

FILOMENA BARBOSA RODRIGUES MENDES

**Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas
de Aço ao Silício**

**FLORIANÓPOLIS
2004**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas
de Aço ao Silício**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

FILOMENA BARBOSA RODRIGUES MENDES

Florianópolis, março de 2004.

Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

‘Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Orientador

Prof. Jefferson Luis Brum Marques, Ph.D.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Presidente

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.
Co-orientador

Prof. Renato Carlson, Dr.

Prof. João Carlos dos Santos Fagundes, Dr.

Eng. Luiz Von Dokonal, M.Sc.

À Deus, por todas as coisas.

Aos meus pais:

Jesuíno Barbosa (in memoriam), pelos ensinamentos e boas recordações
e Leontina, pela incansável espera de meu retorno à casa.

AGRADECIMENTOS

O fato de representar formalmente a autoria desta dissertação, não significa que ela tenha resultado apenas do esforço individual. Ela contou com diversas co-autorias presenciais ou não. Frutos de vínculos estabelecidos com colegas do GRUCAD (grupo de concepção e análise de dispositivos eletromagnéticos), com colegas de diversos laboratórios, com pessoas de áreas distintas à engenharia e de muitos outros vínculos, não menos importantes, que deram sua importante contribuição na consolidação deste trabalho. Assim, passo a destacá-las sumariamente agradecendo as pessoas e os organismos que contribuíram para viabilização desta pesquisa.

No Brasil agradeço:

- meu esposo Fredy pela compreensão, incentivo e afeto.
- minhas filhas Lesly e Ketty pela constante espera das horas de lazer em minha companhia.
- minha irmã Fátima pelo apóio e parceria.
- o Wilson e o Marcelo pelo excelente atendimento.
- a CAPES, pela concepção da bolsa que permitiu a realização deste estudo.
- a professora Jackeline e aos professores do centro tecnológico que acompanharam e participaram de minha jornada acadêmica.
- a família Santos: Manuel (in memoriam), Glória, Ana Maria, Arliane e Andréia pelo apóio e amizade.
- a Elsa e a Eliane pelo companheirismo e incentivo.
- a Laura, Vanessa, Paula e a Isaura por alegrarem e acompanharem minhas filhas em minha ausência.
- a todos os estudantes convênio de Cabo Verde; Angola; Guiné Bissau; Haiti, Moçambique, México, Nicarágua e Colômbia pelas horas de lazer que serviram de inspiração. Aos meus amigos: Miriam, Paula Gago, Teresa Veiga, Miranda, Ana Martins, Bela, Jairson, Lucala, Ronise, Haleinge, Maria, Telita, Adilson, Oulimata, Angélica, Tapias e Zelaya pelo incentivo.
- a todos os colegas do GRUCAD pelo apóio diário e pelos momentos de lazer.

- a Fabiana Lana pelos longos debates e pelo incentivo.
- o Esai pelo apóio e momentos de lazer promovidos.
- os colegas de outros laboratórios pelo suporte fornecido.

Em Cabo Verde começo por agradecer à minha mãe Leontina, meus irmãos: Francisco, Francisca, Augusto e demais familiares, pelo incentivo e pela paciente espera de meu retorno à casa.

Em Coimbra agradeço à minha irmã Helena, pela interminável espera de minha visita.

Em Angola agradeço minha irmã Maria da Conceição e demais familiares pelo apoio moral e espiritual.

Nos Estados Unidos agradeço minha irmã Anita e demais familiares por todo apóio concedido.

No Peru agradeço meus sogros Maglório e Suzana; cunhados e demais familiares pelo apóio à distância e pela longa espera de minha visita.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

Março/2004

Orientador: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-orientador: Patrick Kuo-Peng, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: medição da perda magnética; caracterização magnética.

Número de Páginas: 99.

RESUMO: Neste trabalho, apresenta-se uma análise de procedimentos de medida de perdas magnéticas em lâminas de aço ao silício. Comparam-se várias metodologias para medição da perda magnética e da permeabilidade magnética. Esta pesquisa considera apenas a categoria de aços de grão não orientado. Comparam-se os procedimentos de ensaio e medição apresentados pelas normas brasileira NBR 5161, americana ASTM A343, japonesa JIS C2550 e pela norma da comissão eletrotécnica internacional IEC 404-2. Foi desenvolvida uma estratégia de separação das perdas magnéticas em três componentes: perda por histerese; por correntes de Foucault e perda excedente. Esta estratégia, denominada de eliminação do ensaio da perda por histerese, não requer equipamentos que permitam realizar o ensaio em frequências muito baixas, onde se podem desprezar as perdas dinâmicas. Nesta estratégia são necessários dois ensaios: da perda total, com variação da indução magnética, mantendo a frequência fixa e da perda total, com variação da frequência, mantendo a indução magnética constante.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

Analysis of Measurements of the Magnetic Losses in Sheet Steel Silicon

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

March / 2004

Advisor: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-advisor: Patrick Kuo-Peng, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: iron losses measurements; magnetic characterization.

Number of Pages: 99.

ABSTRACT: This work presents an analysis of the non oriented sheet steel silicon magnetic losses measurements process. Comparisons between measurements procedures of iron losses and permeability introduced by Brazilian standard NBR 5161, American standard ASTM A343, Japanese standard JIS C2550 and by international electrotechnical commission IEC 404-2 are performed. A strategy of iron loss separation are also developed in this work. The iron loss are separated in three components: hysteresis loss; eddy current loss and excess loss. In this strategy, called hysteresis loss elimination strategy, no low frequencies measurements (where the dynamic losses are neglected) is needed. Consequently only two measurements are needed: total loss with variation of the induction keeping frequency fix and total loss with variation of the frequency keeping the induction constant.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	xii
INTRODUÇÃO	1
1. RESUMO DAS NORMAS SOBRE O TESTE DE EPSTEIN E SINOPSE COMPARATIVA	7
1.1 Quadro de Epstein	8
1.1.1 Objetivo das Normas Técnicas.....	8
1.1.2 Procedimento para Corte das Lâminas e Isolação Adicional entre as Lâminas.....	9
1.1.3 Procedimento de Medida da Espessura	11
1.1.4 Medida da Densidade de Massa	12
1.1.5 Condições Necessárias para o Ensaio.....	14
1.1.6 Modelo de Separação da Perda Magnética	17
1.1.7 Instrumentos para Obtenção da Perda Magnética Total e da Permeabilidade Magnética	17
1.1.8 Valor Convencional do Caminho Magnético, Massa Magneticamente Efetiva e Seção Transversal	20
1.1.9 Esquema de Ligação para o Ensaio da Perda Magnética e da Permeabilidade Magnética	22
1.1.10 Compensação da Queda de Tensão Devido ao Fluxo Disperso	25
1.1.11 Redução da Relutância	28
1.1.12 Procedimentos para o Ensaio	28
1.1.13 Obtenção da Perda Específica Total	32
1.1.14 Correção da Perda Magnética	33
1.1.15 Separação da Perda Total: Perda por Histerese e Perda por Correntes de Foucault	35
1.1.16 Obtenção da Permeabilidade Magnética.....	37
1.1.17 Reprodutibilidade.....	39
1.1.18 Relatório de Teste	40
1.2 Roteiro de Ensaio Baseado nas Normas Técnicas	41
1.3 Conclusão.....	50
2. MEDIÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS CONFORME AS NORMAS DO TESTE DE EPSTEIN ..	51
2.1 Ensaio da Perda Total	52
2.1.1 Normas Técnicas.....	52
2.1.2 Medidas Realizadas através do SDCMM	54
2.2 Separação das Perdas no Núcleo	57
2.2.1 Norma Brasileira NBR 5161.....	57
2.2.2 Medição Utilizando o SDCMM	59
2.3 Alimentação do Quadro de Epstein sem Imposição da Forma Senoidal no Secundário	62
2.3.1 Norma Brasileira NBR5161.....	62
2.3.2 Leitura Realizada com o SDCMM.....	62
2.4 Ensaio da Permeabilidade Magnética	64
2.4.1 Determinação da Permeabilidade Conforme as Normas Técnicas	64
2.4.2 Medição Utilizando o SDCMM	65
2.4.3 Comparação com os Resultados Obtidos Conforme as Normas Técnicas e a Medição Através do SDCMM.....	65
2.5 Conclusão.....	67
3. ESTRATÉGIAS DE SEPARAÇÃO DAS PERDAS	69
3.1 Estratégia de Separação das Perdas Considerada como Referência.....	70
3.2 Generalização da Estratégia de Referência.....	70
3.3 Estratégia de Eliminação do Ensaio da Perda por Histerese.....	76

3.4 Resultados	82
3.4.1 Estratégia de Referência	83
3.4.2 Estratégia de Generalização	85
3.4.3 Estratégia de Eliminação do Ensaio da Perda por Histerese	86
3.5 Conclusão.....	89
4. CONCLUSÃO GERAL.....	90
APÊNDICE 1 – MÉTODO DO EMPUXO	92
APÊNDICE 2 – INFORMAÇÕES ADICIONAIS.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Objetivo das normas técnicas.....	8
Tabela 2: Procedimento para corte das lâminas e isolamento adicional entre as lâminas.....	9
Tabela 3: Procedimento de medida da espessura.....	11
Tabela 4: Medida da densidade de massa.....	12
Tabela 5: Condições necessárias para o ensaio.....	14
Tabela 6: Modelo de separação da perda magnética.....	17
Tabela 7: Instrumentos para obtenção da perda magnética total.....	17
Tabela 8: Instrumentos para obtenção da permeabilidade magnética.....	19
Tabela 9: Valor convencional do caminho magnético, massa magneticamente efetiva e seção transversal. ...	20
Tabela 10: Esquema de ligação para o ensaio da perda magnética.....	22
Tabela 11: Esquema de ligação para o ensaio da permeabilidade magnética.....	23
Tabela 12: Compensação da queda de tensão devido ao fluxo disperso.....	25
Tabela 13: Redução da relutância.....	28
Tabela 14: Procedimentos para o ensaio.....	28
Tabela 15: Cálculo da perda específica total.....	32
Tabela 16: Correção da perda magnética.....	33
Tabela 17: Separação das Perdas.....	35
Tabela 18: Obtenção da permeabilidade magnética.....	37
Tabela 19: Reprodutibilidade.....	39
Tabela 20: Relatório de teste.....	40
Tabela 21: Dados do ensaio segundo a norma brasileira NBR5161.....	52
Tabela 22: Dados do ensaio segundo as normas americana, japonesa e norma da comissão eletrotécnica internacional.....	53
Tabela 23: Dados do ensaio utilizando-se o SDCMM.....	54
Tabela 24: Dados do ensaio segundo a norma NBR 5161.....	58
Tabela 25: Separação das perdas segundo a norma NBR5161.....	58
Tabela 26: Dados obtidos através da leitura do SDCMM.....	59
Tabela 27: Separação das perdas através da leitura do SDCMM.....	60
Tabela 28: Correção das perdas segundo a norma brasileira NBR5161.....	62
Tabela 29: Correção das perdas utilizando leituras do SDCMM.....	63
Tabela 30: Ensaio da permeabilidade magnética segundo as normas técnicas.....	64
Tabela 31: Ensaio da permeabilidade magnética através da leitura do SDCMM.....	65
Tabela 32: Dados do ensaio da perda por histerese, perda total à 50 Hz e perda total à 1T.....	83
Tabela A2.1: leituras do voltímetro de valor médio calibrado em valor eficaz.....	97

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1: a) Quadro de Epstein; b) Disposição das lâminas.....	5
Fig.2: Indução magnética.....	53
Fig.3: Corrente primária e tensão secundária à 50 Hz e 1,632 T.....	55
Fig.4: Indução magnética.....	55
Fig.5: Ensaio à 50Hz. Perda total por unidade de massa em função da amplitude da indução magnética.	56
Fig.6: Ensaio à 1 T. Perda total por ciclo em função da frequência.....	58
Fig.7: Ensaio à 1 T. Separação das perdas.....	59
Fig.8: Ensaio à 1 T: a) Perda total; b) Perda total por ciclo em função da frequência.	60
Fig.9: Ensaio à 1T, variando a frequência.....	61
Fig.10: Tensão secundária e corrente primária à 1T e 150 Hz, e fator de forma de 1,1112.	61
Fig.11: Perda total à 50 Hz.	63
Fig.12: Sinais de tensão e corrente à 50 Hz, 1,614 T e F=1,13.	64
Fig.13: Curva B-H do material.....	66
Fig.14: Sinais de tensão e corrente à 50 Hz e 0,295 T.	66
Fig.15: Reta de soluções.....	73
Fig.16: Fluxograma da estratégia de generalização.....	75
Fig.17: Divisão do segmento de reta.	77
Fig.18: Fluxograma da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese.....	80
Fig.19: Fluxograma geral da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese.	82
Fig.20: Caracterização à 50Hz: a) Separação das perdas. b) Separação das perdas corrigida.....	84
Fig.21: Perda Total em 1T em função da frequência.....	85
Fig.22: Separação das Perdas: a) Caracterização à 50 Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência. ...	85
Fig.23: Separação das perdas: a) Caracterização à 50Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.	86
Fig.24: Separação das perdas: a) Caracterização à 50Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.	87
Fig.25: Separação das perdas: a) Caracterização à 50Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.	88
Fig.26: Separação das perdas: a) Caracterização à 50Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.	88
Fig.A1: Método do Empuxo.	93
Fig. A2: Equipamentos convencionais e padronizados conforme a NBR5161, utilizados nos ensaios.	97

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Aceleração.	[m/s ²]
A_p	Constante do material relacionada às correntes de Foucault.	
A_h	Constante do material relacionada as propriedades de histerese do material.	
B	Indução magnética.	[T]
B_m	Amplitude da indução magnética na amostra.	[T]
B'_m	Amplitude da indução magnética obtida através da tensão secundária.	[T]
d	Espessura da lâmina.	[m]
E	Empuxo.	[N]
E_{fm}	Tensão induzida no enrolamento secundário do indutor mútuo.	[V]
e	Porcentagem da perda por correntes de Foucault na indução e frequência correspondentes à P_s observada.	
F	Fator de forma da tensão secundária.	
f	Frequência.	[Hz]
F_i	Força.	[N]
f_0	Frequência base (ou de caracterização do material).	[Hz]
F_p	Fator de forma da tensão primária.	
G	Coefficiente de atrito de um objeto magnético.	
g	Aceleração da gravidade.	[m/s ²]
H_m	Amplitude do campo magnético.	[A/m]
H	Valor eficaz do campo magnético.	[A/m]
h	Porcentagem da perda por histerese na indução e frequência correspondentes à P_s observada.	
H_e	Campo por excesso.	[A/m]
I_m	Amplitude da corrente de excitação.	[A]
I_1	Valor eficaz da corrente primária.	[A]

k_h	Relação entre a perda por histerese e a perda magnética total para fluxo senoidal.	
k_p	Relação entre a perda por correntes de Foucault e a perda magnética total para fluxo senoidal.	
L	Indutância mútua.	[H]
L_m	Indutância mútua do indutor mútuo.	[H]
l	Comprimento da amostra.	[m]
l_e	Distância entre os eletrodos de potencial.	[m]
l_m	Valor convencional para o comprimento do caminho magnético efetivo.	[m]
m	Massa total da amostra.	[kg]
m_a	Massa magneticamente efetiva da amostra.	[kg]
m_e	massa da amostra emersa.	[kg]
m_i	Massa da amostra imersa.	[kg]
n_{om}	Número de objetos magnéticos ativos.	
NI	Norma infinito.	
N_1	Número de espiras primárias do quadro de Epstein.	
N_2	Número de espiras secundárias do quadro de Epstein.	
P	Potência dissipada.	[W]
p	Peso do material.	[N]
P_c	Perda magnética total da amostra para fluxo senoidal.	[W]
P_{tot}	Perda total.	[W]
P_h	Perda por histerese do material.	[W]
P_d	Perda dinâmica.	[W]
P_{clas}	Perda por correntes de Foucault.	[W]
P_e	Perda excedente.	[W]
P_m	Potência medida pelo wattímetro.	[W]
P_s	Perda específica total da amostra.	[W/kg]
P_t	Perda total calculada para fluxo com fator de forma diferente de $1,11 \pm 1\%$.	[W]
P'_m	Potência lida pelo wattímetro para fluxo com fator de	

	forma diferente de $1,11 \pm 1\%$.	[W]
P_p	Perda por correntes de Foucault.	[W]
R	Resistência da amostra.	[Ω]
R_i	Resistência equivalente a dos equipamentos conectados no enrolamento secundário do quadro de Epstein (incluso o circuito de tensão do wattímetro).	[Ω]
R_t	Resistência em série do enrolamento secundário do quadro de Epstein e do indutor de compensação.	[Ω]
R_v	Resistência interna do voltímetro de valor médio.	[Ω]
R_2	Resistência secundária do quadro de Epstein.	[Ω]
R_n	Resistência do resistor de precisão.	[Ω]
R_m	Resistência secundária do indutor mútuo.	[Ω]
r^2	Coefficiente de determinação.	
S	Seção transversal da amostra.	[m ²]
S_t	Seção transversal total do enrolamento secundário do quadro de Epstein.	[m ²]
SI	Sistema Internacional.	
SDCMM	Sistema digital de caracterização magnética de materiais.	
\bar{U}_2	Leitura do voltímetro de valor médio da tensão secundária em um semi-período entre duas passagens por zero (retificada).	[V]
U_{2m}	Leitura do voltímetro de valor médio da tensão secundária em um semi-período entre duas passagens por zero (retificada).	[V]
U_2	Tensão secundária eficaz.	[V]
U_m	Amplitude da tensão do resistor de precisão.	[V]
\bar{U}_m	Tensão secundária média do indutor mútuo (retificada).	[V]
v_d	Volume deslocado.	[m ³]
V_0	Parâmetro equivalente a um campo coercitivo.	
W_h	Perda por histerese.	[J/kg]
W_f	Perda por correntes de Foucault.	[J/kg]

W_e	Perda excedente.	[J/kg]
W_h^s	Perda por histerese em regime senoidal.	[J/kg]
W_{tot}	Perda total.	[J/kg]
x	Expoente do modelo de Steinmetz.	
\bar{x}	Valor médio de x.	
\bar{y}	Valor médio de y.	
δ	Densidade de massa da amostra.	[kg/m ³]
δ_w	Densidade de massa da água.	[kg/m ³]
ρ	Resistividade elétrica do material.	[Ω .m]
%Si	Percentagem de silício presente no material.	
%Al	Percentagem de alumínio presente no material.	
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo.	[H/m]
ΔP	Diferença das perdas originada pela distorção da onda.	
σ	Condutividade elétrica do material.	[Ω m] ⁻¹

INTRODUÇÃO

Considerando a abordagem eletromagnética, para caracterizar um material é necessário determinar os parâmetros que descrevem o meio e a perda magnética que nele ocorre. Para descrever o meio é necessário obter seu valor de permeabilidade magnética e seu valor de condutividade elétrica. Para caracterizar o material, tendo em vista a perda magnética, seleciona-se um modelo de perda magnética e determinam-se seus parâmetros.

A caracterização do material do ponto de vista eletromagnético constitui um tema bastante amplo, logo, é necessário destacar os critérios que nortearam as prioridades desta pesquisa. Neste trabalho, analisam-se os procedimentos de medição da perda magnética e da permeabilidade magnética em lâminas de aço ao silício, em operação com frequências menores que 300 Hz. Supõe-se que o campo magnético e a indução magnética variam em apenas uma direção. Considera-se apenas a categoria de aços de grão não orientado. Este estudo não contempla o efeito da temperatura, do envelhecimento, da isolamento entre lâminas, o efeito de proximidade de corrente nos enrolamentos, das capacitâncias parasitas e o efeito pelicular. Alguns destes efeitos podem ser desprezados com segurança, pois trabalha-se em frequências relativamente baixas.

Para determinar o campo magnético utiliza-se a lei de Ampère. Ressaltam-se as seguintes considerações [1]: como não existe acesso ao campo magnético vetorial, toma-se o vetor diferencial do caminho amperiano colinear ao campo magnético. Desta forma é possível resolver a integral da equação utilizando-se o módulo do vetor campo magnético. O campo magnético será considerado constante em todos os pontos do caminho amperiano. Assim, mede-se este campo de forma indireta através da corrente primária, apesar da dificuldade existente na determinação do comprimento do caminho magnético efetivo.

A indução magnética é obtida através da lei de Faraday. Segundo esta lei um fluxo magnético variando no tempo produz uma tensão induzida num circuito fechado, originando uma corrente elétrica. Esta lei é utilizada simultaneamente com a lei de Lenz que expressa a oposição da tensão induzida em relação ao fluxo que a produziu. A corrente no circuito fechado produz uma indução magnética oposta à indução magnética original [1]. Da mesma forma que para o campo magnético, não existe acesso à indução magnética

vetorial ou a sua efetiva distribuição em uma seção transversal. Logo, utiliza-se o módulo da indução magnética e o módulo do vetor diferencial de área para resolver a equação da lei de Faraday. A indução magnética é suposta constante na seção transversal do circuito. Perante o exposto, mede-se a indução magnética de forma indireta através da tensão secundária induzida.

As considerações acima apresentadas resultam em valores aproximados no processo de medição da perda magnética e, principalmente, da permeabilidade do material. As propriedades magnéticas, obtidas desta forma, possuem influência econômica por determinarem a eficiência de dispositivos eletromagnéticos. Estes dados fornecem requisitos para negociação, levantamento do projeto e controle da qualidade do material. Assim, incentivam-se pesquisas na melhoria das propriedades dos materiais, na modelagem do comportamento do material sob diferentes condições de magnetização, na caracterização do material através de medidas da perda magnética e da permeabilidade magnética (curva B-H).

Dado um transformador sem carga e magnetizado, a energia consumida pelo seu núcleo corresponde principalmente à perda magnética. Esta perda define a qualidade do material do núcleo. A perda magnética total quando determinada define a qualidade do material, mesmo sendo um valor obtido em condições específicas (formato da amostra, tensões no material, instrumento de teste e processo de magnetização) que podem não corresponder às condições reais que o produto final estará submetido [2].

A perda magnética é medida mantendo-se a indução magnética na forma de onda senoidal (para efeitos de comparação de resultados) e o campo magnético variando livremente. Também os modelos de previsão da perda magnética que serão utilizados mostram que a variação temporal da indução magnética provoca perda magnética, tornando-se necessário controlar as distorções na forma do fluxo magnético. No quadro de Epstein, devido à não linearidade do material (visível na curva B-H) e a resistência primária, a tensão primária não é senoidal quando se mantém a tensão secundária senoidal. Conseqüentemente, para fluxo senoidal a corrente de excitação não é senoidal. A corrente de excitação deve evoluir livremente no tempo, enquanto que a indução magnética deve ser mantida senoidal. O valor da perda magnética é obtido através da corrente primária e da tensão secundária (para não incluir a parcela da perda no cobre do enrolamento primário [4]).

A perda magnética depende de diversos fatores, entre eles, das condições de ensaio (especificamente amplitude da indução magnética e frequência) e da amostra (sua direção de estampagem em relação ao sentido de laminação, espessura, resistividade elétrica e densidade). Quanto à direção da amostra, a perda magnética é influenciada pela anisotropia das propriedades magnéticas. As propriedades magnéticas variam com a direção da indução magnética e do campo magnético devido à existência da textura do material. A textura do material está relacionada com a distribuição não aleatória dos grãos [2].

Em nível micro estrutural, a perda magnética depende das discordâncias e do tamanho do grão. Grãos são cristais que constituem o material [2].

Os circuitos magnéticos, que utilizam aços em suas partes constituintes, possuem variadas formas. Para caracterizar o material magnético utilizam-se equipamentos de teste os quais exigem formatos especiais [2]. A amostra toroidal apresenta a vantagem de formar um circuito magnético fechado, com o fluxo magnético completamente localizado no interior dos enrolamentos. Amostra neste formato seria ideal para caracterização do material, se não fosse a dificuldade na determinação do comprimento do caminho magnético médio. Amostras neste formato apresentam ainda as seguintes desvantagens: necessidade de confeccionamento de enrolamentos para cada amostra de teste, e dispor os enrolamentos no formato da amostra é difícil.

A amostra constituída por lâminas é utilizada em equipamentos com circuito de fechamento (“yoke”[27]). O circuito de fechamento é construído por um material distinto da amostra, tendo elevada permeabilidade e baixa perda magnética. Este processo é encontrado no teste de chapa única. Este tipo de amostra é também utilizado no teste de Epstein, sendo este último o ensaio de medição da perda magnética mais utilizado no Brasil [3].

O teste de chapa única apresenta as seguintes vantagens: facilitar a preparação da amostra (amostra maior que 100mm não necessita recozimento para alívio de tensões); utilizar menor quantidade de material (chapa única) e possibilitar ensaio na direção transversal e longitudinal (para circuitos de fechamento quadrados). Entretanto, necessita ajustes pelo teste de Epstein e não apresenta boa reprodutibilidade como este último. No teste de chapa única as medidas da perda magnética podem ser influenciadas pela pressão que o circuito de fechamento superior exerce na amostra, pelo alinhamento da amostra no

interior dos circuitos de fechamento, pelos tipos de circuitos de fechamento e pelas dimensões da amostra [3].

Os materiais amorfos, tendo características de alta permeabilidade, baixas perdas e aplicação em frequências muito superiores a 60 Hz, dificultam a utilização do quadro de Epstein. O teste de chapa única é recomendado por atingir frequências mais elevadas. Neste caso, o magnetismo residual dos circuitos de fechamento podem afetar a precisão da medida visto que a amostra apresenta baixa perda magnética.

A amostra constituída por lâminas de seção retangular ou circular é utilizada em circuitos abertos (solenóides) com as linhas de fluxo fechando-se pelo ar. Nestas condições, devem ser considerados o campo magnético terrestre e o campo desmagnetizante. Este último opõe-se ao campo magnético aplicado e tem origem na polarização da amostra. O campo magnético na amostra é resultante da diferença dos referidos campos magnéticos. Por esta razão, existe uma preferência em se utilizar circuitos fechados como o toróide, teste de Epstein e teste de chapa única [2].

O teste de Epstein e o teste de chapa única permitem testar várias amostras no mesmo aparelho, não sendo necessário confeccionar enrolamentos para cada amostra como no caso do teste toroidal. O teste de Epstein apresenta alta reprodutibilidade e, sendo um dos testes mais utilizados, os resultados são bem aceitos por consumidores de aço ao silício como referência. Por outro lado, o circuito magnético do quadro de Epstein não é homogêneo. A magnetização do material não é uniforme porque além de surgirem nos cantos pequenos entreferos que aumentam a relutância, existe uma quantidade de massa adicional proveniente da superposição das lâminas. Para minimizar os entreferos é feita uma pressão local, originando uma tensão mecânica que altera as propriedades magnéticas do material. As desvantagens do teste estão relacionadas também ao tempo gasto na preparação da amostra (quantidade de lâminas); ao desperdício de material; à montagem e desmontagem das lâminas no teste; à necessidade de recozimento de amostras para alívio de tensões de corte devido à dimensão da amostra [3].

Para o teste de Epstein, as lâminas não devem apresentar curvatura (desvio de aplainamento) originada pelas bobinas de armazenamento do material. Nestas condições, as amostras são forçadas quando inseridas no quadro surgindo deformações elásticas. Estas deformações elevam a perda magnética. Durante o ensaio as lâminas podem vibrar originando reentrâncias na curva de histerese [2]. Nas lâminas para o teste de Epstein, a

indução magnética e o campo magnético são medidos no comprimento da amostra. Esta amostra pode ser estampada na direção longitudinal, transversal ou qualquer outra direção do sentido de laminação do material (a amostra toroidal apresenta a vantagem de possibilitar um arranjo das lâminas que forneça uma média de todas as direções).

Nesta dissertação, utiliza-se o quadro de Epstein como dispositivo de teste com as características apresentadas na Fig.1a. Trata-se de um transformador constituído por dois enrolamentos: primário e secundário. As amostras de teste formam o núcleo magnético do transformador. O quadro de Epstein apresenta ainda um “indutor mútuo” [24] para compensar o fluxo disperso no interior das bobinas, localizado no centro do espaço formado pelos enrolamentos. Os enrolamentos apresentam um total de 700 espiras e são recomendados para teste num intervalo de frequência de 25 a 400 Hz. Excita-se o enrolamento primário e mede-se a tensão secundária. Detalhes construtivos podem ser encontrados nas referências [5, 6, 7, 8 e 24].

As amostras são inseridas no quadro de teste conforme a Fig.1b. Quando metade das lâminas for cortada na direção da laminação e o restante perpendicularmente a esta direção, inserem-se as lâminas paralelas à direção de laminação em dois braços paralelos do teste de Epstein e as lâminas perpendiculares nos demais braços.

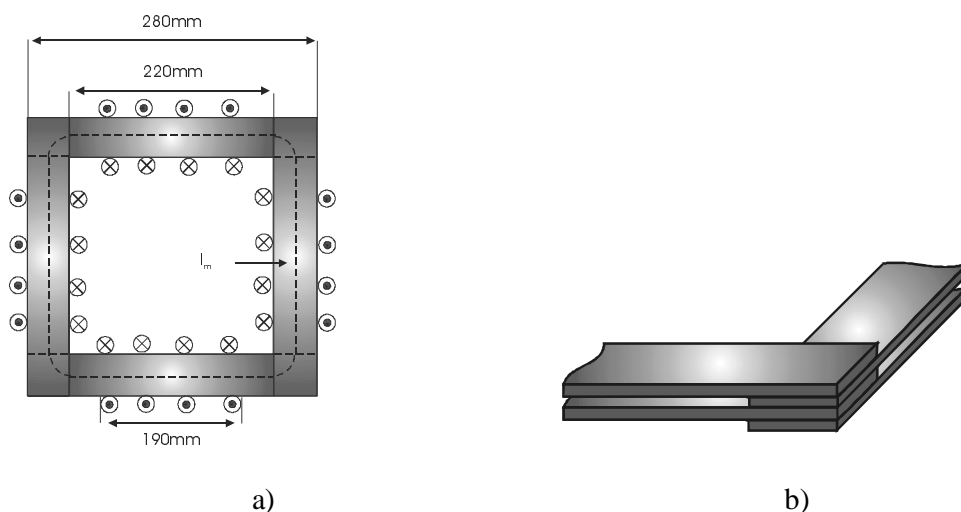


Fig. 1: a) Quadro de Epstein; b) Disposição das lâminas.

Para este trabalho de pesquisa foram propostos os seguintes objetivos:

- a) comparar várias metodologias para medição da perda magnética através do teste de Epstein, normalizadas ou não, e para magnetização em uma só direção (não considerando uma magnetização na forma espacial rotacional), esperando apontar vantagens, dificuldades, imprecisões e outros fatores relevantes característicos;
- b) obter procedimentos de caracterização com base nas metodologias estudadas.

Para atender os objetivos foi realizada uma sinopse comparativa entre as normas NBR 5161, ASTM A 343, JIS C 2550 e IEC 404-2. O cerne do trabalho é a sinopse comparativa entre as normas técnicas. Como resultado deste estudo elaborou-se um roteiro como sugestão de procedimento para a caracterização de materiais magnéticos utilizando o quadro de Epstein padrão. A fim de ilustrar o estudo das normas, foram realizados ensaios com caracterização de um material respectivamente a cada norma.

