamento, fazendo com que o campo magnetizante fosse mais uniforme ao longo da amostra. O circuito magnético tinha a mesma configuração que o anterior – um enrolamento secundário foi distribuído uniformemente ao longo de um equipamento feito de material isolante e um enrolamento magnetizante (primário) distribuído por vinte e quatro bobinas individuais separadas em grupos de seis,

eram colocadas nos diferentes lados do quadrado e ligadas em paralelo (Korzunin, Chistyakov e Rimshev 2000).

Em 1911, Lonkhuyzen apresentou um método diferencial mais simples para medir as propriedades magnéticas, constituído por dois aparelhos de Epstein idênticos um com as amostras de referência e o outro com as amostras que se pretende ensaiar, as quais teriam de apresentar massa e propriedades magnéticas semelhantes às primeiras. Apesar de mais fácil este método caiu em desuso devido às amostras de referência serem calibradas em instalações nas quais apenas se utilizava um quadro de Epstein, fazendo com que os erros presentes das medições se transpusessem para este método (Korzunin, Chistyakov e Rimshev 2000).

Posteriormente em 1941, Burgwin propôs uma versão reduzida de 25 cm do quadro de Epstein, tendo esta sido normalizada e difundida por todo o mundo, como método padrão, quando se pretende realizar medições das propriedades magnéticas para caracterizar aços elétricos sob corrente alternada. A Figura 2.2 mostra o quadro de Epstein com a sua configuração original feita pela Siemens & Halske.



**Figura 2.2 (a) Circuito magnético do aparelho de Epstein com um enrolamento, (b) Vista exterior. Retirado de (Korzunin, Chistyakov e Rimshev 2000)**

## **2.3 APARELHOS QUE CARACTERIZAM AÇOS ELÉTRICOS**

O tema desta dissertação assenta na utilização do aparelho de Epstein para obter as propriedades magnéticas dos aços elétricos de grão orientado e de grão não orientado. Existem porém outros instrumentos que permitem atingir tal objetivo, os quais também se encontram bem estabelecidos e normalizados. Em seguida descrevem-se alguns deles, apresentam-se as suas vantagens e desvantagens comparativamente com o quadro de Epstein e referem-se artigos encontrados na literatura que apresentam interesse.

### **2.3.1 QUADRO DE EPSTEIN – QE**

O quadro de Epstein foi criado para suprir as necessidades de caracterização dos aços elétricos. Este dispositivo é normalmente usado para medir as propriedades magnéticas em corrente alternada utilizando amostras, de acordo com determinados procedimentos

estipulados por diversas normas (Koltermann 2001). É aplicável a aços de GO e de GNO, numa gama de frequências até 400 Hz (Kotnala e Kothari 2000).

Este dispositivo compreende no seu interior dois enrolamentos principais com funções distintas (Batistela 2001): o enrolamento primário, colocado no exterior, também designado de magnetizante, pois é responsável pela criação do campo magnético e o enrolamento secundário colocado no interior, que realiza a medida da densidade de fluxo magnético das amostras que formam o núcleo. Estes enrolamentos são distribuídos uniformemente ao longo do circuito magnético, em forma de quadrado, contendo cada enrolamento 700 espiras (175 espiras por cada lado) e, estão sobrepostos.

Além destes dois enrolamentos o QE geralmente apresenta no seu interior uma bobina de compensação de fluxo de ar, de modo a impedir que tensões indesejadas devido a espaços de ar entre as amostras sejam criados e induzam a erros sistemáticos nas medições.

Outro fator relevante é o número de amostras utilizadas, pois elas alteram a secção transversal efetiva por onde o fluxo no ferro se distribui (Batistela 2001).

Uma das desvantagem deste equipamento é a existência das juntas sobrepostas, tanto a nível magnético, pois causa falta de uniformidade da densidade de fluxo ao longo da amostra, como também para o cálculo da secção transversal efetiva.

Um aspeto de grande interesse académico, tendo sido estudado por Marketos, Zurek e Moses em dois dos seus artigos referentes ao ano de 2007 e 2008, por Blajer e Arsov em 2010 e por Cheng, et al. no ano de 2014, é o cálculo do caminho médio magnético (Marketos, Zurek e Moses 2007), (Marketos, Zurek e Moses 2008), (Blajer e Arsov 2010) e (Cheng, et al. 2014). O qual se encontra estabelecido com o valor fixo de  $\ell_m = 0,94$  m, estes investigadores chegaram à conclusão que se encontra mal definido pois existem diversos fatores, tais como o tipo de material que se encontra em teste, a permeabilidade do material, o campo magnético aplicado ou a frequência com que se realiza o ensaio, que alteram o comprimento do caminho magnético fazendo com que este não seja constante e dependa destas características, o que por sua vez introduz erros nas medições das perdas magnéticas e leva a erros de dimensionamento dos equipamentos.

O quadro de Epstein apresenta uma vantagem em relação ao teste em forma de anel, pois não necessita de novos enrolamentos a cada novo ensaio o que o torna comparativamente mais rápido. Em comparação, devido à necessidade de recozimento de aços de GO, precisão no corte de modo a evitar rebarbas, quantidade e ao tempo de inserção das amostras, este procedimento é mais lento que o teste de folha única (SST), que será abordado na secção 2.3.3. Porém a representatividade do material no QE é superior à do SST.

Uma desvantagem do QE é não ter em conta a geometria dos equipamentos nos quais os aços serão utilizados, focando-se apenas nas propriedades dos materiais, assumindo que a distribuição do campo magnético é uniforme ao longo do comprimento da amostra.

Porém este equipamento desde muito cedo que é usado, o que o tornou aceite mundialmente por diversas normas para caracterizar as propriedades magnéticas dos aços elétricos. A norma da comissão eletrotécnica internacional que caracteriza este equipamento é a (IEC 60404-2), a qual foi revista pela última vez em 2008. Além desta característica é simples e barato, quando se compara com outros dispositivos com o mesmo propósito.

Em 2004, na sua dissertação (Mendes 2004), realizou uma análise comparativa de várias normas existentes, nomeadamente da norma brasileira, americana, japonesa e da comissão eletrotécnica internacional, que caracterizam a obtenção das propriedades magnéticas através do aparelho de Epstein. Na Tabela 2.5 e Tabela 2.6 é possível verificar alguns aspectos que influenciam as medições e os resultados obtidos.

**Tabela 2.5 Parte I – Comparação de normas referentes ao quadro de Epstein.**

Característica	NBR 5161	ASTM A343	Efeito
Tamanho da lâmina	Largura (mm): $30 \pm 0,2$ ; Comprimento (mm): $280 \leq L \leq 308$	Largura (mm): 30; Comprimento (mm): $280 \pm 0,8$	Facilidade de inserção; Perda Magnética
Desvio do aplainamento	Contempla	Não contempla	Tensões mecânicas
Isolação adicional	Contempla	Não contempla	Algo não normal à lâmina
Rebarbas	Contempla	Não contempla	Perdas de Foucault
Quantidade de lâminas	$\geq 12$ e múltiplo de 4	$\geq 12$ e múltiplo de 4	Secção transversal
Espessura	Máximo 1mm	Não contempla	Precisão
Desmagnetização	Contempla	Contempla	Campo coercivo
Temperatura ambiente	18 a 28 (°C)	Não contempla	Resistividade
Fator de Forma	$1,11 \pm 1\%$	$1,11 \pm 1\%$	Perdas de Foucault
Frequência de teste	15 a 100 (Hz)	25 a 400 (Hz)	Perda Magnética
Perdas excedentes	Não contempla	Não contempla	Rendimento
Classe de exatidão dos IM*	0,50%	0,50%	Custo
Massa dos cantos	1 N	200 g	Redução da relutância
Correção da PM**	Contempla	Contempla	Perdas de Foucault
Reprodutibilidade (desvio padrão)	Perda: 1% a 1,5%; P*** (instrumentos classe 0,5): até 2%	Não contempla	Eficácia medições
Relatório de teste	Não contempla	Não contempla	Reprodutibilidade

**Tabela 2.6 Parte II – Comparação de normas referentes ao quadro de Epstein**

Característica	JIS C2550	IEC 404-2	Efeito
Tamanho da lâmina	Largura (mm): $30 \pm 0,2$ ; Comprimento (mm): $(280 \leq L \leq 308) \pm 0,5$	Largura (mm): $30 \pm 0,2$ ; Comprimento (mm): $(280 \leq L \leq 308) \pm 0,5$	Facilidade de inserção; Perda Magnética
Desvio do aplainamento	Não contempla	Contempla	Tensões mecânicas
Isolação adicional	Contempla	Contempla	Algo não normal à lâmina
Rebarbas	Contempla	Contempla	Perdas de Foucault
Quantidade de lâminas	$\geq 12$	Múltiplo de 4	Secção transversal
Espessura	Não contempla	Não contempla	Precisão
Desmagnetização	Contempla	Contempla	Campo coercivo
Temperatura ambiente	18 a 28 (°C)	18 a 28 (°C)	Resistividade
Fator de Forma	$1,11 \pm 1\%$	$1,11 \pm 1\%$	Perdas de Foucault
Frequência de teste	até 400 Hz	até 400 Hz	Perda Magnética
Perdas excedentes	Não contempla	Não contempla	Rendimento
Classe de exatidão dos IM*	0,50%	0,10% e 0,20%	Custo
Massa dos cantos	1 N	1 N	Redução da relutância
Correção da PM**	Contempla	Não contempla	Perdas de Foucault
Reprodutibilidade (desvio padrão)	Perda: até 1,5% GNO com $B=1,5T$ ; P*** (instrumentos classe 0,5): até 2%	Perda: até 1,5% GNO com $B=1,5T$ ; P*** (instrumentos classe 0,5): até 2%	Eficácia medições
Relatório de teste	Não contempla	Contempla	Reprodutibilidade

Para ambas as tabelas acima enunciadas, dever-se-á ter em conta a seguinte legenda:

- ❖ \*IM – instrumentos de medição;
- ❖ \*\*PM – perdas magnéticas;
- ❖ \*\*\*P – permeabilidade.

### 2.3.2 TESTE EM FORMA DE ANEL

O exemplo mais simples de um circuito magnético fechado é o anel, o qual é utilizado em máquinas rotativas de pequenas dimensões nos quais se pretende avaliar o estator ou o rotor, materiais com elevados valores de permeabilidade e compósitos magneticamente macios. As amostras são envolvidas pelo enrolamento secundário de  $N_2$  espiras, o qual reveste a totalidade das amostras devido à incerteza da homogeneidade do material das mesmas. Na parte superior deste é colocado o primário – enrolamento magnetizante, com  $N_1$  espiras. Os dois enrolamentos devem ser distribuídos uniformemente ao longo das amostras (Cullity e Graham 2009).

Apesar de ser o procedimento mais simples no qual as suas amostras podem apresentar diversas configurações, como se pode verificar na Figura 2.3 e, o seu circuito magnético não possuir entreferros apresenta algumas desvantagens (Cullity e Graham 2009):

- ❖ Impossibilidade de aplicar um campo magnético elevado;
- ❖ Campo magnético diminui entre o diâmetro interno e externo;
- ❖ Preparação das amostras e dos enrolamentos consome tempo;
- ❖ Um novo grupo de amostras implica novos enrolamentos;
- ❖ Formato de anel irregular – pode introduzir entreferros, ou seja, dispersão do fluxo magnético;
- ❖ Para caracterizar aço segundo uma direção preferencial é necessário construir um núcleo de fita enrolada, o que cria esforços de flexão na amostra;

Estas características fazem com que este método seja aplicado maioritariamente para comparar resultados de outros equipamentos.

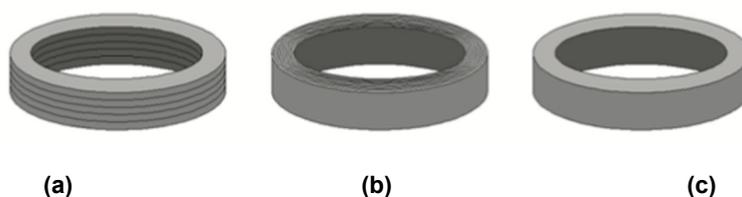


Figura 2.3 Representação esquemática de núcleos em forma de anel.

(a) Laminado, (b) Fita enrolada, (c) Pó sintetizado. Retirado de (Angrisani, et al. 2010, 239)

A norma redigida pela comissão eletrotécnica internacional (CEI) que rege as medições realizadas em aparelhos com a forma de anel é a (IEC 60404-6).

Em 2015 Krings e Soulard optam por utilizar a configuração em forma de anel para caracterizar materiais magnéticos em máquinas elétricas, onde o fluxo magnético é mais complexo devido aos seus campos magnéticos rotativos que atravessam o estator, o rotor e o entreferro. A escolha de uma estrutura em forma de anel é complementada devido ao caminho magnético não apresentar entreferros e à semelhança existente entre esta configuração e este tipo de máquinas, simplificando assim os cálculos quando se pretende comparar aços tabelados pelos métodos padrão com as máquinas rotativas em serviço. O sistema desenvolvido, descreve de forma detalhada como construir um sistema de medições característico para este tipo de configurações e pretende introduzir formas diferentes, e que possam ser consideradas pelos comités internacionais e pelos fabricantes de aço elétrico aquando dos seus valores de referência (Krings e Soulard 2015).

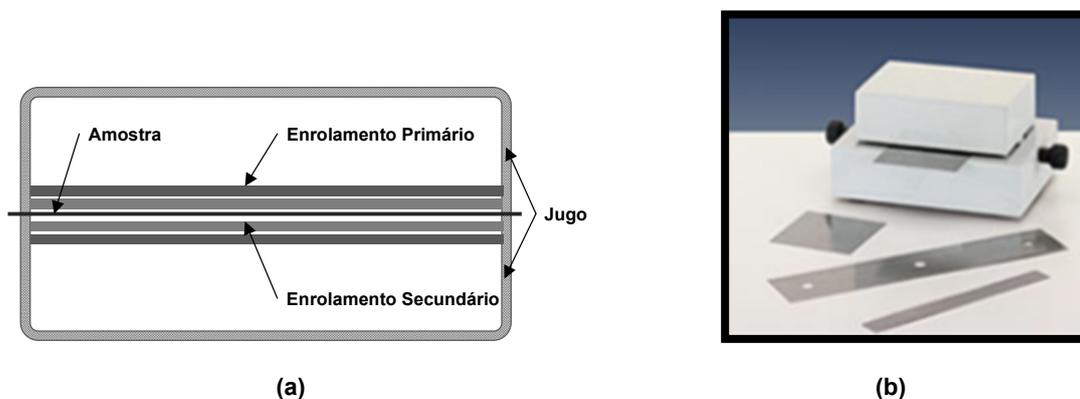
### **2.3.3 SINGLE SHEET TESTER – SST**

O teste de folha única – *Single Sheet Tester (SST)*, concebido para substituir o aparelho de Epstein, permite caracterizar chapas de aço elétrico utilizando uma única tira do material de teste (Muhit 2011). A amostra de teste é colocada entre dois jugos (tradução do plural de yoke - em inglês) idênticos os quais fecham o circuito magnético, permitindo assim medir as características magnéticas com mais precisão. O princípio de medição deste equipamento é semelhante ao quadro de Epstein e, tal como este apresenta dois enrolamentos, o primário (com bobina de compensação de fluxo de ar) e o secundário.

A norma (IEC 60404-3) descreve os métodos necessários para caracterizar os aços elétricos através do teste de folha única. Apresentada pela primeira vez em 1982, foi revista em 1992, 2002 e em 2009. A grande vantagem deste tipo de configuração é a simplificação que foi possível atingir ao ser necessário apenas uma amostra do material, fazendo com que o tempo necessário para introduzir as amostras no equipamento e a preparação das mesmas fosse diminuído. Outras vantagens são que as rebarbas não influenciam as medições, as amostras não precisam de recozimento, consegue caracterizar aços de grão orientado de elevada permeabilidade e apresenta boa reprodutibilidade nas medições (Sievert 2015).

A desvantagem principal deste método relaciona-se com o caminho magnético percorrido apresentar dois tipos de materiais – as amostras que se pretendem ensaiar e os jugos que constituem o equipamento (ver Figura 2.4). Esta característica interfere de tal forma com as medições, que nos aços de GO a diferença pode ser superior a 2% comparativamente com os valores estipulados. Além da desvantagem apresentada os equipamentos são pesados e caros (Sievert 2015). Relativamente ao circuito magnético, este dispositivo apresenta outra característica pouco favorável, que se situa na incerteza relativa do caminho magnético médio este, tal como o quadro de Epstein, é estipulado e tem o valor de  $\ell_{m_{SST}} = 0,45$  m. Por

fim, este equipamento necessita de ser calibrado o que é feito através do quadro de Epstein ou de testes em forma de toróide, constituindo assim uma desvantagem para o teste de folha única.



**Figura 2.4** Teste de folha única norma IEC 60404-2  
**(a)** Descrição elementos do SST; **(b)** Equipamento e amostras típicas

## 2.3.4 COMPARAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.3.4.1 ARTIGOS COMPARATIVOS DA RELAÇÃO ENTRE O QE E O SST

Um estudo comparativo sobre os diferentes valores que se obtêm através do QE e do SST, foi realizado em 2000 por Sievert. Este analisa em detalhe os diferentes resultados obtidos para os dois métodos de caracterização, tendo como objetivo solucionar o problema de modo a converter os resultados de um dos dois métodos nos resultados do outro, levando assim à coerência necessária para que o ensaio de folha única seja melhor aceite (Sievert 2000).

Em 2005 Antonelli, Cardelli e Faba, utilizaram aproximações do método de elementos finitos (FEM) para avaliar e quantificar as diferenças entre o QE e o SST, concluindo que existem algumas vantagens ao se utilizar método de folha única, em particular nos valor de indução, campo magnético e correntes de Foucault (Antonelli, Cardelli e Faba 2005).

Também sobre estas diferenças, com foco nos aços de ferro-silício de grão orientado, foi realizado pelo comité electrotécnico internacional em 2014 um estudo internacional em vários laboratórios que pode ser encontrado em (Appino, et al. 2014). Neste estudo participam onze laboratórios, todos com cinco pares de amostras de GO, para os quais se medem as perdas magnéticas e as potências de magnetização, a induções e frequências de funcionamento estipuladas. Em 2015, Sievert apresenta um artigo que evidencia as diferenças encontradas por Appino, et al., aquando da sua participação nesse mesmo estudo (Sievert 2015).

### 2.3.4.2 ARTIGOS SOBRE DIFERENTES ESTUDOS E CONFIGURAÇÕES DO QUADRO DE EPSTEIN

Em 2005, 2007 e 2008 são realizados estudos com o objetivo de melhorar as características do quadro de Epstein. Em particular, pretendia-se atingir níveis mais elevados de frequência e densidades de fluxo, tendo por mote as necessidades de eficiência cada vez maiores dos produtores de aços elétricos. Os investigadores optaram por reduzir o número de espiras (para 280 nos dois primeiros casos e para 200 no último) e amostras (inclinando-se para o teste de folha única) do QE e tais objetivos foram atingidos. Informação referente a esses avanços pode ser encontrada em (Mthombeni, Pillay e Strnat 2005), (Mthombeni, Pillay e Strnat 2007) e (Manyage e Pillay 2008).

Marketos, Zurek e Moses nos dois artigos encontrados na bibliografia nos anos de 2007 e 2008, estudam o caminho magnético do aparelho de Epstein, com o fim de provarem que se encontra mal definido e apresentam as perdas obtidas para caminhos mais precisos. Para provarem os seus resultados, em ambos os artigos utilizam o método duplo diferencial do quadro de Epstein, que consiste em utilizar dois quadros de Epstein, medindo os parâmetros nas pernas do aparelho (Marketos, Zurek e Moses 2007) e (Marketos, Zurek e Moses 2008). A Figura 2.5, Figura 2.6 e Figura 2.7 apresentam os estudos realizados por estes investigadores para quatro diferentes tipos de aços elétricos, sendo eles o “aço 1” era o único aço de GNO com espessura de 0,50 mm, os restantes aços eram de GO com espessuras de 0,27 mm, diferindo entre si da seguinte forma: o “aço 2” encontrava-se cortado segundo a direção de laminagem, o “aço 3” apresentava-se cortado a 90° da direção preferencial de laminagem e por último o “aço 4” era de elevada permeabilidade.

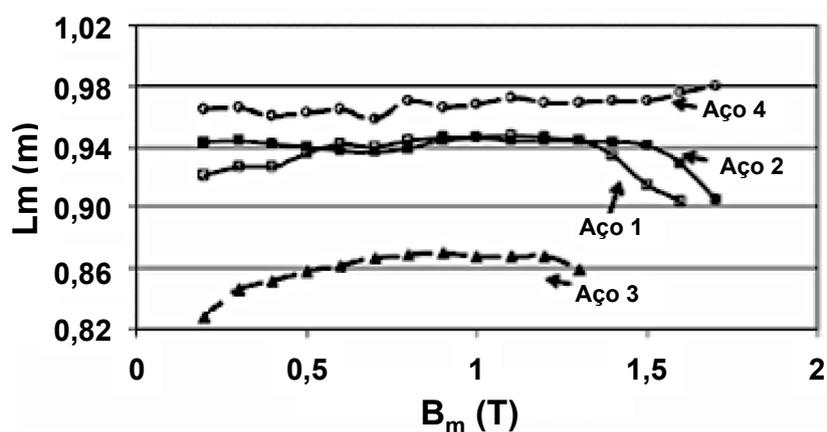


Figura 2.5 Caminho magnético efetivo para diferentes tipos de materiais.

Adaptado de (Marketos, Zurek e Moses 2007)

A Figura 2.6 e Figura 2.7 representam o estudo realizado nos aços elétricos “1” e “4” a diferentes frequências de funcionamento. Com a representação destas três figuras é possível verificar a influência que os diferentes tipos de materiais, frequência de funcionamento e permeabilidade magnética têm no caminho magnético do quadro de Epstein.

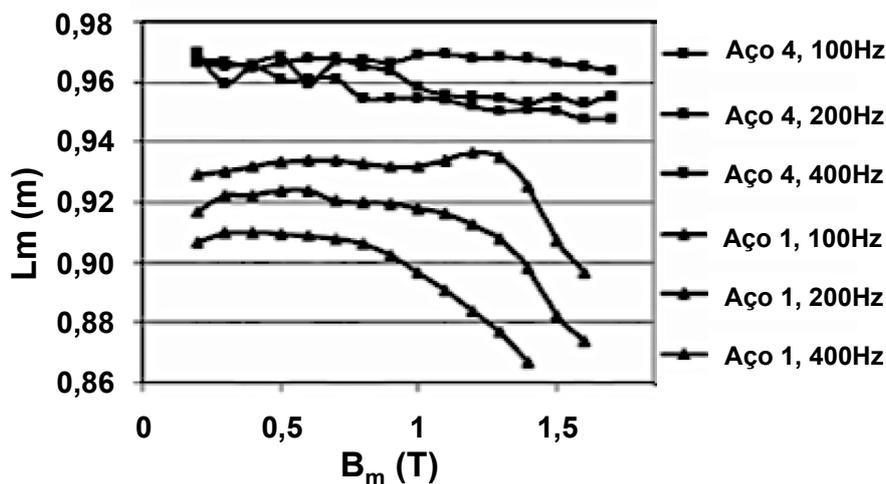


Figura 2.6 Influência da frequência no caminho magnético efetivo do QE.  
Adaptado de (Marketos, Zurek e Moses 2007)

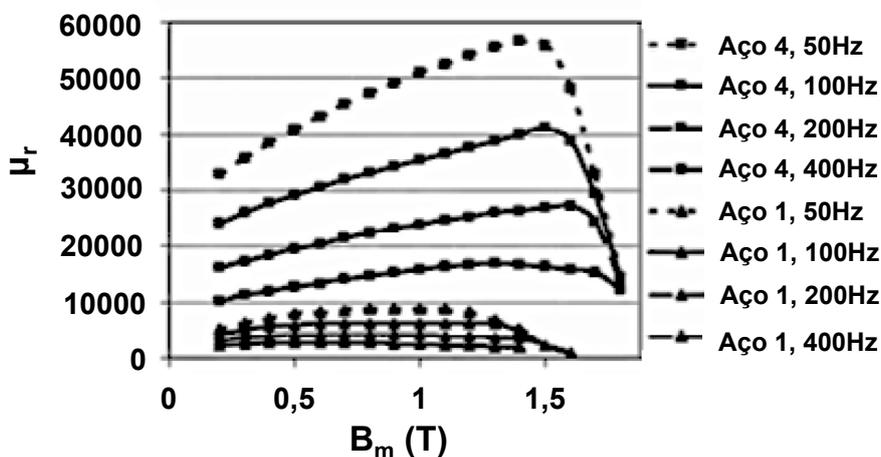


Figura 2.7 Variação da permeabilidade relativa com a frequência e a densidade de fluxo máxima.  
Adaptado de (Marketos, Zurek e Moses 2007)

Em 2014 Cheng, et al. para atingirem uma melhor modelização das propriedades magnéticas dos aços de GO, propõem que através de dois métodos de implementação (combinação de dois quadros menores e “*weighted processing*” de dois níveis) se caracterize estes aços. Testam chapas com diferentes ângulos de laminagem, para determinar as perdas

magnéticas específicas e caminho magnético à temperatura ambiente e, perdas a diferentes temperaturas de funcionamento (Cheng, et al. 2014).

Através do método diferencial de Epstein, onde combinam três aparelhos de Epstein de diferentes tamanhos para obter características de aços de grão orientado, Parente, et al. realizam um estudo aprofundado, no qual chegam à conclusão que este método apresenta vantagens, tais como, ignora o caminho magnético considerando apenas as pernas do aparelho, torna possível separar as perdas existentes nos cantos e que o caminho magnético do fluxo, depende não só do tipo de material e das suas características, mas também da densidade de fluxo magnético (Parent, et al. 2016).

Na Malásia, foram realizados dois estudos, o primeiro tendo em vista a caracterização dos aços de GO e de GNO através do cálculo das perdas magnéticas, separando-as em perdas nas pernas e nos cantos do aparelho de Epstein. Assim, este método tem em conta os valores das perdas existentes devido às fugas dos cantos (Daut, et al. 2009). Já o segundo artigo, pretende determinar a influência da diminuição da espessura das chapas de aço elétrico de grão não-orientado, chegando à conclusão que esta diminuição, diminui as perdas magnéticas, inclusive as perdas por correntes de Foucault (Yanawati, et al. 2013).

Num estudo comparativo das perdas magnéticas obtidas pelos métodos do toróide, quadro de Epstein e Single Sheet Tester, investigadores desenvolvem um método dinâmico das perdas por histerese e comparam-nas, chegando à conclusão que existe semelhança entre o QE e o SST (Zhang, et al. 2009).

Um estudo interessante porém fora do objeto da dissertação, trata da influência das harmônicas de frequência nas propriedades magnéticas dos materiais, apresentando formas de o corrigir e as perdas obtidas através do método do quadro de Epstein (Pereira Jr., et al. 2010).

Na Tabela 2.6 e Tabela 2.7 encontram-se alguns valores das perdas magnéticas referentes aos artigos mencionados.

