



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BENEDITO ANTONIO LUCIANO
UFPB-CCT-DEE**

**ESTUDO DE APLICAÇÕES DA LIGA $Fe_{78}B_{13}Si_9$ AMORFA
EM NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE
BAIXA POTÊNCIA**

Orientadores:

**Claudio Shyinti Kiminami, Dr.-Ing. (UFSCar)
Misael Elias de Moraes, Dr.-Ing. (UFPB)**

**CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
AGOSTO - 1995**

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BENEDITO ANTONIO LUCIANO

**ESTUDO DE APLICAÇÕES DA LIGA $Fe_{78}B_{13}Si_9$ AMORFA
EM NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE
BAIXA POTÊNCIA**

Tese apresentada à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - COPELE - da Universidade Federal da Paraíba - UFPB - em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia

ORIENTADORES: Claudio Shyinti Kiminami, Dr.-Ing. (UFSCar)
Misael Elias de Moraes, Dr.-Ing. (UFPB)

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
AGOSTO - 1995



L937e

Luciano, Benedito Antônio.

Estudo de aplicações da liga Fe78B13Si9 amorfa em núcleos de transformadores de baixa potência / Benedito Antônio Luciano. - Campina Grande, 1995.
115 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1995.
Referências.

"Orientação : Prof. Dr. Cláudio Shyinti Kiminami, Prof. Dr. Misael Elias de Moraes".

1. Transformadores. 2. Transformadores de Baixa Potência. 3. Processamento de Energia. 4. Tese - Engenharia Elétrica. I. Kiminami, Cláudio Shyinti. II. Moraes, Misael Elias de. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.314(043)

**ESTUDO DE APLICAÇÕES DA LIGA Fe B Si AMORFA EM
NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE BAIXA POTÊNCIA**

BENEDITO ANTONIO LUCIANO

Tese Aprovada em 18.08.1995



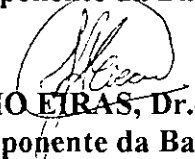
CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI, Dr.-Ing., UFSCar
Orientador



MISAEEL ELIAS DE MORAIS, Dr.-Ing., UFPB
Orientador



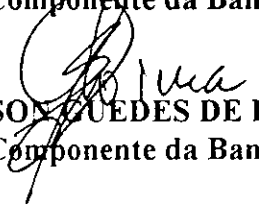
HENRIQUE ANTUNES CUNHA JÚNIOR, Dr.Ing., UFC
Componente da Banca



JOSÉ ANTONIO EIRAS, Dr.-Ing., UFSCar
Componente da Banca



WASHINGTON LUIS DE ARAUJO NEVES, Ph.D., UFPB
Componente da Banca



SEVERINO JACKSON GUEDES DE LIMA, Dr.Ing., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB

Agosto - 1995

**ESTUDO DE APLICAÇÕES DA LIGA Fe B Si AMORFA EM
NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE BAIXA POTÊNCIA**

BENEDITO ANTONIO LUCIANO

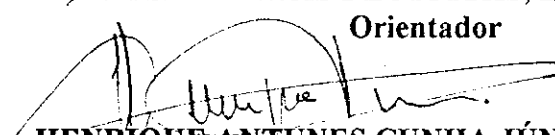
Tese Aprovada em 18.08.1995




CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI, Dr.-Ing., UFSCar
Orientador



MISAEEL ELIAS DE MORAIS, Dr.-Ing., UFPB
Orientador



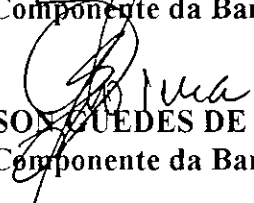
HENRIQUE ANTUNES CUNHA JÚNIOR, Dr.Ing., UFC
Componente da Banca



JOSÉ ANTONIO EIRAS, Dr.-Ing., UFSCar
Componente da Banca



WASHINGTON LUIS DE ARAUJO NEVES, Ph.D., UFPB
Componente da Banca



SEVERINO JACKSON GUEDES DE LIMA, Dr.Ing., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Agosto - 1995