Desenvolveu-se também programas numéricos de obtenção dos parâmetros de um modelo para as perdas magnéticas. Estas são ferramentas de interesse acadêmico e industrial, pois existe uma dificuldade experimental e analítica para a determinação dos parâmetros que caracterizam o material sob o ponto de vista das perdas magnéticas.

1. RESUMO DAS NORMAS SOBRE O TESTE DE EPSTEIN E SINOPSE COMPARATIVA

Neste capítulo, apresenta-se uma sinopse e analisam-se os métodos normalizados de medição da perda magnética e da obtenção das características de magnetização do material pelo teste de Epstein. Comparam-se os procedimentos de ensaio e medição apresentados pelas normas brasileira NBR 5161 [5]; americana ASTM A343 [6]; japonesa JIS C2550 [7] e pela norma da comissão eletrotécnica internacional IEC 404-2 [8].

Delimita-se esta pesquisa considerando os objetivos deste trabalho. Assim, nas fontes de pesquisa acima citadas, foram selecionados os temas apresentados e comentados neste capítulo. Analisam-se somente os procedimentos de ensaio e medição da perda magnética e da permeabilidade magnética em regime de corrente alternada utilizando-se o quadro de Epstein de 25 cm como instrumento de teste.

A nomenclatura utilizada nas normas foi adaptada a uma mesma simbologia, procurando atender o sistema internacional de unidades. Procurou-se também utilizar uma terminologia própria das normas na medida do possível, inclusive os nomes atribuídos aos equipamentos convencionais, tais como “indutor mútuo”, “voltímetro de valor médio”, assim por diante.

A comparação é feita por tópicos, e após a exposição do texto sinótico, faz-se alguns comentários que são julgados essenciais, mesmo que forem repetitivos.

1.1 Quadro de Epstein

As normas a serem apresentadas possuem basicamente a mesma finalidade. Entretanto, diferem em alguns detalhes que comentaremos neste trecho do trabalho.

1.1.1 Objetivo das Normas Técnicas



Tabela 1: Objetivo das normas técnicas.

NBR 5161	ASTM A 343	JIS C 2550	IEC 404-2
Definir procedimentos para obtenção das propriedades de lâminas planas de aço para fins elétricos.	Apresentar um método de teste (para corrente alternada) para avaliar as propriedades magnéticas de materiais utilizando o método do wattímetro e o quadro de Epstein de 25cm.	Apresentar métodos de teste para chapas e lâminas de aço magnético.	Apresentar métodos de medição de propriedades magnéticas de chapas e lâminas de aço elétrico através do quadro de Epstein.

A norma japonesa apresenta objetivo mais genérico que as demais normas. Não esclarece no objetivo o tipo de teste e o equipamento a ser utilizado. A norma brasileira é mais específica definindo o tipo de teste. Mas a norma americana e a norma da comissão eletrotécnica internacional, além de esclarecerem o tipo de teste, definem o equipamento de teste a ser utilizado.

1.1.2 Procedimento para Corte das Lâminas e Isolação Adicional entre as Lâminas

Tabela 2: Procedimento para corte das lâminas e isolamento adicional entre as lâminas.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>- São utilizadas lâminas sem isolamento adicional.</p> <p>- São utilizadas lâminas de superfície plana e espessura igual ou inferior a 1,0 mm.</p> <p>- Cortam-se lâminas sem rebarbas, de largura $b=30\text{mm}\pm 0,2\text{mm}$ e comprimento $280 \leq l < 308$ mm, com exatidão de $\pm 0,5$ mm. Para facilitar a montagem e desmontagem do quadro, utilizam-se lâminas de 305 mm de comprimento.</p> <p>- O número de lâminas deve ser múltiplo de 4 e não deve ser inferior a 12.</p>	<p>- São utilizadas lâminas de seção transversal uniforme e propriedades uniformes em uma dada direção.</p> <p>- As lâminas devem possuir 30 mm de largura e um comprimento não inferior a 280 mm, com tolerância de $\pm 0,8\text{mm}$. Para facilitar a montagem e desmontagem do quadro é recomendado um comprimento de 305 mm.</p> <p>- Em nenhum caso, a amostra deve consistir de um número inferior a 12 lâminas. Amostras que pesam menos que 15g por 1cm de comprimento devem consistir de pelo menos 20 lâminas.</p> <p>- O número total de lâminas deve ser múltiplo de quatro.</p> <p>- São sugeridas várias disposições de lâminas para corte, entre as quais tem-se:</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Fig. ASTM 1: Distribuição de lâminas</p>	<p>- Inserir isolamento entre as camadas das peças de teste não é permissível.</p> <p>- A máquina de corte não deve produzir rebarbas.</p> <p>- As peças de teste devem ser de forma retangular, com largura de 30mm e comprimento de 280mm a 320mm. A tolerância na largura deve ser $\pm 0,2\text{mm}$ e no comprimento $\pm 0,5\text{mm}$.</p> <p>- O número total de peças de teste deve ser selecionado de acordo com a máxima massa admissível pelo modelo do quadro. A quantidade mínima de peças é 12.</p> <p>- São sugeridas várias disposições de lâminas para corte, entre as quais tem-se:</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Fig. JIS 1: Método de corte.</p>	<p>- As medidas devem ser realizadas em lâminas sem isolamento adicional.</p> <p>- Somente lâminas planas devem ser utilizadas.</p> <p>- As lâminas devem ser cortadas por um método que não produza rebarbas.</p> <p>- São utilizadas lâminas com as seguintes dimensões: Largura: $b = 30\text{mm} \pm 0,2\text{mm}$. Comprimento: $280\text{mm} \leq l \leq 320\text{mm}$. São utilizadas lâminas de comprimentos iguais, com tolerância de $\pm 0,5\text{mm}$.</p> <p>- O número de lâminas da amostra deve ser múltiplo de 4.</p>

No que se refere à largura e ao comprimento da amostra, as normas brasileira, japonesa e da comissão eletrotécnica internacional, estabelecem uma largura e um comprimento mínimo e máximo da amostra com respectivas tolerâncias. A norma brasileira estabelece o comprimento máximo num valor inferior a 308 mm (próximo do comprimento ótimo de montagem e desmontagem do quadro). A norma japonesa e a norma da comissão eletrotécnica internacional estabelecem comprimento máximo de 320mm (distante do comprimento ótimo). A norma americana deixa lacunas, não apresentando a tolerância para a medida da largura da amostra (30mm de largura) nem o limite máximo para seu comprimento (comprimento superior ou igual à $280\text{mm} \pm 0,8\text{mm}$).

O comprimento ótimo da amostra (305mm) é apenas tratado nas normas brasileira e americana, estabelecendo um comprimento para facilitar a montagem e desmontagem do quadro.

Sobre a isolamento adicional entre lâminas, somente as normas brasileira, japonesa e norma da comissão eletrotécnica internacional informam que não é permissível sua inserção na amostra. Isolamento adicional é aquela que não é a natural à lâmina.

Quanto à superfície da amostra, com exceção das normas americana e japonesa, as demais normas esclarecem que as lâminas devem possuir superfície plana. Lâminas com curvatura podem exigir esforço ao serem inseridas no quadro, provocando tensões no material. Estas tensões aumentam o valor da perda magnética [2]. A referência [2] diz ainda que a curva de histerese do material pode apresentar reentrâncias devido à variação do acoplamento das lâminas nos cantos e vibração das mesmas durante o ensaio.

Quanto a rebarbas, com exceção da norma americana, as demais normas recomendam utilizar amostras sem rebarba excessiva. A altura da rebarba pode interferir no acoplamento das lâminas [2].

No que se refere à quantidade de lâminas, com exceção da norma japonesa, as demais normas esclarecem que o número total de lâminas seja múltiplo de quatro. Com exceção da norma da comissão eletrotécnica internacional, as demais normas estabelecem a quantidade mínima de 12 lâminas. Entretanto, a norma americana restringe ainda o número de lâminas em função do peso da amostra por unidade de

comprimento (20 lâminas no mínimo, para amostra pesando menos que 15g/cm). Já a norma japonesa apenas restringe o número máximo de lâminas de acordo com a máxima massa admissível pelo modelo do quadro utilizado.

Quanto à seção e propriedades da amostra, somente a norma americana esclarece que a amostra deve apresentar seção transversal uniforme e propriedades uniformes em uma dada direção. Nestas condições, o processo de magnetização do material tende a ser homogêneo.

Sobre a distribuição de lâminas para corte, somente as normas americana e japonesa apresentam sugestões de áreas para corte da amostra, de forma a que esta seja mais representativa. Pelo processo de laminação, as regiões centrais da tira da bobina tende a ser mais espessa que as regiões laterais.

Quanto à espessura da lâmina, somente a norma brasileira limita seu valor, sendo no máximo 1 mm.

1.1.3 Procedimento de Medida da Espessura

Tabela 3: Procedimento de medida da espessura.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>- A espessura é medida em quatro pontos diferentes da lâmina, localizados no mínimo a 40 mm das bordas. A medição é feita com exatidão de 0,01mm.</p> <p>- O resultado final é dado pela média aritmética das medidas feitas.</p>	<p>-----</p>	<p>- Deve-se medir a espessura, para cada lâmina, em 8 pontos, 15mm distantes das extremidades. Utilizar o micrometro externo como instrumento de medida.</p> <div data-bbox="1213 1112 1549 1242" style="text-align: center;"> </div> <p>Fig. JIS 2: Medição da espessura</p>	<p>-----</p>

Apenas as normas brasileira e japonesa apresentam o procedimento de medida da espessura da lâmina. A norma brasileira sugere uma distância maior das extremidades da lâmina (40 mm), para evitar os efeitos de borda. A espessura é dada, assim, pela média aritmética das medidas em quatro pontos diferentes da lâmina. Por sua vez, a norma japonesa sugere oito pontos de medição da espessura (15mm distantes da extremidade), para cada lâmina, com localização ilustrada pela Fig. JIS 2. Esta norma especifica ainda o instrumento a ser utilizado (micrometro externo), mas não fornece a tolerância da medida como o faz a norma brasileira (0,01 mm de exatidão).

1.1.4 Medida da Densidade de Massa

Tabela 4: Medida da densidade de massa.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>Esta norma apresenta três métodos de obtenção da densidade do material: método do empuxo; da resistividade e método que considera as percentagens de alumínio e silício presentes no material.</p> <p>Para o método do empuxo ou para o método da resistividade, são utilizadas cinco amostras cortadas sem rebarba, na direção de laminação (por apresentarem espessura mais uniforme).</p> <p>O método do empuxo é útil para amostras sem revestimento e adequado para casos de perícia. Para aplicar este método é necessário balança hidrostática. No apêndice 1 apresenta-se o sistema de montagem necessário e as deduções de equações utilizadas neste método. A densidade de massa da amostra é dada por:</p> $\delta = \frac{m \cdot \delta_w}{m - m_i} \quad \text{NBR (1.1)}$ <p>O método da resistividade é empregado em amostras siliciosas para fins elétricos cuja composição química satisfaça os seguintes requisitos: teor total de silício e alumínio entre 1% e 5%; teor de alumínio não superior a 0,4% e teor dos demais componentes de liga não superior a 0,4%. Para este método é necessário um instrumento para medição da resistência. A densidade de massa do material é calculada através do resultado do produto $\delta\rho$ dado por:</p>	-----	-----	-----

$\delta \cdot \rho = \frac{m \cdot R}{l l_e}$	NBR (1.2)		
<p>Neste ensaio a massa da amostra deve ser medida com precisão de 0,25%; a resistência da amostra deve ser medida com precisão de 0,5%; o comprimento total da amostra deve ser medido com precisão de 0,25% e a distância entre os eletrodos de potencial deve ser medida com precisão de 0,25%.</p> <p>O produto $\delta\rho$ obtido é inserido no gráfico $\delta\rho \times \delta$, fornecido pela norma, para determinar o correspondente valor da densidade do material. O valor desta última grandeza é dado pela média aritmética de valores de cinco amostras.</p> <p>Para o método que considera as percentagens de Al e Si presentes no material, tem-se que:</p>			
$\delta = [7,865 - 0,065(\%Si + 1,7\%Al)]$	NBR (1.3)		

Somente a norma brasileira apresenta métodos para obtenção da densidade de massa do material. Este valor afeta a área da amostra utilizada para obtenção da amplitude da indução magnética. O método que considera as percentagens de silício e alumínio utiliza valores das percentagens de alumínio e silício presentes no material. Estes dados são fornecidos pelo fabricante. Entretanto, estas características não são uniformes na extensão do material. O método da resistividade requer medição da resistência. Esta medida pode ser influenciada pelo contacto entre os eletrodos e a amostra. O método do empuxo torna-se mais adequado para medição da densidade do material. Como o valor obtido pode ser influenciado pela temperatura é necessário medir a densidade do líquido no momento do ensaio (vide apêndice 1).

1.1.5 Condições Necessárias para o Ensaio

Tabela 5: Condições necessárias para o ensaio.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>- As lâminas devem ser inicialmente desmagnetizadas e devem apresentar temperatura de 18 a 28^oC.</p> <p>- Este ensaio é válido mantendo-se a forma de onda da indução magnética senoidal. Esta condição é satisfeita quando a tensão secundária induzida for senoidal. Assim, o fator de forma da tensão secundária não deve deslocar-se mais que 1% de 1,11 (este limite pode ser transposto no ensaio da permeabilidade magnética). O fator de forma deve ser mantido na faixa de 1,11 ±1% através de sistemas eletrônicos com realimentação. Caso não seja possível, corrige-se a perda magnética para desvios do fator de forma entre 1 e 10%.</p> <p>- A frequência deve ser constante com tolerância de ±0,2%.</p> <p>- Para produtos de grão não orientado, o</p>	<p>- Antes da medição desmagnetiza-se a amostra.</p> <p>- A fonte deve incluir circuito que mantenha a forma de onda do fluxo magnético senoidal. O fator de forma deve ser inferior a $\pm 1\%$ de $\frac{\sqrt{2}\pi}{4}$ (este limite pode ser transposto no ensaio da permeabilidade magnética). A fonte de tensão alternada e ajustável deve apresentar baixa impedância interna. Estabilidade de tensão de 0,1% e exatidão de frequência de 0,1% devem ser mantidas. A fonte deve incluir o circuito necessário para manter a forma de onda do fluxo senoidal (utilizando realimentação negativa da tensão secundária induzida).</p> <p>- Recomenda-se utilizar uma faixa de frequência de 25 a 400 Hz.</p>	<p>- A amostra deve ser inicialmente desmagnetizada. Durante o ensaio a temperatura ambiente deve ser de 18 a 28^oC.</p> <p>- A perda magnética é obtida em amostra magnetizada por fluxo senoidal. O fator de forma da tensão secundária deve estar na faixa 1,11±1%. Este limite pode ser transposto no ensaio da permeabilidade magnética. A tensão e a frequência durante o teste devem ser estáveis com tolerância de ±0,2%. A fonte deve apresentar impedância baixa e deve ser capaz de manter o fator de forma da tensão secundária na faixa de 1,11±1%. Esta fonte deve possuir realimentação negativa da forma de onda da tensão induzida.</p> <p>- O ensaio deve ser realizado em frequência não superior a 400 Hz.</p>	<p>- As medidas são realizadas em temperatura ambiente de 18 a 28^oC. A amostra de teste deve ser desmagnetizada.</p> <p>- As características magnéticas são determinadas considerando-se tensão induzida senoidal. Os resultados são obtidos para valores específicos de amplitude de indução magnética e frequência. Para determinação da perda magnética total, o fator de forma da tensão secundária deve estar entre 1,11 ±1%. A fonte de alimentação deve apresentar baixa impedância e alta estabilidade de tensão e frequência. Durante as medições as variações da tensão e da frequência não devem exceder ±0,2% do valor desejado. Quando se utiliza realimentação negativa é possível manter o fator de forma da</p>

ensaio é realizado para amplitude de indução magnética até 1,5T e preferivelmente para frequência entre 15Hz e 100Hz. Frequência de 400 Hz pode ser alcançada com uma instrumentação adequada.	- Para testes da perda magnética em 50 ou 60 Hz são recomendados os seguintes pontos de indução magnética: 1; 1,5 ou 1,7 Teslas.	- Para materiais de grão não orientado, utiliza-se uma faixa de indução magnética até 1,5 T.	tensão secundária no limite estabelecido. - Utiliza-se uma faixa de frequência até 400 Hz. - Para materiais de grão não orientado, utiliza-se uma faixa de indução magnética até 1,5T.
--	--	--	--

Quanto à desmagnetização da amostra, todas as normas estabelecem que a amostra deve ser inicialmente desmagnetizada. Em alguns casos, no final do processo de produção do material, este apresenta magnetismo residual mesmo sem que houvesse aplicação de um campo magnético externo [2]. O magnetismo residual ocorre quando existem condições para magnetizar o material e características da microestrutura que aumentam o campo coercitivo. Este último é uma resistência do material à desmagnetização.

Sobre a temperatura ambiente durante o ensaio (18 a 28°C), somente a norma americana não estabelece uma temperatura. Elevando-se a temperatura eleva-se a resistividade do material, diminuindo-se a perda por correntes de Foucault [2]. Geralmente as máquinas elétricas operam com os núcleos magnéticos sob temperatura superior a 40°C.

No que se refere ao regime de indução magnética, todas as normas citam que o ensaio da perda total é válido mantendo-se a forma de onda da indução magnética na forma senoidal. Esta condição é satisfeita quando a tensão induzida no enrolamento secundário for senoidal. As normas fornecem ainda o limite do deslocamento do fator de forma da tensão secundária ($1,11 \pm 1\%$). O fator de forma é dado pela razão entre o valor eficaz da tensão secundária e seu valor médio retificado (o termo “valor médio” utilizado nas normas, e que será doravante adotado neste trabalho, se refere ao valor médio retificado. Vide apêndice 2). O fator de forma é uma relação adequada para averiguar a distorção de uma forma de onda senoidal. Como as perdas dependem da amplitude da indução magnética esta deve ser determinada com precisão.

Observando-se o comportamento da perda por unidade de massa em função da amplitude da indução magnética, verifica-se que a perda magnética aumenta com o aumento da amplitude da indução magnética.

As normas brasileira, americana e japonesa estabelecem que a faixa de variação do fator de forma ($1,11 \pm 1\%$) pode ser transposta no ensaio da permeabilidade magnética. Sugere-se que este ensaio seja realizado em regime de fluxo senoidal porque as relações utilizadas para obtenção da amplitude do campo magnético (no método do indutor mútuo) e amplitude de indução magnética são válidas somente para regime senoidal (item 1.1.16).

A faixa da amplitude da indução magnética é apresentada por todas as normas. Para materiais de grão não orientado, a amplitude de indução magnética máxima é de 1,5T. A norma americana cita ainda os valores 1T e 1,7T.

Todas as normas estabelecem uma faixa de frequência de teste. A norma brasileira recomenda uma faixa de 15 a 100 Hz, ou até 400 Hz com instrumentação adequada. A norma americana recomenda uma faixa de 25 a 400 Hz. A norma japonesa e a norma da comissão eletrotécnica internacional, recomendam uma faixa de frequência até 400 Hz.

Quanto à fonte de alimentação, todas as normas citam que esta pode incluir circuito que mantenha a forma de onda do fluxo senoidal. A norma brasileira não estabelece a tolerância na variação da tensão e da frequência. As demais normas indicam as características da fonte quanto à estabilidade da tensão e a exatidão da frequência. A norma japonesa e a norma da comissão eletrotécnica internacional, recomendam que a estabilidade da tensão e da frequência não deve exceder $\pm 0,2\%$ dos valores desejados. Já a norma americana estabelece uma tolerância de 0,1%. Sobre o limite de variação da frequência, somente a norma brasileira apresenta a tolerância para sua variação ($\pm 0,2\%$). Observando o comportamento da perda magnética por unidade de massa em função da frequência, verifica-se que a perda magnética aumenta com o aumento da frequência.

1.1.6 Modelo de Separação da Perda Magnética

Tabela 6: Modelo de separação da perda magnética.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>A perda magnética, em amostra submetida a um campo alternado, é dada por:</p> $P_{tot} = P_h + P_{clas}$ <p>NBR (1.4)</p>	<p>Separa-se a perda magnética em duas componentes: uma variável com a segunda potência do fator de forma e outra não afetada pela variação do fator de forma.</p> <p>Desconsideram-se as dificuldades associadas na caracterização destas componentes como perda por histerese e perda por correntes de Foucault.</p>	-----	-----

Somente as normas brasileira e americana indicam um modelo da perda magnética. Perda por histerese e perda por correntes de Foucault constituem a perda magnética total. Estas normas não consideram a existência da perda dita “anômala” (excedente) [15].

1.1.7 Instrumentos para Obtenção da Perda Magnética Total e da Permeabilidade Magnética

1.1.7.1 Instrumentos para Obtenção da Perda Magnética Total

Tabela 7: Instrumentos para obtenção da perda magnética total.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>- Valor médio da tensão secundária: deve ser medido utilizando-se um voltímetro, de bobina móvel com retificador, de classe 0,5. A resistência interna deste aparelho deve ser elevada (superior ou igual à 1000Ω/V). O instrumento é geralmente calibrado em valor eficaz. Para regime senoidal puro tem-se a seguinte</p>	<p>- Valor médio da tensão secundária: deve ser medido através de um voltímetro de valor médio verdadeiro. Os erros de fundo de escala não devem exceder 0,25%. Instrumentos com exatidão de 0,5% podem ser utilizados em casos de exatidão reduzida. A resistência de entrada de um voltímetro analógico não deve ser inferior à</p>	<p>- Valor médio da tensão secundária: deve ser medido utilizando-se voltímetro de valor médio com exatidão de ±0,5%. Sua resistência interna não deve ser inferior à 1000 Ω/V. Geralmente é graduado para indicar o produto</p>	<p>- Valor médio da tensão secundária: deve ser medido utilizando-se um voltímetro de valor médio retificado com exatidão de ±0,2% ou melhor.</p> <p>- Valor eficaz da tensão</p>

<p>relação:</p> $valor_{eficaz} = 1,1valor_{m\u00e9dio} \text{ NBR (1.5)}$ <p>- Valor eficaz da tens\u00e3o secund\u00e1ria: deve ser medido utilizando-se um volt\u00edmetro de valor eficaz verdadeiro com resist\u00eancia interna superior ou igual \u00e0 500Ω/V e de classe 0,5.</p> <p>- Corrente prim\u00e1ria: deve ser medida utilizando-se um amper\u00edmetro de valor eficaz de classe 1 ou melhor, cuja resist\u00eancia interna seja baixa.</p> <p>- Freq\u00fc\u00eancia: para a medida \u00e9 permiss\u00edvel utilizar um frequ\u00eanc\u00edmetro de classe 0,5, ou de classe 0,2 se for necess\u00e1rio maior exatid\u00e3o.</p> <p>- Pot\u00eancia: \u00e9 medida utilizando-se um watt\u00edmetro de classe 0,5 pr\u00f3prio para sistemas de fator de pot\u00eancia baixo (0,1 ou 0,2). A resist\u00eancia do circuito de tens\u00e3o deve ser inferior ou igual \u00e0 100Ω/V.</p> <p>- Monitoramento da imagem da tens\u00e3o medida: utilizar oscilosc\u00f3pio.</p>	<p>1000Ω/V da indica\u00e7\u00e3o de fundo de escala.</p> <p>- Valor eficaz da tens\u00e3o secund\u00e1ria: para medi\u00e7\u00e3o utilizar um volt\u00edmetro de valor eficaz verdadeiro. A exatid\u00e3o do volt\u00edmetro eficaz deve ser a mesma que a especificada para o volt\u00edmetro de valor m\u00e9dio. A resist\u00eancia de entrada de um volt\u00edmetro de valor eficaz anal\u00f3gico n\u00e3o deve ser inferior \u00e0 5000 Ω/V da indica\u00e7\u00e3o de fundo de escala.</p> <p>- Corrente prim\u00e1ria eficaz: deve ser medida por um amper\u00edmetro de valor eficaz verdadeiro. Exatid\u00e3o nominal de 1,0% de fundo de escala, ou melhor, \u00e9 necess\u00e1ria. O instrumento deve ter baixa imped\u00eancia interna para evitar contribui\u00e7\u00f5es na distor\u00e7\u00e3o da forma de onda do fluxo.</p> <p>- Pot\u00eancia: deve ser medida utilizando-se um watt\u00edmetro. A exatid\u00e3o de fundo de escala n\u00e3o deve ser inferior \u00e0 0,25%.</p>	<p>entre 1,111 e o valor m\u00e9dio.</p> <p>- Valor eficaz da tens\u00e3o secund\u00e1ria: deve ser medido utilizando-se volt\u00edmetro de valor eficaz com exatid\u00e3o de $\pm 0,5\%$.</p> <p>- Corrente prim\u00e1ria eficaz: deve ser medida utilizando-se um amper\u00edmetro de valor eficaz com imped\u00eancia interna baixa e com exatid\u00e3o de $\pm 1\%$.</p> <p>- Freq\u00fc\u00eancia: deve ser medida utilizando-se um instrumento com exatid\u00e3o de $\pm 0,1\%$.</p> <p>- Pot\u00eancia: deve ser medida utilizando-se um watt\u00edmetro de baixo fator de pot\u00eancia com exatid\u00e3o de $\pm 0,5\%$.</p>	<p>secund\u00e1ria: deve ser medido utilizando-se volt\u00edmetro de valor eficaz com exatid\u00e3o de $\pm 0,2\%$ ou melhor.</p> <p>- Freq\u00fc\u00eancia: deve ser medida utilizando-se um frequ\u00eanc\u00edmetro com exatid\u00e3o de $\pm 0,1\%$ ou melhor.</p> <p>- Pot\u00eancia: deve ser medida por um watt\u00edmetro com exatid\u00e3o de $\pm 0,5\%$ ou melhor.</p> <p>- A forma de onda da tens\u00e3o secund\u00e1ria induzida deve ser checada com um oscilosc\u00f3pio para assegurar que somente a componente fundamental esteja presente.</p>
--	---	---	--

A precis\u00e3o da medida depende da classe de exatid\u00e3o do instrumento. Com maior incid\u00eancia, a comiss\u00e3o eletrot\u00e9cnica internacional exige instrumentos com menor classe de exatid\u00e3o (0,1%, 0,2%) em rela\u00e7\u00e3o aos instrumentos exigidos pelas demais normas (0,5%). Assim, os custos de aquisi\u00e7\u00e3o de instrumenta\u00e7\u00e3o segundo a comiss\u00e3o eletrot\u00e9cnica internacional s\u00e3o mais elevados que para as demais normas. \u00c9

interessante observar que as normas NBR 5161 e IEC 404-2 sugerem a utilização de um osciloscópio para checar a forma de onda da tensão induzida, sem exigir que seja realizada uma análise harmônica do sinal. Entretanto, o fator de forma pode ser um indicador da distorção, desde que os instrumentos utilizados estejam adequados também aos valores a serem medidos.

1.1.7.2 Instrumentos para Obtenção da Permeabilidade Magnética

Tabela 8: Instrumentos para obtenção da permeabilidade magnética.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>É necessário um amperímetro de valor eficaz de baixa impedância e de classe 0,5 ou melhor.</p> <p>- Quando o método do resistor calibrado for utilizado para medição do campo magnético é necessário um osciloscópio ou um voltímetro eletrônico de valor de pico. A exatidão da medida deve ser $\pm 3\%$ ou melhor. A exatidão do resistor calibrado deve ser $\pm 0,5\%$ ou melhor. A resistência do resistor calibrado não deve ser superior à 1Ω para minimizar a distorção da forma de onda do fluxo.</p> <p>- Quando for utilizado o método do indutor mútuo para calcular o campo magnético, este deve apresentar exatidão</p>	<p>- Método do voltímetro de valor de pico e resistor padrão: a medição da amplitude da corrente de excitação pode ser feita com um voltímetro de pico. Este voltímetro mede a tensão do resistor padrão conectado em série com o enrolamento primário do quadro de Epstein. O voltímetro deve apresentar exatidão de 1% ou melhor. O resistor deve apresentar exatidão de 0,1% ou melhor. Para evitar níveis de distorções intoleráveis, um resistor fixo entre 0,1 e 1Ω é geralmente apropriado.</p> <p>- Método do indutor mútuo de núcleo de ar e voltímetro de valor médio: o indutor mútuo deve apresentar impedância primária baixa tal que a sua inserção não altera as</p>	<p>- Método do voltímetro de pico: o voltímetro de pico deve apresentar exatidão de $\pm 2,5\%$. A resistência do resistor não deve ser superior a 1Ω e sua tolerância deve ser de $\pm 0,1\%$.</p> <p>- Método do indutor mútuo: o indutor mútuo deve apresentar exatidão de 0,5%. Um indutor mútuo de 1 A ou 10 A deve ser utilizado de acordo com o campo magnético a ser medido. É utilizado também um voltímetro de valor médio.</p>	<p>- Método do voltímetro de pico: o voltímetro de pico deve apresentar exatidão de $\pm 0,5\%$ ou melhor. Resistor com exatidão de 0,1% deve ser utilizado.</p> <p>- Método do indutor mútuo: o indutor mútuo deve apresentar exatidão de 0,5%. O enrolamento primário do indutor mútuo é conectado em série com o enrolamento primário do quadro de Epstein. O voltímetro de valor médio pode ser o mesmo utilizado para medir a tensão secundária do quadro de Epstein.</p>

de $\pm 0,5\%$ ou melhor e impedância primária mínima. A impedância secundária do indutor deve ser baixa comparando-se com o instrumento de medida a ele conectado (para minimização do erro).	condições do circuito primário. A impedância secundária do indutor mútuo deve ser baixa. A adição do voltímetro não deve alterar a tensão secundária do indutor mútuo mais que 0,25%.		
--	---	--	--

O termo “indutor mútuo” é utilizado para denominar o dispositivo utilizado para obter a amplitude do campo magnético.

Para obtenção da permeabilidade magnética as normas apresentam dois métodos para medir a corrente: do resistor calibrado e do indutor mútuo. Quanto ao método do resistor calibrado, a norma americana é a única que especifica a resistência mínima permissível do resistor ($0,1\Omega$). As normas NBR 5161, ASTM A 343 e JISC 2550 especificam que o resistor não deve ter o valor superior a 1Ω . A norma da comissão eletrotécnica internacional não especifica o valor da resistência. Sobre o método do indutor mútuo, a norma americana não especifica a exatidão do indutor mútuo.