**Tabela 2.7 Parte I – Exemplos de perdas em aços elétricos através de diferentes configurações.**  
**Informação retirada de [1] (Mthombeni, Pillay e Strnat 2005), [2] (Marketos, Zurek e Moses 2007), [3] (Mthombeni, Pillay e Strnat 2007),**  
**[4] (Marketos, Zurek e Moses 2008), [5] (Manyage e Pillay 2008), [6] (Zhang, et al. 2009), [7] (Daut, et al. 2009).**

Ano	Autor(es)	Localização	Aparelho de Medição	N	Material	$\epsilon$ (mm)	Freq. (Hz)	B(T)	Perdas (W/Kg)	Referência
2005	Mthombeni, Pillay e Strnat	USA	QE otimizado (nº amostras: 4)	280	M45	0,36	600	1,0	52	A New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements at High Frequencies and High Flux Densities, IEEE, (2005), p.598-600 [1]
								1,5	135	
							1 k	1,0	140	
								1,5	380	
2007	Marketos, Zurek e Moses	U.K.	2 QE (pequeno: 17,5 cm e normal: 25 cm)	700	GNO	0,50	200	1,0	15	A Method for Defining the Mean Path Length of the Epstein Frame, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.43, No.6, (2007), p.2755-2757 [2]
								1,5	40	
2007	Mthombeni, Pillay e Strnat	USA	QE otimizado (nº amostras: 4)	280	M19	0,47	600	1,0	47	New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements Under High Frequencies and High Flux Densities, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.22, No.3, (2007), p.614-620 [3]
								1,5	---	
							1 k	1,0	113	
								1,5	---	
2008	Marketos, Zurek e Moses	U.K.	2 QE (pequeno: 17,5 cm e normal: 25 cm)	700	GNO	0,50	50 (e 20% da 25° H*)	1,0	16	Calculation of the mean path length of the Epstein frame under non-sinusoidal excitations using double Epstein method, (2008), p.2542-2545 [4]
								1,5	27	
2008	Manyage e Pillay	---	QE otimizado (nº amostras: 4)	200	M19	0,47	4 k	1,0	1100	New Epstein Frame for Core Loss Measurements at High Frequencies and High Flux Densities, IEEE, (2008), p.1-6 [5]
								1,5	3200	
							6 k	1,0	2100	
								1,5	6000	
2009	Zhang, Alatawneh, Cheng e Pillay	---	SST	---	M19	0,47	400	1,0	20	Magnetic Core Losses Measurement Instrumentations and a Dynamic Hysteresis Loss Model, IEEE Electrical Power & Energy Conference, (2009) [6]
			QE	700	M19	0,47	400	1,0	20	
								1,5	50	
			Toroíde	---	M19	0,47	400	1,0	34	
								1,5	65	
2009	Daut, Asri, Fayzul, Anayet, Gomesh e Syatirah	Malaysia	QE otimizado otimizado ao material (nº amostras: 8)	700	GNO	0,03	50	1,0	0,6813	Power Losses on Grain Oriented and Non-Grain Oriented Materials Using Epstein Test for Electrical Machine Design, EEIES, (2009) [7]
								1,5	1,4203	
								1,0	0,4734	
					GO	0,03	50	1,5	0,9422	

(Nota para as Tabelas 2.6 e 2.7: N é o número de espiras;  $\epsilon$  é espessura da chapa; Freq. a frequência e B a densidade de fluxo magnético).

**Tabela 2.8 Parte II – Exemplos de perdas em aços elétricos através de diferentes configurações.**

Informação retirada de [8] (Pereira Jr., et al. 2010), [9] (Yanawati, et al. 2013), [10] (Parent, et al. 2016)

Ano	Autor(es)	Localização	Aparelho de Medição	N	Material	$\epsilon$ (mm)	Freq. (Hz)	B(T)	Perdas (W/Kg)	Referência		
2010	Pereira L, Mezaroba, Haffner e Pereira L.	Brasil	QE	700	E230 (Acesita) GNO	0,60	50	1,0	2,5	Análise e Medição de Propriedades Magnéticas dos Materiais em Diferentes Frequências e com Correção de Harmônicos, XVIII Congresso Brasileiro de Automática, (2010), p.2152-2159 [8]		
								1,5	5,0			
								100	1,0		6,5	
								150	1,5		16,0	
								180	1,0		11,0	
1,5	30,0											
1,0	16,0											
1,5	40,5											
2013	Yanawati, Norjasmi, Syatirah, Shafiqin, Pungut, Baharudin e Azuddin	Malaysia	QE (nº amostras: 12 cada)	700	GNO	0,35	50	1,0	1,7537	Nominal Power Loss on 0,35 mm and 0,50 mm Thicknesses of Non-oriented Steel Sheets Using Epstein Tester Frame, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference, (2013), p.600-602 [9]		
								1,5	3,4894			
								1,8	4,3440			
								0,50	50		1,0	1,8241
								1,5	3,8360			
1,8	5,0557											
2016	Parent, Penin, Lecoingt, Brudny e Belgrand	France	3 QE (QE pequeno: 22 cm; QE médio: 58,4 cm; QE grande: 94,9 cm); Cada braço de cada quadro com 7 lâminas	700	GOEP M105-30P	0,30	50	1,0	0,33	Determination of Specific Losses in the Limbs of an Epstein Frame Using a Three Epstein Frame Methodology Applied to Grain Oriented Electrical Steels, Sensors, (2016), p.1-10 [10]		
								1,5	0,72			
								1,7	0,95			
					GOEP M140-30S	0,30	50	1,0	0,40			
								1,5	0,88			
								1,7	1,23			
					GOEP M085-23P	0,23	50	1,0	0,25			
								1,5	0,57			
								1,7	0,76			
								1,0	0,38			
GOEP M135-35P	0,35	50	1,5	0,80								
			1,7	1,05								

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

No capítulo 3 serão explicados alguns conceitos teóricos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. Apresentar-se-á a descrição de diversas características dos materiais magnéticos com um foco especial no ciclo de histerese, curva de primeira magnetização e perdas magnéticas. Também se abordará os diferentes materiais magnéticos macios e o transformador monofásico em vazio, os quais serão posteriormente utilizados nos ensaios.

#### 3.1 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Materiais magnéticos são materiais que ao serem submetidos à acção de um campo magnético produzem eles próprios, um campo de indução magnética  $B_{mat}$ , quer isto dizer que exibem capacidade *de se magnetizar ou polarizar magneticamente* (Robert 1989). Grande parte deste tipo de materiais não apresenta magnetismo espontâneo, devido aos seus domínios magnéticos não se encontrarem alinhados. Apenas quando expostos a um campo magnético externo, os domínios assumem a mesma direcção do campo magnético que lhes foi aplicado,  $H$  em  $A \cdot m^{-1}$ .

No vazio, o campo de indução magnética relaciona-se com o campo magnético da seguinte forma:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.1)$$

onde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  ( $H \cdot m^{-1}$ ) é a *permeabilidade magnética do vazio*.

Na presença de um material magnético, o campo de indução  $B$  no material é dado por:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.2)$$

no qual se define  $M$  vector magnetização, como o momento magnético amperiano por unidade de volume, com unidades  $A \cdot m^{-1}$ . No caso linear a magnetização pode ser dada pela expressão:

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad (3.3)$$

onde  $\chi_m$  é uma grandeza adimensional designada de *susceptibilidade magnética* do material. Substituindo a equação (3.3) em (3.2) e rearranjando obtém-se

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} \quad (3.4)$$

Num meio linear, homogéneo e isotrópico, a indução magnética, que tem como unidade T (*tesla*), é dada pela seguinte expressão:

$$\mathbf{B} = \mu_0\mu_r\mathbf{H} = \mu\mathbf{H} \quad (3.5)$$

em que,  $\mu_r$  é a *permeabilidade magnética relativa* do material, que no caso do vazio vale um, sendo uma grandeza adimensional.  $\mu = \mu_0\mu_r$  ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ) é a *permeabilidade magnética absoluta* do material.

Relativamente ao comportamento magnético macroscópico os materiais magnéticos dividem-se em três grandes grupos: diamagnéticos<sup>1</sup>, paramagnéticos<sup>2</sup> e ferromagnéticos. Sendo que cada um destes grupos se caracteriza por responder de maneira distinta à acção de um campo magnético aplicado (Pronto 2010).

Tendo em conta o tema desta dissertação, os assuntos abordados vão-se centrar apenas nos materiais ferromagnéticos.

## 3.2 MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

Os materiais ferromagnéticos distinguem-se dos demais materiais magnéticos devido às suas características vantajosas. Apresentam uma magnetização interna  $\mathbf{M}$  e uma susceptibilidade magnética  $\chi_m$  bastante elevada e uma forte capacidade de concentrar e conduzir o fluxo magnético.

A forte magnetização espontânea que apresentam, deve-se ao alinhamento existente nos domínios magnéticos. Porém devido a cada domínio magnético adoptar aleatoriamente uma direcção de magnetização, o material encontra-se inicialmente macroscopicamente desmagnetizado. Tudo isto faz com que este tipo de materiais sejam de longe os mais utilizados em aplicações tecnológicas.

Ao aplicar um campo magnético externo a um material ferromagnético desmagnetizado, este responde orientando os seus domínios magnéticos segundo a direcção e sentido do campo que lhe foi aplicado, até que a saturação do material seja atingida (Pronto 2010). O campo magnetizante mantém-se mesmo após a remoção do campo aplicado.

Dentro dos materiais ferromagnéticos ainda é possível diferenciar outras duas classes de materiais. Os materiais magnéticos macios (MMM) e os materiais magneticamente duros (MMD), que se diferenciam pela sua facilidade/dificuldade de magnetizar e desmagnetizar, respectivamente.

---

1 Material diamagnético – apresenta magnetismo fraco com magnetização contrária ao sentido do campo magnético aplicado, exemplo são os materiais supercondutores.

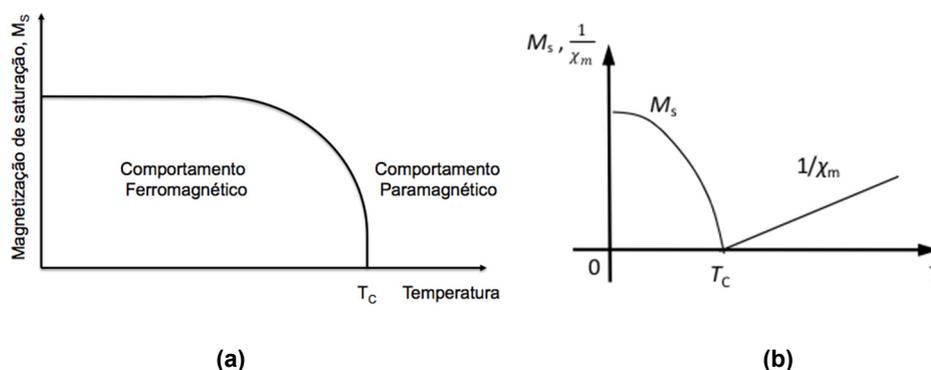
2 Material paramagnético – apresenta magnetismo fraco com magnetização no sentido do campo magnético aplicado.

### 3.2.1 EFEITOS DA TEMPERATURA NO FERROMAGNETISMO

Os materiais ferromagnéticos caracterizam-se por exibirem a magnetização de saturação<sup>3</sup>  $M_s$  dependente da temperatura como se pode ver na Figura 3.1. Acima de uma dada temperatura  $T_C$ , *temperatura de Curie*, a magnetização espontânea desaparece, fazendo com que o material se torne paramagnético. Esta temperatura depende do material em questão e pode ser alterada consoante a composição química do material. A variação da magnetização espontânea e da susceptibilidade magnética (definida em (3.3)) em função da temperatura, segue a Lei de Curie-Weiss, que é dada pela expressão,

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_C} \quad (3.6)$$

onde  $C$  é a constante de Curie,  $T$  a temperatura a que se encontra o material e  $T_C$  a temperatura de Curie.



**Figura 3.1 (a) Efeito da temperatura na magnetização de um material ferromagnético. Adaptado de (Pinho 2009). (b) Ferromagnetismo. Retirado de (Pronto 2010)**

Quando a temperatura de um material ferromagnético é aumentada, a energia térmica acrescentada aumenta a mobilidade dos domínios, facilitando o alinhamento destes mas impedindo-os também de se manterem alinhados quando o campo é removido. Consequentemente, a saturação magnética, a remanescência e o campo coercivo são todos reduzidos a altas temperaturas (Pinho 2009). Exemplos de materiais que se tornam ferromagnéticos à temperatura ambiente (e abaixo da temperatura de Curie) são o ferro, o níquel ou o cobalto (B. D. Cullity 1952) (Chikazumi 1964).

As propriedades magnéticas também são influenciadas por diferentes temperaturas de funcionamento, sabe-se que de um modo geral, o aumento da temperatura degrada algumas propriedades magnéticas dos materiais e melhora outras. Nomeadamente, diminui a indução

---

<sup>3</sup> Magnetização de saturação é o estado que se atinge quando ao se aumentar o campo magnético externo aplicado ao material não aumenta mais a magnetização do material.

de saturação, diminui a magnetização espontânea e, a permeabilidade magnética máxima e inicial começa por aumentar com o aumento da temperatura, para depois diminuir abruptamente junto ao ponto de Curie (Pronto 2010). Por outro lado, tem vantagens como o campo magnético coercivo e as perdas por histerese diminuírem com o aumento da temperatura e a resistividade elétrica do material aumentar, contribuindo para a diminuição das perdas clássicas (Pronto 2010).

A magnetostricção<sup>4</sup> varia com a temperatura, dependendo o tipo de variação, do material considerado.

### 3.2.2 CURVA DE PRIMEIRA MAGNETIZAÇÃO

A *curva de magnetização inicial* ou *curva de primeira magnetização* serve para representar graficamente a magnetização um material ferromagnético, relacionando valores de indução magnética  $B$  com a intensidade de campo magnético  $H$ .

Submetendo um material desmagnetizado a um campo magnético  $H$  crescente e registando a indução magnética obtem-se a *curva B-H*. Através desta representação gráfica é possível verificar a não linearidade existente entre a magnetização do material e o campo externo ao qual é sujeito. Na Figura 3.2 está representada esquematicamente uma curva de magnetização inicial padrão, onde é possível destacar quatro zonas distintas correspondentes às diferentes etapas de magnetização.

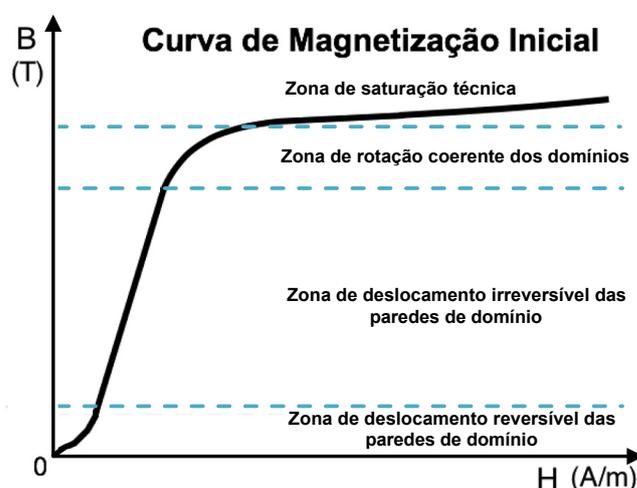


Figura 3.2 Curva de Primeira Magnetização. Adaptado de (Pronto 2010)

Partindo de um estado inicial onde a magnetização resultante é nula devido à orientação aleatória dos domínios magnéticos é aplicado um campo magnético pouco intenso.

---

<sup>4</sup> Medida da variação das dimensões do material por ação de um campo magnético  $\lambda = \Delta l/l_i$ .

Nesta primeira zona, as paredes de domínio começam a deslocar-se fazendo com que os domínios magnéticos que se encontram favoravelmente alinhados com o campo se deformem e cresçam. Caracteriza-se por ser uma das etapas reversível, o que significa que se o campo aplicado for retirado, o material volta ao seu estado desmagnetizado.

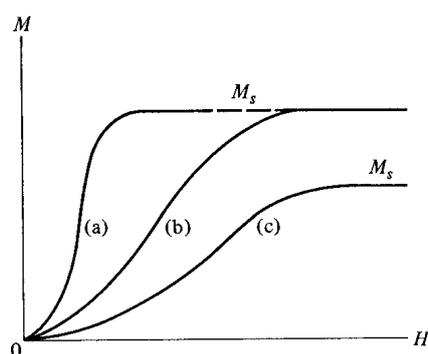
À medida que se aumenta progressivamente o campo magnético, o material começa a responder de forma diferente passando a encontrar-se numa zona irreversível. Tal característica deve-se ao fato do movimento das paredes de domínio não ser contínuo, e dar-se por saltos bruscos denominados saltos de *Barkhausen*, que correspondem à ancoragem e libertação de paredes de domínio. É nesta zona que a permeabilidade magnética absoluta é maior, fazendo com que a *curva B-H*, seja muitas vezes praticamente linear.

A zona de rotação coerente dos domínios magnéticos corresponde ao joelho da curva *B-H*. Nesta região o processo volta a ser reversível e o movimento das paredes cessa, dando início à rotação coerente dos domínios magnéticos segundo o campo magnético aplicado (Pronto 2010).

Por último, atinge-se a *zona de saturação técnica* onde os domínios magnéticos tendem a estar praticamente todos alinhados paralelamente ao campo magnético aplicado.

Se se continuar a aumentar o campo atinge-se a *saturação magnética* do material, e por mais que se aumente, os domínios não podem rodar mais, fazendo com que a densidade de fluxo magnético se torne praticamente independente do valor da intensidade de campo aplicado e portanto, tornando a curva praticamente linear com declive igual à permeabilidade magnética do vazio,  $\mu_0$ .

Uma material magnético pode ser caracterizado pela sua curva de magnetização, exemplo disso é a Figura 3.3.



**Figura 3.3** Curva de magnetização de diferentes materiais. Retirado de (Cullity e Graham 2009)

Numa referência supra foi mencionado que um material é designado como sendo MMM pela sua facilidade em se magnetizar e desmagnetizar, atingindo assim de forma mais “rápida” a saturação, comparativamente com os demais materiais, exemplo disso é o material representado na Figura 3.3 (a). A saturação em outros materiais, que geralmente,

apresentam diferentes magnetizações de saturação  $M_s$ , pode necessitar de maiores campos aplicados, como se vê em Figura 3.3 (c). Tais materiais designam-se MMD. Às vezes o mesmo material pode ser tanto magneticamente macio ou duro, dependendo da sua condição física: assim a curva (a) pode estar relacionada com um material bem recozido, e a curva (b) com um estado de arrefecimento rápido (Cullity e Graham 2009).

### 3.2.3 CICLO DE HISTERESE MAGNÉTICA

Considere-se um material que foi primeiramente magnetizado, descrevendo a curva de magnetização inicial, ilustrada pela curva (1) da Figura 3.4, este atingiu a indução de saturação  $B_s$ . Caso se continue a aumentar o campo magnético aplicado atingir-se-á o ponto máximo de campo magnético  $H_m$ , que corresponde ao valor máximo de indução  $B_m$ . Se em seguida se retirar o campo magnético aplicado, o material não irá voltar ao seu valor inicial de magnetização nula, em vez disso, segue a curva (2), ou seja, apresenta um atraso de campo de indução  $B$  em relação ao campo magnético aplicado  $H$ . Este fenómeno designa-se *histerese magnética*.

Reduzindo gradualmente o campo de  $H_m$  até  $H = 0$  verifica-se que para o mesmo  $H$ , existem dois valores de indução, e que mesmo na ausência de campo magnético, persiste, uma densidade de fluxo, denominada, densidade de fluxo magnético remanescente,  $B_r$ . Para que a densidade de fluxo seja eliminada, é necessário aplicar um campo magnético de sentido contrário (por inversão do sentido da corrente no enrolamento de magnetização), designado campo coercivo  $H_c$ . Ao traço (3) presente no gráfico seguinte denomina-se *característica de desmagnetização*, sendo muito importante para o estudo dos materiais magnéticos permanentes (Pronto 2010).

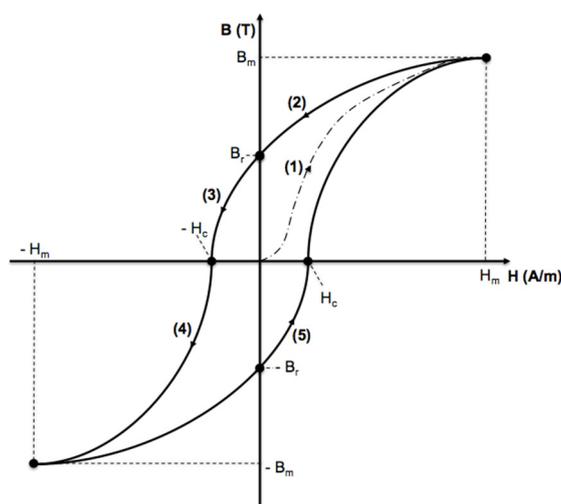


Figura 3.4 Ciclo de histerese magnética. Adaptado de (Pronto 2010)

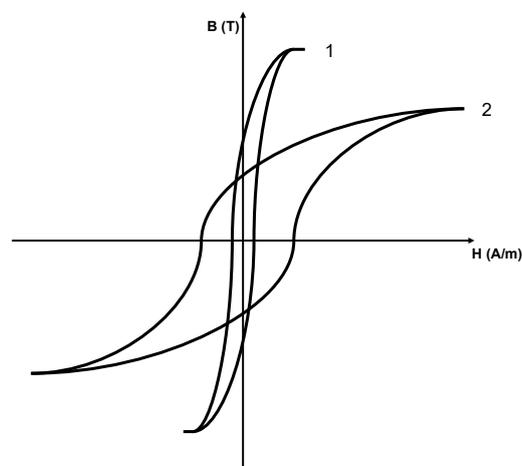
Levando novamente o campo  $H$  até  $-H_m$ , a magnetização do material é alcançada em sentido inverso, atingindo a saturação. Partindo-se desta magnetização negativa e aplicando um campo magnético de sentido positivo, haverá novamente uma indução remanescente, porém de sentido contrário,  $-B_r$ , tal como anteriormente, é necessário aplicar uma força coerciva positiva para eliminar a densidade remanescente (troço 5 no gráfico). Caso se leve, novamente o campo magnético até ao seu valor máximo o ciclo fecha-se – *Ciclo de histerese*.

O conhecimento do ciclo de histerese é essencial na escolha e análise de materiais ferromagnéticos. Uma das suas características fundamentais é que a área do ciclo, dá-nos uma ideia da aplicabilidade do material e representa uma medida direta das perdas magnéticas no material por unidade de volume (e por ciclo), pelo que a minimização destas para o rendimento dos transformadores, é fundamental.

Refere-se acima a existência de materiais magnéticos macios e duros, que se distinguem pela sua característica de magnetização, sendo fácil no caso dos MMM e difícil para os MMD. Pelo que foi mencionado neste capítulo, sabe-se que a facilidade de magnetização está relacionada com a área do ciclo de histerese e por sua vez, com as perdas magnéticas existentes no material.

Os materiais magneticamente macios apresentam um ciclo de histerese mais estreito, com campos coercivos de valores relativamente pequenos. Este tipo de materiais tem uma magnetização elevada com perdas magnéticas baixas. Tais características são fundamentais para a construção de núcleos de transformadores. Daí ter-se optado por este tipo de materiais.

Já os materiais magneticamente duros apresentam áreas de ciclos largas, indicado para a construção de magnetos permanentes, em virtude da necessidade de existir uma magnetização remanescente que não seja destruída com baixos campos coercivos.



**Figura 3.5 Ciclos de histerese:**

**(1) Materiais Magneticamente Macios; (2) Materiais Magneticamente Duros**

### 3.2.3.1 PROCESSOS DE DESMAGNETIZAÇÃO

A desmagnetização dos materiais é um processo necessário, para uma boa estimativa das perdas magnéticas. Os métodos de desmagnetização usuais entre os materiais ferromagnéticos, são o processo de *desmagnetização cíclica* e o processo de *desmagnetização térmica*. Estes dois métodos, por norma, conduzem a estruturas magnéticas internas diferentes, todavia em termos práticos essas diferenças são irrelevantes (Cullity e Graham 2009).

No primeiro processo a desmagnetização é atingida, pela sucessiva aplicação de campos alternados de amplitude progressivamente inferior, como se pode ver na Figura 3.6, até que se atinge a origem (Cullity e Graham 2009).

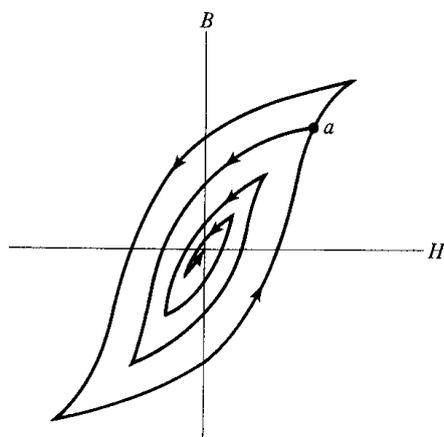


Figura 3.6 Processo de desmagnetização cíclica. Retirado de (Cullity e Graham 2009)

Uma alternativa a este processo é sujeitar o material a temperaturas superiores à temperatura de Curie, tornando-o paramagnético, e em seguida arrefecê-lo sem a presença de campo magnético (Cullity e Graham 2009).

## 3.3 MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS

Segundo a definição, materiais magneticamente macios são fáceis de magnetizar e desmagnetizar, apresentam ciclos de histerese estreitos com valores de coercividade baixos (inferiores a  $1000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ), que se traduz em perdas magnéticas baixas (na ordem dos  $4 \text{ W} \cdot \text{Kg}^{-1}$  a 50 Hz), têm permeabilidade magnética elevada (superior a 5000), correntes de Foucault baixas e elevadas saturações de magnetização.

Dentro dos MMM existem três classes de materiais, são eles:

- ❖ Aços elétricos;
- ❖ Materiais magnéticos amorfos;
- ❖ Ligas ferro-níquel.

Os aços elétricos são utilizados por terem uma qualidade única, a sua capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado (F. Landgraf 2002). São usados em inúmeras aplicações, tais como equipamentos para geração e utilização de energia elétrica (Bohn, Gundel, et al. 2004). Podem-se dividir em três grupos, sendo eles:

- ❖ Aços de baixo carbono;
- ❖ Aços de grão não orientado (GNO);
- ❖ Aços de grão orientado (GO).

Uma característica dos dois últimos aços apresentados é, terem na sua constituição silício, podendo ser designados por *aços siliciosos* ou *aços silício*.

### **3.3.1 AÇOS DE BAIXO CARBONO**

Os aços de baixo carbono foram dos aços elétricos os primeiros a serem utilizados em núcleos de transformadores, motores e geradores. Todavia hoje em dia, o seu uso está limitado a núcleos de pequenos motores onde as perdas magnéticas e conseqüentemente, a eficiência energética não são parâmetros fundamentais (Cullity e Graham 2009).

Contendo teores de carbono de aproximadamente 0,03% do seu peso total, as chapas de baixo carbono, são dos aços elétricos fabricados com custos mais reduzidos e produzidos em larga escala. O seu teor de carbono pode ir até 0,06% caso o aço seja descarbonatado (remover o dióxido de carbono) no recozimento final, realizado após o corte da lâmina (Cardoso 2005).

Apresentam uma textura cristalográfica magneticamente aceitável apenas após uma segunda cristalização (Cullity e Graham 2009) e dentro de um intervalo de elevadas temperaturas,  $815\text{ °C} \leq T \leq 980\text{ °C}$  num período de uma a seis horas (Sgobba 2011), que pode ser quebrada aplicando temperaturas diferentes à do seu ponto de cristalização. Uma desvantagem deste tipo de aços elétricos é o envelhecimento magnético, que se deve à existência de precipitados (Sgobba 2011).

### **3.3.2 AÇOS DE GRÃO NÃO ORIENTADO (GNO)**

Tal como referido no Estado da Arte, as ligas de ferro-silício de grão não orientado foram descobertas acidentalmente por Sir Robert Hadfield em 1882. As primeiras produções datam o início do século XX (Pinho 2009) e rapidamente tornaram-se os materiais mais utilizados na construção de núcleos de transformadores, motores e geradores (Bohn 2005).

Os aços elétricos de grão não orientado, apresentam uma textura aproximadamente isotrópica, ou seja, não existe orientação cristalográfica preferencial que é ideal para máquinas elétricas rotativas de grande potência (e também em pequenos transformadores),

onde o campo magnético muda continuamente de direção e portanto, interessa uniformizar as propriedades magnéticas do material em qualquer direção (Pronto 2010). Assim sendo, os aços de GNO apresentam boas propriedades em qualquer direção considerada (Bohn 2005).