<i>Agradecimentos</i>	i
<i>Resumo</i>	ii
<i>Abstract</i>	iii
<i>Lista de ilustrações e tabelas</i>	iv
<i>Simbologia e Abreviaturas</i>	viii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Objetivo, motivação e organização do trabalho	1
1.2 Contribuição da tese	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Introdução	4
2.2 As ligas amorfas: o que são e como produzi-las	4
2.3 Classificação e aplicações gerais na eletroeletrônica	6
2.4 Aplicações particulares em núcleos de transformadores	9
2.5 Modelamento e configurações do conjunto núcleo-bobinas	15
2.6 Perdas e eficiência do transformador	20
2.6.1 Perdas totais	20
2.6.2 Eficiência	23
2.7 Medidas elétricas e magnéticas	23
2.8 Necessidade do tratamento magnetotérmico	26
2.8.1 Tratamento magnetotérmico, segundo diferentes autores	27

3 PROJETO E REALIZAÇÃO	29
3.1 Introdução	29
3.2 Projeto do pré-protótipo: material e método	29
3.3 Cálculo das induções magnéticas pelo método das diferenças finitas	35
3.4 Realização do pré-protótipo	42
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRELIMINARES	45
4.1 Introdução	45
4.2 Ensaio experimental: antes do tratamento magnetotérmico	45
4.2.1 Determinação das resistências dos enrolamentos	45
4.2.2 Relação de tensões em vazio	47
4.2.3 Teste em carga nominal	48
4.2.4 Ensaio de curto-circuito	49
4.2.5 Ensaio de circuito-aberto	50
4.2.6 Tensão de alimentação (lado de baixa tensão) versus corrente de excitação	51
4.2.7 Histerese e corrente de excitação	53
4.4 Projeto e realização: resultados preliminares	57
5 O TRATAMENTO MAGNETOTÉRMICO	61

5.1	Introdução	61
5.2	Caracterização estrutural da liga Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉	62
5.3	Tratamento magnetotérmico	66
5.3.1	Análise do circuito magnético	66
5.3.2	Cálculo da corrente magnetizante	67
5.3.3	Realização dos isolamentos elétricos e térmicos	69
5.3.4	Características do forno e do controlador de temperatura	69
5.3.5	Atmosfera do tratamento	71
5.3.6	Calibração do forno	71
5.3	Caracterização estrutural da liga Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉ , como recebida e após o tratamento magnetotérmico	77
6	RESULTADOS APÓS O TRATAMENTO MAGNETOTÉRMICO	79
6.1	Introdução	79
6.2	Ensaio experimentais	79
6.2.1	Tensão de alimentação versus corrente de excitação	79
6.2.2	Discussão sobre os erros na medição da potência ativa	81
6.2.3	Determinação das características eletromagnéticas, a partir dos valores <i>V-I</i>	83
6.4	Comparação de desempenho	90
6.5	Discussões dos resultados	93
7	CONCLUSÕES	94
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
	APÊNDICE	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

AGRADECIMENTOS

Aos professores orientadores: Dr. Claudio Shyinti Kiminami e Dr. Misael Elias de Moraes, pelo apoio e incentivo.

Ao Dr. Ryusuke Hasegawa e à Allied Signal Inc. (USA), pela doação do material amorfo, fundamental para o desenvolvimento experimental do trabalho de tese, assim como pelas valiosas informações sobre o tratamento magnetotérmico.

À Indústria e Comércio de transformadores COSMO Ltda (Araras-SP), pela doação dos transformadores com núcleos de ferro-silício.

Ao CNPq-RHAE, processo institucional 610013/93-9, processo individual 460654/94-2, pela bolsa de curta duração, entre 12/0994 a 26/10/94, no Laboratório de Solidificação do DEMa/UFSCar.

À FAPESP, pelo suporte financeiro via processo N° 93/3804-8 .

Ao CCT e ao DEE, pelo apoio Institucional.

Aos colegas professores: Wellington S. Mota, Gurdip S. Deep, Edson Guedes, Moema S. de Castro, Washington Neves, Ricardo Buriti, João Tertuliano, José Homero, José Sérgio, José Gutembergue, Raimundo Freire, Talvanes Meneses, Rosa Tânia, Roberto Siqueira, Marcos Brasileiro, Roberto Homrich (UFRGS), Raimundo Nazareno (UFPA), Eurico Filho (UFPE), Pablo Alsina (UEPB) e Jomar Vasconcelos (CEFET-MA).

Ao eletrotécnico Edson Petrúcio de Oliveira.

Aos colegas do Laboratório de Solidificação do DEMa/UFSCar; particularmente, Antonio Flório e Flávio Politi .

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

À Francisca Fernandes Luciano (in memoriam): minha mãe, amiga e guia espiritual, e ao meu pai Pedro Antonio Luciano.