1.1.8 Valor Convencional do Caminho Magnético, Massa Magneticamente Efetiva e Seção Transversal

Tabela 9: Valor convencional do caminho magnético, massa magneticamente efetiva e seção transversal.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
- O valor convencional para o caminho magnético é: $l_m = 0,94$ [m]. - A massa magneticamente efetiva da	- Assume-se o valor 0,94m como caminho magnético efetivo. - Para cálculo da perda magnética, a massa ativa da amostra (menor que a	- o caminho magnético efetivo é de : 0,94m. - A massa efetiva da amostra é dada por:	- O caminho magnético efetivo é de : 0,94m. - A massa ativa é dada por:

<p>amostra é dada por:</p> $m_a = \frac{l_m \cdot m}{4l} \quad \text{NBR (1.6)}$ <p>- A seção transversal da amostra é dada por:</p> $S = \frac{m}{4l\delta} \quad \text{NBR (1.7)}$	<p>massa total) é dada por:</p> $m_a = \frac{l_m \cdot m}{4l} = 0,235 \frac{m}{l} \quad \text{ASTM (1.1)}$ <p>- A área da seção transversal efetiva em cada braço é dada por:</p> $S = \frac{m}{4l\delta} \quad \text{ASTM (1.2)}$	$m_a = \frac{l_m \cdot m}{4l} \quad \text{JIS (1.1)}$ <p>- A seção transversal da amostra é dada por:</p> $S = \frac{m}{4l\delta} \quad \text{JIS (1.2)}$	$m_a = \frac{l_m \cdot m}{4l} \quad \text{IEC (1.1)}$ <p>- A área da seção transversal da amostra é dada por:</p> $S = \frac{m}{4l\delta} \quad \text{IEC (1.2)}$
--	--	---	---

Todas as normas adotam o valor 0,94m, para representar o comprimento efetivo do caminho magnético do fluxo. Assim, a massa ativa da amostra é menor que a massa total. O comprimento efetivo do caminho magnético do fluxo depende do tipo de material, da indução magnética e é afetado pela sobreposição das lâminas nos cantos do quadro [3].

Na equação $m_a = \frac{l_m \cdot m}{4l}$ verifica-se que a massa total m é corrigida pelo fator $l_m/4l$. Esta relação é obtida por proporcionalidade:

$$\begin{array}{l} m \rightarrow 4.l \\ m_a \rightarrow l_m \end{array} \quad \text{assim, } m_a = \frac{l_m \cdot m}{4l}$$

A seção transversal é obtida através da densidade de massa do material porque a espessura da lâmina apresenta variação típica de até 8%, dificultando a medição da seção geometricamente. Para deduzir a equação $S = \frac{m}{4l\delta}$ tem-se que:

$$\delta = \frac{m}{\text{volume}} = \frac{m}{S.l} \quad \text{como no quadro de Epstein a massa } m \text{ está distribuída ao longo dos quatro braços tem-se:}$$

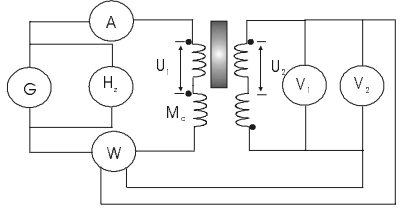
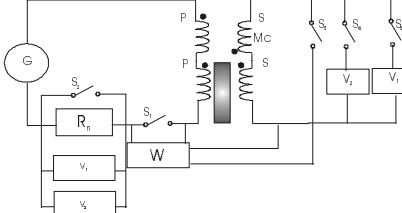
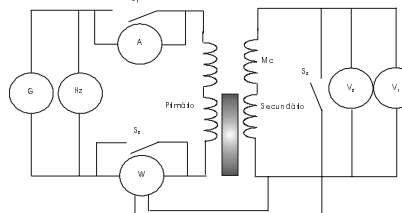
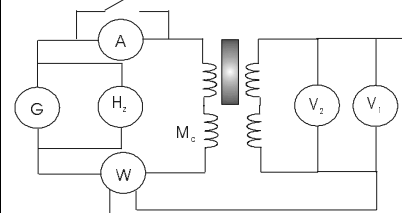
$$\delta = \frac{m}{4.l.S} \quad \text{assim, } S = \frac{m}{4.l.\delta}$$

A equação da massa ativa e a equação da seção transversal, acima deduzidas, consideram que os braços do quadro de Epstein tenham a mesma massa e o mesmo comprimento. Logo, estas condições devem ser verificadas.

1.1.9 Esquema de Ligação para o Ensaio da Perda Magnética e da Permeabilidade Magnética

1.1.9.1 Esquema de Ligação para o Ensaio da Perda Magnética

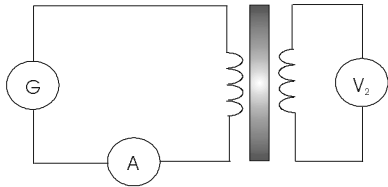
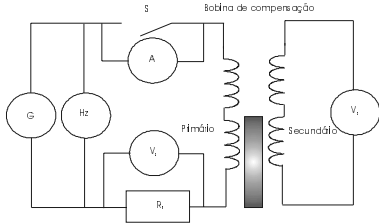
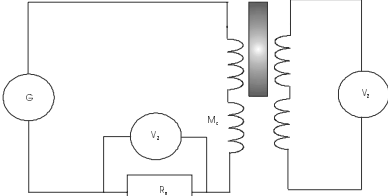
Tabela 10: Esquema de ligação para o ensaio da perda magnética.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
			
<p>Fig. NBR 1: Método do wattímetro.</p> <p><i>G</i>: fonte de tensão alternada.</p> <p><i>A</i>: amperímetro de valor eficaz.</p> <p><i>Hz</i>: frequencímetro.</p> <p><i>W</i>: wattímetro.</p> <p><i>V₁</i>: voltímetro de valor eficaz.</p> <p><i>V₂</i>: voltímetro de valor médio.</p> <p><i>M_c</i>: indutância mútua de compensação do fluxo disperso.</p>	<p>Fig. ASTM 2: Ensaio da perda magnética e das características de magnetização</p> <p><i>G</i>: fonte de tensão alternada.</p> <p><i>W</i>: wattímetro.</p> <p><i>V₁</i>: voltímetro de valor eficaz.</p> <p><i>V₂</i>: voltímetro de valor médio.</p> <p><i>M_c</i>: indutância mútua de compensação do fluxo disperso.</p>	<p>Fig JIS 3: Ensaio da perda magnética</p> <p><i>G</i>: fonte de tensão alternada.</p> <p><i>A</i>: amperímetro de valor eficaz.</p> <p><i>Hz</i>: frequencímetro.</p> <p><i>W</i>: wattímetro.</p> <p><i>V₁</i>: voltímetro de valor eficaz.</p> <p><i>V₂</i>: voltímetro de valor médio.</p> <p><i>M_c</i>: indutância mútua de compensação do fluxo disperso.</p>	<p>Fig. IEC 3: Método do wattímetro</p> <p><i>G</i>: fonte de tensão alternada.</p> <p><i>A</i>: amperímetro de valor eficaz.</p> <p><i>Hz</i>: frequencímetro.</p> <p><i>W</i>: wattímetro.</p> <p><i>V₁</i>: voltímetro de valor eficaz.</p> <p><i>V₂</i>: voltímetro de valor médio.</p> <p><i>M_c</i>: indutância mútua de compensação do fluxo disperso.</p>

Todas as normas apresentam basicamente o mesmo circuito para medição da perda magnética. Apenas a norma americana apresenta um circuito sem o amperímetro de controle da bobina de corrente do wattímetro. A potência é obtida pelas leituras da corrente primária e tensão secundária para não incluir a perda no cobre.

1.1.9.2 Esquema de Ligação para o Ensaio da Permeabilidade Magnética

Tabela 11: Esquema de ligação para o ensaio da permeabilidade magnética.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>A amplitude da indução magnética é obtida para cada valor de amplitude do campo magnético, medindo-se a tensão secundária média retificada.</p> <p>O valor eficaz do campo magnético é calculado a partir do valor eficaz da corrente primária, medida através do seguinte esquema de ligação:</p>  <p>Fig. NBR 2: Corrente primária eficaz.</p> <p>G: fonte de tensão alternada.</p> <p>A: amperímetro de valor eficaz.</p> <p>V₂: voltímetro de valor médio.</p> <p>A amplitude do campo magnético é obtida a partir da</p>		<p>A frequência deve ser mantida constante.</p> <p>- Método I: a amplitude da corrente primária deve ser obtida medindo-se a amplitude da tensão do resistor conforme o seguinte circuito:</p>  <p>Fig. JIS 4: Método do resistor calibrado.</p> <p>G: fonte de tensão alternada.</p> <p>Hz: frequencímetro.</p> <p>V₂: voltímetro de valor médio.</p> <p>A: amperímetro de valor eficaz.</p> <p>V₃: voltímetro de valor de pico.</p>	<p>- Método I: a amplitude da corrente primária deve ser obtida medindo-se a amplitude da tensão do resistor conforme o seguinte circuito:</p>  <p>Fig. IEC 4: Método do resistor calibrado.</p> <p>G: fonte de tensão alternada.</p> <p>V₃: voltímetro de valor de pico.</p> <p>R_n: resistor calibrado.</p> <p>V₂: voltímetro de valor médio.</p> <p>M_c: indutância mútua de compensação</p>

amplitude da corrente primária, por um dos seguintes métodos de medição:

- Método I: a amplitude da corrente primária é obtida medindo-se a amplitude da tensão do resistor calibrado conforme o seguinte circuito:

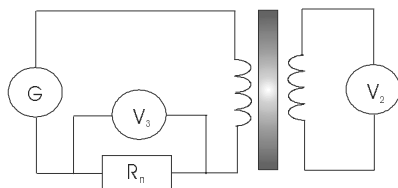


Fig. NBR 3: Método do resistor calibrado

G: fonte de tensão alternada.

V_3 : voltímetro de valor de pico.

R_n : resistor calibrado.

V_2 : voltímetro de valor médio.

- Método II: a amplitude da corrente primária é obtida através da tensão secundária do indutor mútuo conforme o seguinte circuito:

- Método II: a amplitude da corrente primária é obtida através da tensão secundária do indutor mútuo conforme o seguinte circuito:

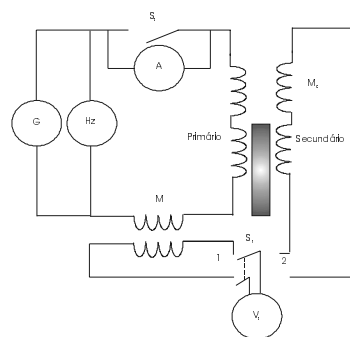


Fig. JIS 5: Método do indutor mútuo.

G: fonte de tensão alternada.

M_c : indutância mútua de compensação de fluxo disperso.

M: indutância mútua.

V_2 : voltímetro de valor médio.

A: amperímetro de valor eficaz.

Hz: frequencímetro.

do fluxo disperso.

- Método II: A amplitude da corrente primária é obtida através da tensão secundária do indutor mútuo conforme o seguinte circuito:

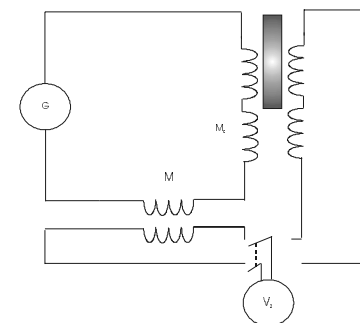


Fig. IEC 5: Método do indutor mútuo.

G: fonte de tensão alternada.

M_c : indutância mútua de compensação de fluxo disperso.

M: indutância mútua.

V_2 : voltímetro de valor médio.

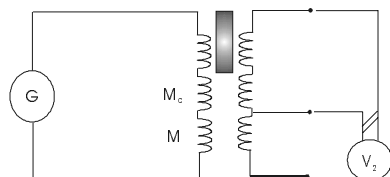


Fig. NBR 4: Método do indutor mútuo.

G: fonte de tensão alternada.

M_c : indutância mútua de compensação de fluxo disperso.

M: indutância mútua.

V_2 : voltímetro de valor médio.

Neste circuito o voltímetro para medição da tensão secundária do quadro de Epstein é também utilizado para medição da tensão do indutor mútuo.

A permeabilidade magnética pode ser obtida pelo método do resistor calibrado ou pelo método do indutor mútuo. Quanto ao método do indutor mútuo, os valores das indutâncias e resistências podem ser afetadas pela frequência. Assim, estas grandezas devem ser medidas antes do ensaio.

1.1.10 Compensação da Queda de Tensão Devido ao Fluxo Disperso

Tabela 12: Compensação da queda de tensão devido ao fluxo disperso.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
A seção transversal do enrolamento secundário do quadro de Epstein é maior que a seção transversal da amostra. O fluxo disperso neste enrolamento,	O ajuste do indutor de compensação do fluxo disperso	Para um material com alta permeabilidade,	O ajuste do valor da indutância mútua do

<p>aumenta a tensão induzida no próprio enrolamento. Assim,</p> $B'_m = B_m + \mu_0 H_m \frac{S_i - S}{S} \quad \text{NBR (1.8)}$ <p>A indução magnética obtida a partir da tensão secundária é diferente da indução magnética na amostra devido ao segundo termo de NBR(1.8). Para minimizar este erro é necessário preencher os braços do quadro com o maior número possível de amostras. Alternativamente, pode ser utilizado um indutor acoplado para compensar o fluxo disperso. A tensão secundária do indutor acoplado compensa a tensão secundária do quadro de Epstein causada pela variação do fluxo disperso. Desta forma o segundo termo de NBR(1.8) desaparecerá. A indução magnética da amostra torna-se igual à indução magnética obtida a partir da tensão secundária:</p> $B_m = \frac{\bar{U}_2}{4fN_2S} \quad \text{NBR (1.9)}$ <p>Realiza-se um ajuste permanente da indutância mútua de compensação. O ajuste é tal que ao excitar o enrolamento primário com uma corrente alternada sem amostra no quadro de Epstein, a tensão nos enrolamentos secundários não deve ser superior a 0,1% da tensão deste enrolamento sem o indutor de compensação. Neste caso a indução magnética calculada em NBR(1.9) é a indução intrínseca (polarização magnética) que não é diferente de B_m.</p>	<p>deve ser checado. Passa-se uma corrente alternada de 2 à 5A através do enrolamento primário do quadro sem amostras, mas com o compensador de fluxo disperso conectado na polaridade certa. Observa-se a tensão alternada de circuito aberto nos terminais secundários com um voltímetro. Quando esta tensão for inferior ou igual à 1mV ou 2mV, significa que o compensador de fluxo disperso está adequado. Compensando o fluxo disperso, a indução magnética calculada pela tensão indicada pelo voltímetro de valor médio é a indução intrínseca. Em muitos casos os valores da indução intrínseca são iguais aos valores da indução normal.</p>	<p>polarização magnética e indução magnética são iguais. Ajusta-se a indutância mútua da bobina de compensação de forma que a indicação do voltímetro de valor médio (conectado no enrolamento secundário de Epstein e no compensador) seja nula quando não existir amostra no quadro de Epstein.</p>	<p>compensador deve ser tal que ao passar uma corrente alternada no enrolamento primário, sem amostra no dispositivo, a tensão medida entre os terminais não comuns dos enrolamentos do secundário, não deve ser superior a 0,1% da tensão secundária apenas do quadro de Epstein.</p>
---	--	---	--

Como o fluxo disperso na seção transversal do quadro aumenta a tensão induzida, é necessário compensá-lo. Para compensar a tensão devido ao fluxo disperso, utiliza-se um indutor de compensação de fluxo disperso. Assim, a indução magnética da amostra é igual à indução magnética obtida pela tensão secundária.

A equação NBR(1.9) é deduzida da seguinte forma:

$$U_2 = N_2 \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Para fluxo magnético senoidal, $\phi = \phi_m \text{sen}(wt)$, tem-se: $U_2 = N_2 \phi_m w \cos(wt)$

Como $U_{\text{pico}} = N_2 \phi_m w$ e $\phi_m = B_m S$, tem-se: $U_{\text{pico}} = N_2 B_m S w$

Como $U_{\text{pico}} = \sqrt{2} U_2$ e $U_2 = \frac{\sqrt{2}\pi}{4} \bar{U}_2$ e $w = 2\pi f$, tem-se: $\sqrt{2} \frac{\sqrt{2}\pi}{4} \bar{U}_2 = N_2 B_m S 2\pi f$

Assim, $B_m = \frac{\bar{U}_2}{4fN_2S}$

Sempre que se utilizar um compensador de fluxo disperso a medida da polarização magnética é considerada como o valor da indução magnética [3].

1.1.11 Redução da Relutância

Tabela 13: Redução da relutância.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
A força permitida, aplicada nos cantos do quadro de Epstein, é de 1N.	Se a lâmina for razoavelmente plana e se existir área de contacto nos cantos, uma relutância suficientemente pequena é obtida sem recorrer à pressão nas juntas. Caso contrário, pressiona-se as juntas utilizando-se pesos não magnéticos de 200 g. É permitido recorrer à pressão nas juntas embora introduza-se tensão no material.	Uma força de 1N deve ser aplicada nas juntas sobrepostas, para minimizar a relutância magnética.	Para minimizar o entreferro é permitido aplicar uma força de 1N em cada canto do quadro.

Com exceção da norma americana, as demais normas recomendam aplicar uma força de 1N nos cantos do quadro de Epstein. Neste caso, seria necessário instrumentação adequada para controlar esta força. A norma americana elimina este problema, estabelecendo a massa (200g) dos pesos de material não magnético aplicados nos cantos do quadro.

1.1.12 Procedimentos para o Ensaio

Tabela 14: Procedimentos para o ensaio.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<ul style="list-style-type: none"> - Mede-se a massa da amostra com exatidão de $\pm 0,1\%$. - Inserem-se as lâminas no quadro de Epstein formando juntas duplamente sobrepostas nos cantos. Se metade das 	<ul style="list-style-type: none"> - Checam-se os comprimentos das lâminas verificando conformidade com $\pm 0,8mm$ de tolerância. Checam-se as amostras verificando existência de rebarbas; torção e distorções evidenciando que abusos mecânicos foram cometidos. Checa-se ainda se a lâmina apresenta largura uniforme. Lâmina com notável desvio de corte é inadequada para teste. 	<ul style="list-style-type: none"> - Controla-se o manuseio da amostra para evitar tensões no material. - A massa das peças de teste deve ser medida com exatidão de $\pm 0,1\%$. - Dividem-se as peças de teste 	<ul style="list-style-type: none"> - A amostra de teste deve ser pesada e sua massa determinada com exatidão de $\pm 0,1\%$. - A massa ativa da amostra de teste deve ser no mínimo 240g para lâminas de 280mm de comprimento.

<p>lâminas forem cortadas na direção da laminação e as restantes perpendiculares à esta direção, inserem-se as primeiras em dois braços paralelos do quadro de Epstein e as últimas nos braços restantes. Os braços devem possuir o mesmo número de lâminas.</p> <p>- Nos cantos o entreferro entre as lâminas deve ser o mínimo possível.</p> <p>- Desmagnetiza-se a amostra aplicando um campo alternado e decrescente.</p> <p>- Ajusta-se a fonte de alimentação tal que se obtenha a indução desejada por:</p> $\bar{U}_2 = 4fSB_m N_2 \quad \text{NBR (1.10)}$ <p>- O amperímetro do circuito da Fig. NBR 1, deve ser controlado para que a bobina de corrente do</p>	<p>- Pesa-se a amostra numa balança capaz de determinar a massa com 0,1% de exatidão. A massa nominal da amostra deve ser aproximadamente 2 kg, 1 kg ou 0,5 kg para lâminas de 28 cm conforme o quadro de teste. Imprecisões na pesagem e na medida do comprimento da amostra causam erros na medida da indução magnética, resultando elevados erros nas perdas obtidas.</p> <p>- Divide-se a amostra em quatro grupos, contendo igual número de lâminas e mesma massa. Inserem-se as lâminas (sempre múltiplas de quatro) nos solenóides do quadro uma por vez, começando com uma lâmina em cada dois solenóides opostos. Se metade das lâminas forem cortadas na direção da laminação e as restantes perpendiculares à esta direção, inserem-se as primeiras em dois braços paralelos do quadro e as últimas nos braços restantes. Dispõem-se as lâminas com superposição nos cantos.</p> <p>- Desmagnetiza-se a amostra da seguinte forma: com os instrumentos conectados conforme Fig. ASTM 2 e as chaves S₁ e S₄ fechadas, chaves S₃ e S₅ abertas, efetua-se esta desmagnetização aplicando inicialmente uma tensão de fonte no circuito primário suficiente para magnetizar a amostra para uma indução acima do joelho da curva de magnetização. Calcula-se o valor da tensão, para a desejada indução magnética de teste na amostra, de acordo com a equação:</p>	<p>cortadas na mesma direção em dois grupos (quatro grupos no total).</p> <p>- Inserem-se as lâminas no quadro de Epstein. Cada grupo formando um braço do caminho magnético. Utilizam-se lâminas cortadas na mesma direção em braços opostos. Formam-se juntas duplamente sobrepostas nos cantos.</p> <p>- Considerando a Fig. JIS 3, fecha-se a chave S₂ e desmagnetiza-se a amostra. Fecham-se ambas as chaves S₁ e S₃ e abre-se a chave S₂. Ajusta-se a fonte de tensão até que a leitura do voltímetro de valor médio for a correspondente da amplitude da indução magnética previamente determinada. Mantém-se a frequência no valor</p>	<p>- As lâminas devem ser empilhadas nas bobinas do quadro com juntas duplamente sobrepostas nos cantos. Os braços devem ser de igual comprimento, de igual área de seção transversal e com igual quantidade de lâminas. Se metade das lâminas forem cortadas na direção da laminação e as restantes perpendiculares à esta direção, inserem-se as primeiras em dois braços paralelos do quadro e as últimas nos braços restantes.</p> <p>- A amostra deve ser desmagnetizada por um campo magnético alternado e decrescente.</p> <p>-A saída da fonte deve ser vagarosamente aumentada até que o valor médio da tensão secundária do quadro seja igual ao valor desejado. Observa-se o</p>
--	--	--	---

<p>wattímetro não seja sobrecarregada.</p> <p>- Anota-se a tensão média (retificada) e a tensão eficaz.</p> <p>- Calcula-se o fator de forma da tensão secundária através da seguinte relação:</p> $F = \frac{U_2}{\bar{U}_2} \quad \text{NBR (1.11)}$ <p>O fator de forma da tensão secundária deve ser medido com exatidão de 0,5%.</p> <p>- Anota-se a leitura do wattímetro.</p>	$U_2 = \sqrt{2\pi B_m S N_2 f} \quad \text{ASTM (1.3)}$ <p>Regulação da indução magnética: com as chaves S₃ e S₄ fechadas e as chaves S₁ e S₅ abertas, aumenta-se a tensão da fonte até o voltímetro de valor médio indicar o valor da tensão calculada para obter a desejada indução magnética de teste. Faz-se decrescer a tensão vagarosamente para uma indução magnética muito baixa.</p> <p>- Testa-se imediatamente os pontos de teste desejados. Quando múltiplos pontos forem necessários, desenvolve-se o teste aumentando os valores de indução magnética.</p> <p>- Lê-se o wattímetro. Alguns usuários preferem abrir a chave S₄ para eliminar a carga do voltímetro de valor médio da indicação do wattímetro. Outros podem preferir manter as chaves S₄ e S₅ fechadas, ao medirem a perda magnética, para que todos os instrumentos sejam lidos simultaneamente. No último caso, a resistência combinada do voltímetro de valor médio, voltímetro eficaz, e circuito de tensão do wattímetro constituem a carga total dos instrumentos no wattímetro. A potência devido a qualquer corrente fluindo no circuito secundário deve ser conhecida para que seja subtraída das indicações do wattímetro.</p> <p>- Mede-se o valor eficaz da tensão secundária tendo ambas as chaves S₄ e S₅ fechadas, e a tensão ajustada para o valor correto.</p>	<p>especificado. Calcula-se a tensão pela fórmula:</p> $U_2 = 4,44 f S B_m N_2 \quad \text{JIS(1.3)}$ <p>- Obtém-se a leitura do wattímetro.</p> <p>- Anota-se a leitura do voltímetro eficaz.</p>	<p>amperímetro do circuito primário para que o circuito de corrente do wattímetro não seja sobrecarregado. A tensão média é obtida segundo o valor desejado de indução magnética como segue:</p> $\bar{U}_2 = 4 f N_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} S B_m \quad \text{IEC (1.3)}$ <p>- Mede-se a potência com o amperímetro do circuito primário curto circuitado e a tensão secundária reajustada se necessário.</p> <p>- O fator de forma da tensão secundária deve ser determinado da razão de seu valor eficaz para seu valor médio retificado.</p> <p>- A leitura do wattímetro deve ser anotada.</p>
--	--	--	--

Quanto ao manuseio da amostra, apenas a norma japonesa recomenda lidar com as amostras com cuidado. Este procedimento evita inclusão de tensões no material. A tensão de tração pode aumentar a permeabilidade magnética e a tensão de compressão pode diminuir este valor [2]. Qualquer dobramento da amostra altera o valor da perda magnética.

Quanto à inspeção da amostra, a norma americana recomenda checar a amostra para possíveis descartes. Deve-se analisar o comprimento, as rebarbas, a inclusão de abusos mecânicos, a uniformidade da largura e existência de desvios de corte.

Sobre o arranjo da amostra, as normas americana e japonesa recomendam dividir a amostra em quatro grupos. Tem-se dois grupos na direção da laminação e dois grupos na direção transversal. Este procedimento facilita a inserção das lâminas no quadro e evita possíveis enganos. A norma americana estabelece que cada grupo tenha o mesmo número de lâminas e a mesma massa. Quanto à inserção da amostra no quadro, todas as normas estabelecem a mesma metodologia de inserção da amostra, realçando a sobreposição das lâminas nos cantos. Este procedimento reduz a relutância do circuito e o fluxo disperso nestes pontos [3]. Quando a amostra for cortada metade na direção da laminação e a outra parte perpendicular a esta direção, obtém-se melhor previsão do comportamento do material no dispositivo eletromagnético. A perda magnética na direção transversal é maior que a perda magnética na direção longitudinal [2]. As propriedades magnéticas são anisotrópicas porque variam com a direção da indução magnética e do campo magnético devido à existência da textura do material e a distribuição não aleatória dos grãos.

Quanto à desmagnetização da amostra, já abordada no item 1.1.5, a norma americana apresenta um procedimento de desmagnetização mais detalhado. Somente esta norma recomenda realizar o teste imediatamente após este procedimento.

Referente ao ajuste da fonte, a norma da comissão eletrotécnica internacional realiza um ajuste da fonte de tensão (em função da indução de teste desejada) diferente das demais normas. Este ajuste é função das resistências dos instrumentos conectados ao circuito secundário e da resistência série do enrolamento secundário e do indutor de compensação, conforme a equação IEC(1.3). O valor eficaz da tensão secundária utilizado para o cálculo da indução magnética (equações ASTM 1.3 e JIS 1.3) é obtido através da leitura do voltímetro de

valor médio (a tensão eficaz é obtida multiplicando-se a leitura do voltímetro de valor médio por 1,11 quando este não o fizer automaticamente).

Quanto à proteção do wattímetro, somente a norma brasileira e a norma da comissão eletrotécnica internacional recomendam conectar um amperímetro ao primário para controlar a bobina de corrente do wattímetro.

Sobre a leitura do wattímetro, a norma americana apresenta opções de leitura considerando a exclusão de cargas dos instrumentos secundários e a possibilidade de se realizar todas as leituras simultaneamente. A norma da comissão eletrotécnica internacional, recomenda curto circuitar o amperímetro e se necessário reajustar a tensão secundária.

1.1.13 Obtenção da Perda Específica Total

Tabela 15: Cálculo da perda específica total.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>A perda total da amostra é dada por:</p> $P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1,11\bar{U}_2)^2}{R_i + R_t} \quad \text{NBR (1.12)}$ <p>A perda específica total da amostra é dada por:</p> $P_s = \frac{P_c}{m_a} \quad \text{NBR (1.13)}$ $P_s = \frac{P_c 4l}{m.l_m} \quad \text{NBR (1.14)}$	<p>Para obter a perda específica da amostra é necessário subtrair toda potência do circuito secundário incluída na indicação do Wattímetro. Para indução magnética e frequência específicas, a perda específica é dada por:</p> $P_s = \frac{P_m - U_2^2 / R_i}{m_a} \quad \text{ASTM (1.4)}$	<p>Calcula-se a perda magnética pela fórmula:</p> $P_c = P_m - \frac{U_2^2}{R_i} \quad \text{JIS (1.4)}$ <p>A perda magnética por unidade de massa é dada por:</p> $P_s = \frac{P_c}{m_a} \quad \text{JIS (1.5)}$	<p>A perda total da amostra de teste deve ser calculada como segue:</p> $P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1,11\bar{U}_2)^2}{R_i} \quad \text{IEC (1.4)}$ <p>A perda específica total medida é dada por:</p> $P_s = \frac{P_c}{m_a} \quad \text{IEC (1.5)}$ $P_s = \frac{P_c 4l}{m.l_m} \quad \text{IEC (1.6)}$

Para obter a perda magnética, todas as normas subtraem a potência do circuito secundário (dada pelo segundo termo das equações NBR(1.12), JIS(1.4) e IEC(1.4)) da leitura do wattímetro (P_m). Para a norma brasileira, a potência do circuito secundário é obtida considerando-se a resistência equivalente dos instrumentos secundários R_i e a resistência série do enrolamento secundário do quadro e do indutor de compensação R_r . Para as normas americana, japonesa e a norma da comissão eletrotécnica internacional a potência do circuito secundário é obtida considerando-se somente a resistência equivalente da associação paralela entre a bobina de tensão do wattímetro e as outras cargas secundárias R_i .