A composição destas ligas pode conter teores de silício (1,0 – 3,7%), podendo ter também algum alumínio (0,2 – 0,8%) e algum manganês (0,1 – 0,3%) adicionado ao ferro (Pronto 2010).

A introdução de silício às ligas de ferro altera as propriedades elétricas, magnéticas e mecânicas do aço (Bohn, Gundel, et al. 2004). Aumenta a resistividade elétrica, que faz com que as correntes parasitas criadas pela variação do campo magnético diminuam, ou seja, diminui as perdas por correntes de Foucault e conseqüentemente as perdas magnéticas. Diminui a anisotropia do material, fazendo com que o campo magnético possa ser aplicado em qualquer direção sem ocorrerem grandes diferenças segundo as direções (Bohn, Gundel, et al. 2004). Ocorre uma diminuição da magnetostrição, que conduz a menores alterações dimensionais no processo de magnetização e desmagnetização e a uma menor sensibilidade das propriedades magnéticas.

Contudo a adição de *Si* diminui a possibilidade de se poder aplicar elevados campos magnéticos ao material, fazendo assim com que este sature com maior facilidade. Outra desvantagem, é tornar o material mais difícil de maquinar, pois com o aumento de resistividade, torna-se mais frágil, limitando assim, a espessura das chapas (normalmente produzidas por laminagem a quente com espessura padrão de 0,35, 0,50 e 0,65 mm (Moses 1990)).

A adição de alumínio ou manganês também diminui as perdas por correntes de Foucault (Sgobba 2011). São ligas mais dúcteis e com maior resistividade magnética, porém estas chapas oxidam com maior facilidade, o que origina um endurecimento na sua superfície, desgastando os equipamentos utilizados no seu fabrico e utilização.

As perdas existentes neste tipo de materiais são maioritariamente por histerese, podendo atingir 60% a 70% das perdas magnéticas totais. Apresentando perdas magnéticas totais específicas, a  $B_m = 1,5$  T e a 50 Hz, que variam entre 3 e 5 W/Kg. As perdas específicas nos aços de GNO, são superiores às perdas dos aços de GO (Pronto 2010).

As propriedades dos aços de GNO são dependentes de vários parâmetros tais como a composição química da liga, as impurezas e/ou precipitados constituintes, o tamanho de grão e a textura. Sendo todos estes parâmetros resultado do processo de fabricação (Bohn 2005).

### 3.3.3 AÇOS DE GRÃO ORIENTADO (GO)

No caso de dispositivos de potência, que se privilegie uma direção preferencial de magnetização, os aços de grão orientado (GO) são os indicados. Desenvolvidos em 1934 pelo metalurgista inglês Norman P. Goss, constituem um processo de laminagem a frio característico, capaz de potenciar as qualidades magnéticas dos aços de silício, comparativamente àquelas obtidas com a laminagem a quente.

Apesar de descobertos em 1934 só começaram a ser produzidos por volta de 1945 e as suas propriedades têm vindo a ser melhoradas desde então (Cullity e Graham 2009).

Norman P. Goss descobriu que ao laminar a frio um aço silicioso com recozimentos intermédios e um recozimento final de elevada temperatura, produz uma amostra com muito melhores qualidades magnéticas na direção de laminagem.

A principal diferença entre os aços de GO e os de GNO está na textura cristalográfica de ambos (F. Landgraf 2002). Os aços de grão orientado apresentam uma textura magnética favorável, designada *textura de Goss*, que é produzida pela recristalização secundária durante o processo de recozimento a elevadas temperaturas.

A *textura de Goss* caracteriza-se por ter uma das direções [100] preferenciais de magnetização alinhada paralelamente à direção de laminagem e ao plano de chapa, como se ilustra na Figura 3.7, o que se traduz em excelentes propriedades magnéticas segundo esse eixo.

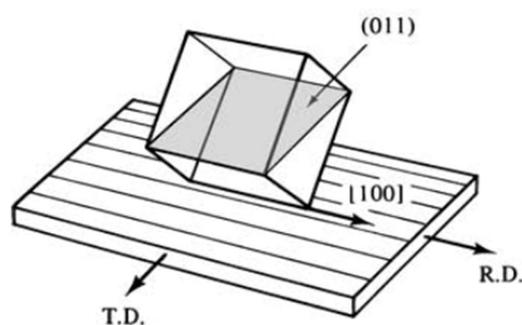


Figura 3.7 Textura de Goss. Retirado de (Cullity e Graham 2009)

Existem diferenças bastante acentuadas nas duas texturas de recristalização existentes no processo de fabrico dos aços de grão orientado.

A recristalização primária ocorre quando um metal trabalhado a frio é aquecido até uma temperatura na qual, novos grãos livres de tensões, se podem nuclear e crescer ao longo de uma matriz trabalhada a frio (Cullity e Graham 2009).

A recristalização secundária, por outro lado, é tipo particular de crescimento de grão, o qual por vezes se designa de descontínuo, exagerado ou anormal, podendo não acontecer em

todos os materiais. Ocorre quando o crescimento do grão é inibido e o material é recozido, durante um longo período de tempo, a temperatura muito superior ao necessário, o que resulta num crescimento preferencial do tamanho do grão (TG), passando a exibir, em alguns casos um TG com tamanho igual à espessura da chapa (Cullity e Graham 2009), ou seja, um único grão ao longo da sua espessura.

Apesar do processo de fabrico dos aços de silício de grão orientado poderem diferir consoante o fabricante, existem alguns passos essenciais na sua produção (Cullity e Graham 2009):

- i. Laminagem a frio, reduzindo em mais de 50% a espessura final do material;
- ii. Recristalização e descarbonatação, a 800°C numa atmosfera de hidrogénio húmido; e
- iii. Recozimento numa atmosfera de hidrogénio seco a 1100 – 1200 °C de modo a produzir a textura de recristalização secundária.

O teor de silício nos aços de GO varia entre 2,2 – 3,2 %, a espessura das chapas encontra-se em valores iguais ou inferiores a 0,35 mm com um TG de aproximadamente 5 mm. Apresentam perdas magnéticas totais específicas, a  $B_m = 1,5$  T e a 50 Hz, na ordem de 1 W/Kg (Pronto 2010).

É importante que as partículas ou compostos, que inibem o crescimento normal do grão sejam removidas aquando do último tratamento térmico, caso contrário podem agir como centros de ancoragem, aumentando o campo coercivo.

As propriedades magnéticas ao longo da direção de laminagem são excelentes, porém em outras direções as propriedades diminuem drasticamente. A ductilidade destes aços também difere: a percentagem de deformação é de apenas 8% na direção de laminagem, comparativamente com os 28% na direção transversal (Cullity e Graham 2009).

Devido às suas propriedades magnéticas serem tão influenciadas pela direção, o corte e a montagem destas chapas num transformador deve ser feito com algum cuidado, por forma a que o fluxo magnético seja conduzido paralelamente à direção de laminagem das chapas (Cardoso 2005).

Os aços de grão orientado podem-se ainda dividir em (Pronto 2010):

- ❖ Aços de grão orientado convencionais – GOC (descritos até aqui) e os
- ❖ Aços de grão orientado de elevada permeabilidade – GOEP, apresentam campos coercivos e perdas histeréticas inferiores às dos convencionais, e os valores mais elevados de permeabilidade, devido à ausência de centros de ancoragem e à presença de grãos grandes muito bem orientados.

### 3.4 PERDAS MAGNÉTICAS

A variação de indução magnética num material ferromagnético provoca sempre uma dissipação de energia.

A importância da determinação destas perdas é de grande relevância quando se pretende projetar um transformador. Aspectos como o que as causou, quais os fatores que as influenciaram e o modo como se podem minimizar, têm grande peso na otimização do rendimento destes dispositivos.

As perdas magnéticas totais num material ferromagnético quando sujeito à ação de um campo de indução magnético variável no tempo dividem-se em:

$$P_t = P_h + P_{cl} + P_{exc} \quad (3.7)$$

onde  $P_h$  representa as *perdas por histerese*,  $P_{cl}$  designam-se por *perdas por correntes de Foucault clássicas* e  $P_{exc}$  são as chamadas *perdas por correntes de Foucault excedentes* ou *anómalas* (Pronto 2010).

Uma outra forma de representar as perdas magnéticas totais é dividi-las em *perdas estáticas* e *perdas dinâmicas*. Nas primeiras inclui-se apenas as perdas por histerese, e nas segundas as perdas por correntes de Foucault clássicas e anómalas.

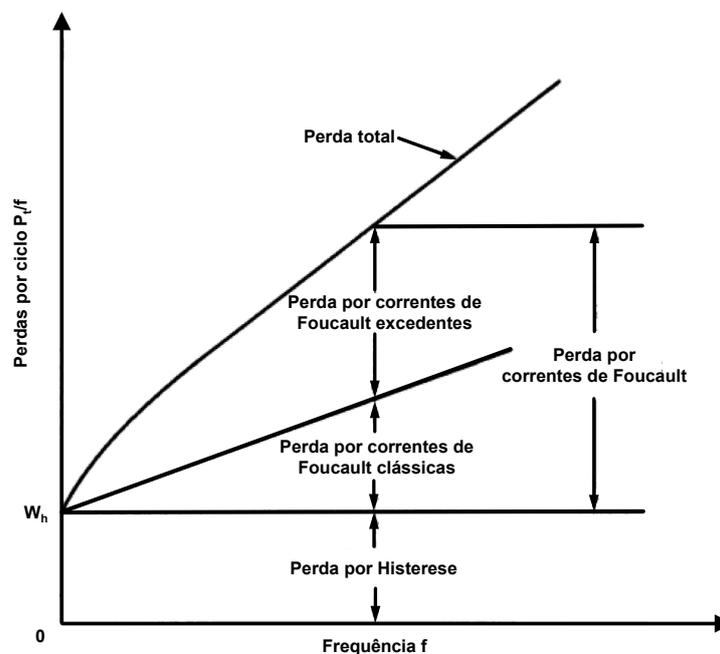


Figura 3.8 Representação convencional das perdas magnéticas num transformador

Adaptado de (Cullity e Graham 2009)

### 3.4.1 PERDAS POR HISTERESE

As perdas por histerese num material ferromagnético são proporcionais à área do ciclo de histerese, obtido em regime quasi-estático ( $f < 0,1$  Hz), dependendo do volume do material  $V_{ol}$  e da frequência de operação  $f$ .

No cálculo destas perdas considere-se, por exemplo o ciclo de histerese presente na Figura 3.9, obtido a partir de um solenóide de comprimento  $\mathcal{L}$  e secção transversal  $S$ , com  $N$  espiras. Ao se aplicar uma corrente  $i$  às espiras, o campo magnético criado vale, segundo a *Lei de Ampère*:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni \quad (3.8)$$

Esse é o campo magnético num determinado ponto  $P$  do gráfico B-H. Se num intervalo de tempo  $dt$ , o campo  $H$  aumentar, a densidade de fluxo magnético  $B$  aumentará  $dB$ . A força eletromotriz (*f. e. m.*) induzida na bobina, em resultado desta variação será:

$$\varepsilon(t) = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -N \cdot \frac{d(BS)}{dt} = -NS \cdot \frac{dB}{dt} \quad (3.9)$$

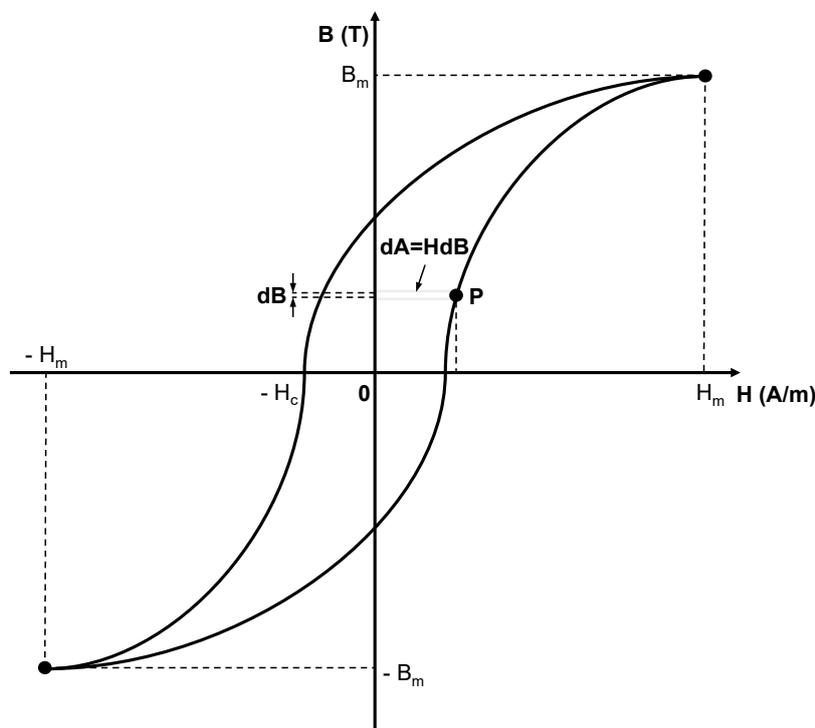


Figura 3.9 Ciclo de histerese - cálculo de  $P_h$

A tensão  $u(t)$  que é necessária aplicar para neutralizar a *f.e.m.* terá sentido contrário à apresentada em (3.9).

A potência que é necessária fornecer ao sistema é

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = NS \cdot \frac{dB}{dt} \cdot i \quad (3.10)$$

Assim sendo, a energia fornecida neste intervalo de tempo é

$$E = \int p(t) dt = NS \cdot dB \cdot i \quad (3.11)$$

De (3.8) vem  $E = H \cdot LS \cdot dB$  onde  $LS = V_{ol}$  é o volume da amostra em  $m^3$ , ou seja, a área do ciclo de histerese é dada por:

$$\frac{E}{V_{ol}} = \oint H dB \quad (3.12)$$

Multiplicando pela frequência  $f (= 1/T)$ , obtém-se a potência de perdas, ou seja, as perdas por histerese, em  $W \cdot Kg^{-1}$ .

$$P_h = V_{ol} \cdot \oint H dB \cdot f \quad (3.13)$$

Se o ciclo de histerese for obtido em regime dinâmico, a área do ciclo não representará apenas a parcela das perdas histeréticas, mas sim o somatório de todas as perdas e considerar-se-á como as perdas totais na amostra. Isto é, em regime dinâmico a área do ciclo de histerese é uma medida da energia total dissipada no material por unidade de volume (Pronto, Análise de perdas em sistemas de energia que empregam supercondutores de alta temperatura 2010).

### 3.4.2 PERDAS POR CORRENTES DE FOUCAULT CLÁSSICAS

Segundo a *lei de Faraday*, existem nos materiais forças eletromotrizes induzidas provenientes da variação temporal do campo de indução magnética  $B(t)$ , que devido à condutividade do material, originam as correntes de Foucault (em inglês “eddy currents”).

As perdas clássicas são calculadas com base nas equações de Maxwell considerando o material perfeitamente homogêneo em termos magnéticos, ou seja, ignorando a estrutura de domínios e a correspondente diferença de permeabilidades existente na massa do material (Pronto 2010). Podem ser calculadas pela expressão que se segue.

$$P_{cl} = \frac{(\pi \cdot e \cdot B_m \cdot f)^2}{6 \cdot \rho \cdot d_m} \quad (3.14)$$

onde  $e$  é a espessura da chapa,  $B_m$  a indução máxima no material,  $f$  a frequência de operação,  $\rho$  a resistividade do material e  $d_m$  a densidade do material. O sistema de unidades internacional define a grandeza referente às perdas clássicas como sendo o  $W \cdot Kg^{-1}$ .

O processo existente para minimizar esta parcela das perdas magnéticas baseia-se na escolha de um material que apresente uma maior resistividade elétrica e uma espessura de chapa reduzida (Figueira 2013).

### 3.4.3 PERDAS POR CORRENTES DE FOUCAULT EXCEDENTES

Resultantes do movimento em larga escala das paredes de domínios e respectiva rotação dos domínios magnéticos que ocorre na zona do joelho da curva de magnetização, estas perdas foram descobertas pela comparação das perdas magnéticas totais em regime dinâmico com a soma das perdas por histerese medidas em regime quasi-estático com as perdas por correntes de Foucault obtidas pela expressão acima. Verificou-se que existia uma discrepância entre ambas, pelo se chamou a esse diferença perdas excedentes ou anómalas,  $P_{exc}$  (Pronto 2010).

$$P_{exc} = P_t - P_h - P_{cl} \quad (3.15)$$

Por forma a minimizar este tipo de perdas, utilizam-se materiais com tamanho de grão inferior, resultando assim numa menor distância percorrida pelas paredes dos domínios magnéticos (Figueira 2013).

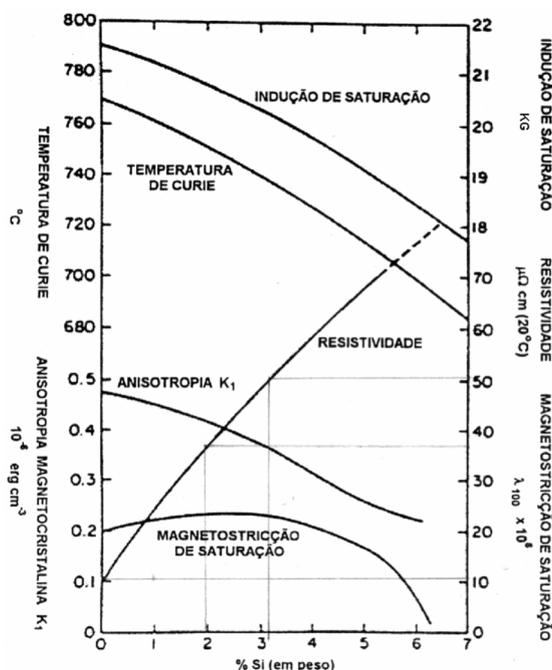
### 3.4.4 EFEITOS DA MICROESTRUTURA NAS PERDAS MAGNÉTICAS DOS AÇOS ELÉTRICOS

As propriedades magnéticas dos aços elétricos são função direta da sua microestrutura (Cardoso 2005), existindo uma relação de dependência entre as perdas magnéticas e os vários fatores que afetam a microestrutura. Destacam-se os seguintes (Pronto 2010):

- ❖ Composição química do material;
- ❖ Impurezas e/ou precipitados;
- ❖ Tamanho de grão;
- ❖ Textura cristalográfica;
- ❖ Deformação plástica.

Tal como mencionado em 3.3.2 a composição química dos materiais altera em muitos aspetos as suas características. Alterando quimicamente os aços elétricos, através de adições de silício (maioritariamente), alumínio, entre outros, almeja-se aumentar a resistividade elétrica, reduzindo as correntes de Foucault, e conseqüentemente as perdas dinâmicas. A adição de alumínio contribui para melhorar a textura cristalográfica do material, enquanto a existência de teores de manganês favorece o crescimento de grão (Cardoso 2005).

Em contrapartida algumas desvantagens ocorrem com estas adições, o material fica mais rígido mecanicamente, limitando a espessura das chapas, muito importante para as perdas clássicas, as chapas oxidam com maior facilidade, que se traduz num envelhecimento magnético mais rápido.



**Figura 3.10** Variação de algumas propriedades intrínsecas do ferro em função do teor de silício.  
Retirado de (Littmann 1971)

A densidade de impurezas e/ou precipitados e tamanho de grão influenciam bastante as perdas por histerese e as perdas excedentes. As impurezas suscetíveis de criar inclusões<sup>5</sup> são os nitratos, sulfuretos, óxidos e carbonetos, que atuam como pontos de ancoragem limitando o crescimento do grão e dificultam a uniformização da textura cristalográfica.

<sup>5</sup> Região do material com magnetização espontânea diferente da magnetização do material que a rodeia.

Aços sem recozimento, fazem com que as perdas por histerese e excedentes aumentem muito. Enquanto os aços com recozimento, fazem com que o tamanho de grão aumente e a maioria dos pontos de ancoragem sejam eliminados, diminuindo bastante as perdas por histerese, porém as perdas anómalas permanecem elevadas.

O tamanho de grão ótimo seria entre 100 e 150  $\mu\text{m}$  no entanto, industrialmente não se conseguem produzir chapas com essas características e o tamanho usual do TG varia entre 3 e 5 mm (Pronto 2010). Segundo (Campos, Teixeira e Landgraf 2005), o tamanho de grão ótimo é inversamente proporcional à frequência de operação. Assim quando se pretende diminuir o tamanho de grão ótimo, afeta-se a resistividade que diminui, e por sua vez a frequência de trabalho e a espessura da amostra aumentam.

Por fim, a deformação plástica tem influência da estrutura dos domínios, provocando tensões mecânicas que aumentam a coercividade do material, o que aumenta as perdas por histerese.

### **3.5 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO EM VAZIO**

O transformador é essencialmente uma máquina elétrica estática, capaz de realizar a transformação de energia elétrica de um circuito para o outro. Apresenta características construtivas singulares que se dividem em dois componentes fundamentais: enrolamentos de material condutor e núcleo de material magnético macio.

O princípio físico elementar de um transformador é a existência de indução mútua entre dois circuitos elétricos que se encontram ligados magneticamente através de um fluxo magnético comum, chamado fluxo principal (Figueira 2013).

Em seguida descreve-se o princípio de funcionamento, as equações gerais e o esquema elétrico do transformador, bem como o ensaio que permite determinar as perdas magnéticas e as especificações dos transformadores a ensaiar.

#### **3.5.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR**

A lei geral da indução, também designada por *lei de Faraday*, em homenagem ao mesmo, é a base do princípio de funcionamento dos transformadores. O fenômeno da indução eletromagnética acontece quando um circuito magnético é submetido a um campo magnético variável no tempo e aparece nele uma corrente elétrica cuja intensidade é proporcional às variações de fluxo.

Na sua forma mais simples o transformador consiste em dois enrolamentos de fio de material condutor, a que se designam de primário e secundário, descritos na Figura 3.11 por  $N_1$  e  $N_2$ , que geralmente envolvem os braços do núcleo de material ferromagnético.

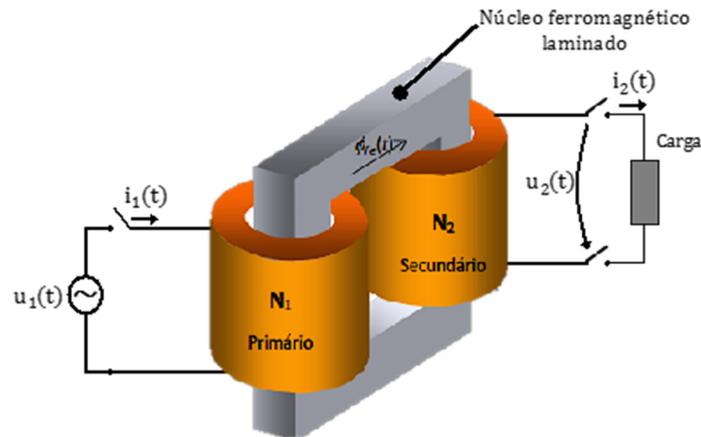


Figura 3.11 Esquema de um transformador monofásico. Adaptado de (Pronto 2010)

### 3.5.2 EQUAÇÕES GERAIS

Na equação (3.9), enuncia-se a lei geral da indução. Na qual se afirma a existência de uma força eletromotriz induzida e segundo a qual a variação do fluxo do campo magnético numa bobina de  $N$  espiras, é dada por:

$$\varepsilon = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.16)$$

Tal como referido abaixo o princípio físico de um transformador rege-se segundo a existência de indução mútua entre dois circuitos elétricos que se encontram ligados magneticamente através de um fluxo magnético comum, ao qual se chama fluxo principal, ou fluxo no ferro,  $\phi_{Fe}(t)$ .

O fluxo simples que atravessa a secção reta  $S$  do núcleo, onde o campo é constante, é dado pela relação linear:

$$\phi = BS \quad (3.17)$$

Em cada bobina, existe um fluxo total ligado com a mesma, que se descreve na seguinte forma:

$$\psi = N\phi \quad (3.18)$$

Segundo a *Lei de Ampère*, para circuitos magnéticos, a qual descreve a criação de campos magnéticos a partir de correntes elétricas, tem-se que o integral de linha sobre um caminho fechado do campo magnético  $\mathbf{H}$  é proporcional à corrente que atravessa a superfície limitada pelo caminho de integração.

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI \quad (3.19)$$

À circulação do vetor de campo magnético ao longo de um caminho fechado  $l$  chama-se *força magnetomotriz*, sendo  $f.m.m. = \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI$ . Designa-se por *Lei de Hopkinson*, a *lei de Ampère* escrita em função do fluxo e da relutância magnética<sup>6</sup>.

$$f.m.m. = N_1 I_1 + N_2 I_2 = \phi \mathcal{R}_m \quad (3.20)$$

onde  $\mathcal{R}_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}$  tem unidades de  $H^{-1}$ . Tal como referido na equação (3.18), caso se pretenda obter o fluxo magnético ligado a cada bobina, basta multiplicar o fluxo simples pelo número de espiras presentes no enrolamento. Para tal e resolvendo a equação, referente à lei de Hopkinson, em ordem ao fluxo magnético simples, obtém-se  $\phi = \frac{NI}{\mathcal{R}_m}$ , de onde se conclui,

$$\psi = \frac{N^2}{\mathcal{R}_m} \cdot I \quad (3.21)$$

De acordo com esta equação, em meios lineares, o fluxo total associado à bobina é proporcional à intensidade da corrente elétrica. Visto que a relutância magnética depende do meio no qual se insere devido à sua dependência sobre a permeabilidade magnética do meio,  $\mu = \mu_r \mu_0$ , o fluxo total também deste.

### 3.5.3 ESQUEMA EQUIVALENTE DE STEINMETZ

As equações gerais que regem o funcionamento do transformador podem ser traduzidas através de um esquema elétrico equivalente que permite uma análise comportamental mais simples, conhecido por esquema equivalente de Steinmetz, em homenagem ao seu inventor Charles Proteus Steinmetz<sup>7</sup>.

Em regime alternado sinusoidal, esse circuito toma a seguinte configuração presente na Figura 3.12 onde se introduz uma resistência  $R_{Fe}$  em paralelo no ramo de magnetização para representar as perdas no ferro (Marques e Resende 2010).

---

<sup>6</sup> Traduz a maior ou menor facilidade com que um dado material pode ser atravessado por linhas de campo magnético e depende da geometria e da constituição do material.

<sup>7</sup> Charles Proteus Steinmetz (1865-1923) Engenheiro eletrotécnico e investigador germano-americano. <http://incredible-people.com/biographies/charles-proteus-steinmetz> (consultado em Setembro de 2016).

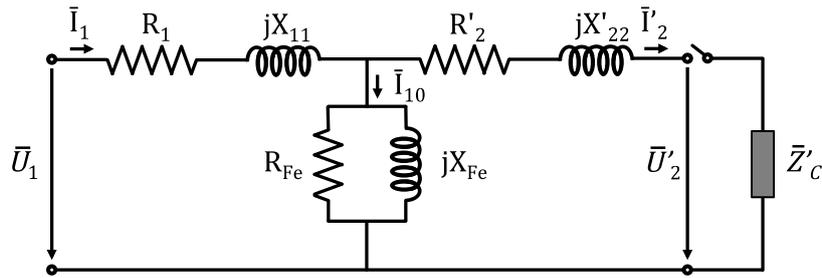


Figura 3.12 Esquema elétrico equivalente de Steinmetz reduzido ao primário em regime alternado

Designando  $m = \frac{N_1}{N_2}$  por razão de transformação do transformador, as grandezas auxiliares referentes ao secundário relacionam-se com as suas verdadeiras através das seguintes expressões.

$$\begin{aligned} \bar{U}'_2 &= -m\bar{U}_2 & r'_2 &= m^2 r_2 \\ \bar{I}'_2 &= -\frac{\bar{I}_2}{m} & X'_{22} &= m^2 X_{22} \\ \bar{Z}'_C &= m^2 \bar{Z}_C \end{aligned} \quad (3.22)$$

A Figura 3.12 diz-se reduzida ao primário pois todos os parâmetros que se referem ao secundário não são as verdadeira grandezas mas sim imagens vistas do primário.