1.1.14 Correção da Perda Magnética

Tabela 16: Correção da perda magnética.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>Recomenda-se manter o fator de forma da tensão secundária na faixa de $1,11 \pm 1\%$. Este controle pode ser realizado através de sistemas eletrônicos de realimentação. Se não for possível, realizam-se correções nos valores medidos de perda magnética para considerar um desvio do fator de forma até 10%.</p> <p>Admite-se que a perda por histerese não depende do fator de forma se a amplitude da indução magnética for correta. A perda por correntes de Foucault depende do valor eficaz da tensão, logo, depende do fator de forma. Assim, corrige-se a perda magnética total através do fator de forma pela equação NBR (1.16).</p> $P_t = \frac{N_1}{N_2} P'_m - \frac{(1,11\bar{U}_2)^2}{R_i + R_r} \quad \text{NBR(1.15)}$	<p>O erro percentual no fator de forma é dado por:</p> $\Delta F = \frac{100(U_2 - \bar{U}_2)}{\bar{U}_2} \quad \text{ASTM (1.5)}$ <p>Na determinação do erro do fator de forma, assume-se que a componente por histerese da perda magnética é independente do fator de forma se a amplitude da indução magnética for correta. A indução magnética é correta quando o voltímetro de valor médio for utilizado para estabelecer este valor. Como a perda por correntes de Foucault é função do valor eficaz da tensão, será incorreta para tensões não senoidais. A perda corrigida, calculada quando o erro do fator de forma for maior que $\pm 1\%$ e menor que 10%, é dada por:</p>	<p>A correção da perda magnética não é realizada desde que o fator de forma da tensão secundária seja mantido na faixa de $1,11 \pm 1\%$.</p>	<p>-----</p>

$P_c = \frac{P_t}{k_h + k_p \left(\frac{F}{1,11}\right)^2} \quad \text{NBR (1.16)}$ $k_h = \frac{P_h}{P_c} \quad \text{NBR (1.17)}$ $k_p = \frac{P_p}{P_c} \quad \text{NBR (1.18)}$ $k_h + k_p = 1 \quad , \quad \text{NBR (1.19)}$ <p>Para corrigir a perda magnética pode ser utilizada a fórmula aproximada:</p> $\Delta F = 1,11 - F \quad \text{NBR (1.20)}$ $\Delta P = 2k_p \left(\frac{\Delta F}{1,11}\right) P_t \quad \text{NBR (1.21)}$ $P_c = \Delta P + P_t \quad , \quad \text{NBR (1.22)}$ <p>onde, k_p: obtido através do método da separação das perdas. F: fator de forma medido.</p>	$P_{\text{corrigida}} = \frac{P_{\text{observada}}}{h + (k.e)} 100 \quad \text{ASTM (1.6)}$ <p>onde, $P_{s \text{ observada}}$: perda específica calculada em ASTM(1.4).</p> $k = \left(\frac{U_2}{\bar{U}_2}\right)^2 \quad \text{ASTM (1.7)}$ <p>Obviamente $h=100-e$ se perdas residuais forem consideradas desprezíveis. Os valores de h e e na equação acima, não são críticos quando as distorções da forma de onda forem pequenas. Estes valores devem ser obtidos através do método de separação de perdas.</p>		
---	--	--	--

Sobre a correção da perda magnética, a norma da comissão eletrotécnica internacional nada estabelece. A norma japonesa afirma somente que não são necessárias correções quando o fator de forma pertencer a faixa $1,11 \pm 1\%$. A norma brasileira solicita que o fator de forma seja mantido na faixa $1,11 \pm 1\%$, através de sistemas eletrônicos com realimentação. Caso não seja possível, corrige-se a perda magnética para desvios do fator de forma entre 1% a 10%. A norma americana sugere correção da perda magnética quando o erro percentual

do fator de forma for maior que $\pm 1\%$ e menor ou igual a 10%. Nesta norma as constantes h e e , referentes à perda por histerese e perda por correntes de Foucault, são obtidas pelo método de separação de perdas, para fluxo senoidal na faixa de $1,11 \pm 1\%$.

Sobre a correção da perda magnética total através do fator de forma, a norma brasileira e a norma americana admitem que a perda por histerese não depende do fator de forma (se a amplitude da indução magnética for correta) e a perda por correntes de Foucault depende do fator de forma (porque depende do valor eficaz da tensão, ou seja, das distorções da forma de onda).

A perda por histerese é função da amplitude da indução magnética (veja equação NBR(1.26)). A equação NBR(1.10) apresenta a relação entre a tensão secundária média e a amplitude da indução magnética. Como comenta-se no item 1.1.10, utilizando-se compensador de fluxo disperso, a indução magnética na amostra é igual à indução magnética obtida pela tensão secundária média. Por este motivo é admitido que a perda por histerese não depende do fator de forma.

A perda por correntes de Foucault é obtida através da integral volumétrica do produto entre a condutividade elétrica do material e o quadrado do campo elétrico. O campo elétrico é obtido dividindo-se a tensão eficaz pelo comprimento. O valor eficaz da tensão secundária é dado pelo produto entre o valor secundário médio e o fator de forma. Assim a perda por correntes de Foucault depende do fator de forma.

1.1.15 Separação da Perda Total: Perda por Histerese e Perda por Correntes de Foucault

Tabela 17: Separação das Perdas.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>A perda total é separada em duas parcelas, devido a correntes de Foucault e devido à histerese do material, admitindo-se variação com a segunda e a primeira potência da frequência. Para mesmo valor de indução magnética tem-se:</p> $P_c = A_p B_m^2 f^2 + A_h B_m^x f \quad \text{NBR (1.23)}$ <p>A_p: Depende do volume da amostra. É proporcional ao quadrado da espessura de uma única lâmina.</p>	-----	-----	-----

A_h : Depende do volume da amostra.

Realiza-se o ensaio de Epstein para várias frequências, situadas entre a metade e o dobro da frequência na qual deseja-se obter a perda corrigida e a curva P_c/f em função da frequência.

$$\frac{P_c}{f} = A_p B_m^2 f + A_h B_m^x \quad \text{NBR (1.24)}$$

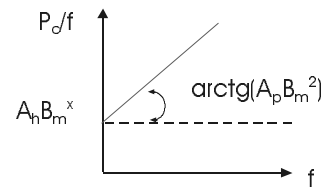


Fig. NBR 5: Método de separação das perdas.

Para levantar o gráfico da Fig. NBR 5 através da reta NBR(1.24), mantém-se constante a amplitude da indução magnética e o fator de forma. Para este caso, o desvio do fator de forma não deve ser superior a 1% de 1,11. Obtidos os termos $A_p B_m^2$ e $A_h B_m^x$ multiplica-se por f^2 e f obtendo-se:

$$P_p = A_p B_m^2 f^2 \quad \text{NBR (1.25)}$$

$$P_h = A_h B_m^x f \quad \text{NBR (1.26)}$$

$$k_p = \frac{P_p}{P_c} \quad \text{NBR (1.27)}$$

$$k_h = \frac{P_h}{P_c} \quad \text{NBR (1.28)}$$

Somente a norma brasileira detalha o método de separação de perdas. Tem-se duas componentes: perda por histerese e perda por correntes de Foucault. A perda por histerese é obtida através do método do prolongamento da curva da perda magnética em função da frequência até se atingir frequência nula.

1.1.16 Obtenção da Permeabilidade Magnética

Tabela 18: Obtenção da permeabilidade magnética.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
<p>A permeabilidade magnética pode ser obtida de duas maneiras: através de valores da amplitude da indução magnética e de valores eficazes do campo magnético ou da amplitude da indução magnética e da amplitude do campo magnético.</p> <p>Quando o campo magnético for especificado, a corrente primária deve ser ajustada até que se obtenha o campo magnético desejado. A amplitude da indução magnética deve ser calculada pela equação NBR(1.9). \bar{U}_2 é obtido corrigindo-se o valor da leitura do voltímetro pelo fator: $\frac{R_v + R_2}{R_v}$.</p> <p>Quando a indução magnética for especificada, ajusta-se a tensão secundária para o valor correspondente à indução magnética especificada.</p>	<p>Determina-se a amplitude da corrente de excitação utilizando-se um voltímetro de valor de pico e um resistor padrão. A chave S_1 (Fig. ASTM 2) deve ser fechada para proteger o wattímetro de correntes excessivas. As chaves S_3 e S_5 devem ser abertas para minimizar o carregamento do circuito secundário. Com a chave S_2 aberta e S_5 fechada ajusta-se a tensão para o valor correto segundo a desejada indução magnética ou ajusta-se a amplitude da corrente para o valor correto segundo o desejado campo magnetizante.</p>	<p>- Método I: desmagnetiza-se a amostra. Fecha-se o interruptor S (Fig. JIS 4) e ajusta-se a fonte de tensão até que a leitura do voltímetro de pico seja a correspondente ao campo magnético determinado previamente. Calcula-se a amplitude do campo magnético pela seguinte fórmula:</p> $H_m = \frac{N_1 I_m}{l_m} = \frac{N_1 U_m}{R_n l_m} \quad \text{JIS (1.6)}$ <p>Obtém-se a leitura do voltímetro de valor médio e calcula-se o valor da amplitude da indução magnética pela equação JIS(1.3).</p> <p>- Método II: desmagnetiza-se a amostra. Fecha-se a chave S_2 (Fig. JIS 5), volta-se a comutação da chave S_1 para o lado 1 e</p>	<p>A amplitude da indução magnética deve ser determinada pela equação:</p> $\bar{U}_2 = 4 f N_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} S B_m \quad \text{IEC (1.7)}$ <p>- Método I: a amplitude do campo magnético é obtida da seguinte forma (Fig. IEC 4):</p> $H_m = \frac{N_1 I_m}{l_m}, \quad \text{IEC (1.8)}$ $I_m = \frac{U_m}{R_n}, \quad \text{IEC (1.9)}$ <p>- Método II: observa-se no osciloscópio que na forma de onda da tensão do enrolamento secundário do indutor mútuo não existe mais que dois zeros por ciclo</p>

<p>Determina-se o campo magnético. O valor eficaz do campo magnético é dado por:</p> $H = \frac{N_1 I_1}{l_m} \quad \text{NBR (1.29)}$ <p>Após determinar-se vários valores de amplitude de indução magnética e campo magnético eficaz, uma curva de magnetização pode ser traçada. A amplitude do campo magnético pode ser obtida por um dos dois métodos:</p> <p>- Método I: leitura do voltímetro de valor de pico (Fig. NBR 3).</p> $H_m = \frac{N_1 U_m}{R_n l_m} \quad \text{NBR (1.30)}$ <p>- Método II: leitura do voltímetro de valor médio conectado no indutor mútuo M (Fig. NBR 4):</p> $H_m = \frac{N_1}{4fL_m} \cdot \frac{R_v + R_m}{R_v} \cdot \bar{U}_m \quad \text{NBR (1.31)}$ <p>Após obter várias amplitudes de indução magnética e de campo magnético, uma curva de magnetização pode ser traçada.</p>	<p>Se o indutor mútuo e o voltímetro de valor médio forem utilizados para determinar a amplitude da corrente, segue-se também o procedimento anterior. A amplitude da corrente de excitação, medida através do indutor mútuo de núcleo de ar e do voltímetro de valor médio é dada por:</p> $I_m = U_2 / (\sqrt{2}\pi f L) \quad \text{ASTM (1.8)}$ <p>A amplitude da corrente de excitação calculada através de um resistor padrão e de um voltímetro de pico é dada por:</p> $I_m = U_m / (2R_n) \quad \text{ASTM (1.9)}$ <p>A amplitude do campo magnético deve ser calculada como segue:</p> $H_m = \frac{N_1 I_m}{l_m} \quad \text{ASTM (1.10)}$	<p>ajusta-se a fonte de tensão até que a leitura do voltímetro de valor médio for a correspondente ao campo magnético determinado previamente. Calcula-se a amplitude do campo magnético pela seguinte fórmula:</p> $H_m = \frac{N_1 I_m}{l_m} = \frac{N_1 U_2}{4,17 f L} \quad \text{JIS (1.7)}$ <p>Volta-se a comutação da chave S₁ para o lado 2 e anota-se a leitura do voltímetro de valor médio. Calcula-se o valor da amplitude da indução magnética pela equação JIS(1.3).</p> <p>A curva de magnetização alternada é obtida tomando-se uma série de medidas da amplitude da indução magnética e amplitude do campo magnético correspondente.</p> <p>A amplitude da permeabilidade magnética é dada por: B_m / (μ₀H_m).</p>	<p>(Fig. IEC 5).</p> <p>A amplitude do campo magnético é dada por:</p> $H_m = \frac{N_1}{4fL_m} \cdot \frac{R_v + R_m}{R_v} \cdot \bar{U}_m \quad \text{IEC (1.10)}$
--	---	---	--

Somente a norma brasileira apresenta dois métodos de levantamento da curva de magnetização do material: pela amplitude da indução magnética e valor eficaz do campo magnético ou pela amplitude da indução magnética e amplitude do campo magnético. As demais normas

utilizam este último método. As normas brasileira e americana esclarecem que para obter-se a permeabilidade magnética, pode ser especificado o campo magnético e calculada a indução magnética correspondente e vice-versa. A norma japonesa apresenta apenas a primeira possibilidade, enquanto que a norma da comissão eletrotécnica internacional nada afirma.

A amplitude do campo magnético é obtida através dos seguintes métodos:

- Método do resistor calibrado: as normas brasileira, japonesa e norma da comissão eletrotécnica internacional apresentam mesma formulação para este método. A norma americana multiplica por dois o valor da resistência utilizada.
- Método do indutor mútuo: as normas americana e japonesa apresentam mesma formulação para este método. A norma brasileira e a norma da comissão eletrotécnica internacional apresentam mesma formulação para este método, corrigindo o valor da tensão secundária média pela resistência interna do voltímetro de valor médio e resistência secundária do indutor mútuo.

1.1.17 Reprodutibilidade

Tabela 19: Reprodutibilidade.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
- Perda magnética: para reproduzir este método o desvio padrão deve ser de 1% a 1,5%. - Permeabilidade magnética: utilizando-se instrumentos da classe 0,5 o desvio padrão dos resultados pode ser até 2%.	-----	- Perda magnética: para testes em frequências comerciais o desvio padrão pode ser até 1,5% para lâminas de aço de grão não orientado, para indução até 1,5 T. - Permeabilidade magnética: utilizando-se instrumentos da classe 0,5 o desvio padrão dos	- Perda magnética: é caracterizada por um desvio padrão relativo de até 1,5%, para medição em material de grão não orientado até 1,5 T. Para medição em altas induções é esperado que este desvio cresça. - Permeabilidade magnética: utilizando-se

		resultados pode ser até 2%.	instrumentos com exatidão de $\pm 0,5\%$ ou melhor, o desvio padrão pode atingir 2%.
--	--	-----------------------------	--

Perda magnética: com exceção da norma americana, as demais normas esclarecem que para reproduzir o método o desvio padrão admissível é de 1,5%. A norma da comissão eletrotécnica internacional lembra que para altas induções espera-se que este desvio cresça.

Permeabilidade magnética: com exceção da norma americana, as demais normas esclarecem que para reproduzir o método utilizando-se instrumentos de classe 0,5 o desvio padrão admissível é de 2%.

1.1.18 Relatório de Teste

Tabela 20: Relatório de teste.

NBR 5161	ASTM A 343	JISC 2550	IEC 404-2
-----	-----	-----	Deve conter: - Tipo e identificação da amostra de teste. - Densidade do material (convencional ou medida). - Comprimento das lâminas. - Número de lâminas. - Temperatura ambiente durante o ensaio. - Frequência. - Valores de indução magnética. - Resultado das medidas.

Somente a norma da comissão eletrotécnica internacional, estabelece os itens que devem constar no relatório de teste.

1.2 Roteiro de Ensaio Baseado nas Normas Técnicas

Da sinopse realizada das normas, enumera-se uma seqüência de procedimentos a serem realizados desde a obtenção das amostras até ao relatório de teste. Alguns itens são sugestões. Quando houver contradição entre as normas, apontam-se os diversos caminhos a serem seguidos.

Para obter a perda magnética e a permeabilidade magnética, em regime de corrente alternada e em lâminas de aço ao silício de grão não orientado, através do teste de Epstein de 25cm, deve-se procurar seguir os seguintes procedimentos:

- 1) Procedimento para corte das lâminas:
 - a) O instrumento de corte não deve produzir rebarba excessiva (a rebarba não deve influenciar o acoplamento das lâminas).
 - b) Retiram-se as lâminas, conforme a Fig.JIS 1, para que estas sejam mais representativas.
 - c) A quantidade de lâminas deve ser múltipla de quatro. A quantidade mínima de lâminas deve ser doze e a máxima deve estar de acordo com a máxima massa admissível pelo modelo do quadro utilizado.
 - ASTM A 343: amostras pesando menos que 15g por centímetro de comprimento devem consistir de pelo menos 20 lâminas.
 - d) As lâminas devem apresentar as seguintes dimensões:
 - Largura:
NBR5161, JIS C 2550 e IEC 404-2: $30\text{mm} \pm 0,2\text{mm}$.
ASTM A 343: 30mm.
 - Comprimento:
NBR5161: $280 \leq l < 308\text{mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Preferencial: $l = 305\text{mm}$
ASTM A 343: $l \geq 280\text{mm} \pm 0,8\text{mm}$. Preferencial: $l = 305\text{mm}$.
JIS C 2550, IEC 404-2: $280\text{mm} \leq l \leq 320\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$.
 - Espessura:
NBR5161: inferior ou igual à 1,0mm.

e) Utilizar lâminas de superfície plana, seção transversal uniforme e propriedades uniformes em uma dada direção.

2) Armazenamento e manuseio das lâminas:

- a) As lâminas devem ser armazenadas em local seco. Devem conter as seguintes informações para identificação: procedência (fabricante, data de estampagem), designação, tipo e direção de estampagem. As lâminas utilizadas para determinar a densidade do material, através do método do empuxo, devem ser secas após o ensaio e armazenadas separadamente, sendo inadequadas para determinar as propriedades magnéticas.
- b) O operador deve estar provido de luvas e deve manusear as lâminas cuidadosamente, evitando fricções e dobramentos. Deve procurar mantê-las sempre em estado de repouso (sem estarem sofrendo tensões mecânicas).

3) Coleta preliminar de dados:

- a) Inspeção da amostra para possíveis descartes: analisar o comprimento (as lâminas devem apresentar o mesmo comprimento), as rebarbas, inclusão de abusos mecânicos, uniformidade da largura e existência de desvios de corte.
- b) Medição da espessura:
- NBR5161: a espessura é medida em quatro pontos diferentes da lâmina, localizados no mínimo 40 mm das bordas. A medição é feita com exatidão de 0,01mm. O resultado final é dado pela média aritmética das medidas anteriores.
 - JIS C 2550: deve-se medir a espessura, para cada lâmina, em oito pontos 15mm distantes das extremidades (Fig.JIS 2). Utilizar o micrometro externo como instrumento de medida.
- c) Medida da densidade de massa (δ):
- NBR5161: utilizar o método do empuxo (apêndice 1) para medição da densidade de massa do material.
- d) Medida da massa: dividem-se as lâminas cortadas na mesma direção em dois grupos (quatro grupos totais). Os quatro grupos devem conter o mesmo número de lâminas. Pesa-se cada grupo numa balança capaz de determinar a

massa com exatidão de 0,1%. Os quatro grupos devem conter aproximadamente a mesma massa. Anota-se a massa total (m).

e) Cálculo da seção transversal: $S = \frac{m}{4l\delta}$

f) Cálculo da massa magneticamente efetiva: $m_a = \frac{l_m \cdot m}{4l}$ sendo $l_m = 0,94$ [m].

- IEC 404-2: a massa efetiva da amostra deve ser no mínimo 240g para lâminas de 280mm de comprimento.

4) Esquema de ligação para obtenção da perda magnética total:

- a) Equipamento padrão: deve ser montado o circuito apresentado na Fig. NBR1.
- b) Sistemas digitais: utilizar o osciloscópio e um sistema de medição de corrente por efeito hall ou utilizar um sistema, por exemplo, da Brockhaus Messtechnik MPG100 (instrumento de medida da Brockhaus utilizado para definir as qualidades magnéticas de aços elétricos).

5) Esquema de ligação para obtenção da permeabilidade magnética:

- a) Método do resistor calibrado: montar o circuito da Fig. JIS 4.
- b) Método do indutor mútuo: montar o circuito da Fig. JIS 5.
- c) Sistemas digitais: utilizar o osciloscópio e um sistema de medição de corrente por efeito hall ou um sistema destinado a este fim, tal como o da Brockhaus Messtechnik MPG100.

6) Procedimento para o ensaio da perda total:

- a) Anota-se a temperatura ambiente durante o ensaio (18°C à 28°C).
- b) Realiza-se o ensaio em regime de indução magnética senoidal ($F = 1,11 \pm 1\%$).
- c) Realiza-se o ensaio até os seguintes limites de indução e frequência:
 - NBR5161: 1,5 T e frequência de 15 à 400 Hz.
 - ASTM A 343: para testes da perda magnética em 50 ou 60 Hz recomendam-se os pontos 1; 1,5 ou 1,7 T. Recomenda-se uma faixa de frequência de 25 à 400 Hz.
 - JIS C 2550, IEC 404-2: 1,5 T e frequência não superior à 400 Hz.

d) Utiliza-se compensador de fluxo disperso para que a indução magnética na amostra seja dada pelas seguintes relações:

- NBR5161: $\bar{U}_2 = 4fSB_m N_2$
- ASTM A 343: $U_2 = \sqrt{2}\pi B_m SN_2 f$
- JIS C 2550: $U_2 = 4,44fSB_m N_2$
- IEC 404-2: $\bar{U}_2 = 4fN_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} SB_m$

Verificação da adequação do compensador de fluxo disperso:

- NBR5161, IEC 404-2: ao excitar o enrolamento primário com uma corrente alternada sem amostra no quadro de Epstein, a tensão nos enrolamentos secundários não deve ser superior a 0,1% da tensão deste enrolamento sem o indutor de compensação.
- ASTM A 343: passa-se uma corrente alternada de 2 à 5 A através do enrolamento primário do quadro sem amostras, mas com o compensador de fluxo disperso conectado na polaridade certa. Observa-se a tensão alternada de circuito aberto nos terminais secundários com um voltímetro. Quando esta tensão for inferior ou igual à 1mV ou 2mV, significa que o compensador de fluxo disperso está adequado.
- JIS C 2550: a indicação do voltímetro de valor médio (conectado no enrolamento secundário de Epstein e no compensador) deve ser nula quando não existir amostra no quadro de Epstein.

e) Redução da relutância nos cantos do quadro:

- NBR5161, JIS C 2550 e IEC 404-2: recomendam aplicar uma força de 1N nos cantos do quadro.
- ASTM A 343: recomenda utilizar pesos de material não magnético (de 200g) nos cantos do quadro. Quando as lâminas forem planas e existir área de contacto nos cantos, não é necessário exercer pressão nas juntas.

- f) Quando metade das lâminas for cortada na direção da laminação e o restante perpendicularmente a esta direção, inserem-se as lâminas paralelas à direção de laminação em dois braços paralelos do teste de Epstein e as lâminas perpendiculares nos demais braços. As lâminas devem ser sobrepostas nos cantos. Cada braço do quadro de Epstein deve apresentar comprimentos iguais, mesmo número de lâminas, mesma massa e mesma seção magneticamente efetiva.
- g) Isolação adicional entre lâminas:
- NBR5161, JIS C 2550 e IEC 404-2: não se deve inserir isolação adicional entre as lâminas.
- h) Desmagnetização da amostra: aplica-se uma tensão de fonte suficiente para magnetizar a amostra para uma indução acima do joelho da curva de magnetização. Aumenta-se a tensão da fonte até o voltímetro de valor médio indicar o valor da tensão calculada para obter a desejada indução magnética de teste. Faz-se decrescer a tensão vagarosamente para uma indução magnética muito baixa. Este valor deve ser o mínimo possível.
- i) Testam-se imediatamente os pontos de teste desejados. Quando múltiplos pontos forem necessários, desenvolve-se o teste aumentando os valores de indução magnética.
- j) Medição da perda total e cálculo da perda específica:
- NBR5161: $P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1,11\bar{U}_2)^2}{R_i + R_t}$ e $P_s = \frac{P_c}{m_a}$
 - ASTM A 343: $P_s = \frac{P_m - U_2^2/R_i}{m_a}$
 - JIS C 2550: $P_c = P_m - \frac{U_2^2}{R_i}$ e $P_s = \frac{P_c}{m_a}$
 - IEC 404-2: $P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1,11\bar{U}_2)^2}{R_i}$ e $P_s = \frac{P_c}{m_a}$
- k) Anota-se o fator de forma: $F = \frac{U_2}{U_2}$

l) Correção da perda magnética:

- NBR5161: o fator de forma deve ser mantido na faixa $1,11 \pm 1\%$, através de sistemas eletrônicos com realimentação. Caso não seja possível, corrige-se a perda magnética para desvios do fator de forma entre 1 e 10%. A perda corrigida é dada por:

$$P_C = \frac{P_t}{k_h + k_p \left(\frac{F}{1,11}\right)^2} \quad \text{onde} \quad P_t = \frac{N_1}{N_2} P'_m - \frac{(1,11 \bar{U}_2)^2}{R_i + R_t}$$

k_h e k_p são obtidos pelo método de separação das perdas.

F é o fator de forma medido.

- ASTM A 343: sugere correção da perda magnética quando o erro percentual do fator de forma for maior que $\pm 1\%$ e menor ou igual a 10%. A perda corrigida é dada por: $P_{scorrigida} = \frac{P_{observada}}{h + (k.e)} 100$ onde

$$k = \left(\frac{U_2}{\bar{U}_2}\right)^2$$

h e e devem ser obtidos através de um método de separação de perdas.

- JIS C 2550: A correção da perda magnética não é realizada desde que o fator de forma da tensão secundária seja mantido na faixa de $1,11 \pm 1\%$.
- Sugestão: realizar o ensaio em regime de fluxo magnético senoidal evitando a correção da perda magnética.

m) Separação das Perdas:

- NBR5161: A perda total é separada em duas parcelas, devido a correntes de Foucault e devido à histerese do material.

$$P_c = A_p B_m^2 f^2 + A_h B_m^x f$$

Realiza-se o ensaio de Epstein para várias frequências, situadas entre a metade e o dobro da frequência na qual deseja-se obter a perda corrigida e a curva P_c/f em função da frequência (Fig. NBR 5).

$$\frac{P_c}{f} = A_p B_m^2 f + A_h B_m^x$$

Para levantar esta curva mantém-se constante a amplitude da indução magnética e o fator de forma. Para este caso, o desvio do fator de forma não deve ser superior a 1% de 1,11. Obtidos os termos $A_p B_m^2$ e $A_h B_m^x$ multiplica-se por f^2 e f obtendo-se:

$$P_p = A_p B_m^2 f^2 \quad P_h = A_h B_m^x f$$

$$k_p = \frac{P_p}{P_c} \quad \text{e} \quad k_h = \frac{P_h}{P_c}$$

- Sugestão: utilizar a estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese, desenvolvida neste trabalho, para separar as perdas.

7) Procedimento para o ensaio da permeabilidade magnética:

- NBR5161, ASTM A 343 e JIS C 2550: o limite $1,11 \pm 1\%$ para o fator de forma pode ser transposto.
- Sugestão: manter o fator de forma na faixa $1,11 \pm 1\%$ (garantindo fluxo senoidal) porque as equações utilizadas para obter a amplitude da indução magnética e amplitude do campo magnético (no método do indutor mútuo) são válidas somente para sinal senoidal.

a) NBR5161: A permeabilidade magnética pode ser obtida de duas maneiras:

- através de valores da amplitude da indução magnética e de valores eficazes do campo magnético: quando o campo magnético for especificado a corrente primária deve ser ajustada até que se obtenha o campo magnético especificado. A amplitude da indução magnética

$$B_m = \frac{\bar{U}_2}{4fN_2S} \text{ é obtida. } \bar{U}_2 \text{ é obtido corrigindo-se o valor da leitura}$$

do voltímetro pelo fator: $\frac{R_v + R_2}{R_v}$. Quando a indução magnética for

especificada, ajusta-se a tensão secundária para o valor correspondente à indução magnética especificada e o campo

magnético $H = \frac{N_1 I_1}{l_m}$ é determinado. Após determinar-se vários

valores de amplitude de indução magnética e campo magnético eficaz, uma curva de magnetização pode ser traçada.

- através da amplitude da indução magnética e da amplitude do campo magnético: a amplitude do campo magnético pode ser obtida pelo método do resistor calibrado ou pelo método do indutor mútuo. Para o método do resistor calibrado tem-se que $H_m = \frac{N_1 U_m}{R_n l_m}$. Para o método do indutor mútuo tem-se que $H_m = \frac{N_1}{4 f L l_m} \cdot \frac{R_v + R_m}{R_v} \cdot \bar{U}_m$.

Após obter várias amplitudes de indução magnética e de campo magnético, uma curva de magnetização pode ser traçada.

b) ASTM A 343: a amplitude da indução magnética é obtida da relação

$$U_2 = \sqrt{2} \pi B_m S N_2 f . \text{ A amplitude do campo magnético } H_m = \frac{N_1 I_m}{l_m} \text{ deve ser}$$

calculada.

- Método do resistor calibrado: ajusta-se a tensão para o valor correto segundo a desejada indução magnética ou ajusta-se a amplitude da corrente para o valor correto segundo o desejado campo magnetizante. A amplitude da corrente $I_m = U_m / (2 R_n)$ é obtida.
- Método do indutor mútuo: segue-se também o procedimento do método do resistor calibrado. A amplitude da corrente de excitação $I_m = U_2 / (\sqrt{2} \pi f L)$ é calculada.

c) JIS C 2550: A curva de magnetização alternada é obtida tomando-se uma série de medidas da amplitude da indução magnética e amplitude do campo magnético correspondente. A amplitude da permeabilidade magnética é $B_m / (\mu_0 H_m)$.

- Método do resistor calibrado: desmagnetiza-se a amostra. Ajusta-se a fonte de tensão até que a leitura do voltímetro de pico for a

correspondente ao campo magnético $H_m = \frac{N_1 I_m}{l_m} = \frac{N_1 U_m}{R_n l_m}$.

Obtém-se a leitura do voltímetro de valor médio e calcula-se o valor da amplitude da indução magnética $U_2 = 4,44 f S B_m N_2$.

- Método do indutor mútuo: desmagnetiza-se a amostra. Ajusta-se a fonte de tensão até que a leitura do voltímetro de valor médio for a

correspondente ao campo magnético $H_m = \frac{N_1 I_m}{l_m} = \frac{N_1 U_2}{4,17 f L}$.

Anota-se a leitura do voltímetro de valor médio. Calcula-se o valor da amplitude da indução magnética $U_2 = 4,44 f S B_m N_2$.

- d) IEC 404-2: a amplitude da indução magnética deve ser determinada

utilizando-se a equação $\bar{U}_2 = 4 f N_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} S B_m$.

- Método do resistor calibrado: a amplitude do campo magnético é

$$H_m = \frac{N_1 I_m}{l_m} \quad \text{onde} \quad I_m = \frac{U_m}{R_n}$$

- Método do indutor mútuo: observa-se no osciloscópio que na forma de onda da tensão do enrolamento secundário do indutor mútuo não existe mais que dois zeros por ciclo. A amplitude do campo

magnético é $H_m = \frac{N_1}{4 f L l_m} \cdot \frac{R_v + R_m}{R_v} \cdot \bar{U}_m$

- 8) Relatório de teste: deve conter tipo e identificação da amostra de teste, densidade do material, comprimento das lâminas, número de lâminas, espessura da amostra, direção de estampagem, massa, temperatura ambiente durante o ensaio, frequência, valores de indução magnética, resultado das medidas, método de separação das perdas utilizado (se pertinente) e a norma técnica utilizada (se pertinente).

1.3 Conclusão

Como pode-se observar, as normas apresentam basicamente a mesma finalidade. Entretanto, diferem em alguns itens. Cada norma técnica aprofundou mais um item em relação à outra. Algumas apresentam lacunas dificultando a compreensão e prejudicando a clareza característica de normas técnicas.

Quanto à abrangência de assunto, a norma brasileira apresenta-se mais completa, fornecendo em uma mesma documentação informações relacionadas ao ensaio em questão. As demais normas técnicas não incluíram em documentação única todas as informações necessárias para o ensaio.