Neste circuito, estão apresentadas os seguintes efeitos (Marques e Resende 2010):

- ❖ Resistência  $R_1$  e  $R_2$  representam as perdas de Joule ou perdas no cobre. Introduzem uma componente de queda de tensão em fase com a corrente;
- ❖ O ramo de magnetização  $R_{Fe}$  e  $X_{Fe}$  representam a magnetização e perdas no núcleo;
- ❖ As reatâncias de dispersão  $X_{11}$  e  $X'_{22}$  representam os fluxos de dispersão.

De forma análoga, caso se pretenda encontrar o esquema equivalente de Epstein reduzido ao secundário, basta realizar as transformações presentes na equação (3.23), que relacionam as verdadeiras grandezas do primário com as grandezas vistas do secundário.

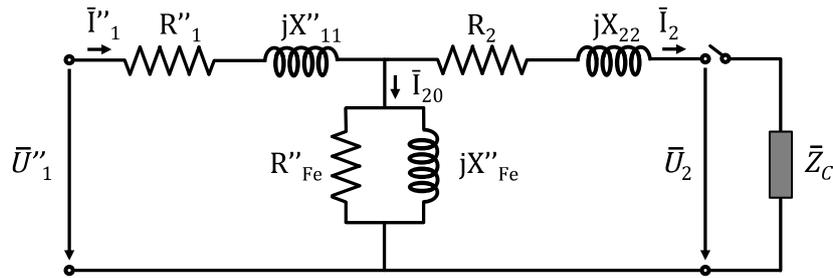


Figura 3.13 Esquema elétrico equivalente de Steinmetz reduzido do secundário em regime AC

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_1'' &= -\frac{1}{m} \bar{U}_1 & r_1'' &= \frac{1}{m^2} r_1 & R_{Fe}'' &= \frac{1}{m^2} R_{Fe} \\
 \bar{I}_1'' &= -m \bar{I}_1 & X_{11}'' &= \frac{1}{m^2} \lambda_{11} & X_{Fe}'' &= \frac{1}{m^2} X_{Fe} \\
 \bar{I}_{20} &= -m \bar{I}_{10}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

### 3.5.3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PERDAS NO FERRO

A variação de fluxo  $\phi$  no núcleo de ferro provoca perdas de energia que se devem à histerese e a correntes de Foucault. Tal como foi referido, a representação destas perdas é comumente feita através de uma resistência em paralelo com a reatância  $X_{Fe}$ . Porém, ao invés do paralelo pode utilizar-se um circuito equivalente em série onde os novos parâmetros podem ser calculados por (Marques e Resende 2010):

$$\begin{aligned}
 R_m + jX_m &= R_{Fe} // jX_{Fe} \\
 R_{Fe} &= \frac{R_m^2 + X_m^2}{R_m} ; \quad X_{Fe} = \frac{R_m^2 + X_m^2}{X_m}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Referindo-se estes ao primário. Caso se pretenda transformar para a vista do secundário utiliza-se  $R_m'' = \frac{1}{m^2} R_m$  e  $X_m'' = \frac{1}{m^2} X_m$ .

### 3.5.4 ENSAIOS DO TRANSFORMADOR

Na prática, a determinação dos parâmetros fundamentais do transformador fazem-se através de dois ensaios, sendo eles o *ensaio em vazio* e o *ensaio em curto-circuito*.

Ao conjunto destes ensaios pode denominar-se de *ensaios económicos*, visto ser possível obter valores para grandezas significativas, úteis na definição das condições do transformador e na determinação indireta dos valores das grandezas características do

funcionamento, consumindo apenas pequenos valores de energia elétrica (Guedes 2004/2005).

Os ensaios podem ser feitos em qualquer um dos enrolamentos do transformador, sendo todas as grandezas obtidas referidas ao mesmo.

Como se pretende apenas obter as perdas magnéticas em regime alternado sinusoidal, ensaia-se o transformador monofásico em vazio, de modo a que se tenha apenas o ramo transversal do esquema equivalente de Steinmetz, enunciado acima na Figura 3.12.

#### 3.5.4.1 ENSAIO EM VAZIO

O ensaio em vazio, realiza-se colocando os terminais de um dos enrolamentos, neste caso o secundário, em circuito aberto ( $I_2 = 0$ ), enquanto uma tensão nominal é aplicada ao primário ( $U_1$ ), magnetizando assim o núcleo com uma corrente de excitação  $I_1$ . A este ensaio também se pode chamar de ensaio sem carga ou ensaio em circuito aberto.

O objetivo fundamental deste ensaio é obter as perdas existentes no núcleo, ou seja, as perdas no ferro, através da medição da resistência de perdas  $R_{Fe}$  e da reatância de magnetização  $X_{Fe}$ .

A passagem do ramo de magnetização do centro para a esquerda (ou para a direita) conduz a erros pequenos e a uma simplicidade considerável (Marques e Resende 2010). Esta simplificação pode ser feita pois, normalmente os valores de  $R_{Fe}$  e  $X_{Fe}$  da impedância de magnetização são muito superiores aos valores da impedância, neste caso, do primário.

Do circuito presente na Figura 3.14, pode-se verificar que as perdas no ferro, dependem apenas da tensão aplicada ao primário do transformador, pois neste caso  $\bar{I}_0 = I_1$ .

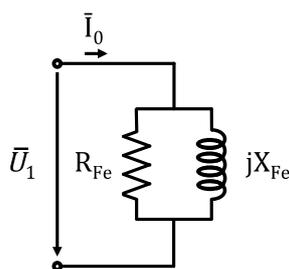


Figura 3.14 Esquema equivalente de Steinmetz simplificado – ensaio em circuito aberto



## 4 MÉTODOS USADOS NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

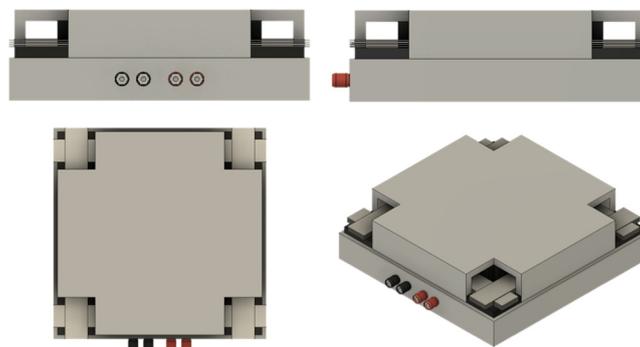
Tendo em vista a contextualização referente aos métodos utilizados na caracterização das propriedades magnéticas e os objetivos referidos no capítulo 1.2, o presente capítulo pretende descrever os aspectos teóricos relativos ao método de Epstein e aos transformadores monofásicos ensaiados em vazio.

A necessidade de induzir a sociedade a reduzir o consumo de energia elétrica tem levado os governos de todo o mundo a pressionar os fabricantes de aços elétricos na produção de materiais com perdas magnéticas inferiores, fazendo assim com que os rendimentos dimensionados em dispositivos de serviço sejam superiores. Deste modo ocorre a necessidade de aferir a incerteza relativa às diferenças entre as medições sujeitas ao método padrão e a sistemas em serviço no dia-a-dia das empresas. Entende-se assim a inevitabilidade de realizar o estudo teórico dos dois métodos referidos acima.

### 4.1 QUADRO DE EPSTEIN

Foi visto, que a escolha para uma determinada aplicação de um material magnético é parte fundamental na construção dos equipamentos que utilizam materiais magnéticos. Partindo deste pressuposto, sabe-se que a caracterização das propriedades magnéticas (tais como a permeabilidade e as perdas no núcleo) dos materiais magnéticos, em particular dos aços elétricos, é muito importante, estando diretamente relacionada com a eficiência dos dispositivos de energia.

O equipamento padrão utilizado na caracterização das propriedades estáticas e dinâmicas das lâminas magnéticas de aço silicioso é o quadro de Epstein (Batistela 2001), sendo de longe o dispositivo mais usado com normas internacionais bem aceites.



**Figura 4.1 Vista frontal, Vista lateral esquerda, Vista superior e Vista geral do Aparelho de Epstein**

Anteriormente referiu-se que este dispositivo foi inventado, com o propósito de resolver a controvérsia existente entre produtores e consumidores de aços elétricos (Korzunin, Chistyakov e Rimshev 2000), de forma que as propriedades magnéticas dos aços elétricos fossem determinadas de forma coerente.

Em seguida, descreve-se o princípio fundamental em que se baseia o funcionamento do quadro de Epstein, bem como as partes que o constituem.

#### 4.1.1 CONSTITUIÇÃO DO QUADRO DE EPSTEIN

O aparelho de Epstein de 25 cm assemelha-se a um transformador monofásico com o secundário em vazio. Apresenta tal como este, dois enrolamentos concêntricos que formam o primário e o secundário e, um núcleo de material ferromagnético constituído pelo material que se pretende ensaiar. Além destes componentes, apresenta na sua constituição um compensador de fluxo de ar.

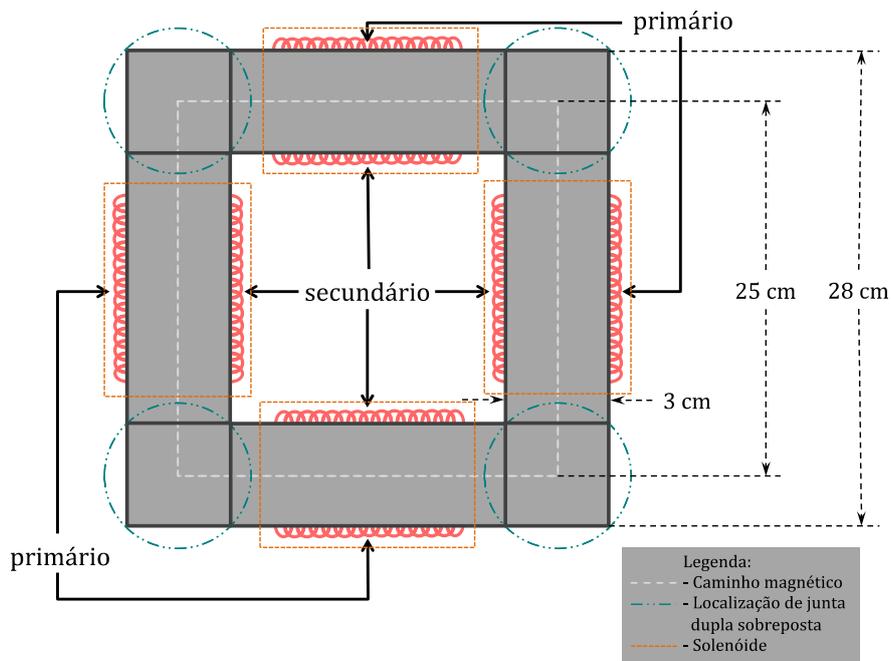


Figura 4.2 Quadro de Epstein – esquema da planta

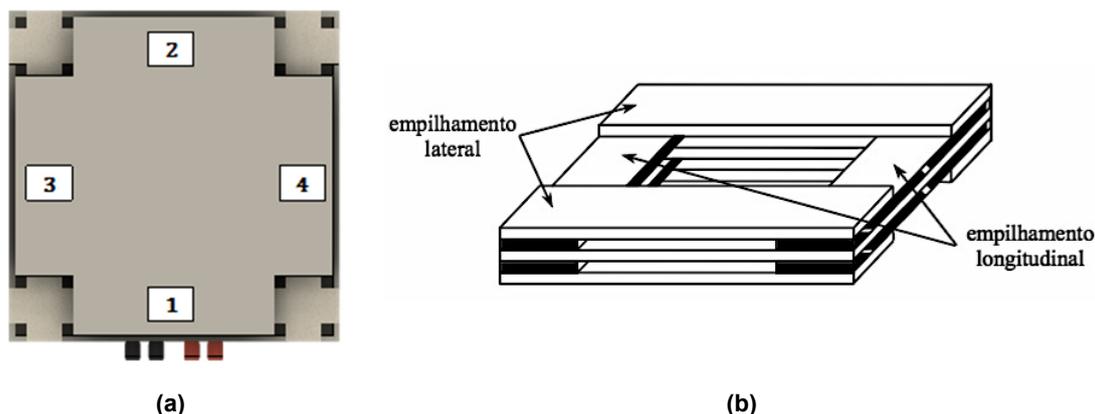
O quadro de Epstein é composto por quatro solenóides, os quais devem estar fixos a um suporte não magnético com o propósito de formar um quadrado (Figura 4.2). Cada solenóide deve comportar um enrolamento primário exterior e um enrolamento secundário interior. Os enrolamentos devem estar uniformemente distribuídos ao longo do circuito magnético, cada solenóide comportando um quarto do número de espiras, tendo o primário e o secundário o mesmo número de espiras (700 espiras cada) e, estando o enrolamento primário sobreposto ao enrolamento secundário. Os enrolamentos individuais primários dos quatro solenóides

devem estar montados em série, o mesmo acontecendo com os enrolamentos do secundário.

Os enrolamentos existentes no quadro de Epstein são construídos de maneira a ter a maior ligação magnética possível, e que o vetor de indução magnética tenha, sempre que possível, a direção paralela ao campo magnético resultante, gerado pela corrente elétrica no enrolamento primário, assumindo assim que a distribuição do campo magnético é uniforme ao longo da magnetização da amostra. A alimentação do dispositivo é realizada através do enrolamento primário, que impõe o campo magnético no material. No secundário colhe-se a imagem da forma de onda da indução magnética no material, através da tensão elétrica induzida. Neste enrolamento obtém-se o valor da indução magnética (Batistela 2001).

Uma característica de relevo, sem a qual não se pode garantir as condições mínimas para a caracterização magnética, é a tensão induzida no enrolamento do secundário tem de ter forma de onda sinusoidal, para tal tem de ser controlada precisamente. Ora, se é possível controlar a tensão induzida no secundário, conseqüentemente também é possível controlar a forma de onda da indução, controlando assim a fluxo magnético no material. Esta propriedade é muito difícil de obter, pois o circuito magnético não possui entreferro e as lâminas apresentam comportamento magnético não linear, o que se traduz na forma de onda da corrente de excitação  $i_1$ , seja normalmente não sinusoidal e, por sua vez a tensão induzida no secundário não tenha também esta característica. Tal aspeto, acontece principalmente em regiões perto da zona de saturação. Sabe-se, que as perdas totais variam no tempo com a indução e que o conteúdo harmónico interage distintamente em cada tipo de perda assim, é imperativo que se mantenha a tensão induzida no secundário na forma de onda sinusoidal, para o processo de separação das perdas magnéticas (Batistela 2001). Sendo esta uma das condições necessárias para os ensaios, a norma IEC 604040-2 refere no seu manual que, para a determinação das perdas magnéticas totais, o fator de forma da tensão no enrolamento secundário, deve estar entre  $1,111 \pm 1\%$ , para tal, deve-se utilizar realimentação negativa.

O núcleo do aparelho de Epstein é composto por lâminas de material que se pretende estudar. Estas lâminas, devem ser empilhadas em quatro grupos, tendo cada um, o mesmo número de amostras e sendo inseridas individualmente no equipamento de forma alternada, seguindo os números que se encontram na Figura 4.3 (a). Caso se pretenda estudar as características magnéticas de tiras de aço elétrico com diferentes direções (tiras de aço segundo RD – “Rolling Direction” e segundo TD – “Transverse Direction”), estas devem ser agrupadas em grupos distintos e chapas do mesmo grupo devem ser inseridas em ramos paralelos.



**Figura 4.3 Quadro de Epstein.**

**(a) Forma de inserir amostras para ensaio (b) empilhamento das chapas**

Quando introduzidas nos quatro braços do equipamento, as chapas formam um circuito magnético fechado, com juntas duplas sobrepostas nos cantos do quadrado, de igual comprimento e igual secção transversal. A *Comissão Eletrotécnica Internacional*, define, no seu quadro de normas referente ao aparelho de Epstein (IEC 60404-2), que a necessidade de uniformidade nas medições, requer um número total de lâminas introduzidas no equipamento, múltiplo de quatro.

A aplicabilidade do quadro de Epstein referindo-se às amostras de teste, garante a possibilidade de testar, lâminas obtidas de folhas de aços elétricos e tiras de qualquer gama. É aplicável a aços elétricos GO, GNO, tiras para medições AC de propriedades magnéticas a frequências até 400 Hz e para medições magnéticas DC (Kotnala e Kothari 2000).

O aparelho de Epstein pretende medir as propriedades magnéticas dos materiais, e para tal, ocorre a necessidade de garantir que o ar existente entre as lâminas seja minimizado de forma a que não conste nas medições. A não existência de material inserido no quadro, provoca que a corrente que circula pelo enrolamento primário produza um fluxo que atravessa as espiras do secundário. Este fluxo induz uma tensão indesejada no enrolamento secundário, pois sem material magnético a tensão no enrolamento secundário deve ser nula. Assim, ao se adicionar as lâminas no quadro, este fenómeno continua a ocorrer para qualquer nível de indução, sendo mais perceptível em zonas de saturação do material e quando a sua permeabilidade diminui. Para tal, o aparelho de Epstein apresenta no seu interior uma bobina de compensação, com dois enrolamentos (primário e secundário de compensação) ligados em série com os respectivos enrolamentos do QE, de modo a impedir este fenómeno. Esta bobina de compensação gera uma tensão induzida contrária, de forma a anular a tensão induzida gerada pelas bobinas principais por meio do fluxo que não passa no interior das lâminas, garantindo assim a exatidão das medidas (Meurer 2005).

## 4.1.2 DIRETRIZES NORMATIVAS PARA OS ENSAIOS

As normas que regulam o método de medição do aparelho de Epstein, são diversas e desse modo, neste documento, procurará dar-se ênfase à norma da Comissão Eletrotécnica Internacional – CEI 60404-2, que aborda especificamente a utilização do quadro de Epstein em medidas de corrente contínua, para valores específicos de amplitude de indução magnética e frequência até 400 Hz. Parte desta análise revelou alguns pontos nos quais esta norma tem algumas falhas e, de modo a estar de acordo com o equipamento no qual se realizaram os ensaios, foram incluídos alguns aspectos de outras normas, que têm o mesmo objetivo de caracterizar aços elétricos com o aparelho de Epstein.

Em seguida enumeram-se características e métodos que se deve seguir, para determinar as propriedades magnéticas dos aços elétricos através do aparelho de Epstein, tendo por base a referência (Mendes 2004).

### 4.1.2.1 CARACTERÍSTICA FÍSICA DAS AMOSTRAS

As chapas a ser submetidas a testes no quadro de Epstein não podem apresentar isolamento adicional e lâminas com desvio de aplainamento visível, devem ser descartadas. O equipamento de corte utilizado não deverá produzir rebarbas, de modo a maximizar o acoplamento magnético das lâminas. As dimensões, deverão estar dentro das seguintes medidas, tendo em conta que apenas se utilizarão lâminas de comprimento igual, com uma tolerância de  $\pm 0,5$  mm:

Largura: 30 mm  $\pm$  0,2 mm,

Comprimento: 280 mm  $\leq l \leq$  320 mm.

As amostras devem ser pesadas e a sua massa determinada com exatidão de  $\pm 0,1\%$ . O número de amostras deve ser múltiplo de quatro e não deve ser inferior a doze. Relativamente à medida da espessura das lâminas é feita uma média aritmética de quatro pontos medidos em diferentes pontos da chapa, com atenção que estes pontos estejam afastados das extremidades. A medida da densidade do material é feita através da sua massa  $m$  e do volume do material  $V_{ol}$ , segundo a fórmula:  $d_m = \frac{m}{V_{ol}}$  em Kg  $\cdot$  m<sup>-3</sup>.

Um dos constituintes necessários ao bom funcionamento do quadro de Epstein é a existência de quatro pesos, colocados sobre as lâminas nos cantos, onde existem as juntas sobrepostas. Os pesos aplicam uma força de 1 N em cada canto e garantem o bom contacto das amostras nestes locais, minimizando os erros devidos aos entreferros, ou seja, reduz a relutância.

#### 4.1.2.2 CONDIÇÕES PARA O ENSAIO

As chapas devem ser inicialmente desmagnetizadas por um campo magnético alternado decrescente e submetidas ao teste numa temperatura ambiente de 18 a 28 °C. Os testes não devem ultrapassar os 400 Hz.

Foi referido acima que a tensão induzida no secundário deve permanecer sinusoidal, assim o fator de forma deve estar entre  $1,111 \pm 1\%$ .

A fonte de alimentação utilizada deve apresentar baixa impedância e alta estabilidade de tensão e frequência.

#### 4.1.2.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

A classe de precisão dos instrumentos de medição, quando se pretende medir as perdas magnéticas totais, deve ser de  $\pm 0,2\%$  para o valor médio e valor eficaz da tensão no secundário, de  $\pm 0,1\%$  para a frequência e de  $\pm 0,5\%$  para a potência, utilizando respectivamente, um voltímetro de valor médio retificado, um voltímetro de valor eficaz, um frequencímetro e um wattímetro.

Para obtenção da permeabilidade magnética, utiliza-se um de dois métodos, ambos com precisão de  $\pm 0,5\%$ , o método do voltímetro de valor máximo, ou o método do indutor mútuo.

Deve apresentar uma bobina de compensação de fluxo disperso, de forma a que, ao excitar o enrolamento primário com uma corrente alternada, sem amostras no interior do quadro, a tensão nos enrolamentos do secundário não seja superior a 0,1% da tensão medida neste enrolamento sem a bobina de compensação.

#### 4.1.2.4 CÁLCULOS ESSENCIAIS AO ENSAIO

O comprimento do caminho médio efetivo do circuito magnético é estipulado com o valor de  $\ell_m = 0,94$  m. A massa efetiva do conjunto constituído pelas amostras é:

$$m_{ef} = \frac{\ell_m}{4 \cdot l} \cdot m_{tot} \quad (4.1)$$

No qual  $l$  é o comprimento das chapas em metros e  $m_{tot}$  a massa total do conjunto em quilogramas. O cálculo da área efetiva da secção transversal do núcleo do quadro de Epstein pode ser calculado de duas maneiras, sendo a primeira obtida através da densidade de massa do material,

$$S_{FeQE} = \frac{m_{tot}}{4 \cdot l \cdot d_m} \quad (4.2)$$

ou, através da área das chapas em cada braço, onde  $v$  é o número de chapas existente por braço,  $e$  a espessura das chapas e  $w$  a largura das mesmas.

$$S_{FeQE} = v \cdot e \cdot w \quad (4.3)$$

#### 4.1.2.5 EQUAÇÕES GERAIS DO QUADRO DE EPSTEIN

Admitindo que o campo de indução magnético é uniforme ao longo das amostras, a fórmula do fluxo magnético simples para o quadro de Epstein é apresentada na equação que se segue:

$$\phi = B_{Fe} S_{FeQE} \quad (4.4)$$

No caso do circuito estar a funcionar em vazio, se o fluxo que circula no enrolamento secundário for sinusoidal,  $\phi_2 = \phi_{2m} \sin(\omega t)$ , sabe-se pela lei geral da indução, enunciada na equação (3.9), que a tensão nesse mesmo enrolamento também o será. Sabendo que em regime sinusoidal se tem,  $U_m = \omega \phi_m$ ,  $U_m = \sqrt{2} U_{ef} \Rightarrow U_{ef} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \bar{U}$  e que  $\omega = 2\pi f$ , tem-se para o valor máximo de campo de indução magnética no secundário do quadro de Epstein:

$$B_m = \frac{U_2}{\frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_2 \cdot S_{FeQE}} \quad (4.5)$$

Aquando dos testes é necessário realizar o cálculo do valor da tensão eficaz  $U_2$  aos terminais do enrolamento do secundário, para os vários pontos de indução magnética desejados, (aproxima-se o valor  $2\pi/\sqrt{2} \approx 4,44$ ).

$$U_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_2 \cdot B_m \cdot S_{FeQE} \quad (4.6)$$

Quando se pretende obter as perdas totais da amostra de teste, a norma da comissão eletrotécnica internacional, diz que se deve seguir a seguinte equação:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1,11 \cdot \bar{U}_2)^2}{R_i} \quad (4.7)$$

Onde  $P_m$  é obtida através da leitura dos instrumentos e  $R_i$  é a resistência equivalente dos instrumentos secundários. As perdas específicas totais medidas em  $W \cdot Kg^{-1}$ , são dadas por,

$$P_s = \frac{P_c}{m_{efQE}} \quad (4.8)$$

A amplitude de campo magnético deve ser calculada da seguinte forma:

$$H_m = \frac{N_1 \cdot I_{1m}}{\ell_{mQE}} \quad (4.9)$$

onde  $I_{1m}$  é a corrente máxima de magnetização.

#### 4.1.2.6 RELATÓRIO DE TESTE

Segundo a norma IEC 60404-2 os testes no quadro de Epstein deverão ser acompanhados por um relatório de teste, com as seguintes características:

- ❖ Tipo e identificação da amostra;
- ❖ Densidade do material (medida ou convencional);
- ❖ Comprimento das lâminas;
- ❖ Número de lâminas;
- ❖ Temperatura ambiente durante o ensaio;
- ❖ Frequência de trabalho;
- ❖ Valores de densidade de fluxo magnético;
- ❖ Resultados das medidas.

#### 4.1.3 ESPECIFICAÇÕES DO MODELO EP-350

Neste subcapítulo pretende-se enfatizar os materiais utilizados e as suas especificações. O quadro de Epstein utilizado é um transformador padrão EP-350, da marca GOPAL ELECTRONICS.

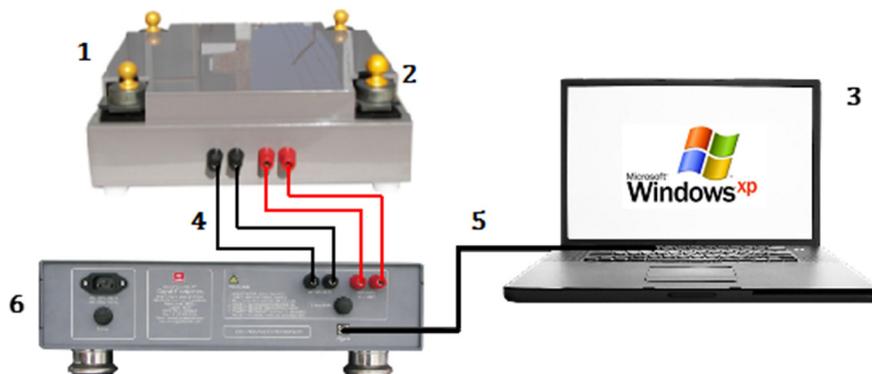


Figura 4.4 Esquema de ligação entre o quadro de Epstein, o EP-350 e o PC

Legenda da figura:

1. Quadro de Epstein de 25 cm;
2. Pesos para introduzir nos cantos;
3. Computador com Windows XP e Office 2000 (necessário para que o *software* fornecido funcione);
4. Cabos de ligação;
5. Cabo USB;
6. EP-350;

O conteúdo do conjunto contém também um CD com o software, um grupo de amostras de referência calibradas pela empresa GOPAL ELECTRONICS acompanhado com o relatório de teste para estas chapas.