Classificando as normas técnicas, segundo maior abrangência de informações relacionadas ao ensaio, tem-se o seguinte perfil: a norma brasileira apresenta apenas uma lacuna, correspondente ao relatório de teste. Na seqüência, estão as normas americana e japonesa, ambas com quatro lacunas. A norma americana apresenta lacunas relacionadas ao procedimento de medida da espessura; procedimento de medida da densidade do material; procedimento de separação da perda magnética e relatório de teste. A norma japonesa apresenta as seguintes lacunas: procedimento de medida da densidade do material; modelo da perda magnética; procedimento de separação da perda magnética e relatório de teste. A norma da comissão eletrotécnica internacional apresenta maior número de lacunas (5), correspondentes ao procedimento de medida da espessura; procedimento de medida da densidade do material; modelo da perda magnética; procedimento de separação da perda magnética e correção da perda magnética.

No próximo capítulo, apresentar-se-á uma caracterização de um material utilizando os procedimentos normativos, com medições através da instrumentação padrão. Simultaneamente, utiliza-se um osciloscópio e seu sistema de medição de corrente assessorados por um programa numérico, baseado no ambiente Labview da National Instruments [4], efetuando as mesmas medidas.

2. MEDIÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS CONFORME AS NORMAS DO TESTE DE EPSTEIN

Nesta parte do trabalho apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos através de ensaios realizados. Foram desenvolvidos os testes segundo as normas brasileira, americana, japonesa e a norma da comissão electrotécnica internacional, utilizando-se instrumentação padrão em conformidade com a norma brasileira. Utilizou-se uma bancada de ensaios, para a determinação das perdas, que mantém a tensão no secundário na forma senoidal conforme solicitação da norma. Esta bancada [4, 14] tem como característica a imposição da tensão no secundário através de uma malha de realimentação. A alimentação do quadro de Epstein é realizada por um inversor de onda senoidal variável em amplitude e frequência, possível também de operar com um conteúdo harmônico ou com formas de onda pulsadas. Para medir as grandezas elétricas e gerar os sinais de referência, utiliza-se o software LabView da National Instruments residente em um microcomputador comunicável com um osciloscópio 2430A da Tektronix. Mede-se simultaneamente tensão e corrente nos dois canais do osciloscópio. O sinal de referência é gerado por uma placa PCI-6110E da National Instruments. A determinação das perdas nas lâminas e das demais grandezas é realizada por cálculo numérico no ambiente do software LabView em função da corrente e tensão medidas, válida para formas de ondas com conteúdo harmônico. Este sistema será chamado Sistema Digital de Caracterização Magnética de Materiais (SDCMM). Os resultados obtidos através deste sistema baseiam-se nos procedimentos de cálculo conforme a norma NBR5161.

Foi testado no quadro de Epstein um material (de grão não orientado) de identificação CPGXH14, de espessura 0,5mm fornecido pela Acesita (Companhia Aços Especiais Itabira). Foram utilizadas 13 lâminas por braço. O material foi inserido no quadro com 50% das lâminas na direção longitudinal e 50% das lâminas na direção transversal. A massa total compreende 1,650 kg. Este material não possui uma classificação pois serviu anteriormente para testes com outros objetivos. No momento do ensaio, esta amostra era a mais adequada que havia para realizar os testes.

2.1 Ensaio da Perda Total

A temperatura ambiente durante o ensaio foi de 26°C. Foram utilizadas lâminas de 0,28m de comprimento. A densidade de massa do material é de 7694,83 kg/m³. Este valor foi obtido utilizando-se o método do empuxo (apêndice 1).

2.1.1 Normas Técnicas

Segundo a norma brasileira NBR5161 os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 21: Dados do ensaio segundo a norma brasileira NBR5161

Ensaio NBR 5161													
f (Hz)	B _m (T)	S (m ²)	U ₂ (V)	U _{2m} (V)	F	P _m (W)	P _c (W)	R _i (Ω)	R _t (Ω)	P _s (W/kg)	m _a (kg)	W (J/kg)	
50	1,599	0,00019	45,7	42,973	1,06	6,25	6,25	36290323	5,38	4,50	1,39	0,0900	
50	1,492		42,7	40,0901	1,07	5,00	5,00	36290323		3,60		0,0720	
50	1,391		39,7	37,3874	1,06	4,05	4,05	36290323		2,92		0,0583	
50	1,290		37,0	34,6847	1,07	3,43	3,42	36290323		2,47		0,0493	
50	1,207		34,7	32,4	1,07	2,95	2,95	36290323		2,12		0,0425	
50	1,123		32,2	30,1802	1,07	2,53	2,52	36290323		1,82		0,0364	
50	1,032		29,8	27,7477	1,07	2,20	2,20	36290323		1,58		0,0317	
50	0,955		27,5	25,6757	1,07	1,88	1,87	36290323		1,35		0,0270	
50	0,721		21,5	19,3694	1,11	1,13	1,12	36290323		0,81		0,0162	
50	0,603		17,1	16,2	1,05	0,88	0,87	16071429		0,63		0,0126	
50	0,486		14,0	13,0631	1,07	0,50	0,50	16071429		0,36		0,0072	
50	0,379		10,8	10,1802	1,06	0,38	0,37	16071429		0,27		0,0054	
50	0,268		7,4	7,2	1,03	0,13	0,12	8333333		0,09		0,0018	

Na tabela 21 pode-se observar que a resistência R_t apresenta valor desprezível comparando-se com a ordem de grandeza da resistência R_i . Desta forma a resistência R_t pode ser desconsiderada no cálculo da perda (item 1.1.13), como o fazem as normas americana, japonesa e a norma da comissão eletrotécnica internacional. Convém chamar a atenção que o fator de forma F é menor que 1,11, fato que demonstra a existência de erro, pois a tensão eficaz é superior a tensão média retificada. Uma hipótese poderia ser a regulação dos voltímetros utilizados, mas provavelmente esta se deve às leituras que foram realizadas no início da escala. Nos ensaios teve-se a dificuldade de se adequar as escalas da instrumentação padrão com a capacidade da fonte de tensão senoidal utilizada (tensão de pico máxima em torno de 60V).

Os cálculos conforme as normas americana, japonesa e a norma da comissão eletrotécnica internacional tiveram os resultados apresentados na tabela 22. Os valores medidos são os mesmos da tabela 21.

Tabela 22: Dados do ensaio segundo as normas americana, japonesa e norma da comissão eletrotécnica internacional.

ASTM	ASTM e JIS	ASTM e JIS	JIS	IEC	IEC	IEC	IEC
B_m (T)	P_s (W/kg)	W (J/kg)	B_m (T)	B_m (T)	P_c (W)	P_s (W/kg)	W (J/kg)
1,599	4,501	0,090	1,599	1,599	6,250	4,501	0,090
1,492	3,601	0,072	1,492	1,492	5,000	3,601	0,072
1,391	2,916	0,058	1,391	1,391	4,050	2,916	0,058
1,290	2,466	0,049	1,290	1,290	3,425	2,466	0,049
1,207	2,124	0,042	1,207	1,207	2,950	2,124	0,042
1,123	1,818	0,036	1,123	1,123	2,525	1,818	0,036
1,032	1,584	0,032	1,032	1,032	2,200	1,584	0,032
0,955	1,350	0,027	0,955	0,955	1,875	1,350	0,027
0,721	0,810	0,016	0,721	0,721	1,125	0,810	0,016
0,603	0,630	0,013	0,603	0,603	0,875	0,630	0,013
0,486	0,360	0,007	0,486	0,486	0,500	0,360	0,007
0,379	0,270	0,005	0,379	0,379	0,375	0,270	0,005
0,268	0,090	0,002	0,268	0,268	0,125	0,090	0,002

A Fig.2 ilustra a diferença do valor da indução magnética das diferentes normas técnicas tendo como referência os valores de indução magnética obtidos segundo a norma brasileira. Assim, $\Delta B_m = \frac{B_{mNBR} - B_{mnorma}}{B_{mNBR}}$.

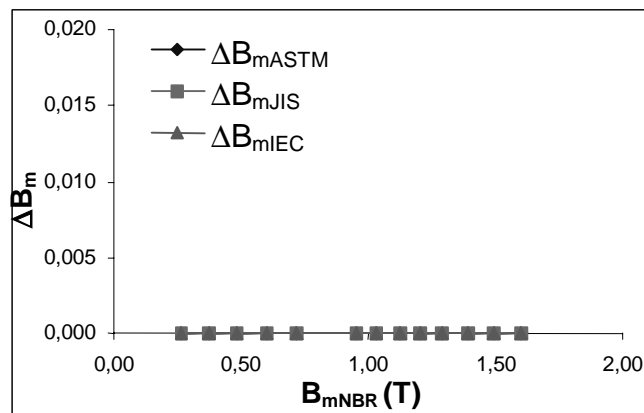


Fig.2: Indução magnética.

Na Fig.2 observa-se que as normas americana, japonesa e norma da comissão eletrotécnica internacional apresentam valores de indução magnética próximos dos

valores de indução magnética obtidos segundo a norma brasileira (diferença praticamente nula).

2.1.2 Medidas Realizadas através do SDCMM

Utilizando-se o SDCMM [4, 14] os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 23: Dados do ensaio utilizando-se o SDCMM

Osciloscópio									
f (Hz)	B _m (T)	S (m ²)	F	U ₂ (V)	U _{2m} (V)	H _m (A/m)	P _{tot} (W)	W (J/kg)	m _a (kg)
50	1,632	0,00019	1,1117	48,21	43,36	3276,6	7,50	0,1080	1,39
50	1,502		1,1103	44,90	40,44	968,1	5,60	0,0807	
50	1,399		1,1100	41,80	37,66	268,1	4,35	0,0627	
50	1,305		1,1107	38,97	35,09	147,4	3,65	0,0526	
50	1,219		1,1100	36,36	32,76	107,2	3,13	0,0451	
50	1,131		1,1113	33,89	30,49	90,9	2,74	0,0395	
50	1,041		1,1110	31,17	28,06	84,9	2,35	0,0338	
50	0,954		1,1111	28,48	25,63	78,2	2,01	0,0289	
50	0,840		1,1101	25,08	22,60	68,5	1,58	0,0228	
50	0,726		1,1100	21,77	19,52	63,4	1,23	0,0177	
50	0,612		1,1108	18,27	16,45	56,9	0,94	0,0136	
50	0,498		1,1108	14,88	13,39	54,2	0,66	0,0096	
50	0,394		1,1106	11,25	10,13	44,4	0,41	0,0059	
50	0,281		1,1124	7,93	7,13	38,7	0,23	0,0033	
50	0,110		1,1079	3,36	3,03	28,7	0,05	0,0007	

Na tabela 23, os valores obtidos do fator de forma confirmam que a forma de onda da indução magnética foi mantida senoidal no ensaio. Entretanto, os valores do fator de forma apresentados na tabela 21 indicam que a forma de onda da indução magnética não seria senoidal (com exceção da medida cujo fator de forma foi igual a 1,11). O controle da forma de onda da indução magnética pelo fator de forma pode ser comprometido pela instrumentação utilizada, como mostra a tabela 21. A norma brasileira exige que este controle seja realizado também através do monitoramento da imagem da tensão secundária em um osciloscópio, mas não solicita uma análise harmônica da forma de onda. Neste caso do ensaio não houve a necessidade de realizar a correção da perda magnética porque pela tabela 23 e visualmente pela Fig.3, a tensão secundária foi mantida na forma de onda senoidal.

As medições com a instrumentação padrão geralmente foram realizadas no início das escalas por força das condições da fonte de alimentação do quadro de Epstein.

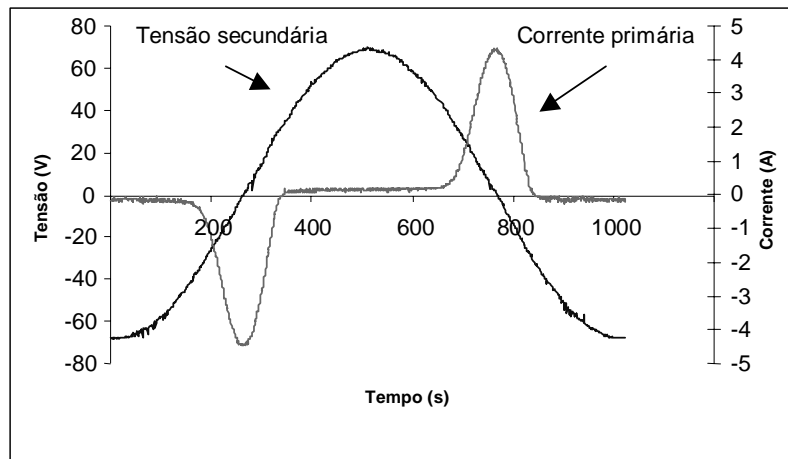


Fig.3: Corrente primária e tensão secundária à 50 Hz e 1,632 T.

A Fig.4 mostra a diferença da indução magnética das diferentes normas técnicas tendo como referência os valores de indução magnética obtidos através do SDCMM (pois estas medidas com o osciloscópio forneceram um fator de forma praticamente de 1,11).

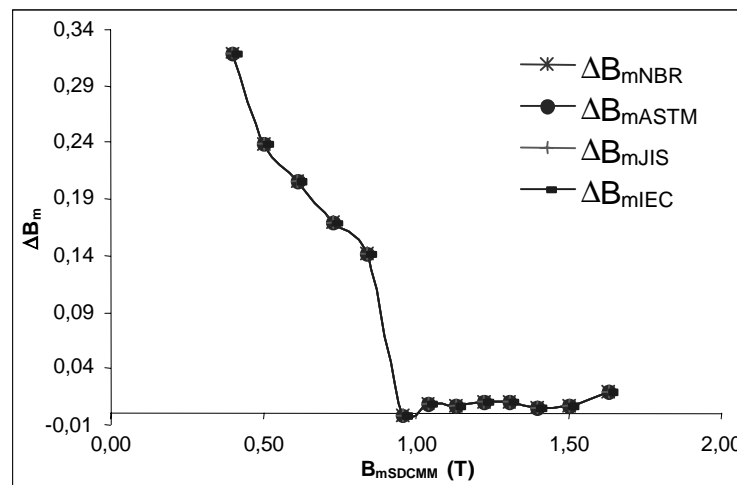


Fig.4: Indução magnética.

Na Fig.4 observa-se que a indução magnética obtida através da norma da comissão eletrotécnica internacional e das normas brasileira, americana e japonesa é maior que a indução magnética obtida através do SDCMM somente em 1T.

Em termos de perdas obtidas conforme as normas, a Fig.5 apresenta as várias curvas em função da indução máxima no material. Apresenta-se também uma medição obtida através do SDCMM e baseada na norma NBR5161.

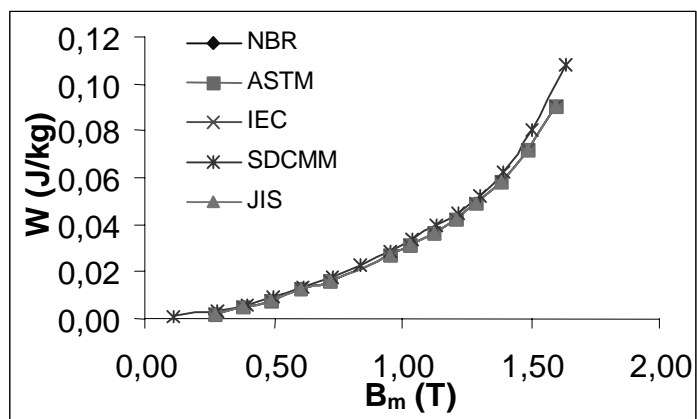


Fig.5: Ensaio à 50Hz. Perda total por unidade de massa em função da amplitude da indução magnética.

Na Fig.5 verifica-se que as normas brasileira, americana, japonesa e a norma da comissão eletrotécnica internacional apresentam praticamente o mesmo resultado. Este comportamento é esperado porque estas normas possuem formulações idênticas para o cálculo das grandezas envolvidas. A norma brasileira e a norma da comissão eletrotécnica internacional apresentam resultados semelhantes aos resultados das demais normas porque a soma da resistência equivalente à dos equipamentos do enrolamento secundário do quadro de Epstein e resistência em série do enrolamento secundário do quadro de Epstein e do indutor de compensação é aproximadamente igual a resistência equivalente à dos equipamentos do enrolamento secundário do quadro de Epstein. A curva obtida pela leitura do SDCMM difere da curva obtida segundo as normas técnicas utilizando a sua instrumentação padrão.

Observando ainda a Fig.5, verifica-se que duas curvas diferentes modelam o comportamento do mesmo material. As medidas obtidas através da instrumentação padrão apresentaram-se menos confiáveis que as medidas obtidas através do SDCMM. O fator de forma lido na instrumentação padrão não apresentou coerência com os valores obtidos com o SDCMM. Estes valores do fator de forma afetam diretamente a decisão da necessidade da correção das perdas. No item 1.1.7.1 a norma brasileira apresenta dois limites admissíveis de variação do fator de forma (limite de leitura da perda e limite no qual a correção da perda é possível). Existe um conflito no estabelecimento dos limites acima quando se dispõe de um valor de fator de forma

obtido com instrumentação inadequada. O valor do fator de forma afeta também a separação das perdas (no item 1.1.5 a norma brasileira estabelece o limite de variação do fator de forma que possibilita a separação das perdas). A imagem no osciloscópio da forma de onda da tensão induzida sempre esteve coerente com o fator de forma lido através do SDCMM. Então, pode-se afirmar que a instrumentação padrão utilizada não apresentou-se adequada para o cálculo do fator de forma e demais medidas neste ensaio.

2.2 Separação das Perdas no Núcleo

Neste ensaio houve a necessidade de alterar o número de lâminas, de treze lâminas por braço (correspondente às frequências de 50, 60 e 80 Hz nas tabelas 24 e 26, com exceção das duas últimas colunas e três últimas colunas respectivamente) para, quatro lâminas por braço. Este fato foi necessário para adequar o ensaio à capacidade da fonte de alimentação. No segundo caso, a massa total foi de 0,51 kg e a seção magnética foi de $5,91 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. A temperatura ambiente durante o ensaio foi de 24°C. A amplitude da indução magnética, obtida pela equação NBR(1.9), foi mantida em aproximadamente 1T.

A alteração da quantidade de lâminas pode influenciar as medidas visto que o circuito magnético pode apresentar variações de suas características originais. Para diminuir esta influência o equilíbrio da massa nos braços do quadro de Epstein deveria ser novamente realizado.

2.2.1 Norma Brasileira NBR 5161

Segundo a norma brasileira os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 24: Dados do ensaio segundo a norma NBR 5161.

B_m (T)	f (Hz)	U_{2m} (V)	U_2 (V)	P_m (W)	F	P_c (W)	R_i (Ω)	R_1 (Ω)	P_s (W/kg)	m_a (kg)	P_c/f	P_c (W)	P_c/f
1,0213	40	6,75676	7,1	0,375	1,0508	0,3750	8333333	5,38	0,8776	0,4273	0,0094	0,3750	0,0094
0,9888	50	26,5766	28,5	1,8	1,0724	1,8000	36290323		1,2962	1,3886	0,0360	0,5538	0,0111
0,9916	60	31,982	34,5	2,3	1,0787	2,3000	36290323		1,6563	1,3886	0,0383	0,7077	0,0118
0,9726	70	11,2613	11,5	0,875	1,0212	0,8750	8333333		2,0478	0,4273	0,0125	0,8750	0,0125
0,9951	80	42,7928	45,5	3,5	1,0633	3,4999	36290323		2,5204	1,3886	0,0437	1,0769	0,0135
1,0288	90	15,3153	16,2	1,3	1,0578	1,3000	16071429		3,0425	0,4273	0,0144	1,3000	0,0144
1,0077	100	16,6667	17,2	1,5	1,0320	1,5000	16071429		3,5106	0,4273	0,0150	1,5000	0,0150
1,0022	125	20,7207	21,2	2,125	1,0231	2,1250	16071429		4,9733	0,4273	0,0170	2,1250	0,0170
0,9986	150	24,7748	25,2	2,875	1,0172	2,8750	16071429		6,7286	0,4273	0,0192	2,8750	0,0192

A perda total por ciclo em função da frequência apresenta o seguinte comportamento:

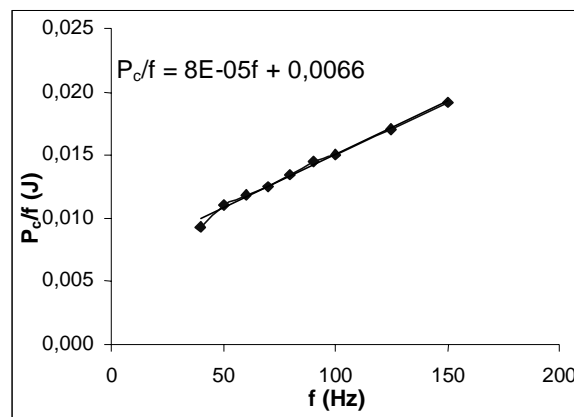


Fig.6: Ensaio à 1 T. Perda total por ciclo em função da frequência.

A Fig.6 foi construída considerando-se P_c/f correspondente a última coluna da tabela 24. Nesta figura verifica-se que o comportamento da perda total por ciclo em função da frequência, não é linear. A extrapolação desta curva para frequência nula foi realizada através da equação linear da tendência como sugere a norma brasileira. Com estes resultados obteve-se os dados da seguinte tabela:

Tabela 25: Separação das perdas segundo a norma NBR5161.

B_m (T)	f (Hz)	$A_h B_m^x$	$A_p B_m^z$	P_p	P_h	K_h	K_p	soma K_h e K_p
1,0213	40	0,0066	0,00008	0,128	0,264	0,7040	0,3413	1,0454
0,9888	50			0,200	0,330	0,5958	0,3611	0,9570
0,9916	60			0,288	0,396	0,5596	0,4070	0,9665
0,9726	70			0,392	0,462	0,5280	0,4480	0,9760
0,9951	80			0,512	0,528	0,4903	0,4754	0,9657
1,0288	90			0,648	0,594	0,4569	0,4985	0,9554
1,0077	100			0,800	0,660	0,4400	0,5333	0,9733
1,0022	125			1,250	0,825	0,3882	0,5882	0,9765
0,9986	150			1,800	0,990	0,3444	0,6261	0,9705

O coeficiente da perda por histerese é 0,0066 [J] obtido pela extrapolação da reta para frequência nula (Fig.6). O coeficiente da perda por correntes de Foucault é 0,00008 [J] obtido através da tangente do ângulo da reta apresentada na Fig.6.

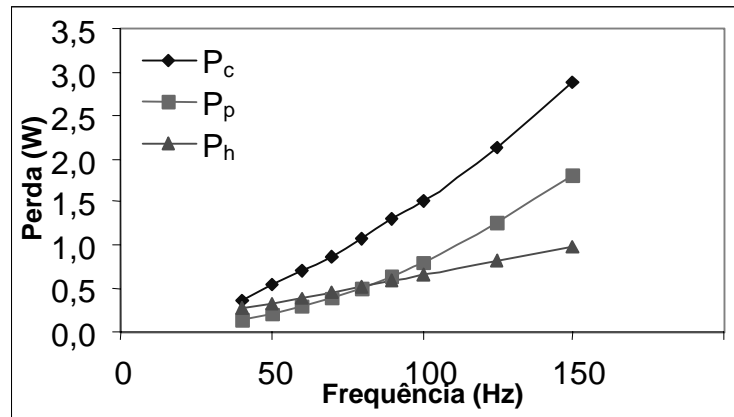


Fig.7: Ensaio à 1 T. Separação das perdas.

A Fig.7 apresenta a separação das perdas segundo a norma brasileira. Até aproximadamente 80Hz a perda por histerese é maior que a perda por correntes de Foucault. Acima deste valor este comportamento é invertido.

2.2.2 Medição Utilizando o SDCMM

Utilizando-se o SDCMM foram obtidos os seguintes dados:

Tabela 26: Dados obtidos através da leitura do SDCMM.

B _m (T)	f (Hz)	H _m (A/m)	P' (W)	U _{2m} (V)	U ₂ (V)	F	P _s (W/kg)	m _a (kg)	P (W)	W (J/kg)	P/f
1,015	40	71,5	0,469	6,84	7,59	1,1100	1,0977	0,4273	0,4690	0,0274	0,0117
1,006	50	84,9	2,010	26,99	29,99	1,1110	1,4475	1,3886	0,6185	0,0289	0,0124
1,010	60	85,6	2,510	32,59	36,17	1,1097	1,8075	1,3886	0,7723	0,0301	0,0129
0,961	70	80,4	0,940	11,14	12,37	1,1102	2,2000	0,4273	0,9400	0,0314	0,0134
1,014	80	104,3	4,000	33,60	48,38	1,1095	2,8805	1,3886	1,2308	0,0360	0,0154
1,050	90	96,8	1,450	15,62	17,34	1,1102	3,3936	0,4273	1,4500	0,0377	0,0161
1,008	100	99,0	1,700	16,68	18,51	1,1099	3,9787	0,4273	1,7000	0,0398	0,0170
0,998	125	108,7	2,330	20,64	22,99	1,1102	5,4532	0,4273	2,3300	0,0436	0,0186
0,981	150	120,6	3,040	24,33	27,03	1,1112	7,1149	0,4273	3,0400	0,0474	0,0203

A perda total e a perda total por ciclo, em função da frequência, apresentam o comportamento mostrado na Fig. 8.

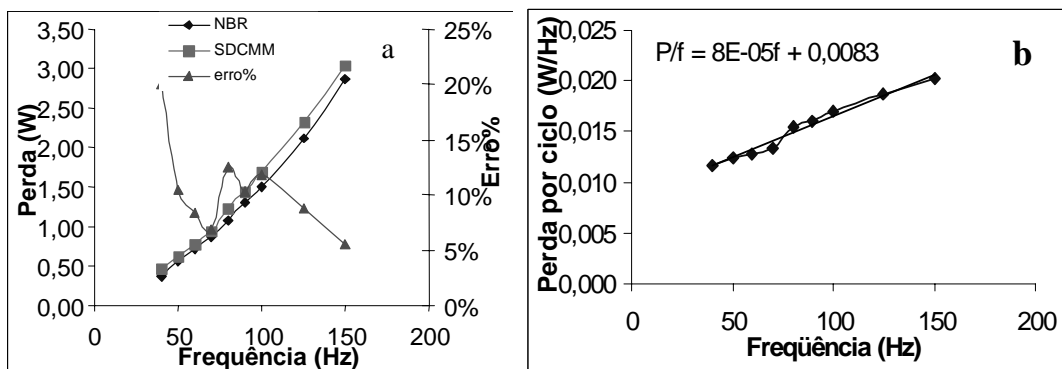


Fig.8: Ensaio à 1 T: a) Perda total; b) Perda total por ciclo em função da freqüência.

A Fig.8a ilustra o erro entre a perda magnética obtida segundo a norma brasileira utilizando a instrumentação padrão (item 2.2.1) e segundo as medições através do osciloscópio e seu sistema. As medidas segundo o SDCMM são mais confiáveis que as medições realizadas através da instrumentação padrão pelo motivo apresentado no item 2.1.2.

Com os resultados apresentados na Fig.8b construiu-se a seguinte tabela:

Tabela 27: Separação das perdas através da leitura do SDCMM.

B_m (T)	f (Hz)	$A_h B_m^x$	$A_p B_m^2$	P_p	P_h	k_h	k_p	soma k_h e k_p
1,015	40	0,0083	0,00008	0,128	0,332	0,7079	0,2729	0,9808
1,006	50			0,200	0,415	0,6710	0,3234	0,9944
1,010	60			0,288	0,498	0,6448	0,3729	1,0177
0,961	70			0,392	0,581	0,6181	0,4170	1,0351
1,014	80			0,512	0,664	0,5395	0,4160	0,9555
1,050	90			0,648	0,747	0,5152	0,4469	0,9621
1,008	100			0,800	0,830	0,4882	0,4706	0,9588
0,998	125			1,250	1,038	0,4453	0,5365	0,9818
0,981	150			1,800	1,245	0,4095	0,5921	1,0016

O coeficiente da perda por histerese é 0,0083 [J] obtido pela extrapolação da reta para freqüência nula (Fig.8). O coeficiente da perda por correntes de Foucault é 0,00008 [J] obtido através da tangente do ângulo da reta apresentada na Fig.8.

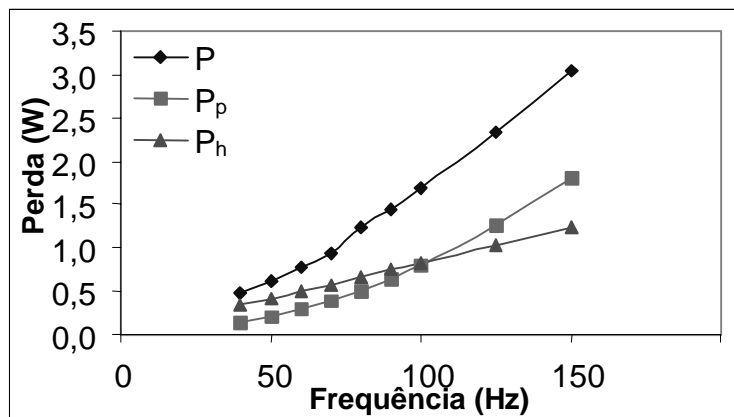


Fig.9: Ensaio à 1T, variando a frequência.

A Fig.9 apresenta a separação das perdas segundo os dados obtidos através do SDCMM. Até 100Hz a perda por histerese é maior que a perda por correntes de Foucault. Acima deste valor este comportamento é invertido.

Este ensaio deve ser realizado mantendo-se a forma de onda da indução magnética senoidal. Visualmente, como sugere a norma brasileira, estima-se pela Fig.10 que a forma de onda da tensão secundária é senoidal.

Entretanto, o fator de forma nas medições foi de 1,11 com aproximadamente 0,04% de variação máxima. Este fato comprova que a forma de onda da indução foi mantida senoidal.

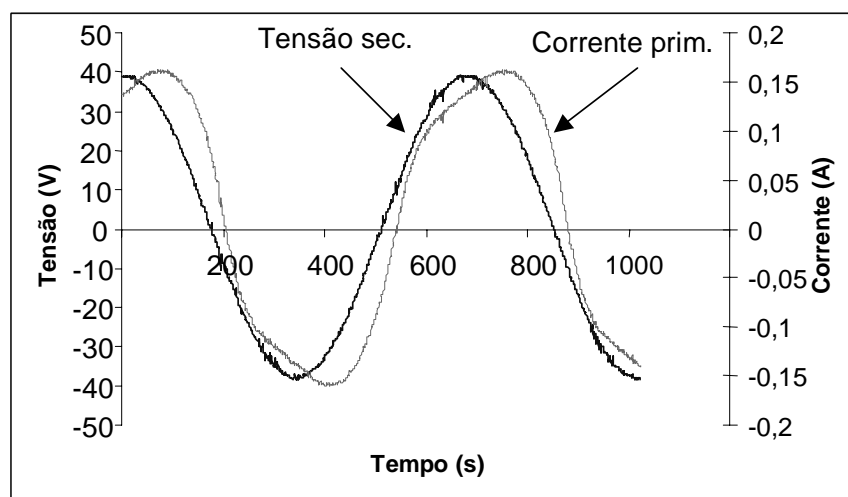


Fig.10: Tensão secundária e corrente primária à 1T e 150 Hz, e fator de forma de 1,1112.