#### 4.1.3.1 EP-350

O EP-350 faz a ligação direta com o quadro de Epstein, fornecendo a tensão e a corrente e adquirindo os valores das medições realizadas. Permite realizar medições em corrente alternada para obter as propriedades dos aços elétricos com uma gama de frequências que vai de 25 Hz a 450 Hz. Contém no seu interior um wattímetro, um amperímetro e um voltímetro, de modo a simplificar a forma como se realizam os testes, sendo que para o utilizador estes instrumentos, não estão visíveis, conseguindo assim, medir propriedades como as perdas, curva de magnetização e permeabilidade magnética.

As suas medições são relativas à tensão no secundário, valores eficazes de tensão e corrente, valores máximo de corrente e potência e fator de forma da tensão no secundário. Apresenta uma boa resistividade à temperatura, garantindo que possa funcionar numa gama de temperaturas entre 20°C a 45°C.

De modo a simplificar as medições este equipamento só necessita que lhe sejam introduzidos determinados valores, tais como, o peso, comprimento e densidade das amostras, a frequência de teste, a percentagem de correntes de Foucault e a indução desejada, para realizar os testes.

O *software*, denominado de “Gopal Communication Tool”, da empresa que fabrica este conjunto de aparelhos, comunica diretamente com o EP-350, permitindo assim a recolha dos dados realizados pelo quadro de Epstein e permitindo ao utilizador criar um ficheiro MS-Excel com o relatório de teste realizado.

De salientar que este equipamento deve aquecer pelo menos trinta minutos antes de realizar os testes, para uma melhor precisão.

Relativamente à percentagem de correntes de Foucault, os fabricantes cedem uma tabela que permite ter a noção dos valores que se devem introduzir.

**Tabela 4.1 Percentagem típica das perdas por correntes de Foucault.**

**Adaptado de (Gopal Electronics s.d.)**

Material	Orientação	Percentagem de perdas por correntes de Foucault assumidas, espessura (mm)						
		0,18	0,23	0,27	0,3	0,35	0,47	0,64
GNO	metade	...	...	...	...	20	30	40
GNO	paralelo	...	...	...	...	25	35	45
GO	paralelo	35	45	50	55	...	...	...

Em seguida enumeram-se as especificações técnicas do EP-350:

- ❖ Gerador de onda sinusoidal (25 Hz a 400 Hz)
- ❖ Precisão da frequência de 0,03%
- ❖ Capacidade máxima da fonte 11,2 A
- ❖ Capacidade máxima de tensão eficaz 16,0 V
- ❖ Distorção da onda sinusoidal 0,025%
- ❖ Proteção máxima da fonte sem ligação 11,5 A
- ❖ Tensão de entrada 230 V @ 50 Hz, 5 A  $\pm$  10% ou 110 V @ 60 Hz, 8 A  $\pm$  10%
- ❖ Temperatura de operação: 20°C a 45°C
- ❖ Humidade de operação inferior a 70%
- ❖ Dimensões: largura = 425 mm, profundidade = 557 mm, altura = 100 mm + perna
- ❖ Peso = 14,5 Kg

**Tabela 4.2 Classe de precisão dos instrumentos de medição no EP-350**

Parâmetro	Precisão do EP-350	Classe de precisão das normas	
		ASTM A343	IEC 60404-2
Voltímetro de valor eficaz	0,10	0,25	0,20
Amperímetro de valor eficaz	0,10	1,00	0,20
Wattímetro	0,10	0,25	0,50
Voltímetro	0,20	0,25	0,20
Amperímetro de valor máximo	0,20	1,00	0,50
Repetibilidade	0,50	1,00	1,00

#### 4.1.3.2 QUADRO DE EPSTEIN 25 cm

Representado na Figura 4.4 com o número “1”, o quadro de Epstein utilizado tem um número de 700 espiras no enrolamento primário, o qual é igual ao do secundário. Permite a inserção de lâminas de aço elétrico, com um comprimento de 30,0 mm, largura recomendada de 305,0 mm e um número mínimo de oito amostras de teste. O peso do conjunto de teste pode variar de 250 g a 500 g.

No centro do quadro tem uma bobina de compensação de fluxo disperso e contém, devidamente identificados, quatro terminais que correspondem às bobinas do primário e do secundário, permitindo assim a ligação entre o quadro e o equipamento EP-350. Para uma melhor eficácia das suas medições apresenta ainda quatro pesos que deverão ser colocados sobre os cantos das chapas depois inseridas no equipamento.

O esquema elétrico do quadro de Epstein é indicado na Figura 4.5.

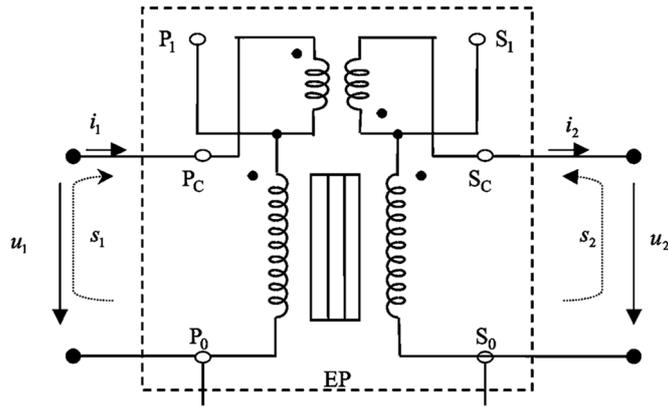


Figura 4.5 Esquema elétrico do quadro de Epstein. Retirado de (IST 2005)

O aparelho de Epstein a utilizar em laboratório apresenta as seguintes características:

Enrolamentos do aparelho:

- ❖ Primário ( $P_0 - P_1$ ) 700 espiras, aproximadamente  $0,493 \Omega$ ;  $0,592 \text{ mH}$ ;
- ❖ Secundário ( $S_0 - S_1$ ) 700 espiras, aproximadamente  $2,722 \Omega$ ;  $4,89 \text{ mH}$ .

Enrolamentos de compensação:

- ❖ Primário ( $P_1 - P_c$ ) 30 espiras;
- ❖ Secundário ( $S_1 - S_c$ ) 232 espiras, aproximadamente  $2,722 \Omega$ .

#### 4.1.3.3 EQUAÇÕES DE CÁLCULO DO EP-350

Tabela 4.3 Equações utilizadas pelo EP-350. Adaptado de (Gopal Electronics s.d.)

Definição	Equação	Ordem da grandeza
Massa efetiva	(4.1)	Kg
Área secção transversal	(4.2)	$\text{m}^2$
Tensão eficaz $U_{2ef}$	(4.6)	V
Perdas específicas totais	(4.8)	$\text{W} \cdot \text{Kg}^{-1}$
Potência magnetizante	$\text{VA} \cdot \text{Kg}^{-1} = (I_{1ef} \cdot U_{2ef})/m_{ef}$	$\text{VA} \cdot \text{Kg}^{-1}$
Campo magnético máximo	(4.9)	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
Permeabilidade magnética relativa máxima	$\mu_r = \frac{B_m}{H_m \cdot \mu_0}$	Adim.

#### 4.1.3.4 FLUXOGRAMA

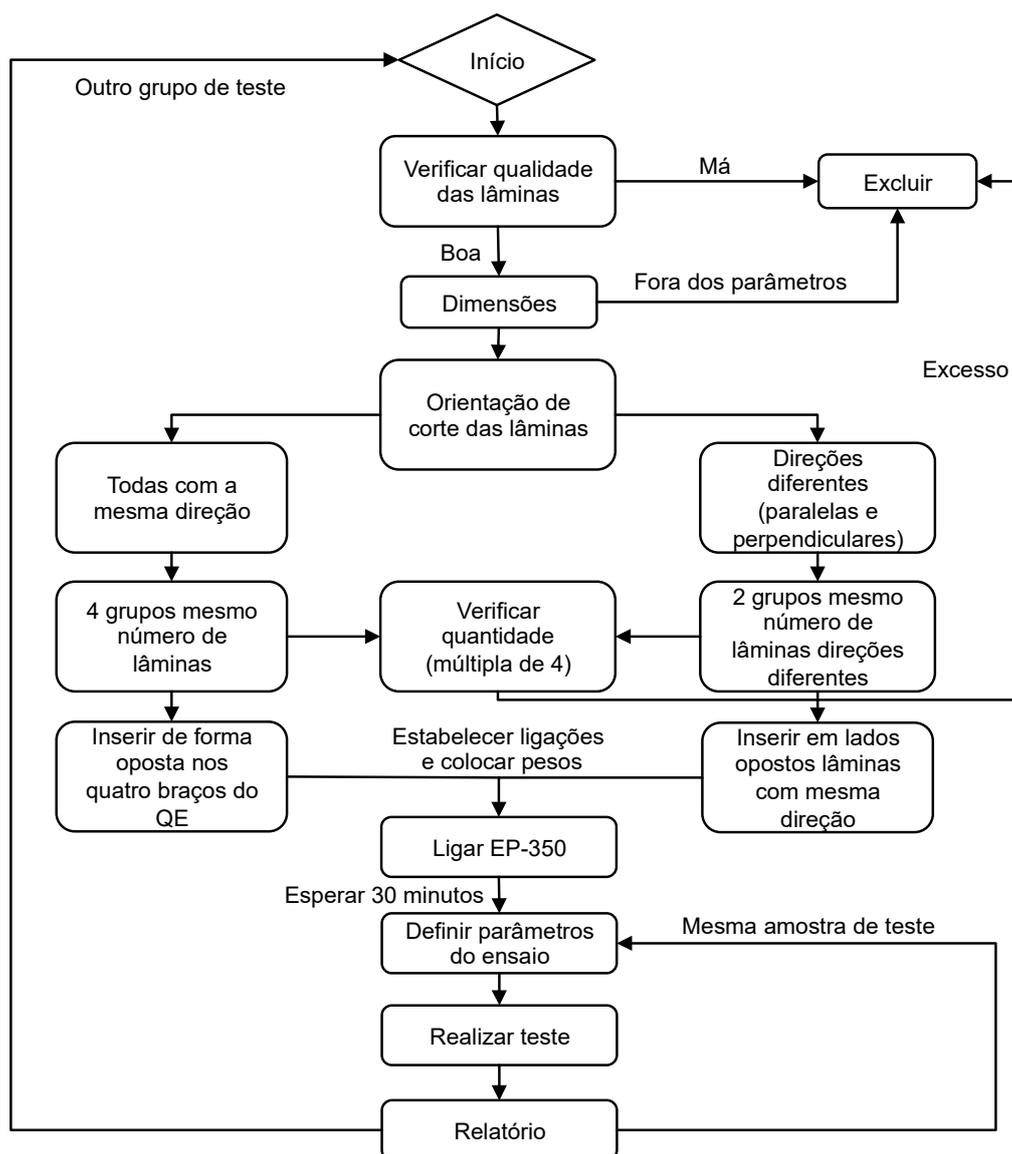
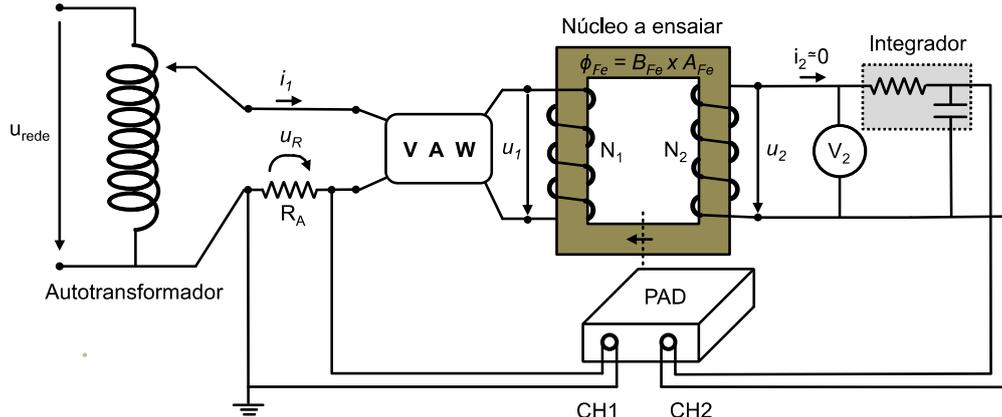


Figura 4.6 Fluxograma da realização de ensaios no quadro de Epstein

## 4.2 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO EM VAZIO

Pretende-se agora evidenciar algumas das especificações necessárias aquando da montagem do transformador monofásico em vazio.

A Figura 4.7 apresenta o esquema para a realização do ensaio em vazio do transformador monofásico. Como se pode verificar, o primário é ligado à rede elétrica por via de um autotransformador, que permite variar a tensão de entrada aos terminais do transformador. Para seja possível conhecer os valores eficazes de corrente e tensão e potência ativa que circulam no primário, é colocado um multímetro, referido na figura como “VAW”. De modo a que seja possível saber o valor da tensão que circula no secundário do transformador é colocado em fase com o mesmo um voltímetro de valor eficaz.



**Figura 4.7 Montagem para o ensaio em corrente alternada do transformador monofásico em vazio**

Tendo em vista a obtenção da característica dinâmica B-H e ensaiando o transformador monofásico com o secundário em vazio, as saídas dos terminais do osciloscópio (representado na Figura 4.7 por “PAD”) vêm como duas tensões, as quais precisam de ser trabalhadas de modo a obter as características necessárias

As imagens das formas de onda do campo magnético  $H$  e da indução magnética  $B$ , são adquiridas através do osciloscópio digital, nos canais 1 (CH1) e 2 (CH2), respetivamente. O campo magnético  $H$  é calculado a partir da medição da queda de tensão aos terminais da resistência  $R_A$ , a qual é uma imagem da corrente no primário do transformador  $i_1(t)$  e o campo de densidade de fluxo magnético  $B$  é obtido com o secundário em vazio, através da tensão  $u_2(t)$ , que depois de integrada é proporcional ao fluxo magnético no núcleo.

A corrente de magnetização coincide com a corrente existente no primário do transformador  $i_1$ , que ao ser forçada a atravessar uma resistência de amostragem  $R_A$ , observa-se a queda de tensão nos terminais do enrolamento primário. Assim na saída do CH1:

$$u_A = R_A \cdot i_1 \quad (4.10)$$

Segundo a lei de Ampère, descrita na equação (3.19), é possível estabelecer a relação entre a corrente e o campo magnético. Valendo o campo magnético que atravessa o enrolamento correspondente,

$$H = \frac{N_1 \cdot i_1}{l} \quad (4.11)$$

onde  $N_1$  é o número de espiras que atravessa o ramo magnetizante e  $l$  o caminho magnético médio.

O enrolamento secundário que se encontra em vazio é atravessado por uma corrente desprezável, fazendo com que a sua tensão seja apenas induzida pelo fluxo no ferro vindo apenas:

$$u_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (4.12)$$

ou seja,

$$\phi = \frac{1}{N_2} \int u_2 dt \quad (4.13)$$

Utiliza-se um integrador passivo formado por um circuito  $RC$  (ver Figura 4.7 – “Integrador”), com uma constante de tempo  $\tau = 1$  s, de modo a se obter o fluxo no núcleo.

O circuito ao funcionar como integrador, necessita que a constante de tempo seja muito superior ao inverso da frequência. Assim, e como os ensaios serão realizados a uma frequência de 50 Hz (ou  $T = 20$  ms), usa-se na constituição do integrador, onde  $\tau = RC$ , uma resistência de valor  $R = 1$  M $\Omega$  e um condensador  $C = 1$   $\mu$ F, vindo então,  $\tau \gg 0,02/2\pi$ , fazendo assim que a impedância presente neste circuito seja significativamente elevada para que a corrente absorvida seja desprezada, e assim a bobina do secundário seja considerada em vazio. A função que do integrador é representada abaixo.

$$u_{saída} \cong \frac{1}{\tau} \int u_{entrada} dt \quad (4.14)$$

Como a tensão de entrada no integrador é a tensão no secundário do núcleo, vem:

$$u_{saída} = \frac{N_2}{\tau} \cdot \phi \Leftrightarrow \phi = \frac{\tau}{N_2} \cdot u_2 \quad (4.15)$$

De forma análoga ao apresentado na equação (4.11) para a corrente, o fluxo ligado  $\psi$  é proporcional ao integral de superfície do campo magnético  $B$  que atravessa a secção do núcleo.

$$\psi = N_2 \iint_S (\mathbf{B} \cdot \hat{n}) dS \quad (4.16)$$

Assim, partindo do pressuposto que a densidade de fluxo magnético é uniforme e tendo em conta as equações (3.17) e (3.18), obtem-se a seguinte expressão:

$$B = \frac{\psi}{N_1 S_{Fe}} \quad (4.17)$$

Através destes processos, obtém-se a evolução do fluxo simples em função da corrente de magnetização, os ciclos de histerese, a característica de magnetização inicial, a permeabilidade magnética, a curva da potência magnetizante e as perdas nos núcleos. De modo a calcular a área do ciclo de histerese dos vários valores de  $B_m$  obtidos, recorre-se ao software *Matlab*.

## 4.2.1 ESPECIFICAÇÕES DO TRANSFORMADOR

Apresentam-se agora os aspectos construtivos dos transformadores monofásicos utilizados em laboratório, nomeadamente, um transformador  $T1$  constituído por chapas laminadas de aço elétrico de grão não orientado com espessuras de 0,50 mm, e outro, designado por transformador  $T2$ , feito de chapas laminadas de aço elétrico de grão orientado, com espessuras de 0,35 mm.

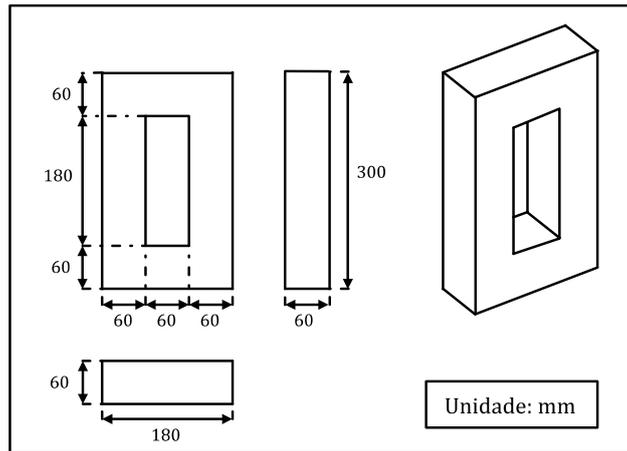


Figura 4.8 Núcleos ferromagnéticos usados nos ensaios. Retirado de (Pronto 2010)

### 4.2.1.1 NÚCLEOS FERROMAGNÉTICOS

O núcleo dos transformadores disponíveis em laboratório, apresentam as mesmas características dos transformadores dimensionados por Pronto na dissertação para a obtenção do grau de doutor, em 2010 (Pronto 2010). Assim sendo, e tendo em vista analisar as perdas magnéticas totais em regime alternado sinusoidal, à frequência de 50 Hz, os transformadores monofásicos, apresentam uma potência aparente de 1,15 kVA, com uma relação de tensões entre o primário e o secundário de 230 V/115 V.

As dimensões são iguais para ambos os núcleos e estão representadas na Figura 4.9.



**Figura 4.9** Dimensões dos núcleos ferromagnéticos T1 e T2. Retirado de (Pronto 2010)

De modo a obter o valor do campo de indução máximo  $B_m$ , e de acordo com a equação (4.5) aplicada ao primário, sabe-se que para uma área de secção transversal de  $S_{Fe} = 36 \text{ cm}^2$ , frequência  $f = 50 \text{ Hz}$ , 203 espiras no primário e uma tensão eficaz de 230 V, a indução máxima para que o núcleo não sature é de 1,4 T.

Para o cálculo do campo magnético é necessário determinar o caminho magnético médio  $l$ , o qual segundo as medidas da Figura 4.9, vale 0,72 m.

Os núcleos encontram-se da forma UI, são desmontáveis de modo a facilitar a utilização do mesmo par de bobinas e as suas chapas são laminadas de ferro-silício, com espessura 0,50 mm (transformador  $T_1$ ) e, 0,35 mm (transformador  $T_2$ ), montadas em paralelo e isoladas entre si.

#### 4.2.1.2 ENROLAMENTOS (PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO)

Relativamente aos enrolamentos utilizados, tanto o primário como o secundário são constituídos por bobinas de cobre e apresentam 203 e 102 espiras, respetivamente. De forma a abraçarem as colunas do núcleo e, de modo a facilitar a introdução e a remoção apresentam um suporte de material não magnético.



**Figura 4.10** Bobinas utilizadas nos ensaios

## 5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresenta, interpreta e discute-se os resultados obtidos aquando da realização dos ensaios com o aparelho de Epstein e com os núcleos dos transformadores monofásicos  $T_1$  e  $T_2$ . De agora em diante, o quadro de Epstein constituído por chapas de espessura 0,50 mm, de grão não orientado, será designado de “ $QE_1$ ”, enquanto o quadro de Epstein com chapas de espessura 0,35 mm, de grão orientado será designado por “ $QE_2$ ”.

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS ELÉTRICOS UTILIZADOS

É importante referir que tanto os aços elétricos presentes no aparelho de Epstein, como os que constituem o núcleo dos transformadores, são originários do mesmo fornecedor, porém a proveniência dos mesmos não é garantida que advenha do mesmo lote. Ocorre assim, a necessidade de determinar algumas das características dos aços elétricos utilizados em laboratório.

Na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2 evidencia-se, de forma respetiva, algumas especificações referentes aos aços elétricos utilizados no quadro de Epstein e no transformador.

**Tabela 5.1 Especificações dos aços elétricos usados no QE de 25 cm**

Designação das chapas	Liga Fe-Si	$e$	$l$	$w$	Nº de chapas	$m_{tot}$	$d_m$	%E	O.L.
$QE_1$	GNO	0,50	304,0	29,96	12	498	7,69	35	RD
$QE_2$	GOC	0,35	304,5	29,75	16	364	7,05	55	RD

Onde  $e$  é a espessura,  $l$  o comprimento, e  $w$  a largura, das chapas em milímetros. A massa total do conjunto de chapas em gramas é designada por  $m_{tot}$ , à qual corresponde uma densidade magnética, designada por  $d_m$  em  $g/cm^3$ . Relativamente à percentagem de correntes de Foucault, designada por %E, e de acordo com a Tabela 4.1, é possível definir os valores acima descritos. Quanto a O.L. representa a orientação de laminagem presente nas chapas, a qual é RD – *Rolling direction*.

**Tabela 5.2 Especificações dos aços elétricos utilizados. Retirado de (Pronto 2010)**

Designação dos núcleos	Tipo de liga Fe-Si	Espessura das chapas (mm)	Desig.* AISI	Desig.* DIN 46400	% wt Si	Densidade ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
$T_1$	GNO	0,50	M43	V400-50A	2,7	7,69
$T_2$	GOC	0,35	M6	VM111-35N	3,9	7,05

\* Desig. Significa designação

## 5.2 QUADRO DE EPSTEIN

De acordo com os dados referidos na Tabela 5.1 foram ensaiados dois grupos de aços elétricos, um de grão não orientado e outro de grão orientado, com 12 e 16 amostras de aço laminado, respectivamente. As medidas referentes aos tamanhos das lâminas foram efetuadas com um paquímetro digital.

Na Figura 5.1 é possível evidenciar as ligações realizadas durante os ensaios entre o quadro de Epstein de 25 cm situado à esquerda na imagem e o EP-350.

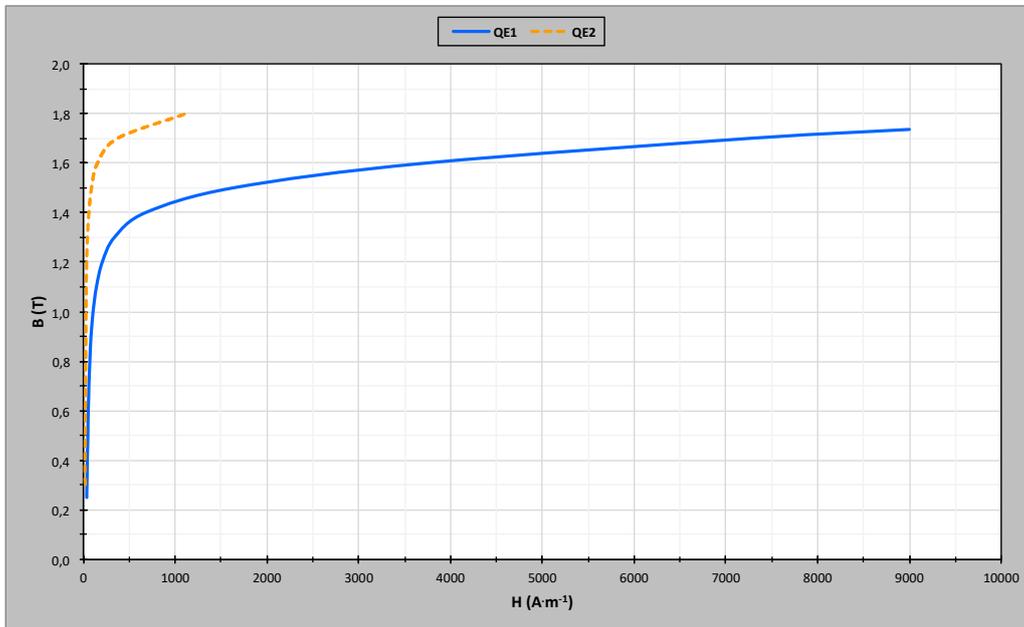
No que se refere à frequência dos ensaios, e visto que os transformadores são ensaiados à frequência de 50 Hz, os ensaios no quadro de Epstein, foram realizados a essa frequência de trabalho.



**Figura 5.1 Ensaio do quadro de Epstein**

Relativamente às lâminas, os dois conjuntos encontravam-se em bom estado, não apresentando rebarbas, desvios de aplainamento e deformidades visíveis, que afetassem as medições.

Em seguida, apresentam-se as curvas de magnetização inicial para os dois aços elétricos introduzidos no aparelho de Epstein. Das quais se pode aferir que a indução de saturação,  $B_s$ , para o aço de grão não orientado  $QE_1$  é aproximadamente 1,2 T, enquanto que para o conjunto de aço de grão orientado ronda os 1,6 T.



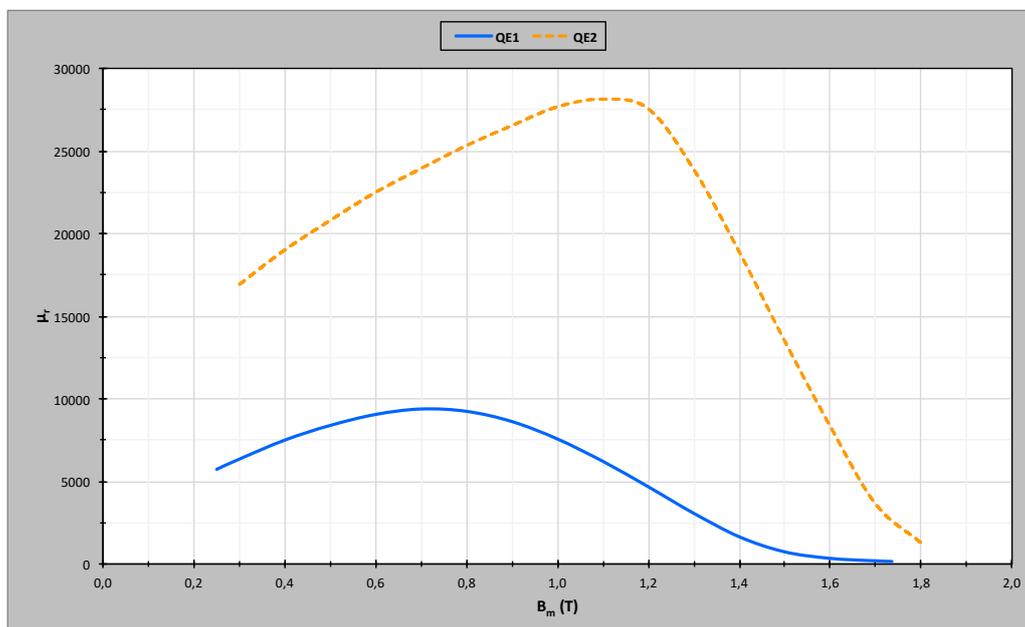
**Figura 5.2** Comparação entre as curvas de magnetização inicial para  $QE_1$  e  $QE_2$

Devido ao declive mais acentuado, presente na característica de magnetização de  $QE_2$ , pode-se afirmar que este material exhibe uma maior permeabilidade magnética. Tal aspecto está de acordo, com o esperado para o aço de grão orientado.

Os níveis máximos de indução  $B_m$ , atingidos para o aço  $QE_1$  foram 1,75 T com um campo magnético de  $9000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ , enquanto  $QE_2$  de modo a se obter uma densidade de fluxo máxima de 1,8 T, é necessário aplicar um campo magnético de  $1121 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Comparativamente e de acordo com a curva apresentada na Figura 5.2, para uma indução de aproximadamente 1,6 T, é necessário aplicar um campo magnético de  $3729 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  para o aço de grão não orientado, enquanto que para o aço elétrico de grão orientado é necessário aplicar um campo magnético de valor aproximado a  $152 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ . Tal diferença nos campos magnéticos deve-se à mais fácil magnetização dos aços de grão orientado.

Relativamente ao declive das curvas de magnetização inicial analisou-se a sua variação, ou seja, a evolução da permeabilidade magnética em função da densidade de fluxo  $B_m$ . Neste caso, a permeabilidade magnética relativa, obtida pela razão  $B_m / (\mu_0 \cdot H_m)$  em função de  $B_m$  está indicada na Figura 5.3.



**Figura 5.3** Variação da permeabilidade magnética relativa máxima em função da densidade de campo máximo para  $QE_1$  e  $QE_2$

Da observação da figura acima representada é evidente, que o aço de grão orientado tem valores de permeabilidade magnética superiores.

A permeabilidade magnética relativa máxima de  $QE_1$  é atingida para valores inferiores de indução magnética, comparativamente ao aço  $QE_2$ . Para o aço de grão não orientado esse valor é próximo de 0,7 T, enquanto que para o aço GO é aproximadamente 1,1 T.

A curva da potência magnetizante, ou curva de excitação, é representada desprezando as perdas ôhmicas no enrolamento primário, ou seja, calculando a potência necessária para magnetizar as chapas. A sua representação realizada pelo quadro de Epstein para os dois aços  $QE_1$  e  $QE_2$  é apresentada na Figura 5.4.

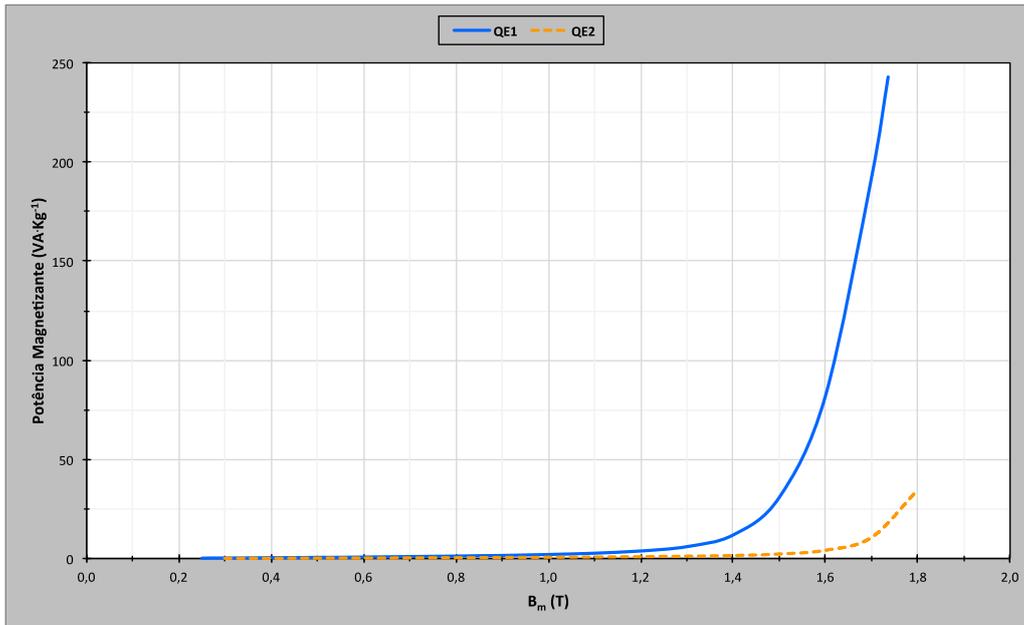


Figura 5.4 Curvas de excitação em função da densidade de fluxo máxima para  $QE_1$  e  $QE_2$

Como os aços de grão orientado exibem uma magnetização mais fácil, estes apresentam um valor de potência magnetizante inferior comparativamente aos aços de grão não orientados, representados no gráfico pela curva de  $QE_1$ .

O quadro de Epstein através do ensaio realizado permite obter as perdas magnéticas totais para  $QE_1$  e  $QE_2$ . A sua representação é indicada na Figura 5.5.

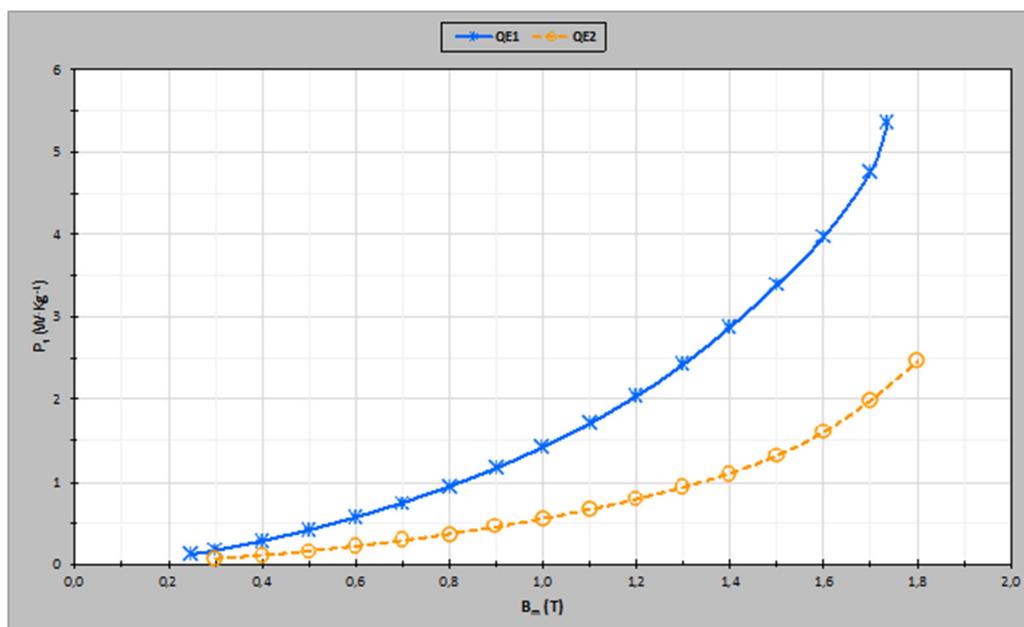


Figura 5.5 Perdas magnéticas totais para  $QE_1$  e  $QE_2$

Os resultados obtidos para as curvas, estão de acordo com os valores referidos para os aços de GNO e de GO, presentes no capítulo 3.3.2 e 3.3.3, respetivamente.

Em conclusão, relativamente aos aços caracterizados através do aparelho de Epstein, é possível verificar na Tabela 5.3 as diferenças entre os dois tipos de aços presentes.

**Tabela 5.3 Valores relativos aos ensaios com o quadro de Epstein**

	$B_m$ (T)	$H_m$ (A · m <sup>-1</sup> )	$\mu_r$ (Adim.)	P.M (VA · Kg <sup>-1</sup> )	$P_t$ (W · Kg <sup>-1</sup> )
$QE_1$	1,0	105	7571	2,04	1,41
	1,2	205	4667	3,82	2,03
	1,5	1634	731	30,74	3,39
$QE_2$	1,0	29	27681	0,65	0,56
	1,2	35	27551	0,95	0,79
	1,5	88	13496	2,28	1,31

Sendo que as suas propriedades são bastante distintas, é possível caracterizar o aço de grão orientado,  $QE_2$ , como sendo um aço de elevada permeabilidade, devido à sua permeabilidade relativa máxima ser aproximadamente  $\mu_r = 28141$ .

## 5.3 NÚCLEO DE TRANSFORMADOR

De acordo com os dados referidos na Tabela 5.2 foram ensaiados dois núcleos de material ferromagnético, nomeadamente  $T_1$  de aço elétrico de grão não orientado e  $T_2$  constituído por aço elétrico de grão orientado. Em seguida apresenta-se a chapa de características e respetiva montagem dos transformadores. Tendo por base o objetivo de caracterizar os dois núcleos, através da análise das perdas magnéticas totais em regime alternado sinusoidal, à frequência de 50 Hz, obteve-se para o estudo, as curvas de magnetização inicial, perdas magnéticas totais, potência magnetizante e evolução da permeabilidade magnética relativa, partindo dos valores de corrente de magnetização e fluxo magnético no ferro.

### 5.3.1 CHAPA DE CARACTERÍSTICAS DOS TRANSFORMADORES

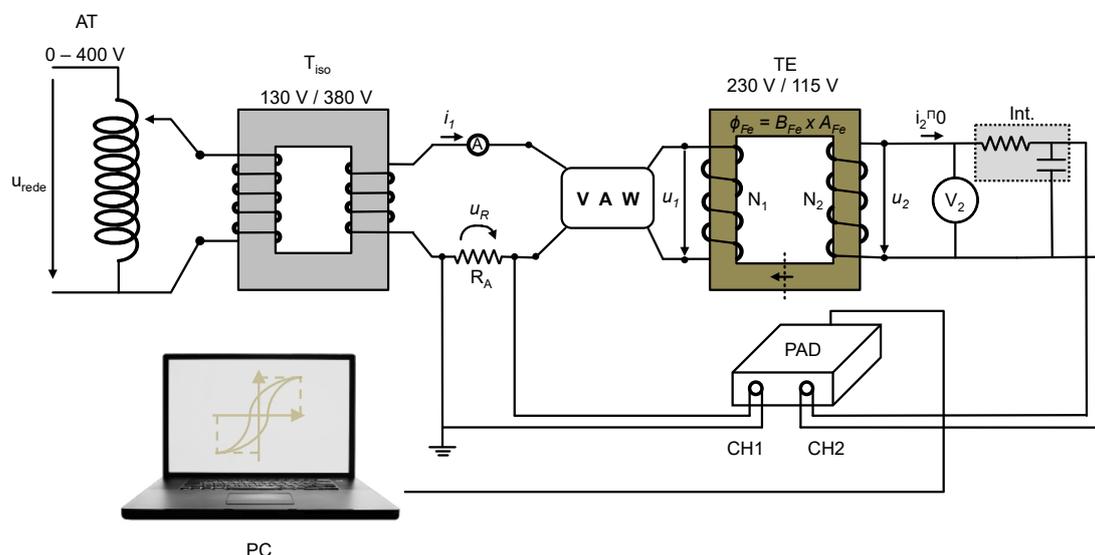
A Tabela 5.4 apresenta a chapa de características dos núcleos referente aos dois transformadores sob ensaio.

**Tabela 5.4 Chapa de características dos transformadores**

$S_n$ (kVA)	$f$ (Hz)	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$I_1$ (A)	$N_1$	$N_2$
1,15	50	230	115	10	203	102

### 5.3.2 MONTAGEM EXPERIMENTAL E LISTA DE MATERIAL

Na Figura 5.6 está representado o esquema elétrico da montagem experimental utilizado para determinar o ciclo de histerese dinâmico dos dois núcleos.



**Figura 5.6 Montagem experimental para determinação das perdas magnéticas totais**

O material necessário para realizar os ensaios com os transformadores monofásicos, que se encontra representado esquematicamente na figura anterior foi o seguinte:

- ❖ AT – Autotransformador variável (0 V / 400 V), que permite aplicar uma tensão variável aos enrolamentos do transformador de isolamento.
- ❖ T<sub>ISO</sub> – Transformador de isolamento (133 V / 380 V), responsável pelo isolamento galvânico da montagem experimental relativamente à rede.
- ❖ A – Amperímetro eletromagnético, utilizado para controlar os valores.
- ❖ R<sub>A</sub> – Resistência de amostragem (1 Ω), utilizada para medir a corrente no primário do transformador.
- ❖ V, A, W – Multímetro digital, que permite medir a tensão, corrente e potência ativa, usado apenas para controlo.
- ❖ TE – Transformador monofásico cujo núcleo se pretende ensaiar, com relação de tensões entre o primário e o secundário de 230 V / 115 V.
- ❖ N<sub>1</sub> e N<sub>2</sub> – Bobinas referentes ao primário e ao secundário, com 203 e 102 espiras, respetivamente.
- ❖ V<sub>2</sub> – Voltímetro digital utilizado para controlar a tensão em vazio no secundário do transformador sob ensaio.

- ❖ *Int.* – Integrador passivo RC, com constante de tempo  $\tau = 1\text{ s}$  ( $R = 1\text{ M}\Omega$  e  $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ ), que permite integrar a tensão aos terminais do secundário em vazio.
- ❖ *PAD* – Placa de aquisição de dados, para obtenção do valor das tensões aos terminais da resistência de amostragem e do integrador – *PicoScope Série 3000* da *Pico Technology Limited* – osciloscópio digital.
- ❖ *PC* – Computador para aquisição e tratamento dos resultados obtidos.

### 5.3.3 NÚCLEO DE TRANSFORMADOR $T_1$ E $T_2$ EM VAZIO

A Figura 5.7 representa, para uma indução máxima de 1,6 T, os ciclos de histerese dos dois núcleos ferromagnéticos  $T_1$  e  $T_2$ . Sendo que  $T_1$  corresponde ao núcleo constituído por chapas laminadas de aço elétrico de grão não orientado e  $T_2$  corresponde ao núcleo constituído por chapas laminadas de aço elétrico de grão orientado.

Tal como esperado, a área do ciclo de histerese de  $T_2$  é inferior à área do ciclo de histerese de  $T_1$ , apresentando assim menores perdas magnéticas. Relativamente ao declive, ou seja, a permeabilidade magnética, o aço de grão não orientado  $T_1$  apresenta um menor declive comparativamente ao aço de grão orientado  $T_2$ , significando por isso uma característica com menor permeabilidade.

Para se obter em  $T_1$  o nível de indução máximo  $B_m$  igual a 1,6 T, foi necessário aplicar um campo magnético aproximadamente igual a  $1030\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ . O qual é significativamente superior ao campo magnético necessário para atingir a mesma indução máxima em  $T_2$ , visto que para este tipo de aços elétricos apenas foi necessário aplicar um campo magnético de aproximadamente  $705\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ .

Apesar da diferença pouco acentuada na densidade de fluxo remanescente  $B_r$  e no campo magnético coercivo  $H_c$ , o aço elétrico  $T_1$  apresenta para ambos, valores superiores, de aproximadamente 0,54 T e  $100\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ , respetivamente. Enquanto que para  $T_2$  a densidade de fluxo remanescente é de aproximadamente 0,3 T e o campo magnético coercivo de aproximadamente  $56\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ .

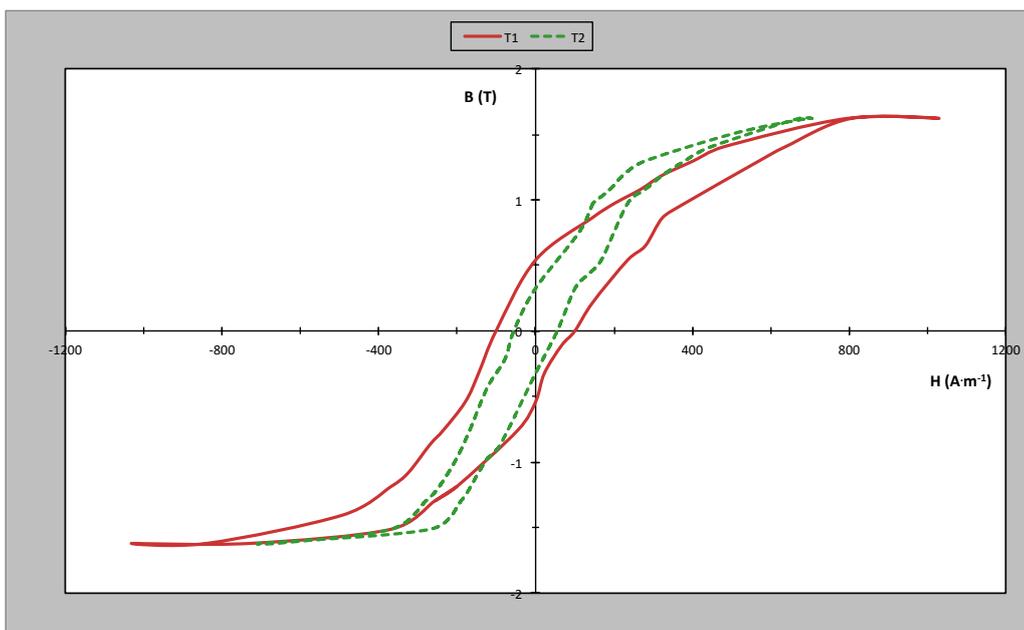


Figura 5.7 Ciclos de histerese de  $T_1$  e  $T_2$  para  $B_m = 1,6 \text{ T}$  e  $f = 50 \text{ Hz}$

A partir do traçado dos ciclos de histerese para diversos valores de  $B_m$ , obtiveram-se as características de magnetização para os diferentes materiais, representadas na Figura 5.8.

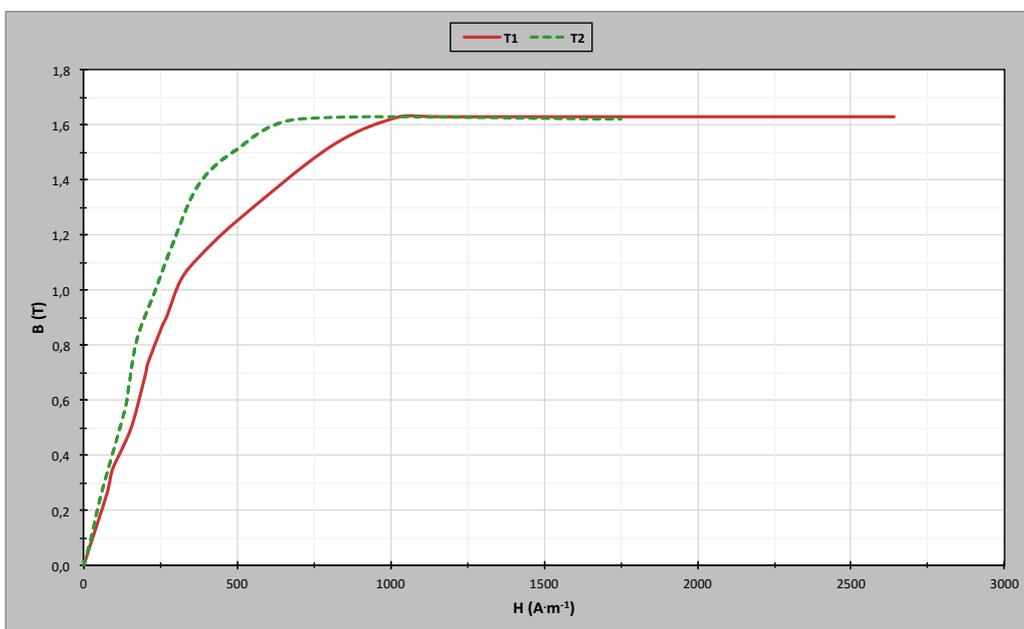
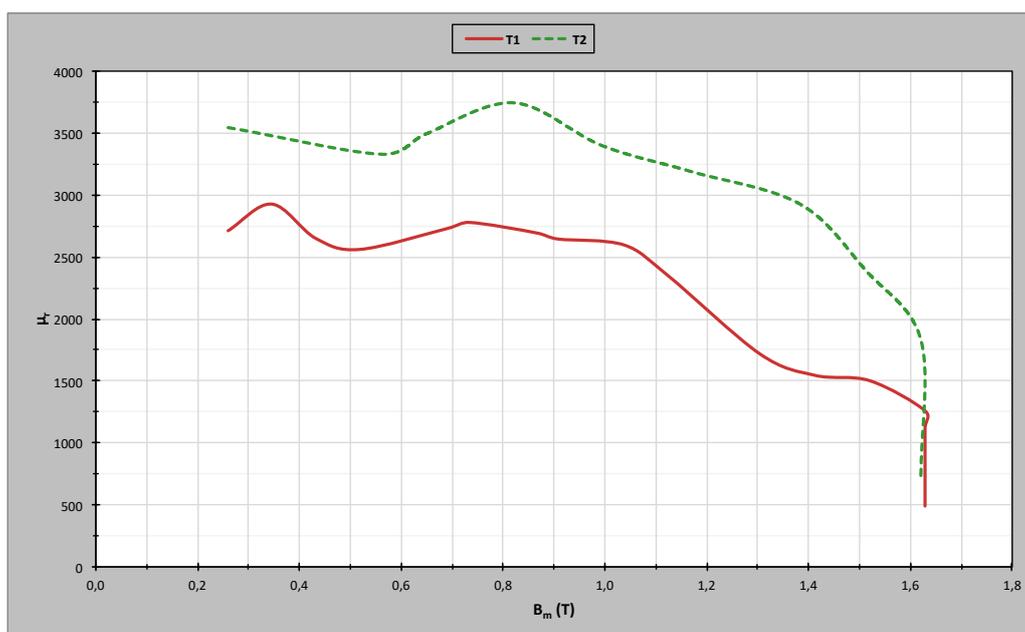


Figura 5.8 Comparação entre as curvas de magnetização inicial para  $T_1$  e  $T_2$

Ambos os núcleos atingiram praticamente o mesmo nível de indução máxima  $B_m$  de aproximadamente 1,6 T. Tal como referido e ilustrado na Figura 5.7, para atingir estes campos de indução foi necessário aplicar um campo magnético de  $1030 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  para o aço elétrico  $T_1$ , que se variou até aproximadamente  $2640 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ , enquanto para  $T_2$  apenas foi necessário aplicar um campo magnético de  $705 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  para que o núcleo atingisse o valor máximo de indução, o qual se variou até um campo magnético de  $1750 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ . Tal diferença nos campos magnéticos deve-se à mais fácil magnetização dos aços de grão orientado.

De acordo com o que foi apresentado na Figura 5.2 para os aços inseridos no quadro de Epstein, a Figura 5.8 demonstra um declive mais acentuado relativo à curva de  $T_2$ , o que indica uma maior permeabilidade magnética e relativamente à característica dos aços, enquadra-se com o aço representado ser um aço de grão orientado. Para os dois aços presentes sob ensaio, e tendo em conta que estas curvas se tratam de valores aproximados, a indução de saturação  $B_s$  ronda 1,1 T para  $T_1$  e 1,4 T para  $T_2$ .

A variação da permeabilidade magnética relativa em função da densidade de fluxo máxima é traçada na Figura 5.9, para  $T_1$  e  $T_2$ .



**Figura 5.9** Variação da permeabilidade magnética relativa máxima em função da indução de fluxo máxima para  $T_1$  e  $T_2$

Tal como esperado, a permeabilidade magnética relativa é superior para o aço elétrico de grão orientado  $T_2$ , sendo o valor do seu máximo aproximadamente 3745 (Adim.), tal aspecto deve-se ao declive mais acentuado presente na representação das curvas de magnetização, e está de acordo com a características inerentes a este tipo de aços elétricos. Para o aço de

grão não orientado  $T_1$  o valor do seu máximo de permeabilidade magnética relativa é de aproximadamente 2927 (Adim.).

Desprezando as perdas ôhmicas no enrolamento primário é possível traçar a curva de potência magnetizante, à qual também se pode designar de curva de excitação, e que permite avaliar a potência necessária para magnetizar os núcleos. Na Figura 5.10 ilustram-se estas curvas para os aços elétricos  $T_1$  e  $T_2$ .

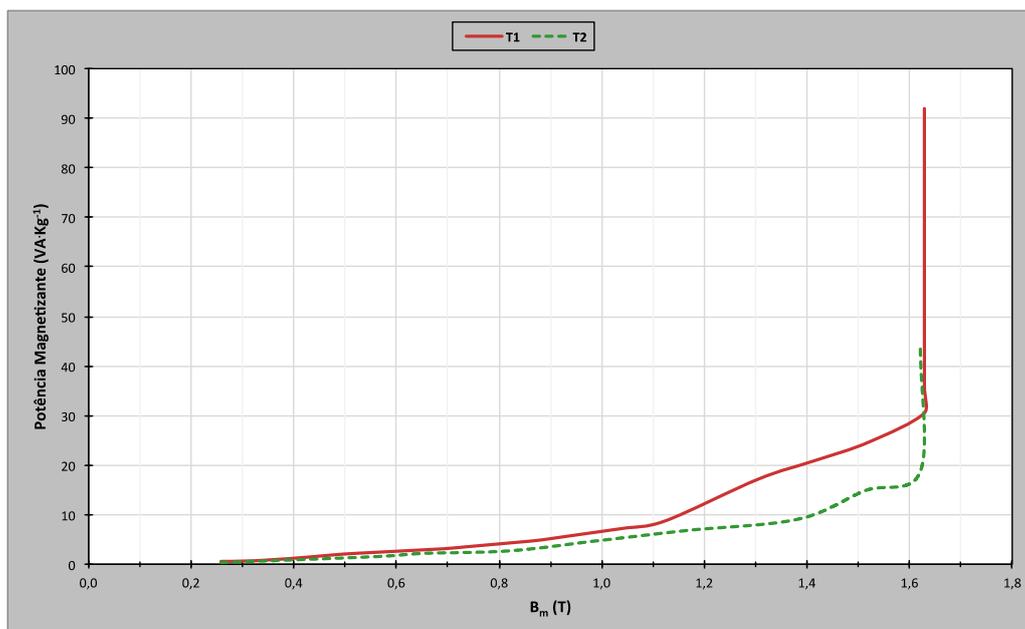


Figura 5.10 Curvas de excitação em função da densidade de fluxo máxima para  $T_1$  e  $T_2$

Assim, de acordo com o descrito na secção 5.2 relativamente às curvas de potência magnetizante no quadro de Epstein, evidencia-se a menor necessidade de magnetização dos aços de grão orientado comparativamente aos aços de grão não orientado.

A partir dos ensaios realizados é possível determinar as perdas magnéticas totais, estando estas ilustradas na Figura 5.11.

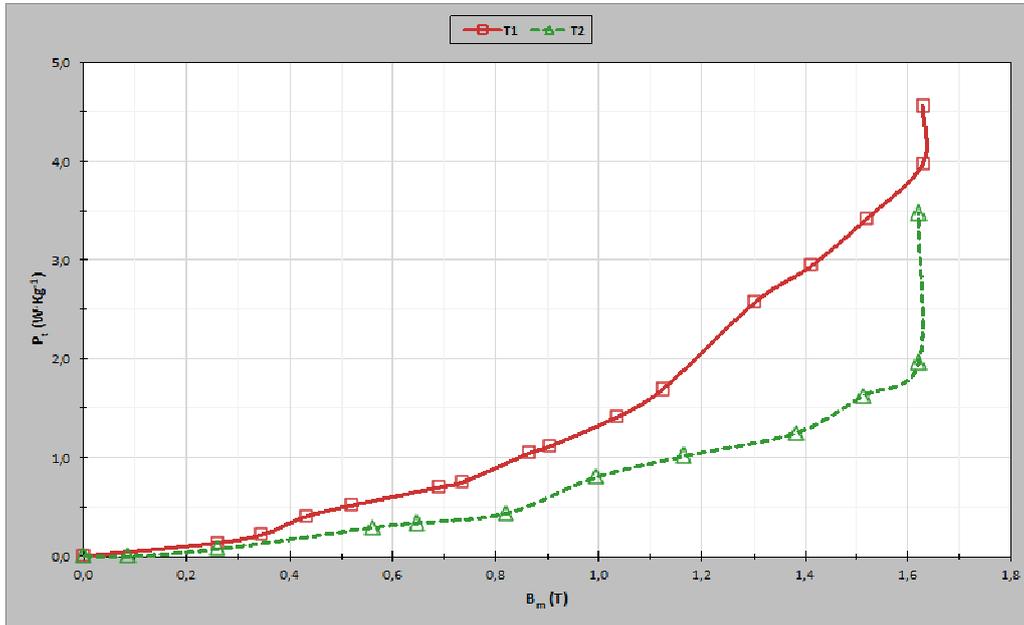


Figura 5.11 Perdas magnéticas totais para  $T_1$  e  $T_2$

Os resultados obtidos para as curvas, estão de acordo com os valores referidos para os aços de GNO e de GO, presentes no capítulo 3.3.2 e 3.3.3, respetivamente.