2.3 Alimentação do Quadro de Epstein sem Imposição da Forma Senoidal no Secundário

Neste ensaio alimentou-se o enrolamento primário do quadro de Epstein com sinal de tensão senoidal. A tensão secundária não foi controlada de maneira a ser mantida na forma de onda senoidal para que fosse possível estudar a correção da perda quando o fluxo é não senoidal. A temperatura durante este ensaio da perda magnética foi de 24,6°C.

2.3.1 Norma Brasileira NBR5161

Segundo a norma brasileira e utilizando a instrumentação padrão os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 28: Correção das perdas segundo a norma brasileira NBR5161.

Medida	f (Hz)	B _m (T)	U _{2m} (V)	U ₂ (V)	P _m (W)	F	R _i (Ω)	R _t (Ω)	P _c (W)
7	50	5,87E-01	15,8	16,8	0,750	1,0656	16071428,57	5,38	0,75
8	50	7,07E-01	19,0	19,6	1,125	1,0311	16071428,57		1,12
9	50	7,88E-01	21,2	21,9	1,275	1,0344	16071428,57		1,27
10	50	9,12E-01	24,5	24,9	1,750	1,0161	16071428,57		1,75
11	50	1,04E+00	27,9	28,1	2,250	1,0062	16071428,57		2,25
12	50	1,11E+00	29,7	31,5	2,500	1,0595	36290322,58		2,50
13	50	1,24E+00	33,3	35,0	3,000	1,0500	36290322,58		3,00
14	50	1,29E+00	34,7	37,0	3,375	1,0668	36290322,58		3,37
15	50	1,39E+00	37,4	40,0	4,125	1,0699	36290322,58		4,12
16	50	1,42E+00	38,3	40,7	4,375	1,0630	36290322,58		4,37
17	50	1,56E+00	41,9	44,9	5,875	1,0718	36290322,58		5,87
18	50	1,61E+00	43,2	46,0	6,300	1,0638	36290322,58		6,30

Observando a tabela 28, a primeira coluna não contém todas as medidas correspondentes à tabela 29 porque nem todas as leituras foram possíveis de serem realizadas (leituras no início da escala). Estas medições foram realizadas utilizando a instrumentação padrão da norma NBR5161.

2.3.2 Leitura Realizada com o SDCMM

Utilizando-se leituras do SDCMM, os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 29: Correção das perdas utilizando leituras do SDCMM.

Medida	f (Hz)	B _m (T)	F _p	U ₂ (V)	U _{2m} (V)	H _m (A/m)	P (W)	F
1	50	0,049	1,1115	1,39	1,25	25,3	0,0114	1,1142
2	50	0,099	1,1105	2,95	2,66	31,9	0,0463	1,1101
3	50	0,201	1,1104	5,99	5,39	38,7	0,1577	1,1104
4	50	0,301	1,1094	8,98	8,09	45,6	0,3048	1,1101
5	50	0,399	1,1094	11,93	10,73	49,4	0,4817	1,1118
6	50	0,498	1,1098	14,86	13,38	56,6	0,7208	1,1107
7	50	0,605	1,1103	18,07	16,28	61,7	0,9938	1,1103
8	50	0,712	1,1099	21,26	19,15	64,9	1,2400	1,1104
9	50	0,790	1,1097	23,58	21,24	70,0	1,5000	1,1101
10	50	0,904	1,1096	27,01	24,32	78,9	1,9100	1,1105
11	50	1,027	1,1093	30,66	27,61	87,1	2,4100	1,1105
12	50	1,116	1,1109	33,29	29,98	97,6	2,7800	1,1103
13	50	1,228	1,1098	36,66	33,00	111,7	3,2100	1,1106
14	50	1,310	1,1098	39,15	35,23	150,4	3,6800	1,1112
15	50	1,407	1,1090	42,06	37,81	277,0	4,4100	1,1124
16	50	1,440	1,1104	43,10	38,71	440,9	4,7900	1,1134
17	50	1,570	1,1099	47,44	42,21	2159,6	6,9100	1,1239
18	50	1,614	1,1108	49,02	43,39	3321,3	7,7400	1,1298

Os valores do fator de forma apresentados na tabela 29 indicam que as duas últimas leituras da perda devem ser corrigidas. A correção da perda magnética não foi realizada porque apenas duas leituras necessitam de correção. A Fig.11 apresenta o comportamento da perda total medida sem correção para considerar o desvio do fator de forma.

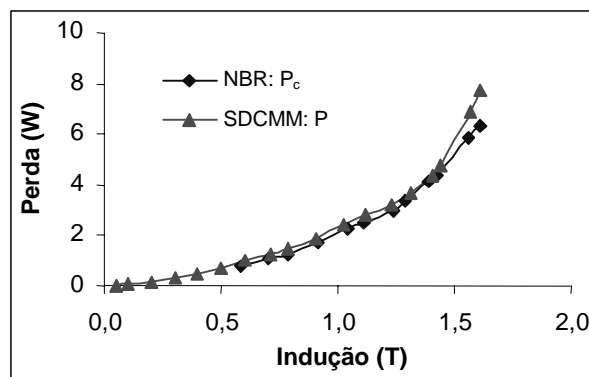


Fig.11: Perda total à 50 Hz.

A Fig.12 apresenta os sinais de tensão e corrente à 50 Hz e 1,614 T. Visualmente percebe-se que o sinal da tensão primária é senoidal que é confirmado pelo seu fator de forma de 1,11, enquanto que o sinal da tensão secundária apresenta distorções, com fator de forma de aproximadamente 1,13.

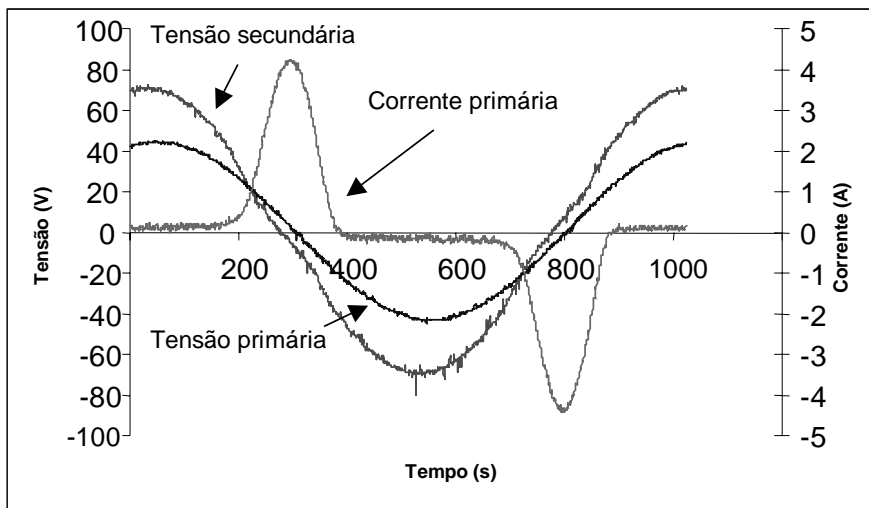


Fig.12: Sinais de tensão e corrente à 50 Hz, 1,614 T e $F=1,13$.

2.4 Ensaio da Permeabilidade Magnética

Este ensaio serve para determinar a permeabilidade magnética do material. O método utilizando o indutor mútuo foi aplicado para obter o valor desta grandeza. A amplitude da indução magnética foi imposta e o correspondente campo magnético foi lido por meio da tensão secundária no indutor mútuo. O valor da indutância mútua do indutor mútuo é de 178,4 mH e sua resistência secundária é de 662,5 Ω . A temperatura durante o ensaio foi de 27,2°.

Os seguintes resultados foram obtidos obedecendo os procedimentos das normas técnicas e utilizando a instrumentação padrão convencional para a medição.

2.4.1 Determinação da Permeabilidade Conforme as Normas Técnicas

Tabela 30: Ensaio da permeabilidade magnética segundo as normas técnicas.

f (Hz)	NBR e IEC				ASTM e JIS	
	B_m (T)	Epstein U_{2m} (V)	Indutor U_{2m} (V)	H_m (A/m)	B_m (T)	H_m (A/m)
50	1,441	38,7	21,6	455,25322	1,4404	450,9742
50	1,324	35,6	8,6	180,2044	1,3231	178,5106
50	1,207	32,4	5,4	113,81331	1,2059	112,7436
50	1,089	29,3	4,5	94,8444	1,0887	93,95296

Como os instrumentos convencionais permitiram apenas a leitura de quatro pontos experimentais, não foi possível traçar a curva B-H do material. Isto também se deve à adequação do ensaio com a capacidade da fonte de tensão disponível [4].

2.4.2 Medição Utilizando o SDCMM

Utilizando-se leituras do SDCMM, os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 31: Ensaio da permeabilidade magnética através da leitura do SDCMM.

f (Hz)	Osciloscópio				NBR e IEC			ASTM e JIS		
	B _m (T)	Epstein U _{2m} (V)	Indutor U _{2m} (V)	H _m (A/m)	B _m (T)	H _m (A/m)	μ relativo	B _m (T)	H _m (A/m)	μ relativo
50	1,445	39,28	21,43	379,8	1,462	451,219	2577,637	1,461	446,977	2600,220
50	1,326	35,68	7,78	168,3	1,328	163,811	6449,377	1,327	162,272	6505,880
50	1,214	32,66	5,12	131,1	1,215	107,804	8970,543	1,214	106,791	9049,133
50	1,084	29,40	4,07	127,3	1,094	85,696	10158,403	1,093	84,890	10247,400
50	0,972	26,00	3,49	107,2	0,967	73,484	10476,601	0,967	72,793	10568,387
50	0,713	19,18	2,69	73,7	0,714	56,639	10026,949	0,713	56,107	10114,795
50	0,654	17,60	2,56	66,3	0,655	53,902	9668,191	0,654	53,395	9752,893
50	0,537	14,46	2,32	77,4	0,538	48,849	8765,018	0,538	48,390	8841,808
50	0,414	11,13	2,08	62,6	0,414	43,795	7524,962	0,414	43,384	7590,888
50	0,295	8,01	1,82	58,7	0,298	38,321	6189,187	0,298	37,961	6243,411
50	0,180	4,88	1,48	57,2	0,182	31,162	4636,931	0,181	30,869	4677,555
50	0,058	1,57	0,86	23,2	0,058	18,108	2567,283	0,058	17,937	2589,775

2.4.3 Comparação com os Resultados Obtidos Conforme as Normas Técnicas e a Medição Através do SDCMM

O material apresenta as curvas B-H mostradas na Fig.13, obtidas conforme as normas NBR, ASTM, JIS, IEC e leitura do SDCMM. Na Fig.13 pode-se observar que as curvas traçadas segundo as normas brasileira, americana, japonesa e norma da comissão eletrotécnica internacional começam a ter uma permeabilidade que inicia a região de saturação acima de 1,2 T. Observa-se nas curvas obtidas com os valores máximos de campo e indução através da medição pelo osciloscópio que há diferença entre as três curvas. Mantendo a tensão secundária senoidal à 50 Hz, a curva neste caso é diferente daquela obtida à 50 Hz mantendo a tensão senoidal no primário do quadro. Ademais, as curvas obtidas à 50 Hz são diferentes da curva obtida à 1 Hz. A curva de magnetização do material é afetada pela frequência. Para tensão secundária

senoidal, observa-se que a curva à 1Hz é praticamente coincidente com a curva à 50 Hz apenas acima do joelho.

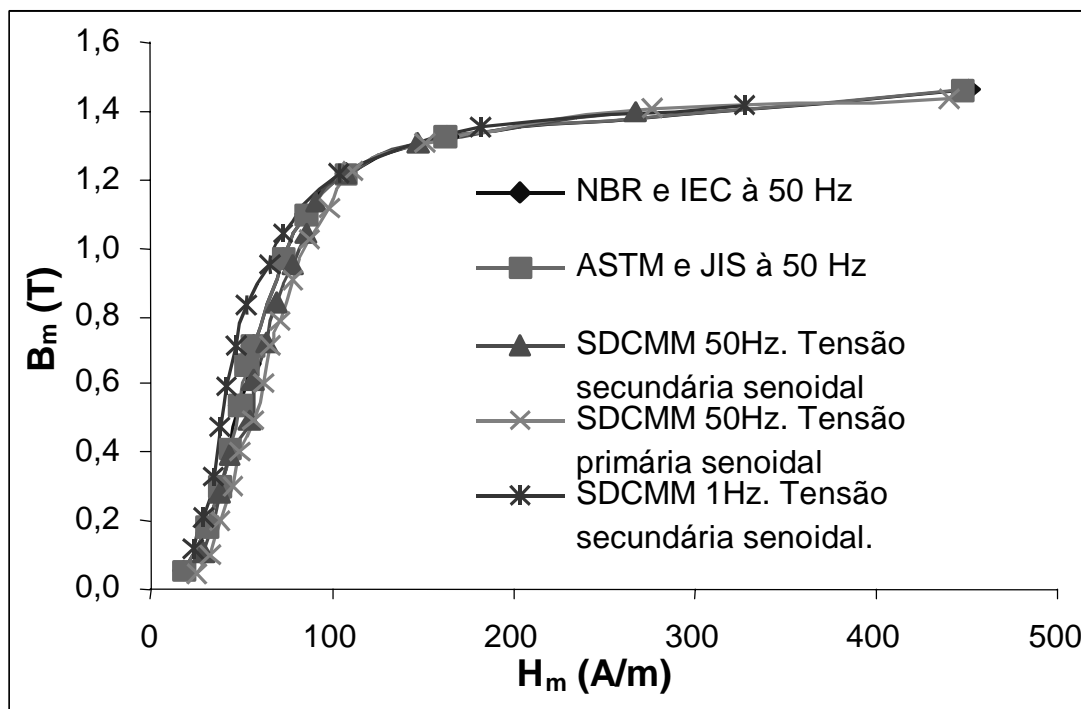


Fig.13: Curva B-H do material.

A Fig.14 apresenta os sinais de tensão e corrente à 50 Hz e 0,295 T. Pode-se observar que o sinal da tensão secundária apresenta ruídos, os quais podem estar sendo captados pelas sondas de tensão e corrente.

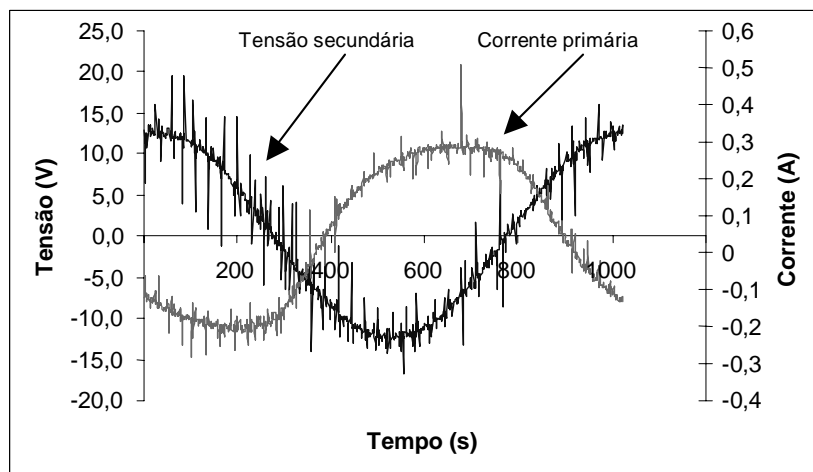


Fig.14: Sinais de tensão e corrente à 50 Hz e 0,295 T.

2.5 Conclusão

Este capítulo apresentou um exemplo da aplicação das normas técnicas sobre a caracterização de aço ao silício de grão não orientado. Foi mostrada, através dos ensaios, a dificuldade de se utilizar a instrumentação padrão convencional quando não se tem condições e disponibilidade de uma fonte de tensão adequada impondo a forma de onda senoidal no secundário do quadro. Poder-se-ia utilizar a tensão comercial com regulagem da amplitude através de um auto transformador. Dois problemas então haveriam: a inexistência do controle da tensão no secundário e a forma de onda da tensão comercial está contaminada atualmente por um conteúdo harmônico.

No ensaio da perda total segundo as normas técnicas, o controle da forma de onda da indução magnética através do fator de forma da tensão secundária obtido através da instrumentação padrão não foi eficiente devido às leituras terem sido realizadas no início das escalas dos instrumentos de medida. Os resultados do fator de forma obtidos através da instrumentação padrão divergiam dos resultados obtidos com o SDCMM. Houve dificuldades em manter sempre as leituras dos instrumentos no final da escala. Assim, os dados obtidos através do SDCMM apresentaram-se mais confiáveis, visto que o fator de forma assim obtido esteve sempre coerente com a imagem da tensão secundária observada.

Quanto ao modelo de separação das perdas apresentado pela norma brasileira, existe uma dificuldade para caracterizar suas componentes como perda por histerese e perda por correntes de Foucault. Apenas a norma brasileira separa a perda magnética em duas componentes, uma variável com a primeira potência da frequência (“perda por histerese”) e a outra variável com a segunda potência da frequência (“perda por correntes de Foucault”). Estas componentes são obtidas da curva da perda por ciclo em função da frequência, supondo que esta curva tenha comportamento linear. Na realidade, a curva da perda por ciclo em função da frequência não apresenta comportamento linear.

No ensaio da permeabilidade magnética, segundo o método utilizando o indutor mútuo, foram obtidos poucos pontos medidos com a instrumentação padrão, dificultando o traçado da

curva B-H. Já o SDCMM permitiu o traçado desta curva, com mais número de pontos apresentando-se novamente mais eficaz que a instrumentação padrão convencional.

Para um mesmo material testado, as normas técnicas forneceram resultados semelhantes, tanto os resultado da perda magnética bem como os resultados das características de magnetização.

No próximo capítulo apresentar-se-á métodos numéricos de separação das perdas magnéticas, baseados na modelagem do atual estado-da-arte [4,10].

3. ESTRATÉGIAS DE SEPARAÇÃO DAS PERDAS

Um dos métodos experimentais utilizados para a separação das perdas magnéticas em lâminas de aço ao silício realiza uma medição da perda por histerese em uma frequência relativamente baixa, adequada para que se possa desprezar as perdas magnéticas dinâmicas. Por motivos de dificuldade e custos envolvidos nos ensaios experimentais, por exigirem instrumentos e aparelhos que operem em baixas frequências, estratégias que possam eliminar o ensaio nestas frequências são interessantes.

Atualmente, um dos modelos mais utilizados para a perda magnética é a composição de três tipos de perdas: por histerese, por correntes de Foucault e as excedentes [19]. A referência [9] utiliza um wattímetro analógico de alta precisão para medição das perdas no quadro de Epstein. O intervalo de frequência $1\text{Hz} \leq f \leq 300\text{Hz}$ é utilizado no ensaio para pontos distintos de indução magnética. A perda por histerese é avaliada em cada ponto de indução magnética extrapolando-se a curva da perda para frequência nula. A perda por correntes de Foucault é calculada através de (3.0), onde σ é a condutividade elétrica do material $[\Omega\text{m}]^{-1}$, d é o valor da espessura [m] e B_m é a amplitude da indução magnética [T]. A perda excedente é obtida da diferença entre a curva da perda total medida, curva da perda por histerese e da curva da perda por correntes de Foucault.

$$P^{(class)} = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2, [\text{W}] \quad (3.0)$$

Nesta dissertação, apresenta-se uma estratégia de separação sem necessidade do ensaio da perda por histerese propriamente dito. Esta estratégia para separar as perdas magnéticas não necessita de dados de medição em baixas frequências, como também não utiliza o método de extrapolação da tendência da perda para uma frequência “nula”. Adicionalmente, o processo de separação também não requer o conhecimento da condutividade elétrica do material. Para validar a estratégia proposta de eliminação do ensaio da perda por histerese apresenta-se a estratégia generalizada que separa as perdas magnéticas através de três ensaios: da perda total com variação da indução magnética mantendo a frequência constante (por exemplo 50 Hz), ensaio da perda por histerese com variação da indução magnética mantendo a frequência constante (por exemplo 1 Hz) e ensaio da perda total com variação da frequência mantendo a

indução magnética constante (por exemplo 1T) utilizada para confirmação dos coeficientes encontrados relativos aos três tipos de perda magnética, conforme o modelo apresentado por [19].

Procura-se neste capítulo contextualizar estratégias não padronizadas de obtenção da perda magnética, utilizando o modelo da separação das perdas magnéticas em três componentes.

3.1 Estratégia de Separação das Perdas Considerada como Referência

Neste trabalho, toma-se como base a estratégia de separação das perdas apresentada pelas referências [4 e 10], onde são necessários um conjunto de medidas em uma frequência baixa, suficiente para desprezar as perdas dinâmicas, em função da indução máxima, e um outro conjunto em uma frequência onde as perdas dinâmicas são significativas, em função também da indução máxima. Para avaliar o processo de separação, é necessário um conjunto de medidas em função da frequência mantendo a indução magnética constante.

Denomina-se este procedimento como “referência” pois a perda por histerese é conhecida através da medição da mesma.

3.2 Generalização da Estratégia de Referência

O modelo da perda total $W_{tot}(B_m, f_o)$ é dado pela equação (3.1) [19], onde B_m é a amplitude da indução magnética [T], d é a espessura da lamina [m], σ é a condutividade elétrica [Ωm]⁻¹, δ é a massa específica do material [kg/m^3], G é o coeficiente de atrito [22], V_o é um parâmetro equivalente ao campo coercitivo [22], f_o é a frequência [Hz] e S é a seção transversal [m^2]. O primeiro termo é a perda por histerese W_h e o segundo termo é a perda por correntes de Foucault W_f . O terceiro termo representa a perda excedente W_e . Para uma indução magnética com forma de onda senoidal, a perda total W_{tot}^s é dada pela equação (3.2), onde a perda por histerese é dada pelo modelo de Steinmetz com os parâmetros k_h e α . Para esta específica forma de onda da indução magnética, a perda magnética é função da amplitude da indução magnética e dos coeficientes constantes, dados pela equação (3.3).

Para resolver a equação (3.2) é necessário conhecer parâmetros microestruturais e a condutividade elétrica. Mas a equação (3.3) é resolvida através dos coeficientes das perdas obtidos experimentalmente.

$$W(t)_{tot} = W(t)_h + \frac{\sigma d^2}{12f\delta T} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt + \frac{\sqrt{\sigma G V_o S}}{f\delta T} \int_0^T \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^{1.5} dt, \quad [\text{J/kg}] \quad (3.1)$$

$$W_{tot}^s(B_m) = k_h B_m^\alpha + \frac{(\pi d)^2}{6\delta} \sigma f_o B_m^2 + \frac{8.76\sqrt{\sigma S G V_o}}{\delta} \sqrt{f_o} B_m^{1.5}, \quad [\text{J/kg}] \quad (3.2)$$

$$W_{tot}^s(B_m) = k_h B_m^\alpha + k_f B_m^2 + k_e B_m^{1.5}, \quad [\text{J/kg}] \quad (3.3)$$

Obtém-se a perda por histerese numa frequência relativamente baixa, por exemplo 1 Hz, onde as perdas dinâmicas (perda por correntes de Foucault e perda excedente) podem ser desprezadas. Pelo modelo de Steinmetz a perda por histerese é dada pela equação (3.4). A faixa de indução magnética (região de baixa indução magnética) é selecionada baseando-se nos resultados estatísticos. Esta seleção é feita de forma a obter-se o maior coeficiente de determinação (vide equação (3.11)) e o maior número de pontos experimentais possível.

$$W_h = k_h (B_m)^\alpha \quad (3.4)$$

onde,

$1,4 < \alpha < 1,8$ para aços ao silício de grão não orientado.

k_h : dependente do material e do sistema de unidades empregado.

α : dependente apenas do material.

A equação (3.4) é uma função potência. Esta função corresponde a um modelo de regressão linear nos logaritmos das duas variáveis W_h e B_m [11]. Utilizando a equação (3.4) e artifícios matemáticos chega-se a seguinte equação da reta:

$$\ln(W_h) = \ln(k_h) + \alpha \ln(B_m) \quad (3.5)$$

$$y = a + bx \quad (3.5.a)$$

Para conhecer as constantes k_h e α é necessário calcular a interseção da reta com o eixo das ordenadas “a” e seu coeficiente angular “b”. Estes últimos são obtidos pelo método de regressão linear.

Para uma reta genérica de predição dada por (3.6), o resíduo E é o erro, discrepância, entre o valor verdadeiro de y e o valor aproximado $a+bx$ predito pela equação linear.

$$y = a + bx + E \quad (3.6)$$

Para assentar uma reta de predição à um conjunto de pontos, minimiza-se a soma dos quadrados dos resíduos. Esta soma é dada pela equação (3.7), onde “ n ” é o número de pontos experimentais.

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (3.7)$$

Deriva-se esta equação em relação a “ a ” e a “ b ”. Os coeficientes a e b são obtidos após deduções e simplificações:

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.8)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3.9)$$

O erro devido a aplicação da regressão linear é dado por: $S_t - S_r$.

A soma total dos quadrados é dada por:

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.10)$$

Com os valores da soma dos quadrados dos resíduos e da soma total dos quadrados, o coeficiente de determinação é obtido:

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (3.11)$$

Para se obter assentamento perfeito da reta, a soma dos quadrados dos resíduos S_r deve ser nula. Assim,

$$r^2 = 1$$

De (3.5) e (3.5.a) define-se:

$$k_h = e^a \quad (3.12)$$

$$\alpha = b \quad (3.13)$$

A perda total é obtida pelo ensaio do material a uma frequência alta, por exemplo 50 Hz, onde as perdas dinâmicas (perda por correntes de Foucault e perda excedente) são detectadas. O procedimento para obtenção das constantes k_t e γ da perda total, é análogo ao procedimento de obtenção de k_h e α relativos à perda por histerese.

As constantes k_f e k_e da perda por correntes de Foucault e da perda excedente são obtidas através da equação (3.3). Esta equação é reescrita como:

$$k_t(B_m)^\gamma = k_h(B_m)^\alpha + k_f(B_m)^2 + k_e(B_m)^{1.5} \quad [\text{J/kg}] \quad (3.14)$$

A faixa da amplitude da indução magnética B_m utilizada para o processo de separação das perdas corresponde à interseção das faixas de máximo coeficiente de determinação da perda por histerese e da perda total.

Conhecendo as constantes da perda total e da perda por histerese, tem-se:

$$k_e = \frac{k_t(B_m)^\gamma - k_h(B_m)^\alpha}{(B_m)^{1.5}} - k_f(B_m)^{0.5} \quad (3.15)$$

A equação (3.15) representa a reta de soluções. Esta equação pode ser reescrita como:

$$k_e = a_{fe} + b_{fe}k_f \quad (3.16)$$

A Fig.15 ilustra a reta de soluções na região de interesse:

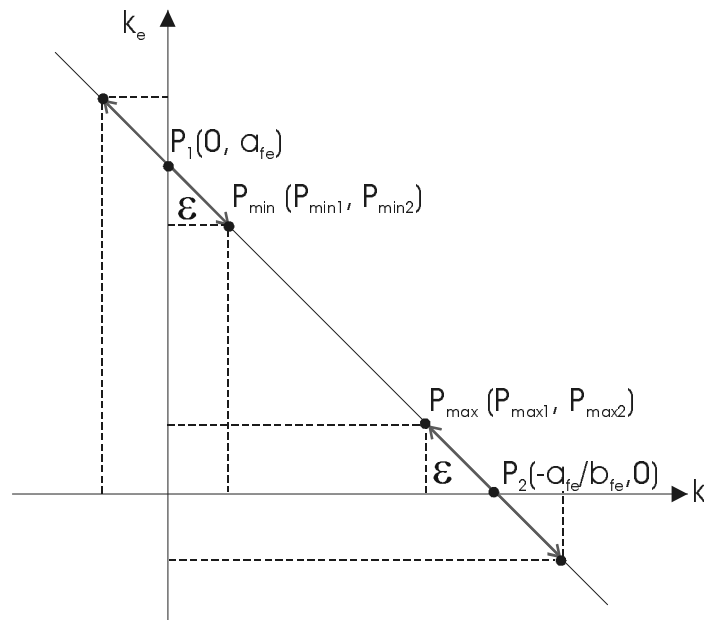


Fig.15: Reta de soluções.

Como valores $k_f = 0$ e $k_e = 0$ não ocorrem, calcula-se um valor ϵ , dado por (3.18), de dimensão pequena em relação ao comprimento do segmento $\overline{p_1p_2}$:

$$d(p_1, p_2) = \sqrt{\left(\frac{a_{fe}}{b_{fe}}\right)^2 + a_{fe}^2} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon = \frac{d(p_1, p_2)}{1000} \quad (3.18)$$

Para seleccionar o par ordenado (k_f, k_e) é necessário conhecer as coordenadas dos pontos p_{min} e p_{max} . Esta formulação é obtida através das seguintes imposições:

$$\begin{cases} d(p_2, p_{max}) = d(p_1, p_{min}) = \varepsilon \\ p_{max}, p_{min} \in k_e = a_{fe} + b_{fe} k_f \end{cases} \quad (3.19)$$

Para o ponto p_{max} tem-se:

$$\begin{cases} (1 + b_{fe}) p_{max1}^2 + (2 \frac{a_{fe}}{b_{fe}} + 2 a_{fe} b_{fe}) p_{max1} + ((\frac{a_{fe}}{b_{fe}})^2 - \varepsilon^2 + a_{fe}^2) = 0 \\ p_{max2} = a_{fe} + b_{fe} p_{max1} \end{cases} \quad (3.20)$$

A primeira equação do sistema (3.20) é uma equação quadrática. Para obter-se o ponto desejado (situado no primeiro quadrante), toma-se a raiz que resulta um valor positivo de p_{max2} . Desta forma se obtém as coordenadas do ponto P_{max} .

Para o ponto p_{min} tem-se:

$$\begin{cases} p_{min1} = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{1 + b_{fe}^2}} \\ p_{min2} = a_{fe} + b_{fe} p_{min1} \end{cases} \quad (3.21)$$

Para obter-se o ponto desejado (situado no primeiro quadrante), toma-se o valor positivo de p_{min1} . Desta forma se obtém as coordenadas do ponto P_{min} .

Variando-se k_f do ponto p_{min1} ao ponto p_{max1} , selecciona-se o par ordenado (k_f, k_e) que minimiza o erro em relação a perda ensaiada com variação da frequência segundo a equação (3.22) [19].

$$W_{tot}^s(f) = k_h (B_m)^\alpha + k_f (B_m)^2 \frac{f}{f_0} + k_e (B_m)^{1.5} \sqrt{\frac{f}{f_0}}, \quad [\text{J/kg}] \quad (3.22)$$

O par ordenado (k_f, k_e) é avaliado comparando as perdas estimadas utilizando-se a equação (3.22) com os valores da perda medida em outra frequência f diferente de f_0 .

Assim, obtém-se:

$$w_f = k_f (B_m)^2 \quad (3.23)$$

$$w_e = k_e (B_m)^{1.5} \quad (3.24)$$

O fluxograma desta estratégia está representado nas Fig.16 e Fig.16.a.