Em seguida a Tabela 5.5 apresenta os valores de campo magnético máximo, permeabilidade magnética relativa máxima e as perdas magnéticas dos aços de GNO e GO presentes no núcleo dos transformadores  $T_1$  e  $T_2$  para os respetivos valores de indução magnética de 1,0 T, 1,2 T e 1,5 T.

Tabela 5.5 Valores relativos aos ensaios com os transformadores monofásicos

	$B_m$ (T)	$H_m$ (A · m <sup>-1</sup> )	$\mu_r$ (Adim.)	P.M (VA · Kg <sup>-1</sup> )	$P_t$ (W · Kg <sup>-1</sup> )
$T_1$	1,0	300	2625	6,96	1,32
	1,2	475	2075	12,31	2,09
	1,5	775	1525	23,87	3,31
$T_2$	1,0	234	3397	4,76	0,81
	1,2	300	3150	7,34	1,05
	1,5	485	2449	14,56	1,59

## 5.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

De modo a aferir se os métodos utilizados, apresentam resultados coerentes, é necessário comparar os valores obtidos para cada um dos aços aquando do ensaio nos diferentes instrumentos de medição. Para tal, e de acordo com o apresentado anteriormente, separam-se as curvas conforme o método ensaiado, consoante a característica do aço em questão que se pretende diferenciar. Tal como referido, parte-se do pressuposto que ambos os conjuntos provêm do mesmo fornecedor, o qual não garante a proveniência advir do mesmo lote.

### 5.4.1 $QE_1$ E $T_1$

Nesta secção pretende-se realizar a comparação entre os aços elétricos de grão não orientado, presentes no quadro de Epstein  $QE_1$ , e no núcleo do transformador  $T_1$ .

No que diz respeito aos aços de grão não orientado, os resultados referentes às curvas de magnetização estão ilustrados na Figura 5.12.

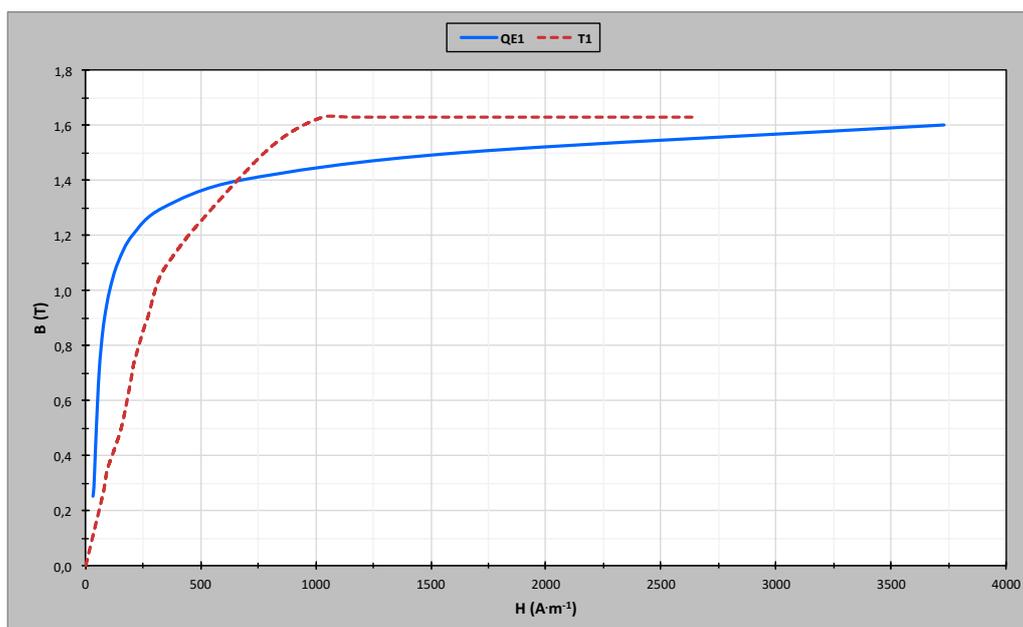


Figura 5.12 Comparação das curvas de magnetização inicial para aços de GNO

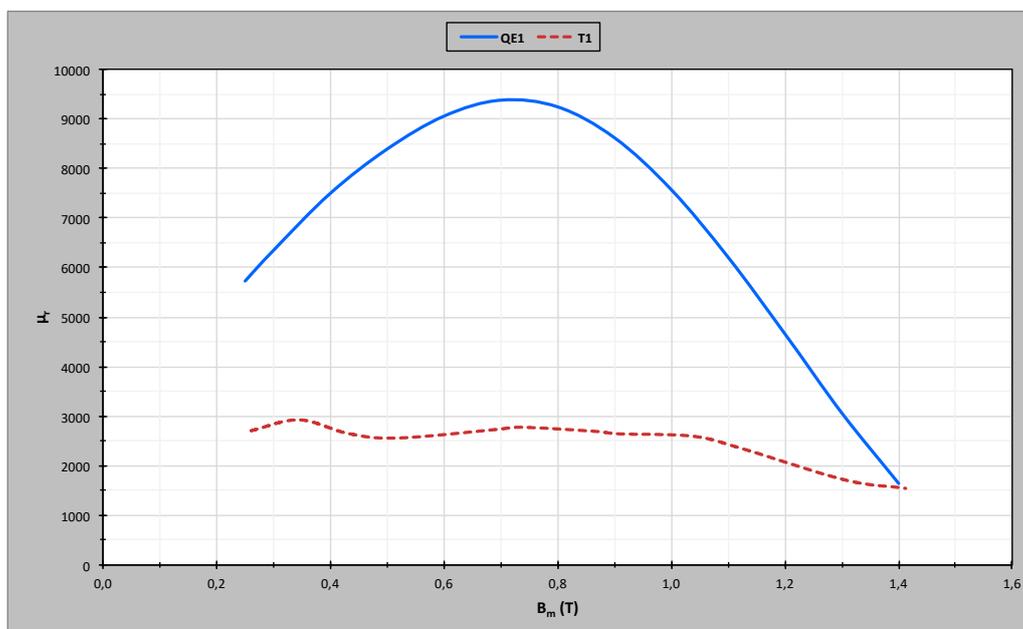
Observa-se pelo gráfico anterior que na zona de declive linear, ou seja, na zona de descolamento irreversível das paredes de domínio, ocorrem diferenças bastante acentuadas entre os dois métodos, apresentando uma diferença que no mínimo é de aproximadamente 25% ao se fixar o campo magnético aplicado. Por sua vez, na zona de saturação técnica essas diferenças são atenuadas, tendo uma diferença que varia de aproximadamente 5% a

11%. Para uma indução  $B = 1,3 \text{ T}$  a diferença percentual entre os campos magnéticos aplicados para as duas curvas toma o valor de aproximadamente 63%.

Pelo que já foi referido anteriormente, o conjunto de aços elétricos presente no quadro de Epstein, apresenta uma indução de saturação  $B_s$  de  $1,2 \text{ T}$  para a qual é necessário aplicar um campo magnético de  $200 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ , enquanto para o conjunto de aços elétricos que perfaz o núcleo  $T_1$  o valor de indução de saturação é aproximadamente  $1,1 \text{ T}$ , sendo necessário aplicar um campo magnético superior que ronda os  $380 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .

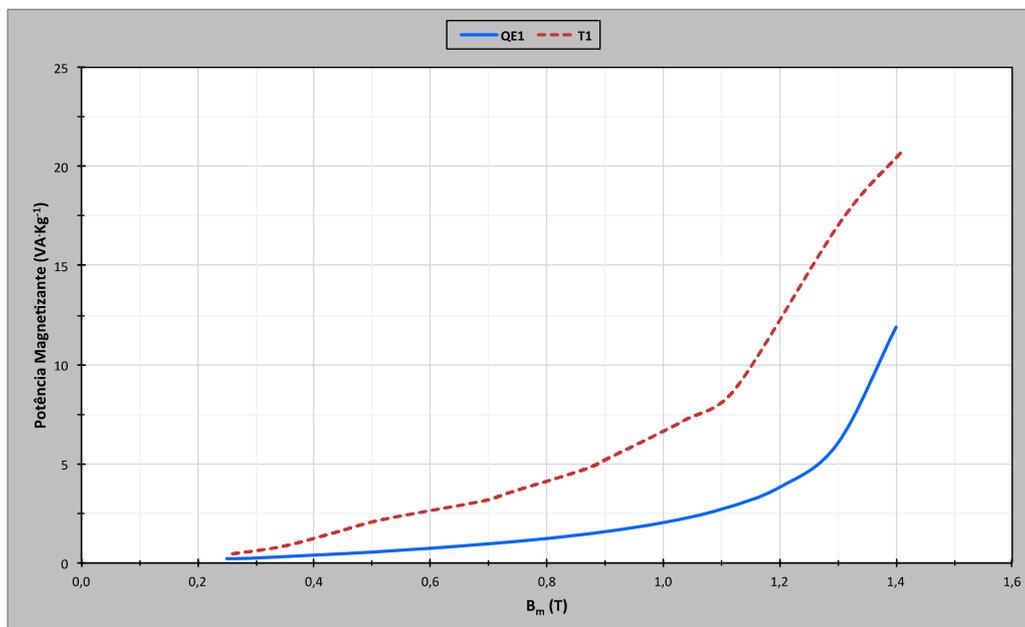
Em relação aos valores de campo de indução máximo obtidos e, de acordo com a Figura 5.2, onde se ilustra a curva da magnetização inicial de  $QE_1$  completa, sabe-se que esse valor é aproximadamente  $1,7 \text{ T}$ . Por sua vez, o núcleo do transformador  $T_1$  atinge o máximo da indução para valores aproximadamente superiores a  $1,6 \text{ T}$ .

Os valores obtidos para a permeabilidade magnética estão representados na Figura 5.13. A discrepância entre os valores é bastante visível apresentando uma diferença que no máximo toma uma variação de 343% para o valor máximo de permeabilidade magnética do quadro de Epstein. Esta variação, tendo em conta que a permeabilidade magnética é uma característica da qualidade dos aços elétricos, permite afirmar que os aços elétricos sob teste, apesar de ambos serem de grão não orientado (pois o aço existente no transformador  $T_1$  exibe as características de um aço de grão não orientado, seguindo os valores normais de permeabilidade magnética tabelados), realmente não provêm do mesmo lote, sendo inconclusivo.



**Figura 5.13 Comparação entre as curvas de permeabilidade magnética máxima para os aços de GNO, em função do campo de indução máxima**

A curva de potência magnetizante obtida pelos dois métodos de caracterização é representada na Figura 5.14.



**Figura 5.14** Comparação entre as curvas de potência magnetizante obtidas para os aços de GNO, em função da indução máxima

A potência necessária para magnetizar o núcleo do transformador  $T_1$  até um dado valor de  $B_m$ , que vai até aproximadamente 1,4 T, é maior, estando de acordo com o fato da permeabilidade magnética nessa situação ser menor.

A Figura 5.15 representa o comportamento das perdas magnéticas totais descrito pelos dois métodos utilizados.

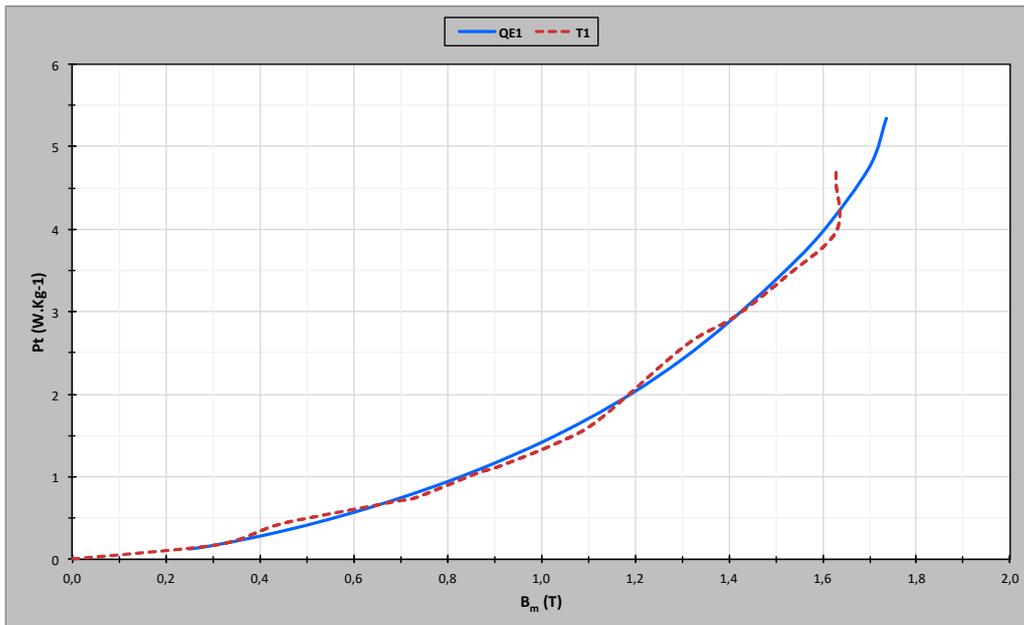


Figura 5.15 Comparação das perdas magnéticas totais para  $QE_1$  e  $T_1$

A curva referente ao transformador  $T_1$  segue a curva apresentada pelo quadro de Epstein quase de maneira uniforme, apresentando pequenos desvios que no máximo tomam uma diferença percentual de aproximadamente 18% para uma indução magnética máxima de 0,5 T.

Em seguida apresenta-se um gráfico com a variação das perdas magnéticas totais para os dois aços ensaiados.

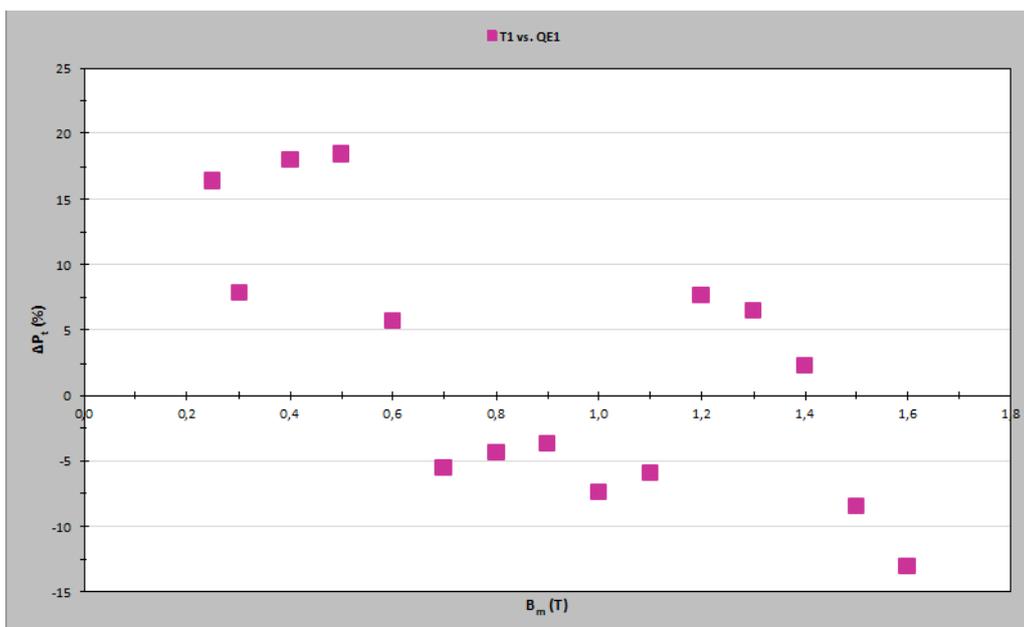


Figura 5.16 Variação das perdas magnéticas totais para  $QE_1$  e  $T_1$

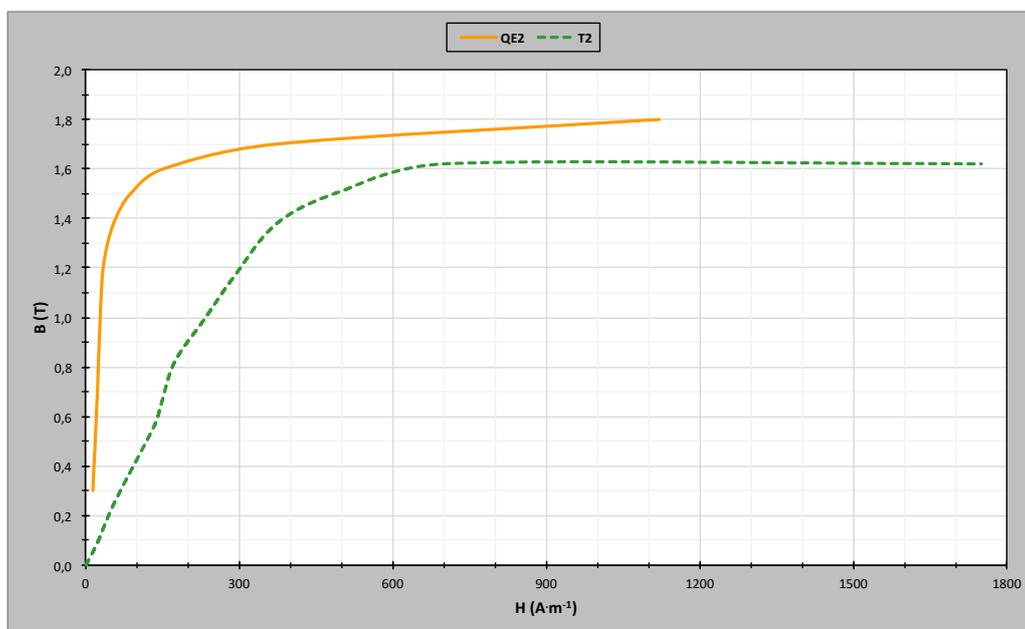
Por fim a Tabela 5.6, apresenta uma comparação entre os dois métodos de caracterização para vários pontos de funcionamento, nos aços elétricos de grão não orientado. As diferenças presentes permitem afirmar que apesar dos valores de perdas magnéticas serem aproximados, existe uma falta de coerência entre os dois processos.

**Tabela 5.6 Valores relativos aos ensaios com o aço de GNO**

	$B_m$ (T)	$H_m$ (A · m <sup>-1</sup> )	$\mu_r$ (Adim.)	P.M (VA · Kg <sup>-1</sup> )	$P_t$ (W · Kg <sup>-1</sup> )
$QE_1$	1,0	105	7571	2,04	1,41
	1,2	205	4667	3,82	2,03
	1,5	1634	731	30,74	3,39
$T_1$	1,0	300	2625	6,96	1,32
	1,2	475	2075	12,31	2,09
	1,5	775	1525	23,87	3,31

### 5.4.2 $QE_2$ E $T_2$

Apresentam-se agora os resultados obtidos para os aços de grão orientado presentes no aparelho de Epstein e no transformador monofásico. Ilustra-se na Figura 5.17 as curvas de magnetização.

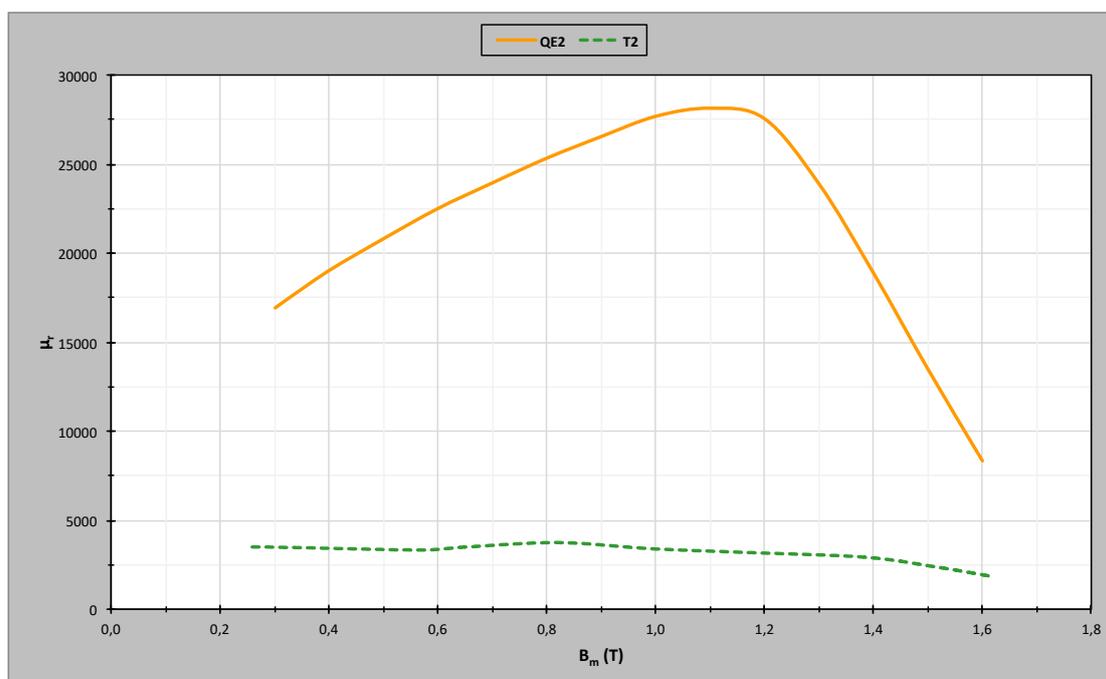


**Figura 5.17 Comparação das curvas de magnetização inicial para aços de GO**

Pela análise das curvas, é evidente a diferença existente, variando aproximadamente de 9% a 18% na zona de saturação da curva referente ao quadro de Epstein. O declive do aço elétrico introduzido no quadro de Epstein é bastante superior ao existente no núcleo do transformador  $T_2$ , ou seja, apresenta uma permeabilidade magnética muito superior.

Comparativamente, a indução de saturação  $B_s$  para  $QE_2$  é aproximadamente 1,4 T, enquanto que no transformador monofásico este valor é aproximadamente 1,2 T. No que se refere ao campo magnético aplicado, para uma indução magnética de  $B = 1,6$  T é necessário aplicar  $152 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  às lâminas sob ensaio no quadro de Epstein enquanto para o núcleo do transformador  $T_2$  de modo a atingir esse valor de indução é necessário aplicar  $630 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Os valores obtidos para a permeabilidade magnética estão representados na Figura 5.18. Sendo que a discrepância entre os valores apresentados é bastante significativa, podendo a diferença entre as curvas diferir no seu máximo aproximadamente 866%.



**Figura 5.18 Comparação entre as curvas de permeabilidade magnética relativa máxima para aços de GO, em função do campo de indução máxima**

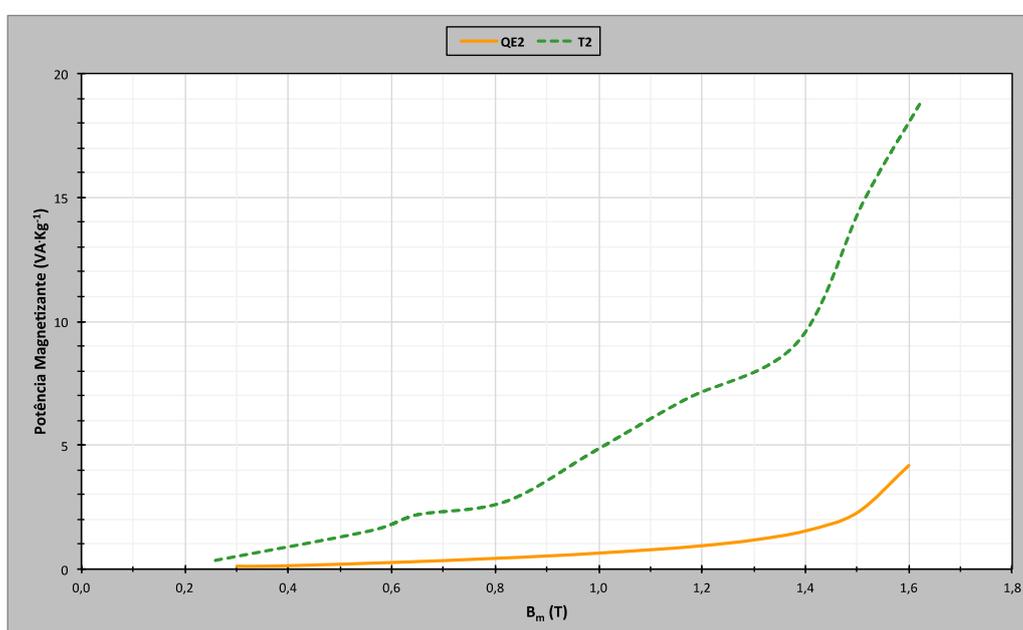
Analisando ao pormenor a curva de permeabilidade magnética do quadro de Epstein e, tendo em conta que o valor máximo atingido ser aproximadamente  $\mu_r = 28141$  (Adim.), pode-se afirmar que o material presente neste equipamento, é caracterizado por ser aço elétrico de grão orientado de elevada permeabilidade.

A diferença mais acentuada entre as duas curvas de grão orientado, comparativamente às de grão não orientado, em parte, deve-se à direção de laminagem no transformador monofásico, nem sempre seguir a direção de corte, fazendo assim com que nem todos os

domínios magnéticos se encontrem alinhados com o campo magnético aplicado. Aspeto esse, não presente no quadro de Epstein.

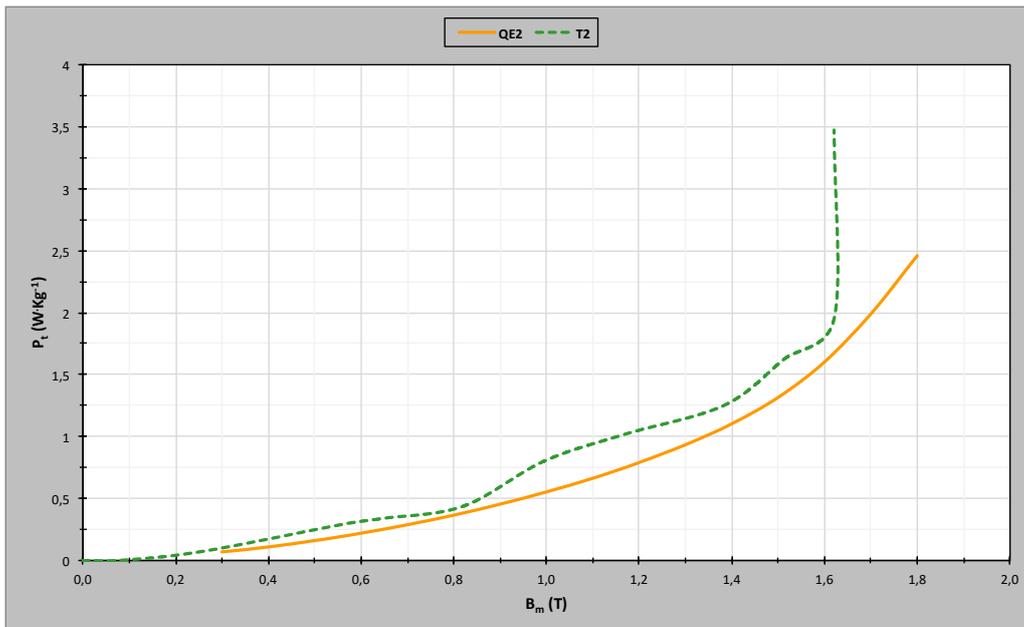
Tal como concluído em 5.4.1, aqui também é possível afirmar que apesar da categoria dos aços elétricos presentes serem ambos de grão orientado, estes não apresentam características de permeabilidade semelhantes, sendo que o conjunto de aços inseridos no aparelho de Epstein, apresenta características bastante superiores. Este aspeto poderá em parte também dever-se à geometria, a qual difere entre os dois métodos.

A curva de potência magnetizante obtida pelos dois métodos de caracterização é representada na Figura 5.19 e está de acordo com o apresentado no gráfico relativo à permeabilidade magnética.



**Figura 5.19 Comparação entre as curvas de potência magnetizante obtidas para os aços de GO, em função da indução máxima**

A Figura 5.20 ilustra o comportamento das perdas magnéticas totais descrito pelos dois métodos utilizados aquando dos ensaios com aços de grão orientado.



**Figura 5.20 Comparação das perdas magnéticas totais para  $QE_2$  e  $T_2$**

A curva referente ao transformador  $T_2$  apresenta diferenças significativas comparativamente ao quadro de Epstein, sendo que foram obtidos valores de perdas superiores, ainda que dentro dos parâmetros para os aços de grão orientado. As diferenças existentes tomam valores percentuais de aproximadamente 21%, 34% e 47% para as induções magnéticas de 1,5 T, 1,2 T e 1,0 T, respectivamente.

De acordo com o descrito sobre a permeabilidade magnética, aqui também é evidente uma diferença mais acentuada, comparativamente aos aços de GNO. Tal discrepância deve-se à direção preferencial do campo magnético aplicado, estar de acordo com a direção de laminagem presente nas lâminas inseridas no quadro de Epstein, enquanto que para o núcleo do transformador, devido à construção presente ser na forma UI, existam zonas onde o campo magnético aplicado é perpendicular à direção de laminagem.

Em seguida apresenta-se um gráfico com a variação das perdas magnéticas totais para os dois aços de grão orientado. Sendo que para esta categoria de aços elétricos a diferença nas medidas foi bastante mais acentuada do que para os aço de grão orientado, apresentando um valor percentual máximo de aproximadamente 56,4% para uma indução magnética máxima de 0,5 T.

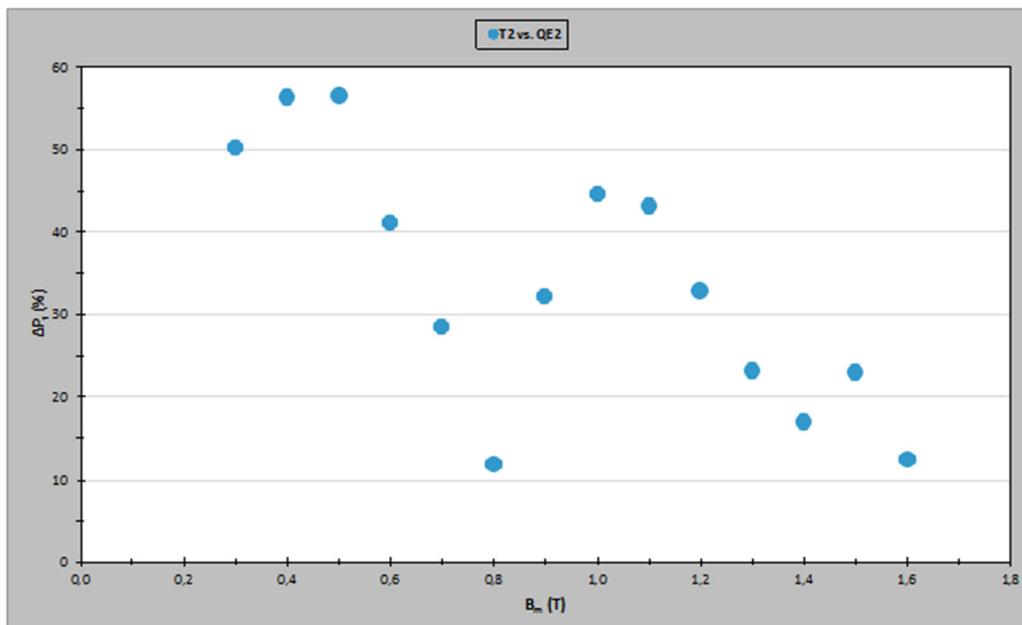


Figura 5.21 Variação das perdas magnéticas totais para  $QE_2$  e  $T_2$

Por fim apresenta-se na Tabela 5.7 uma comparação dos dois métodos de caracterização para vários pontos de funcionamento. Tal como referido até aqui, as diferenças existentes para os aços elétricos de grão orientado são bastante superiores.

Tabela 5.7 Valores relativos aos ensaios com o aço de GO

	$B_m$ (T)	$H_m$ ( $A \cdot m^{-1}$ )	$\mu_r$ (Adim.)	P.M ( $VA \cdot Kg^{-1}$ )	$P_t$ ( $W \cdot Kg^{-1}$ )
$QE_2$	1,0	29	27681	0,65	0,56
	1,2	35	27551	0,95	0,79
	1,5	88	13496	2,28	1,31
$T_2$	1,0	234	3397	4,76	0,81
	1,2	300	3150	7,34	1,05
	1,5	485	2449	14,56	1,59

## 5.5 RESUMO DOS VALORES OBTIDOS

Em seguida apresentam-se alguns valores e gráficos obtidos, comparativamente a todos os aços ensaiados.

Na Tabela 5.8 comparam-se os valores obtidos para uma indução magnética de  $B = 1,4$  T. Onde  $H_m$  é a indução máxima,  $\mu_r$  a permeabilidade relativa máxima e  $P_t$  as perdas magnéticas observadas.

Tabela 5.8 Valores relativos aos ensaios realizados para os aços  $QE_1$  e  $T_1$  (GNO),  $QE_2$  e  $T_2$  (GO)

	$B$ (T)	$H_m$ ( $A \cdot m^{-1}$ )	$\mu_r$ (Adim.)	P.M ( $VA \cdot Kg^{-1}$ )	$P_t$ ( $W \cdot Kg^{-1}$ )
$QE_1$	1,4	678	1644	11,90	2,87
$T_1$	1,4	678	1600	20,42	2,86
$QE_2$	1,4	59	18882	1,54	1,10
$T_2$	1,4	390	2900	9,47	1,28

De modo a realizar uma comparação de todos os aços ensaiados, obtiveram-se-se as curvas de permeabilidade magnética máxima e de perdas magnéticas.

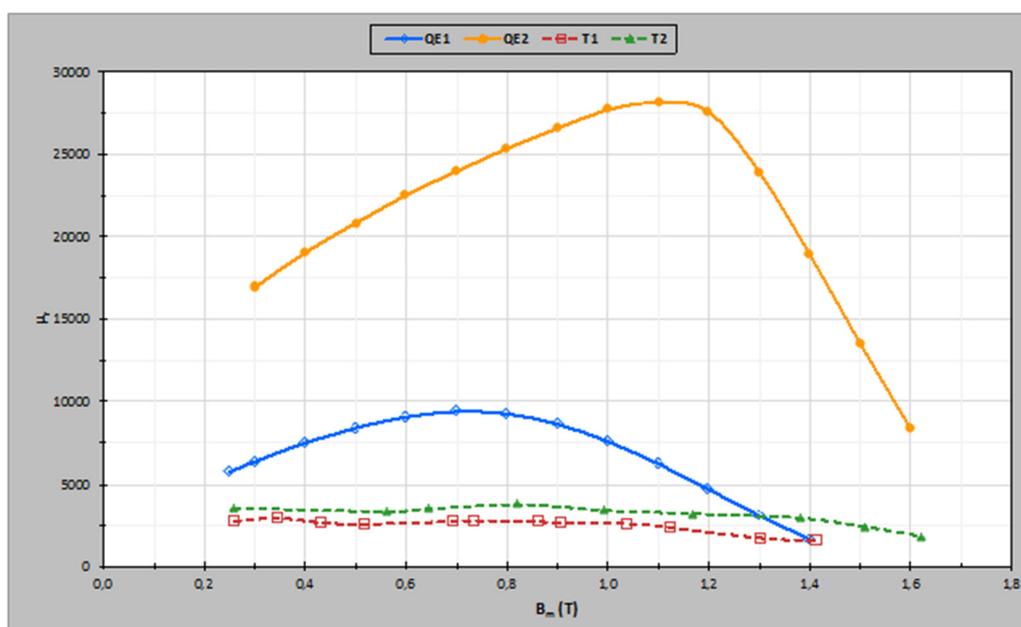
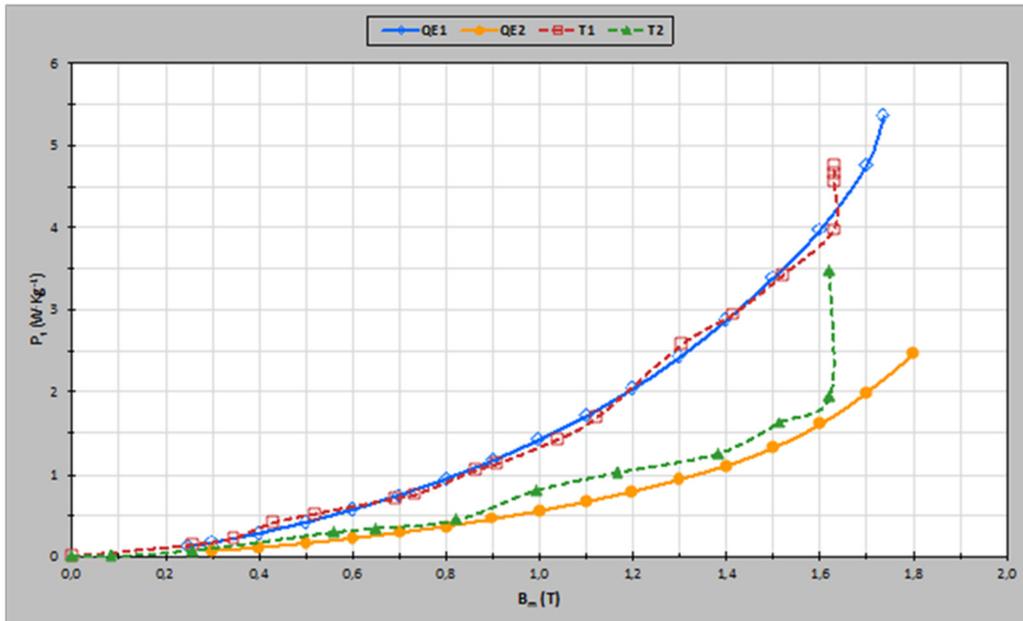


Figura 5.22 Variação da permeabilidade magnética relativa máxima em função do campo de indução máxima para os aços  $QE_1$ ,  $QE_2$ ,  $T_1$  e  $T_2$



**Figura 5.23** Comparação das perdas magnéticas totais para  $QE_1$ ,  $QE_2$ ,  $T_1$  e  $T_2$

As diferenças presentes na Tabela 5.8 podem ser explicadas pelos mecanismos utilizados no quadro de Epstein apresentarem classes de precisão superiores, comparativamente aos materiais disponíveis em laboratório.

Sabendo que a permeabilidade magnética é um indicador da qualidade dos aços, é possível afirmar, tanto para os aços de GNO como para os aços de GO, que os dois conjuntos de lâminas ensaiadas no quadro de Epstein apresentam melhores características. Sendo este aspeto mais evidente no aços de GO. Estas diferenças são reforçadas devido à geometria dos dois equipamentos ser diferente, induzindo em erros aquando da comparação dos dois métodos.

Da análise da Figura 5.23 referente às perdas magnéticas é possível verificar que a diferença entre os dois métodos de medição é mais evidente para os aços de grão orientado, tal característica é comprovada pelos valores superiores presentes no gráfico da Figura 5.24.

Apesar das diferenças visíveis, os valores pontuais obtidos tanto para o quadro de Epstein como para os transformadores monofásicos, estão dentro dos valores esperados.

Sobre os ensaios nos transformadores, estes estão de acordo com os valores obtidos por (Pronto 2010).

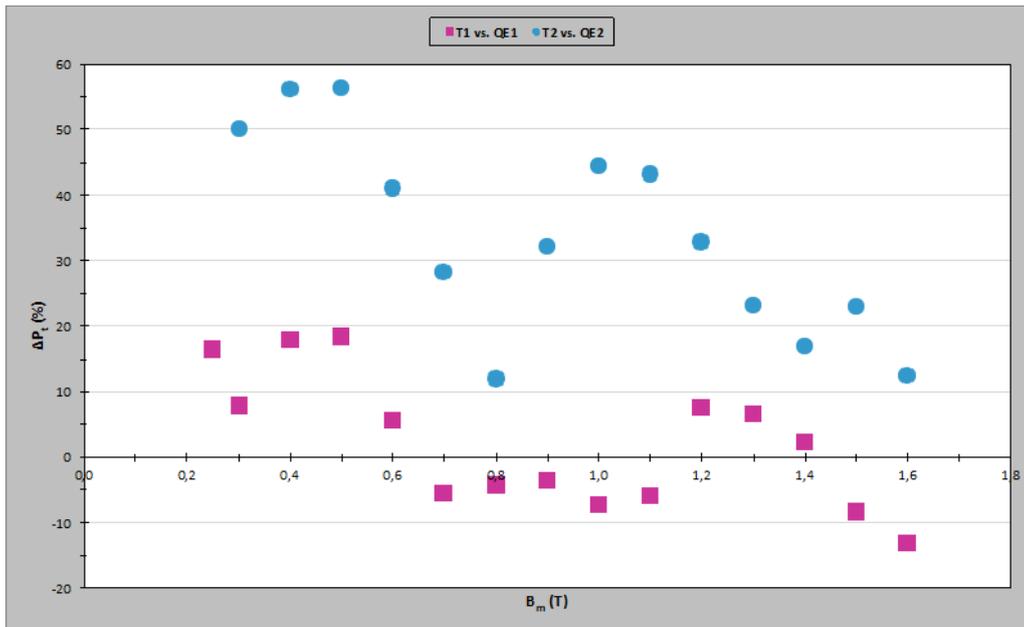


Figura 5.24 Comparação da variação das perdas magnéticas totais para os aços de grão não orientado e para os aços de grão orientado

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Pretende-se com este capítulo apresentar as principais conclusões obtidas após a realização dos ensaios e referir algum trabalho de interesse, visto este ser um campo de grande interesse, a nível académico e industrial, e com investigação constante.

### 6.1 CONCLUSÕES

Após a realização deste trabalho e de acordo com a motivação e objetivos inicialmente definidos, pode-se concluir o seguinte:

- ❖ As perdas magnéticas totais apesar de estarem de acordo com os valores estipulados apresentam diferenças entre as medições, sendo as quais superiores para os aços de grão orientado. Tal aspeto deve-se em parte ao aparelho de Epstein ser construído de forma a que campo de indução magnética tenha, sempre que possível a direção paralela ao campo magnético aplicado, fazendo com que seja mais preciso em medições onde o aço elétrico a caracterizar seja de grão orientado. Implicitamente a precisão inferior das medidas referentes às perdas magnéticas no núcleo dos transformadores, deve-se ao fato dos núcleos terem a sua constituição na forma UI e por isso apresentarem uma zona específica, na qual a orientação dos domínios magnéticos é perpendicular ao campo magnético resultante, fazendo com que a distribuição do campo magnético não seja uniforme ao longo da magnetização dos transformadores.
- ❖ As permeabilidades magnéticas obtidas apresentam diferenças bastante elevadas, o que indica que os materiais em teste, apesar de se encontrarem dentro da mesma categoria (comparação entre aços GO e GNO) são diferentes, sendo que os presentes nos transformadores apresentam qualidades inferiores comparativamente aos aços utilizados nos ensaios com o quadro de Epstein.
- ❖ Outra característica de relevo é a influência da geometria. Tal como referido os núcleos dos transformadores utilizados apresentam uma zona específica na qual a orientação dos domínios magnéticos é perpendicular ao campo magnético aplicado, o que pode originar erros aquando da comparação com aços elétricos onde essa zona não existe, como é o caso dos aços elétricos utilizados e inseridos no quadro de Epstein.
- ❖ Apesar das desvantagens inerentes ao quadro de Epstein, tais como o caminho magnético convencionado ser sempre igual independentemente do material inserido e a existência de entreferros nas juntas, este equipamento apresenta vantagens, relativamente aos transformadores monofásicos, que se apresentam como sendo a menor quantidade de material necessária a ensaiar (menor investimento para

realizar o ensaio), possibilidade de ensaiar diferentes materiais sem que haja necessidade de construir outro dispositivo, montagem e reprodutibilidade dos testes superior e o tempo despendido para realizar os ensaios ser inferior – daí ser perceptível o porquê deste equipamento ser utilizado na caracterização padrão dos aços elétricos.

Portanto, tendo em vista a comparação das características magnéticas obtidas e sabendo que tradicionalmente as perdas magnéticas são o principal parâmetro de controle dos aços elétricos, pode-se afirmar que apesar das geometrias presentes diferirem entre si, as diferenças para os aços elétricos de grão não orientado não são muito relevantes, podendo os utilizadores de núcleos de transformadores em serviço ter em conta os valores apresentados pelos fornecedores de aços elétricos que utilizam o aparelho de Epstein para caracterizar os seus aços.

Porém, quando se pretende que o equipamento a dimensionar seja construído por aços elétricos de grão orientado ocorre a necessidade de verificar os valores padrão e as geometrias utilizadas. Pois tal como referido, com estes aços elétricos o risco de não existir coerência entre os resultados obtidos é superior.

Os dados obtidos permitem afirmar que relativamente às perdas magnéticas, estas estão de acordo com os valores estabelecidos independentemente do equipamento utilizado. Porém seria necessário realizar novos ensaios com diferentes materiais dando uma maior importância às geometrias utilizadas, de modo a aprofundar a coerência real entre as medições realizadas pelas empresas fornecedoras de aços elétricos e os equipamentos que se encontram em serviço.

## **6.2 TRABALHO FUTURO**

São vários os assuntos que ao longo deste trabalho se mostraram de grande interesse e relevo no estudo de materiais magnéticos macios e das suas propriedades magnéticas.

Tal como referido, devido às diferenças existentes nos resultados seria interessante aprofundar este estudo alargando-o para outros tipos de materiais, tendo sempre em conta as geometrias presentes nos diferentes equipamentos, de modo a aferir a existência ou não de coerência entre os valores obtidos pelo método de Epstein e equipamentos em serviço, de modo a evitar dimensionamentos errados e custos muito mais elevados do que seria esperado.

Foi visto que o aparelho de Epstein apresenta uma ampla gama de frequências de trabalho. Sendo esta uma característica interessante que permite alargar o estudo sobre a influência das propriedades magnéticas que caracterizam os aços elétricos e sobre o funcionamento do próprio quadro de Epstein.

Por fim, seria interessante realizar um estudo sobre as propriedades magnéticas dos aços elétricos a diferentes temperaturas. Ou seja, comparar os dados aqui obtidos com aqueles que se obtêm a diferentes temperaturas, nomeadamente à temperatura do azoto líquido. Utilizando para isso os mesmo equipamentos – quadro de Epstein e núcleo de transformador.



# BIBLIOGRAFIA

Angrisani, L., M. Marracci, N. Pasquino, e B. Tellini. "Data Acquisition Systems for Magnetic Shield Characterization." In *Data Acquisition*, montagem por Michele Vadursi, 229-244. Intech, 2010.

Antonelli, E., E. Cardelli, e A. Faba. "Epstein Frame: how and when it can be really representative about magnetic behavior of laminated magnetic steels." *IEEE Transactions on Magnetics* (Industrial Engineering Department, University of Perugia) 41, n.º 5 (May 2005): 1516-1519.

Appino, C., et al. "International comparison on SST and Epstein measurements in grain-oriented Fe-Si sheet steel." (1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing) 2014.

Batistela, N. J. "Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício." Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Novembro de 2001.

Blajer, M., e L. Arsov. "FEM-3D for Metrologically Improved Magnetic Measurements." *Journal of Electrical Engineering* (Ss. Cyril & Methodius University, Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies) 61, n.º 7/s (2010): 42-45.

Bohn, F. "Magnetostrição e ruído de Barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado." Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos, 2005.

Bohn, F., A. Gundel, A. M. Severino, F. J. G. Landgraf, e R. L. Sommer. "Propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não-orientado." Porto Alegre, RS: Departamento de Física, Universidade de Santa Catarina e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2004.

Campos, M. F., J. C. Teixeira, e F. J. G. Landgraf. "The optimum grain size for minimizing energy losses in iron." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005.

Cardoso, Rodrigo F. A. "Influência do Tamanho de Grão e das Adições de Al e Mn nas propriedades Magnéticas dos Aços Elétricos de Grão Não Orientados com 3% de Si." Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

Cheng, Z., et al. "Modeling of Magnetic Properties of GO Electrical Steel Based on Epstein Combination and Loss Data Weighted Processing." *IEEE Transactions on Magnetics* (IEEE) 50, n.º 1 (January 2014).

Chikazumi, S. "Physics of Magnetism." J. Wiley, 1964.

Cullity, B. D. "Introduction to Magnetic Materials." Addison-Wesley, 1952.

Cullity, B. D., e C. D. Graham. "Introduction to Magnetic Materials." New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

Daut, I., et al. "Power Losses on Grain Oriented and Non-Grain Oriented Materials Using Epstein Test for Electrical Machine Design." Penang: International Conference: Electrical Energy and Industrial Electronic Systems EEIES2009, 7-8 de December de 2009.

Figueira, P. R. S. "Projecto e construção de um transformador de potência supercondutor." Lisboa: FCT/UNL, Março de 2013.

Gopal Electronics. "Operation Manual EP-350 Digital Epstein Tester."

Guedes, M. V. "Máquinas Eléctricas II." Vols. TLME-2.3. FEUP, 2004/2005.

IEC 60404-2. "Magnetic Materials - Part 2: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet and Strip by Means of an Epstein Frame." International Electrotechnical Commission, 2008.

IEC 60404-3. "Magnetic materials - Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of single sheet tester." Internacional Electrotechnical Commission, 2009.

IEC 60404-6. "Magnetic materials - Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 KHz by the use of ring specimens." International Electrotechnical Commission, 2003.

IST. *Propriedades Electromagnéticas dos Materiais, 3ª Série, B - Ensaio de Ferros no Aparelho de Epstein*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2005.

Knoema. *Knoema*. 2017. <https://pt.knoema.com/SSY2014/steel-statistical-yearbook-2016> (acedido em 18 de Janeiro de 2017).

Koltermann, P. I. "Cálculo de Campos Magnéticos Considerando Histerese." *Tese de doutoramento*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Fevereiro de 2001.

Korzunin, G. S., V. K. Chistyakov, e F. F. Rimshev. "Developing Techniques for Testing Magnetic Properties of Electric Steels." *Russian Journal Of Nondestructive Testing* (Institute of Metal Physics, Ural Division of Russian Academy of Sciences) 36, n.º 11 (April 2000): 782-799.

Kotnala, R. K., e P. C. Kothari. "Magnetic Measurements on Electrical Steel Strips Using Standard Epstein Frame." *Indian Journal of Pure & Applied Physics* 38 (November 2000): 797-800.

Krings, A., e J. Soulard. "Experimental Characterization of Magnetic Materials for Electrical Machine Applications." Stockholm: Department of Electrical Energy Conversion, KTH Royal Institute of Technology, 2015.

Landgraf, F. J. G. "Propriedades Magnéticas de Aços para fins Eléctricos." São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estados de S. Paulo, 2002.

- Littmann, M. F. "Iron and Silicon - Iron alloys." Vol. 7. IEEE Transaction on Magnetics, 1971. 48-60.
- Manyage, M., e P. Pillay. "New Epstein Frame for Core Loss Measurements at High Frequencies and High Flux Densities." *IEEE*, 2008: 1-6.
- Marketos, P., S. Zurek, e A. Moses. "A Method for Defining the Mean Path Length of the Epstein Frame." Vol. 43. n.º 6. Cardiff: Wolfson Centre for Magnetics, Cardiff School of Engineering, Cardiff University, June de 2007. 2755-2757.
- Marketos, P., S. Zurek, e J. Moses. "Calculation of the mean path length of the Epstein frame under non-sinusoidal excitations using the double Epstein method." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (Elsevier), May 2008: 2542-2545.
- Marques, G., e M. J. Resende. "Circuitos Eléctricos - Sistemas Eléctricos e Electromecânicos." Este texto foi desenvolvido no âmbito do projecto europeu "e-LEE". Área Científica de Energia - IST/UTL, 2010.
- Mendes, F. B. R. "Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício." *Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Eléctrica*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- Meurer, E. J. "Estudo das Perdas Magnéticas Interlaminares em Máquinas Eléctricas." *Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Eléctrica*. Florianópolis, Março de 2005.
- Moses, A. J. "Electrical Steels: past, present and future developments." Vol. 137. IEE Proceedings, 1990. 233-245.
- Mthombeni, T. L., P. Pillay, e R. M. W. Strnat. "New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements Under High Frequencies and High Flux Densities." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 22, n.º 3 (September 2007): 614-620.
- Mthombeni, T. L., P. Pillay, e R. Strnat. "A New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements at High Frequencies and High Flux Densities." 2005. 598-600.
- Muhit, M. S. "Magnetic and Electric Characterization of Materials for Electrical Machines." Stockholm: Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, August de 2011.
- Parent, G., R. Penin, J. Lecoite, J. Brudny, e T. Belgrand. "Determination of Specific Losses in the Limbs of an Epstein Frame Using a Three Epstein Frame Methodology Applied to Grain Oriented Electrical Steels." *Sensors*, 2016. 1-10.
- Pereira Jr., I., M. Mezaroba, S. Haffner, e L. Pereira. "Análise e Medição de Propriedades Magnéticas dos Materiais em Diferentes Frequências e com Correção de Harmônicos." Bonito, MS: XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 12-16 de Setembro de 2010. 2152-2159.

- Pinho, Luís. "Materiais Magnéticos e suas Aplicações." FEUP, Janeiro de 2009.
- Pronto, A. G. "Análise de perdas em sistemas de energia que empregam supercondutores de alta temperatura." *Dissertação de Doutoramento*. Lisboa, 2010.
- Pronto, A. G. "Material de apoio à unidade curricular Tecnologia dos Materiais para a Energia." (*Não publicado, contactar autor*). FCT - UNL, 2012/2013.
- Robert, P. "Matériaux de l'Électrotechnique (Traité d'Électricité)." Vol. II. Lausanne: Presses polytechniques romandes, 1989.
- Santos, J. P. "Influências do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos - o efeito textura." *Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Eléctrica*. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Março de 2005.
- Sgobba, S. "Physics and measurements of magnetic materials." Geneva: CERN, 2011.
- Sievert, J. "The magnetic properties of electrical sheet steel - physical, statistical and standards aspects of measurement." 2015.
- Sievert, J. "The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel - survey on methods and situation of standards." Braunschweig: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000. 647-651.
- Tumanski, S. "Handbook of Magnetic Measurements." Montagem por Taylor & Francis Group. New York, 2011.
- Yanawati, Y., et al. "Nominal Power Loss on 0,35 mm and 0,50 mm Thicknesses of Non-oriented Steel Sheets Using Epstein Tester Frame." Langkawi, 3-4 de Junho de 2013. 600-602.
- Zhang, Y., N. Alatawneh, M. Cheng, e P. Pillay. "Magnetic Core Losses Measurement Instrumentations and a Dynamic Hysteresis Loss Model." *IEEE*, 2009.