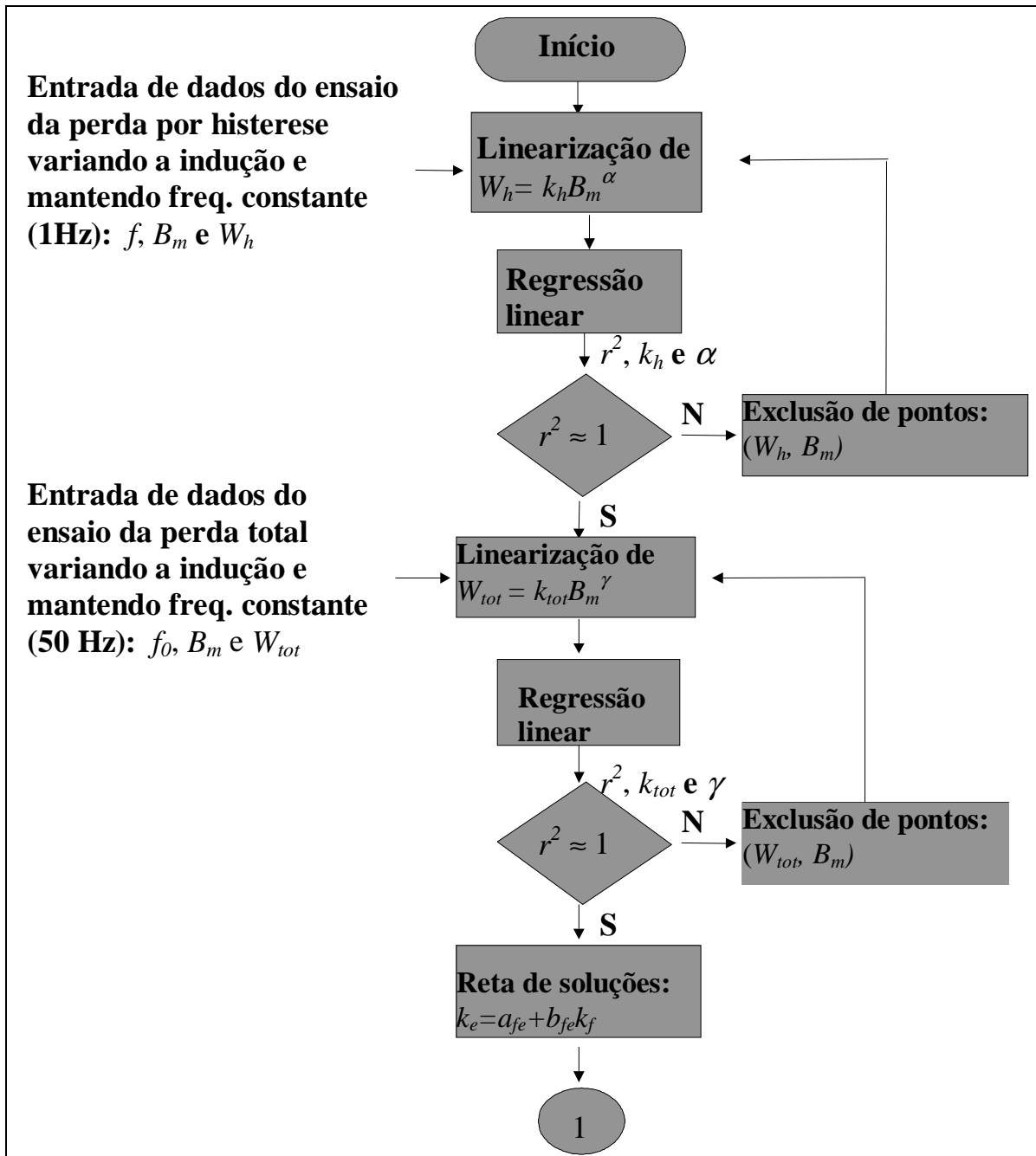


Fig.16: Fluxograma da estratégia de generalização.

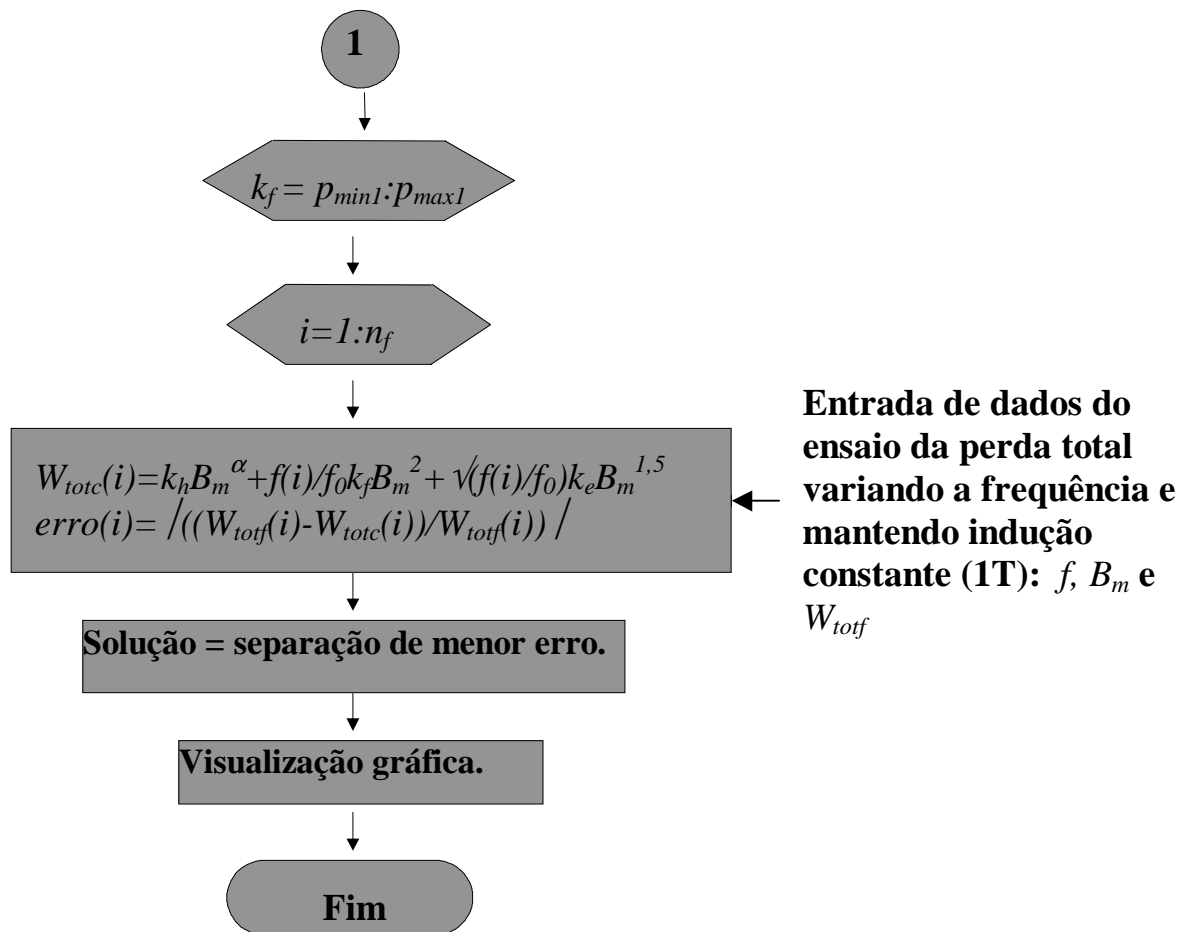


Fig.16.a: Fluxograma da estratégia de generalização.

3.3 Estratégia de Eliminação do Ensaio da Perda por Histerese

Nas estratégias anteriores, mede-se a perda por histerese considerando-se que para frequência baixa, por exemplo 1 Hz, as demais parcelas da perda magnética total não ocorram. Assim, apresenta-se uma alternativa de separação das perdas magnéticas eliminando o ensaio de determinação da perda por histerese.

Nesta estratégia, realizam-se dois ensaios. Ensaio da perda total (por exemplo em 50 Hz), de forma semelhante aos métodos anteriores, e ensaio com variação da frequência mantendo-se a amplitude da indução magnética constante (por exemplo 1T).

As constantes k_f e γ da perda total, são obtidas de forma semelhante à apresentada na estratégia anterior. Assim, tem-se a equação:

$$k_t(B_m)^\gamma = k_h(B_m)^\alpha + k_f(B_m)^2 + k_e(B_m)^{1,5} \quad (3.25)$$

Como k_t e γ são conhecidos, tem-se quatro incógnitas: k_h , α , k_f e k_e . Pode-se escrever a equação (3.25) em função de vários valores de indução magnética, resultando o sistema de equações (3.26).

$$\begin{cases} k_t(B_{m1})^\gamma = k_h(B_{m1})^\alpha + k_f(B_{m1})^2 + k_e(B_{m1})^{1,5} \\ k_t(B_{m2})^\gamma = k_h(B_{m2})^\alpha + k_f(B_{m2})^2 + k_e(B_{m2})^{1,5} \\ k_t(B_{m3})^\gamma = k_h(B_{m3})^\alpha + k_f(B_{m3})^2 + k_e(B_{m3})^{1,5} \\ k_t(B_{m4})^\gamma = k_h(B_{m4})^\alpha + k_f(B_{m4})^2 + k_e(B_{m4})^{1,5} \end{cases} \quad (3.26)$$

Se B_{m1} e B_{m4} forem os extremos de um segmento $\overline{B_{m1}B_{m4}}$, então, a coordenada (x) de um ponto que divide o segmento numa razão dada [12] é:

$$x = \frac{x_1 + rx_2}{1 + r} \quad (3.27)$$

onde,

x_1, x_2 : são as coordenadas dos pontos extremos.

r : razão dada.

A Fig.17 ilustra o procedimento de divisão do segmento de reta utilizado nesta estratégia.

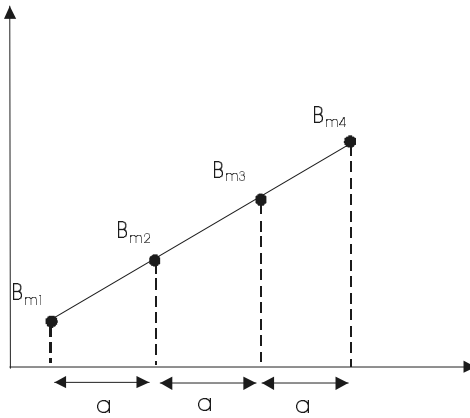


Fig.17: Divisão do segmento de reta.

Para o segmento $\overline{B_{m1}B_{m2}}$: $r = a/2a = 1/2$.

Para $\overline{B_{m1}B_{m3}}$: $r = 2a/a = 2$.

Utilizando-se a equação (3.27), com $B_{m1} = 0,4$ e $B_{m4} = 1,4$ tem-se:

$$B_{m2} = \frac{0,4 + \frac{1}{2}1,4}{1 + \frac{1}{2}} = 0,73 \quad e \quad B_{m3} = \frac{0,4 + 2(1,4)}{1 + 2} = 1,067$$

Assim, o sistema (3.26) é reescrito como:

$$\begin{cases} k_t(0,4)^\gamma = k_h(0,4)^\alpha + k_f(0,4)^2 + k_e(0,4)^{1,5} \\ k_t(0,73)^\gamma = k_h(0,73)^\alpha + k_f(0,73)^2 + k_e(0,73)^{1,5} \\ k_t(1,067)^\gamma = k_h(1,067)^\alpha + k_f(1,067)^2 + k_e(1,067)^{1,5} \\ k_t(1,4)^\gamma = k_h(1,4)^\alpha + k_f(1,4)^2 + k_e(1,4)^{1,5} \end{cases} \quad (3.28)$$

Resolve-se este sistema de equações não lineares, pelo método de Newton. O método de Newton é o método mais conhecido e estudado para resolver sistemas de equações não lineares [13]. Uma iteração de Newton requer avaliação da matriz jacobiana em x_k e resolução do sistema linear $J_s = -F$. Dada uma função não linear $F(x)$, deseja-se encontrar as soluções para $F(x) = 0$.

Para aplicar o método de Newton são necessários valores iniciais de k_h , α , k_f e k_e . Assim, para um dado valor de α obtém-se as constantes k_h ; k_f e k_e pelas três primeiras equações do sistema (3.28).

Para o sistema dado pela equação (3.29), F é a matriz obtida do sistema de equações (3.28) e s é a solução buscada.

$$J*s = -F \quad (3.29)$$

$$F = \begin{bmatrix} k_h(0,4)^\alpha + k_f(0,4)^2 + k_e(0,4)^{1,5} - k_t(0,4)^\gamma \\ k_h(0,73)^\alpha + k_f(0,73)^2 + k_e(0,73)^{1,5} - k_t(0,73)^\gamma \\ k_h(1,067)^\alpha + k_f(1,067)^2 + k_e(1,067)^{1,5} - k_t(1,067)^\gamma \\ k_h(1,4)^\alpha + k_f(1,4)^2 + k_e(1,4)^{1,5} - k_t(1,4)^\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

O vetor das derivadas parciais de $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é denominado vetor gradiente de $f_i(x)$, dado por:

$$\nabla f_i(x) = \left(\frac{\partial f_i(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_n} \right)^T \quad (3.31)$$

A matriz das derivadas parciais de $F(x)$ é a matriz jacobiana, dada por:

$$J(x) = \begin{bmatrix} \nabla f_1(x)^T \\ \nabla f_2(x)^T \\ \vdots \\ \nabla f_n(x)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

O método de Newton é um método iterativo, ou seja, a partir de um ponto inicial x_0 gera-se uma seqüência x_k de vetores e na convergência tem-se:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = x^*$$

onde, x^* : é uma das soluções do sistema não linear.

Neste método existem critérios de parada para aceitar um ponto x_k como aproximação da solução exata x^* e para detectar divergência.

Como $F(x^*) = 0$, sendo x^* a solução exata, como critério de parada é necessário verificar se todas as componentes de $F(x_k)$ possuem módulo de dimensão pequena:

$$\|F(x_k)\| < \varepsilon$$

Esta verificação é realizada utilizando-se a norma infinito, sendo v o vetor dos valores absolutos de F :

$$\|v\|_{\infty} = \max |v_i| \text{ para } 1 \leq i \leq n$$

Outro critério de parada é verificar se a norma infinito $\|x_{(k+1)} - x_k\|$ está próxima de zero: quando $\|x_{(k+1)} - x_k\|_{\infty} < \varepsilon$ x_{k+1} é escolhido como aproximação para x^* .

Para detectar divergência e interromper os cálculos, utiliza-se teste com um número máximo de iterações.

Para resolver o sistema linear (3.29) utiliza-se fatoração LU [13]. Este método consiste em decompor a matriz J em dois fatores. Assim, $J = LU$, ou seja, $LU = -F$. Tomando $y = Us$, resolver o sistema $Js = -F$ é equivalente a resolver o sistema linear $Ly = -F$ e em seguida o sistema linear $Us = y$. A matriz L é triangular inferior com diagonal unitária e a matriz U é triangular superior.

O sistema (3.30) apresenta várias soluções, entretanto, existe apenas uma solução fisicamente verdadeira, ou que atenda o modelo da equação (3.2) pois os parâmetros d , σ , δ , G , V_0 e S são considerados constantes. Esta estratégia permite o encontro da solução fisicamente verdadeira através da seleção da separação das perdas que coincide com a curva de pontos experimentais obtidos no ensaio com variação da frequência mantendo-se indução constante. O fluxograma desta estratégia está representado nas Fig.18 e Fig.19:

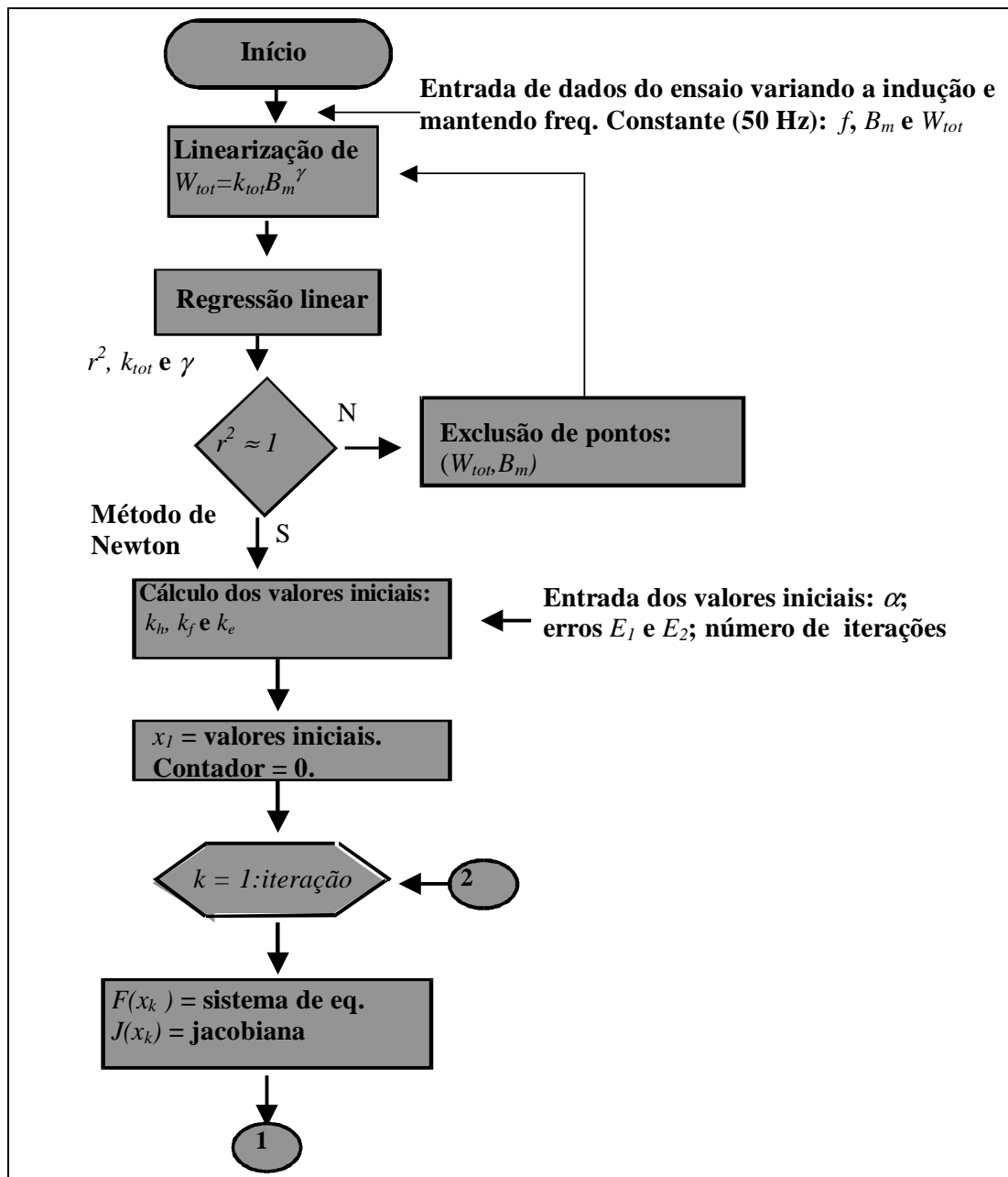


Fig.18: Fluxograma da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese.

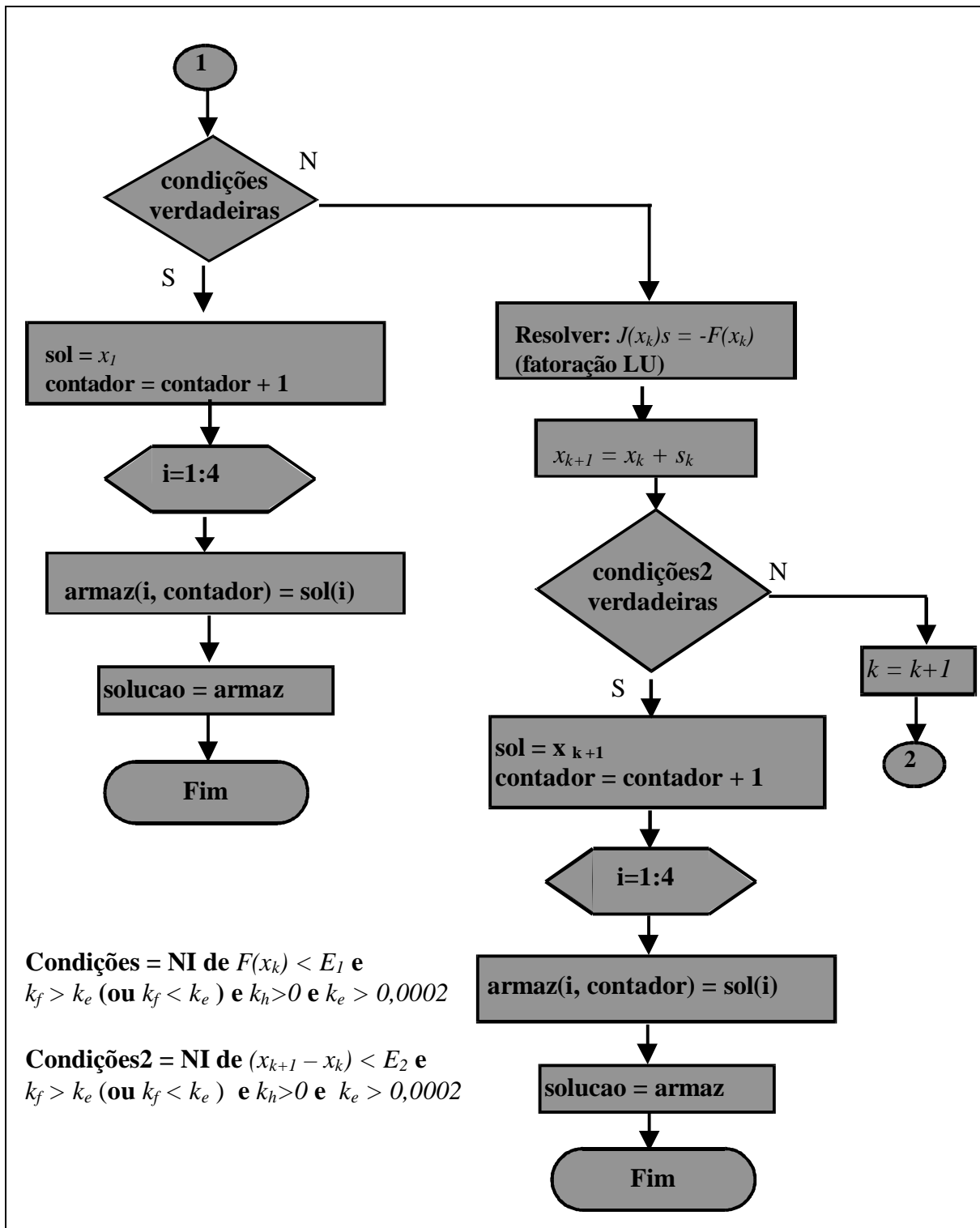


Fig.19.a: Fluxograma da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese.

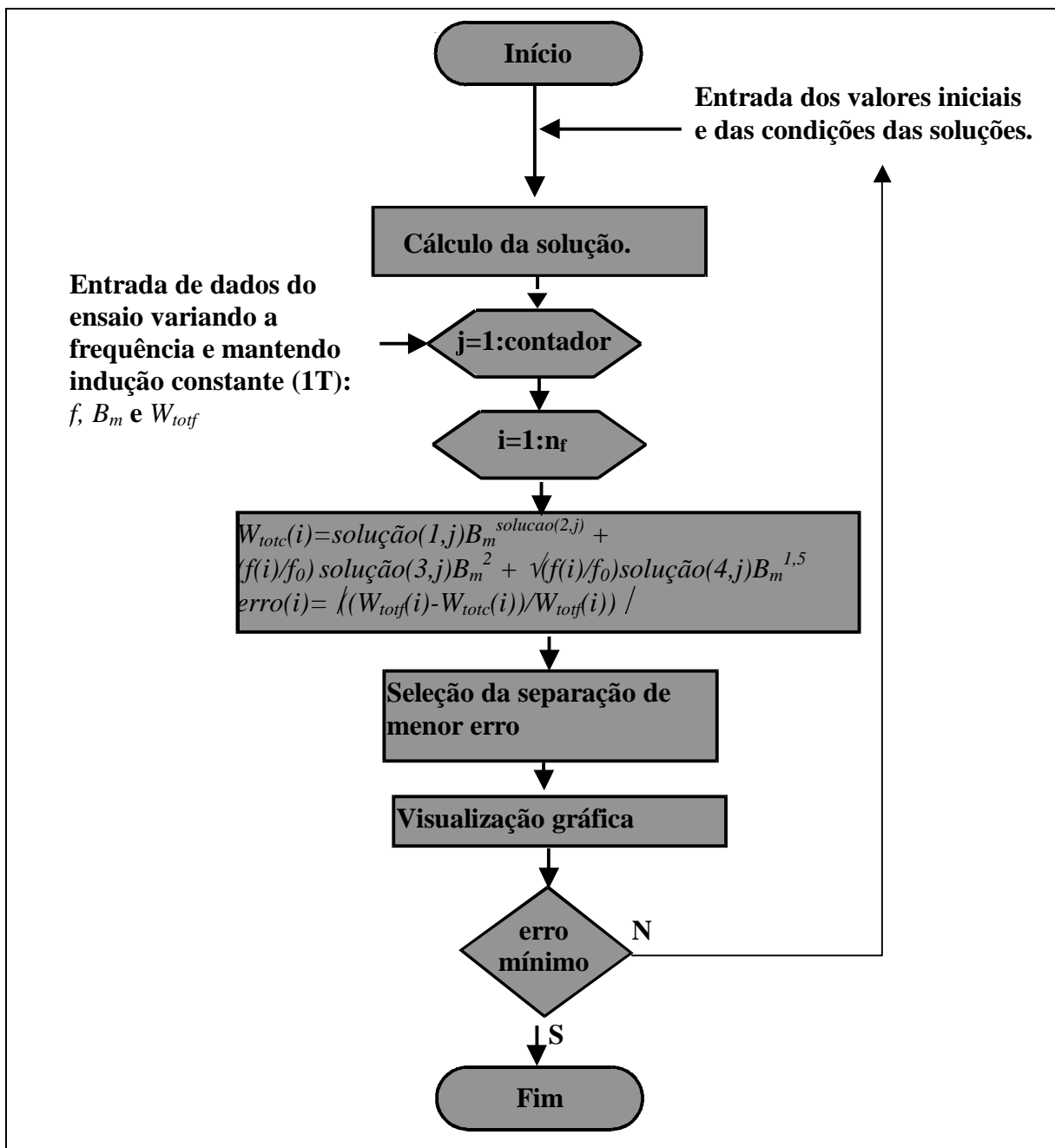


Fig.19: Fluxograma geral da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese.

3.4 Resultados

Nesta parte do trabalho, apresenta-se os resultados obtidos aplicando as estratégias de separação das perdas abordadas. O material ensaiado foi inserido no quadro de Epstein com todas as lâminas cortadas na direção longitudinal. No ensaio

da perda por histerese foram utilizadas doze lâminas por braço. Nos ensaios restantes foram utilizadas três lâminas por braço. Os seguintes dados de ensaio foram obtidos para a amostra:

Tabela 32: Dados do ensaio da perda por histerese, perda total à 50 Hz e perda total à 1T.

f (Hz)	B _m (T)	W _h (J/kg)	f (Hz)	B _m (T)	W _{tot} (J/kg)	B _m (T)	f (Hz)	W _{tot} (J/kg)
1	0,053	7,09E-05	50	0,02	1,628E-05	1,001	10	0,013652
	0,128	0,000394		0,049	9,903E-05	1,011	25	0,016731
	0,252	0,001326		0,1	0,0003959	1,014	50	0,021078
	0,369	0,002455		0,148	0,0008149	1,015	60	0,022795
	0,498	0,003938		0,198	0,0013757	1,006	80	0,025415
	0,676	0,00638		0,301	0,0026727	1,01	100	0,028607
	0,748	0,007496		0,397	0,0043068	1,007	150	0,03573
	0,848	0,009176		0,505	0,0064859	1,019	200	0,04214
	0,928	0,010659		0,601	0,0087385	1,017	300	0,055525
	1,015	0,012274		0,702	0,0113019			
	1,091	0,013967		0,803	0,0141185			
	1,266	0,019126		0,905	0,0173488			
	1,392	0,02502		1,014	0,021078			
	1,43	0,027449		1,11	0,0249164			
	1,465	0,030888		1,209	0,0299645			
	1,49	0,033382		1,3	0,0349712			
	1,513	0,035955		1,4	0,0424908			
	1,533	0,038594		1,502	0,0561628			
	1,592	0,046089		1,58	0,0673188			
	1,616	0,050067		1,699	0,0879542			
	1,664	0,050579		1,79	0,0999103			
				1,828	0,0906776			

A faixa de 0,128 T à 1,091 T da perda por histerese (1 Hz) e a faixa de 0,1 T à 1,11 T da perda total (50 Hz) representam as faixas que fornecem maior coeficiente de determinação.

3.4.1 Estratégia de Referência

Aplicando a estratégia dita de referência [4], o resultado da separação das perdas está mostrado na Fig. 20.

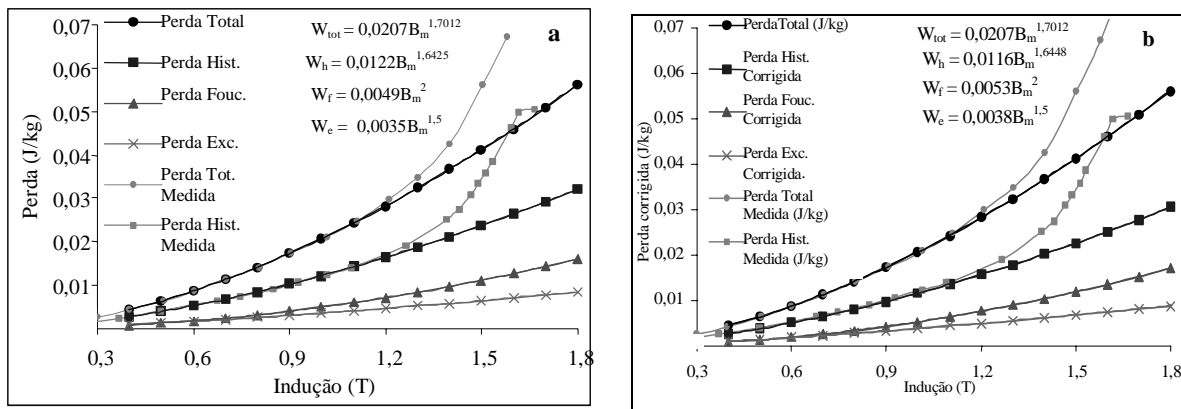


Fig.20: Caracterização à 50Hz: a) Separação das perdas. b) Separação das perdas corrigida.

A Fig.20a apresenta as curvas das perdas medidas à 1 e 50 Hz. Pode-se notar que até à 1,2 T a aproximação entre o modelo e os pontos experimentais é satisfatória. É interessante ressaltar que o modelo é válido para a faixa de indução magnética de previsão correspondente à interseção das faixas de máximo coeficiente de determinação da perda por histerese e da perda total, de 0,1 à 1,1 T. Para altos valores de indução magnética o erro aumenta. Na Fig.20b as perdas são obtidas corrigindo-se a perda por histerese. O coeficiente da perda por histerese diminuiu 0,06%; o expoente da perda por histerese aumentou 0,23%; o coeficiente da perda por correntes de Foucault aumentou 0,04% e o coeficiente da perda excedente aumentou 0,03%.

A Fig.21 apresenta as curvas de perda obtidas para diferentes frequências mantendo-se a indução magnética em 1T. Pode-se observar que a aproximação da perda calculada em relação à curva medida, está caracterizada por um erro máximo de 10%. A aproximação da perda corrigida em relação à curva medida está caracterizada por um erro máximo de 5%.

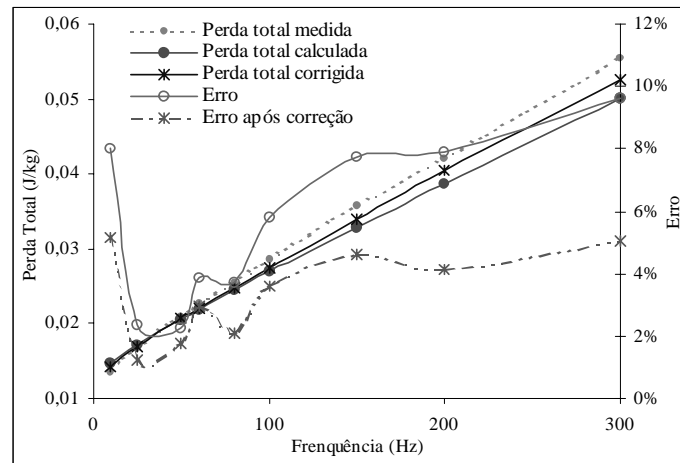


Fig.21: Perda Total em 1T em função da frequência.

3.4.2 Estratégia de Generalização

Utilizando-se a estratégia de generalização foram obtidos os resultados apresentados na Fig.22.

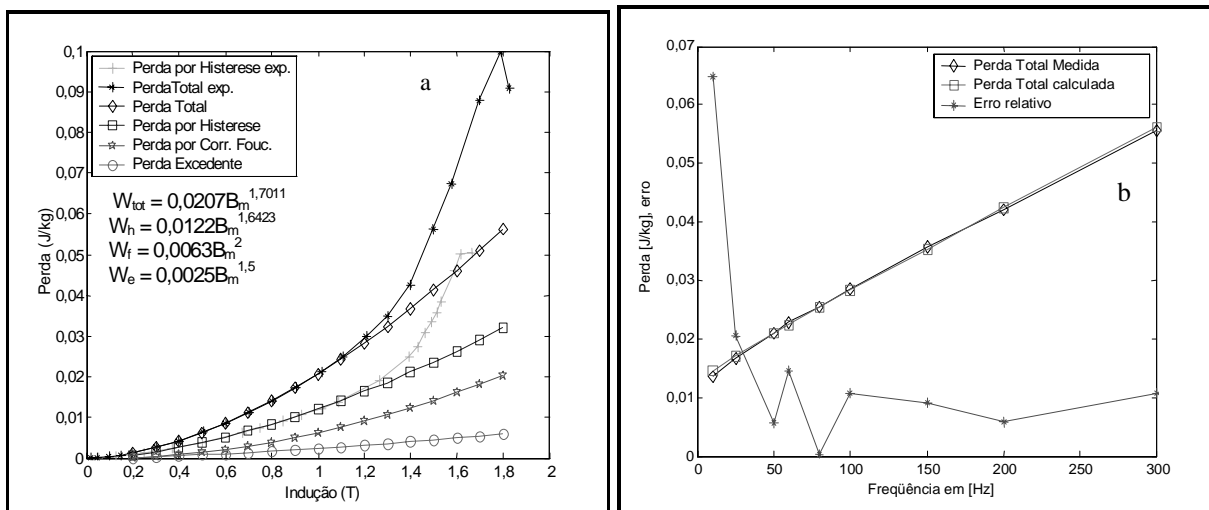


Fig.22: Separação das Perdas: a) Caracterização à 50 Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.

Na Fig.22.a pode-se observar que até 1,2T existe uma boa aproximação entre o modelo e os pontos medidos.

Como nesta estratégia a perda por histerese não foi corrigida, os resultados serão comparados com os resultados da estratégia de referência sem correção da perda por histerese. A Fig.22.b mostra que a aproximação da perda calculada em relação à curva medida, está caracterizada por um erro máximo de aproximadamente 6,5%. Este erro é 3,5% menor que o erro apresentado pela estratégia de referência. Observando as Figuras 21 e 22.b verifica-se que esta última modela melhor o comportamento do material (em todos os pontos medidos).

3.4.3 Estratégia de Eliminação do Ensaio da Perda por Histerese

No algoritmo desta estratégia, pode-se estabelecer valores de α e solicitar que o programa forneça $k_f > k_e$ ou $k_f < k_e$. A solução é satisfatória quando obedece a uma faixa da perda total e apresenta erro de dimensão pequena em relação ao ensaio com variação da frequência.

A solução abaixo, foi obtida após 04 iterações, para $\alpha = 1,10$ à $1,20$ com passo de $0,01$ e para $k_f > k_e$.

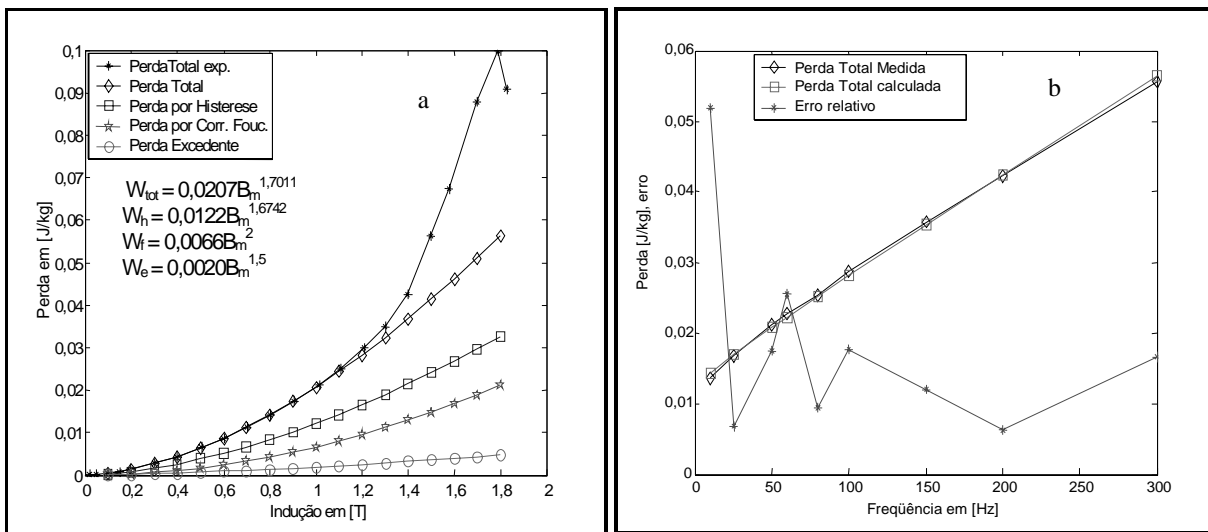


Fig.23: Separação das perdas: a) Caracterização à 50Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.

Na Fig.23.a pode-se observar que até 1,2T existe uma boa aproximação entre o modelo e os pontos medidos. Na Fig.23.b pode-se observar que a perda calculada apresenta uma

excelente aproximação em relação à curva medida. A Fig.23.b apresenta um erro máximo de aproximadamente 5% e a Fig.22.b apresenta um erro máximo de aproximadamente 6,5%. Isto demonstra que a estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese atinge um conjunto de parâmetros do modelo melhor, comparando-se com as estratégias anteriores.

Como exemplo de aplicação da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese no Grucad (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos da Universidade Federal de Santa Catarina), apresentam-se os resultados da separação das perdas para três materiais diferentes ensaiados no sistema MPG100 fabricado pela empresa Brockhaus Messtechnik [28]. Este sistema não permite o ensaio da perda por histerese por não atingir frequências baixas (por exemplo 1 Hz).

A Fig.24 apresenta os resultados de separação das perdas do material E230-C0 de espessura 479,29 μ m fornecido pela Embraco (Empresa Brasileira de Compressores S.A.) [29]. Os resultados foram obtidos para α de 0,1 à 1,10 com passo de 0,01 e para $k_f > k_e$.

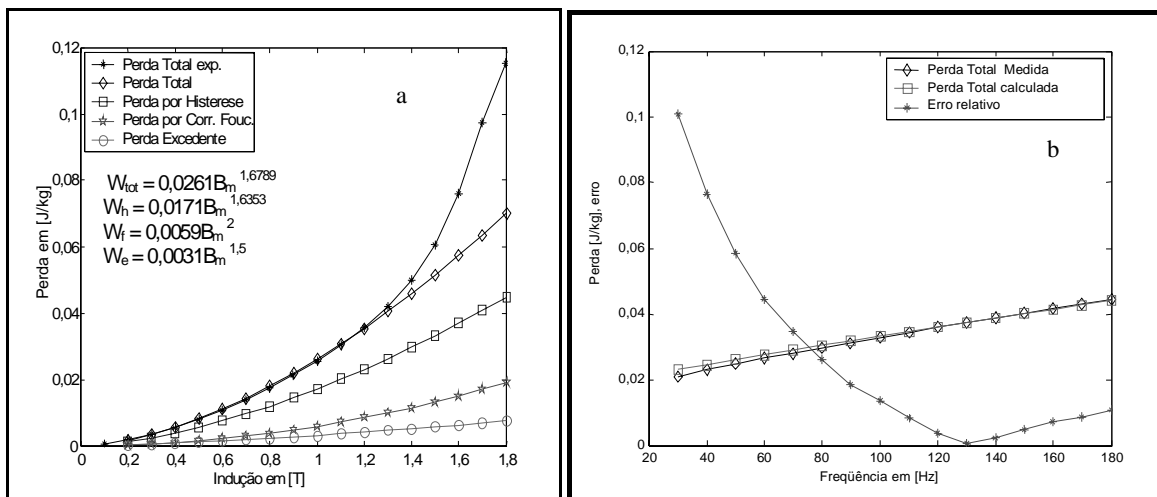


Fig.24: Separação das perdas: a) Caracterização à 50Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.

A Fig.25 apresenta os resultados de separação das perdas do material CPGXH-4 de espessura 492 μ m fornecido pela Acesita (Companhia Aços Especiais Itabira) [30]. Metade das lâminas foram estampadas na direção da laminação e as restantes foram estampadas na

direção transversal. Os resultados foram obtidos para α de 0,1 à 1,10 com passo de 0,01 e para $k_f > k_e$.

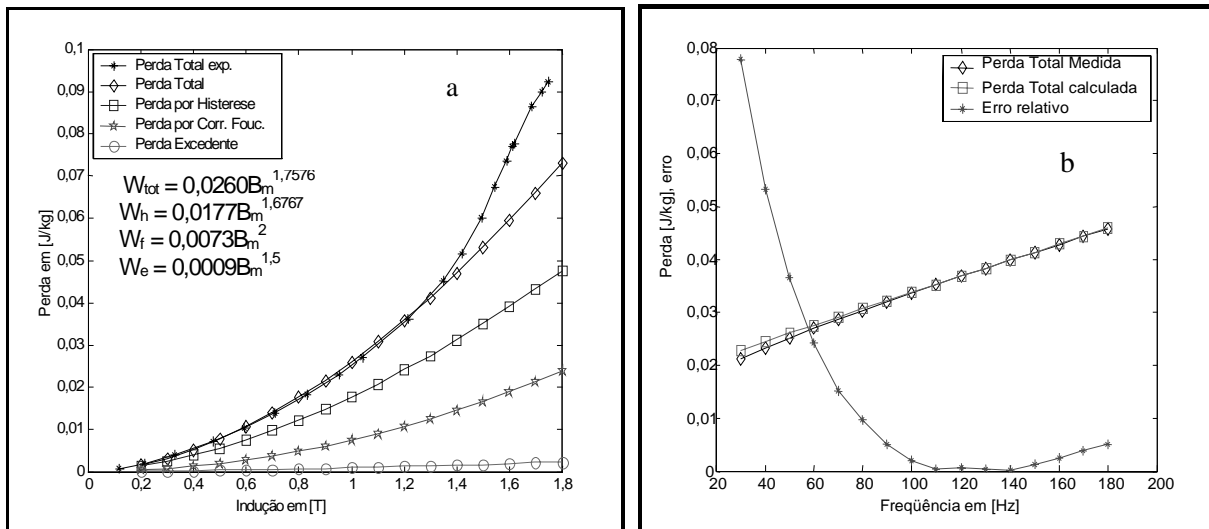


Fig.25: Separação das perdas: a) Caracterização à 50Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.

A Fig.26 apresenta os resultados de separação das perdas do material BGJPX83-F de espessura 520 μm . Os resultados foram obtidos para α de 2,1 à 3 com passo de 0,01 e para $k_f > k_e$.

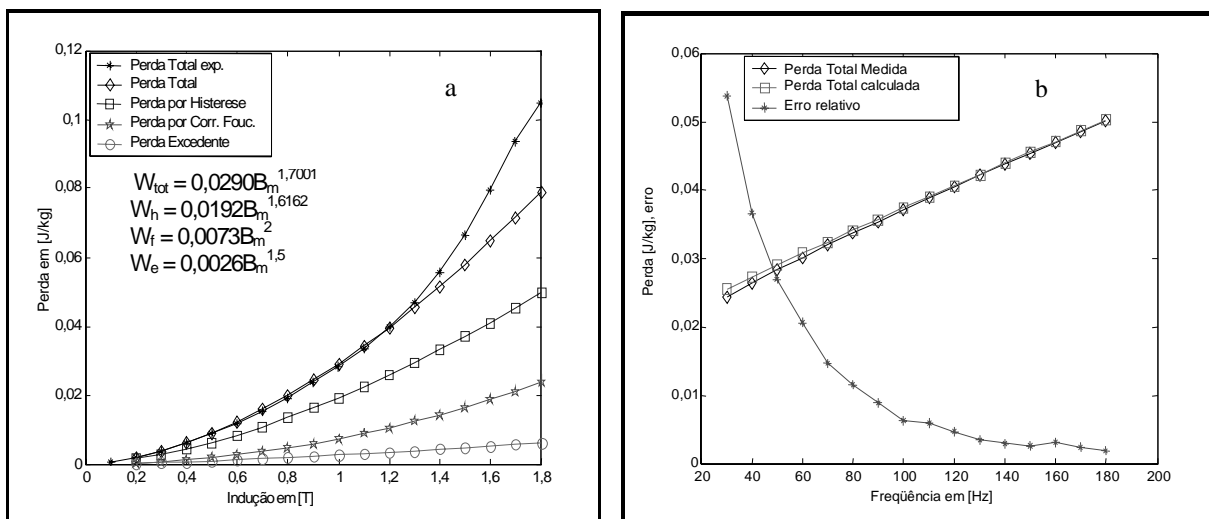


Fig.26: Separação das perdas: a) Caracterização à 50Hz; b) Perda total em 1T em função da frequência.

As figuras 24.b, 25.b e 26.b mostram que a curva da perda total calculada segue praticamente o mesmo comportamento da curva experimental, havendo erros de dimensões desprezíveis.

3.5 Conclusão

A estratégia de referência foi utilizada como base para o desenvolvimento da estratégia de generalização. A estratégia de referência apresenta a vantagem de utilizar dados de dois ensaios (da perda total e da perda por histerese). Entretanto, sua desvantagem reside no fato de poder fornecer como solução uma separação das perdas que apresenta um erro maior que o obtido pelas demais estratégias, mas, o erro é tolerável.

A estratégia de generalização apresenta a desvantagem de utilizar três ensaios (da perda total com variação da indução, ensaio da perda por histerese com variação da indução e ensaio da perda total com variação da frequência). Entretanto, atinge um conjunto de parâmetros do modelo melhor, comparando-se com a estratégia de referência.

A estratégia de eliminação da perda por histerese apresenta vantagem de não exigir equipamentos que permitam realizar o ensaio em frequências muito baixas onde se possam desprezar as perdas dinâmicas. Por outro lado, esta estratégia mostrou-se ser mais eficiente que as estratégias de referência e de generalização por fornecer um erro menor. Na estratégia de eliminação da perda por histerese são necessários apenas dois ensaios (da perda total com variação da indução e da perda total com variação da frequência).

Pode-se concluir que a estratégia de eliminação da perda por histerese além de reunir as vantagens das estratégias anteriores (dois ensaios e atingir um conjunto de parâmetros do modelo melhor), elimina o ensaio crítico em baixas frequências. O conjunto de busca da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese é maior que o conjunto de busca das estratégias de referência e de generalização, porque k_h e α também são incógnitas. Isto apresenta uma vantagem de se poder encontrar um conjunto mais próximo dos valores reais.

4. CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho abordou as normas de caracterização de lâminas de aço ao silício de grão não orientado. Fez-se uma sinopse comparando as normas brasileira NBR5161, americana ASTM A343, japonesa JISC 2550 e norma da comissão eletrotécnica internacional IEC 404-2. Restringiu-se o estudo sobre a determinação das perdas magnéticas e permeabilidade magnética do material. Como resultado, organizou-se um roteiro com diretrizes e sugestões para ser utilizado desde a obtenção das amostras, ensaios, procedimentos de cálculos, até o relatório final sobre a caracterização. Sabe-se que trabalhos desta natureza até o presente momento foram raros no Brasil, e até mesmo no exterior. Assim, julga-se que este trabalho seja relevante para o meio industrial, pois auxilia a avaliação dos valores apresentados nos catálogos dos materiais dos fabricantes, realizados sob as diversas normas, bem como auxilia aquelas empresas que forem realizar a caracterização do material para efeitos de controle de qualidade ou na elaboração de uma caracterização conforme tal norma. Por vezes, há textos repetitivos. A intenção é que o leitor tenha um resumo da sinopse, podendo averiguar o que cada norma trata em específico sobre determinado assunto.

Realizou-se a caracterização de uma amostra de um material conforme as quatro normas estudadas. Comentou-se os resultados obtidos e as dificuldades de se utilizar a instrumentação padrão convencional. No geral, como é de se esperar, a aplicação das várias normas conduzem a praticamente uma mesma caracterização do material.

Uma contribuição relevante deste trabalho é o desenvolvimento da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese. Esta estratégia não necessita equipamentos que atinjam frequências baixas (por exemplo 1Hz) onde se possam desprezar as perdas dinâmicas. Com as vantagens da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese apresentadas e com os resultados obtidos, recomenda-se a utilização desta estratégia no processo de separação das perdas no material.

A estratégia de generalização apresenta a desvantagem de utilizar três ensaios (da perda total com variação da indução, ensaio da perda por histerese com variação da indução e ensaio da perda total com variação da frequência). A estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese apresenta a vantagem de não exigir equipamentos que permitam realizar o

ensaio em frequências muito baixas onde se podem desprezar as perdas dinâmicas. Por outro lado, esta estratégia mostrou-se ser mais eficiente que a estratégia de generalização por fornecer um erro menor. Na estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese são necessários apenas dois ensaios (da perda total com variação da indução e da perda total com variação da frequência). Podemos concluir que o conjunto de busca da estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese é maior que o conjunto de busca da estratégia de generalização, porque k_h e α também são incógnitas. Isto apresenta uma vantagem de se poder encontrar um conjunto mais próximo dos valores reais.

Para continuidade desta pesquisa, os seguintes temas são propostos: análise de erro referente às medições utilizando os procedimentos normativos; preparar e adquirir conhecimentos para implementação de laboratório padronizado de caracterização magnética de lâminas de aço ao silício; desenvolvimento de um novo modelo para a perda por histerese que contemple a região de altas induções; adequar a estratégia de eliminação do ensaio da perda por histerese para modelar outros tipos de materiais; desenvolver uma estratégia de separação das perdas magnéticas baseada em um ensaio em única frequência; realizar um estudo da perda magnética considerando-se o efeito pelicular das correntes induzidas.

Como existe dificuldade de identificação das componentes da separação das perdas apresentada pela norma brasileira, como perda por histerese e perda por correntes de Foucault, recomenda-se utilizar a metodologia de separação das perdas em três componentes: perda por histerese; perda por correntes de Foucault e perda excedente. Este modelo para as perdas magnéticas em três tipos apresenta resultados mais próximos à realidade [4].

Como a condutividade elétrica do material varia na extensão do lote de aço e como a espessura do material é de dimensão muito pequena e variável não recomenda-se obter a perda por correntes de Foucault através de cálculo utilizando estas duas grandezas. Como o comportamento da perda em função da frequência não é linear, não recomenda-se a obtenção da perda por histerese extrapolando-se esta curva para frequência nula.

APÊNDICE 1 – MÉTODO DO EMPUXO

O método do empuxo é um método normalizado [1] de determinação da densidade do material. O empuxo E é a força resultante que um fluido em repouso exerce num corpo nele submerso. Esta força age sempre verticalmente de baixo para cima e é igual ao peso do fluido que é deslocado pelo sólido [16].

Para este ensaio (conforme a norma NBR5161) são necessários: suporte; fio de massa desprezível (nylon); recipiente transparente (para permitir a verificação e a remoção de bolhas originadas no material); líquido de densidade conhecida (água); balança e cinco amostras do material. As amostras devem verificar as condições apresentadas na tabela 4 deste trabalho.

A Fig.A1 mostra como deve ser montado o sistema. Deve-se proceder da seguinte forma: abre-se orifício de dimensão pequena na parte superior da amostra suficiente para atravessar o fio de massa desprezível. Pesa-se a amostra (obtendo-se a massa m_e). Dispõe-se o fluido (água) num recipiente transparente. Coloca-se o recipiente sobre uma balança. Zera-se a balança. Insere-se a amostra, suspensa pelo fio, dentro do recipiente. Fixa-se o fio no suporte. Removem-se todas as bolhas de ar originadas no material. Mede-se a massa m .

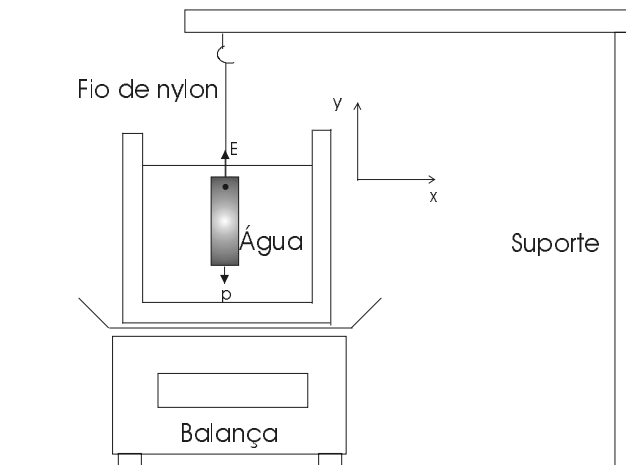


Fig.A1: Método do Empuxo.

Aplicando a lei de Newton:

$$\sum F_i = ma \tag{A1.1}$$

no sistema da Fig.A1 obtém-se:

$$E - p = 0 \tag{A1.2}$$

$$v_d \delta g - mg = 0 \quad (\text{A1.3})$$

$$v_d \delta = m \quad (\text{A1.4})$$

$$\text{assim, } E = m \quad (\text{A1.5})$$

A massa aparente do corpo imerso em água m_i é dada por:

$$m_i = m_e - E \quad (\text{A1.6})$$

Como a densidade de massa varia com a temperatura, este valor deve ser lido durante o ensaio. O seguinte procedimento pode ser seguido: mede-se a massa de 5ml de água obtendo-se a relação g/ml. Sabendo-se que $1\text{m}^3 = 1000\text{ l}$ e aplicando conversões pertinentes, obtém-se o valor da densidade do líquido utilizado δ_w em kg/m^3 .

Com estes dados, o valor da densidade do material pode ser determinado utilizando-se a equação NBR (1.1) reescrita como: $\delta = \frac{m_e \cdot \delta_w}{m_e - m_i}$.

APÊNDICE 2 – INFORMAÇÕES ADICIONAIS

A2.1 Relação entre Tensão Eficaz e Tensão Média

Para o valor médio da tensão tem-se que:

$$\bar{U}_2 = \frac{1}{T} \int_0^T U_2(t) dt . \text{ Para } U_2(t) = U_{pico} \text{ sen}(wt) \text{ obtém-se}$$

$$\bar{U}_2 = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{pico} \text{ sen}(wt) dt$$

$$\text{Assim,} \quad \bar{U}_2 = \frac{2U_{pico}}{\pi} \quad (\text{A2.1})$$

Para o valor eficaz da tensão tem-se que:

$$U_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_2(t))^2 dt} . \text{ Para } U_2(t) = U_{pico} \text{ sen}(wt) \text{ obtém-se}$$

$$U_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_{pico} \text{ sen}(wt))^2 dt}$$

$$\text{Assim,} \quad U_2 = \frac{U_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (\text{A2.2})$$

De (A2.1) e (A2.2) define-se que $U_2 = 1,11\bar{U}_2$

A2.2 Valores Medidos

Nos ensaios realizados foram lidos o valor eficaz da tensão secundária através do voltímetro de valor eficaz, o valor eficaz da tensão secundária através do voltímetro de valor médio calibrado em valor eficaz e a potência através do wattímetro. A referência [24] apresenta a descrição dos instrumentos utilizados no ensaio. As leituras do valor eficaz obtidas através do voltímetro de valor médio são apresentadas na tabela A2.1.

Tabela A2.1: leituras do voltímetro de valor médio calibrado em valor eficaz.

Tabela 21	Tabela 24	Tabela 28	Tabela 30	
U_2 (V)	U_2 (V)	U_2 (V)	Epstein U_2 (V)	Indutor U_2 (V)
47,7	7,50	17,5	43	24
44,5	29,50	21,10	39,5	9,5
41,5	35,50	23,5	36,0	6,0
38,5	12,50	27,2	32,5	5,0
36,0	47,50	31		
33,5	17,00	33		
30,8	18,50	37		
28,5	23,00	38,5		
21,5	27,50	41,5		
18,0		42,5		
14,5		46,5		
11,3		48		
8,0				

A2.3 Instrumentos Convencionais Utilizados

A descrição dos equipamentos de medida convencionais e padronizados, conforme a norma NBR5161, estão na referência [24]. A figura A2 mostra estes equipamentos.



Fig. A2: Equipamentos convencionais e padronizados conforme a NBR5161, utilizados nos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BASTOS, João Pedro A.. *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. 2^a edição. Florianópolis: Editora da UFSC, 1992.
- [2] IPT: Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos. *Aços Carbono e Aços Silício para Fins Elétricos*. S. Paulo. 2001.
- [3] SOARES, Ronaldo Alves. *Estudo Comparativo de Ensaios de Chapa Única para Medidas de Perdas em Aços Elétricos*. São Paulo, 2001. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [4] BATISTELA, Nelson Jhoe. *Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício*. Florianópolis, 2001. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos – verificação das propriedades*, NBR5161. 1996.
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter- Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame*. ASTM A343. 1997.
- [7] JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. *Test Methods for Magnetic Steel Sheet and Strip*. JIS C 2550. 2000.
- [8] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Magnetic Materials - Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet and Strip by Means of an Epstein Frame*. IEC 404 – 2. 1996.
- [9] BAN,G.; BERTOTTI, G.. Frequency and Peak Induction Dependence of Eddy Current Losses in AlSiFe Magnetic Laminations. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, pp.3967-3969, sept. 1989.
- [10] BATISTELA, Nelson J.; MENDES, Filomena Barbosa R.; SADOWSKI, Nelson *et al.* A Strategy for Iron Losses Separation. In: PIERS (2004, Pisa).
- [11] HOFFMANN, Rodolfo; VIEIRA, Sônia. *Análise de Regressão: Uma Introdução a Econometria*. 2^a edição. São Paulo: hucitec, 1977.
- [12] LEHMANN, Charles H.*Geometria Analítica*. 6^a edição. Rio de Janeiro: Editora globo, 1987.
- [13] RUGGIERO, Márcia A. Gomes; LOPES, Vera Lúcia da Rocha. *Cálculo Numérico: aspectos teóricos e computacionais*. 2^a edição. São Paulo: Makron Books, 1996.
- [14] BATISTELA, Nelson J. ; SADOWSKI, Nelson; CARLSON, Renato *et al.* Caracterização Magnética de Lâminas de Aço ao Silício e Avaliação das Perdas no Ferro sob Vários Regimes de Indução. *Revista Controle & Automação da Sociedade Brasileira de Automática*, vol.13, no. 2, Maio/Agosto de 2002, pp. 156-164.

- [15] BERTOTTI, Giorgio. General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 24, p.621-630, jan.1988.
- [16] STREETER, Victor L.; WYLIE, E. Benjamim. *Mecânica dos Fluidos*. 7^a edição. São Paulo: Mcgraw Hill, 1982.
- [17] AMAR, M.; PROTAT, F. A Simple Method for the Estimation of Power Losses in Silicon Iron Sheets under Alternating Pulse Voltage Excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 30, p.942-944, mar. 1994.
- [18] FIORILLO, Fausto; NOVIKOV, Alexander. An Improved Approach to Power Losses in Magnetic Laminations under Nonsinusoidal Induction Waveform. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, p.2904-2910, sept. 1990.
- [19] FIORILLO, F.; NOVIKOV, A. Power Losses under Sinusoidal, Trapezoidal and Distorted Induction Waveform. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, p.2559-2561, sept. 1990.
- [20] LANCAROTTE, Marcelo S.; PENTEADO JR, Aderbal de Arruda. Prediction of Core Losses Increase under Sinusoidal an Non-sinusoidal Induction. In: ELECTRIMACS (isbn 972-98257-0-x: 1999). p. 129-134.
- [21] SIEVERT, J. The Measurement of Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel – Survey on Methods and Situation of Standards. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2000.
- [22] BERTOTTI, G. Physical Interpretation of Eddy Current Losses in Ferromagnetic Materials. Theoretical Considerations. *Journal of Applied Physics*, mar. 1985.
- [23] ACESITA. Aços ao Silício de Grão Orientado - Aços ao Silício de Grão Não Orientado. Catálogo do fabricante.
- [24] YOKOGAWA ELECTRIC WORKS, LTD. *The Instruction for 25cm Epstein Core Loss Tester Type B-EP-25*, 1968 (manual do equipamento).
- [25] KERCHNER, Corcoran. *Circuitos de Corrente Alternada*. Porto Alegre: Editora globo, 1973.
- [26] PROCOBRE: Instituto Brasileiro do Cobre. *Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas Efeitos e Soluções*.
- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Alternating-Current Magnetic properties of Materials at Power Frequencies Using Sheet-Type Test Specimens. ASTM A804/A804M. 1999.
- [28] www.brockhaus.net.
- [29] www.embraco.com.br.
- [30] www.acesita.com.br.
- [31] BROCKHAUS MESSTECHNIK. Manual do equipamento MPG100.