Ao professor Dr. Evandro Fachine (in memoriam): primeiro orientador deste trabalho de doutorado. Um colega que partiu, nos deixando uma lição de vida.

À minha esposa Vânia: amiga, companheira e incentivadora.
Aos meus filhos: Érika, Pablo e Ivã.

RESUMO

Esta tese apresenta um estudo sobre as aplicações da liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa em núcleos de transformadores, focalizando sobretudo a operação em vazio destes equipamentos, em comparação com transformadores comerciais que empregam em seus núcleos de materiais ferromagnéticos cristalinos. Para efeito de análise, partiu-se de um modelo equivalente do transformador, para discutir as perdas no núcleo, em vazio e em carga, destacando o efeito do material magnético sobre tais perdas e sobre a corrente de excitação do equipamento. Em termos práticos, um pré-protótipo de transformador monofásico de 100 VA, 220 V/ 110 V, 60 Hz, foi projetado e construído, para servir de base para a realização de um protótipo de transformador de 1,0 kVA, 220 V/ 110 V, 60 Hz, utilizando como material magnético para os respectivos núcleos a liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa. Os núcleos destes transformadores foram submetidos a um tratamento térmico, sob a ação de um campo magnético, numa atmosfera de argônio. A realização e a avaliação deste tratamento *magnetotérmico*, são apresentadas, incluindo o cálculo das induções magnéticas, empregando o método das diferenças finitas. Os resultados obtidos, com este tratamento, que teve por objetivo relaxar as tensões introduzidas durante o processo de confecção dos núcleos, confirmaram a melhoria nas propriedades magnéticas do material da liga amorfa. Esta relaxação estrutural foi confirmada pela realização de ensaios de Calorimetria Diferencial de Varredura, simulando as condições do tratamento magnetotérmico sobre os núcleos, analisando amostras do material amorfo como recebido do fabricante e após o tratamento ter sido realizado. Os ensaios comparativos diretos, de curto-circuito e de circuito aberto, mostraram que os transformadores projetados e construídos com núcleos de liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa são mais eficientes que os transformadores com núcleo de FeSi.

ABSTRACT

The object of this thesis is to evaluate the performance of transformer cores designed and built from the amorphous alloy $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$. A simple transformer equivalent circuit is used to carry out these investigations. The main focus is on the effect of the magnetic material on the total loss on the excitation current. A finite difference method is used to help the design of two single-phase transformer prototypes, with the following rated values: 100 VA and 1,0 kVA, 220V/110V, 60 Hz. The as-cast material structure were examined using X-ray diffractometer. These amorphous cores are annealed in an argon atmosphere, under a DC magnetic field applied along the ribbon length for inducing uniaxial anisotropy. The crystallization behaviour was examined by differential scanning calorimetry (DSC) and no one crystallization was observed. The achieved results are compared with test data obtained on two commercial silicon-steel transformers with the same rated values. It is shown amorphous cores are more efficient than silicon-steel cores.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E TABELAS

<i>Capítulo 2</i>	<i>Página</i>
Figura 2.1 - Diagrama de blocos representativo do processo de produção de fitas amorfas	5
Tabela 2.1 - Dados de algumas ligas amorfas comerciais	8
Tabela 2.2 - Desenvolvimento das ligas amorfas para uso em núcleos de transformadores	10
Tabela 2.3 - Tendência de redução das perdas nos núcleos de transformadores	11
Figura 2.2 - Redução das perdas nos núcleos, com a introdução das ligas amorfas	12
Tabela 2.4 - Quadro comparativo de materiais para núcleos de transformadores	13
Tabela 2.5 - Comparação das perdas em transformadores de distribuição, trifásicos, em função do material do núcleo	14
Tabela 2.6 - Comparação das perdas em transformadores de distribuição, monofásicos, em função do material do núcleo	15
Figura 2.3 - Núcleo com três colunas	16
Figura 2.4 - Esquema do transformador ideal	17
Figura 2.5 - Circuito equivalente de um transformador real	19
Figura 2.6 - Curvas de histerese para o aço ao silício GO e a liga Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉ amorfa	21
Figura 2.7 - Divisão das perdas em suas partes constitutivas	25
Tabela 2.6 - Valores típicos dos parâmetros temperatura, tempo e campo magnetizante	27
 <i>Capítulo 3</i>	
Figura 3.1 - Configuração geométrica do núcleo de material amorfo	31
Tabela 3.1 - Parâmetros básicos do projeto do pré-protótipo com núcleo de liga amorfa	31

Tabela 3.2 -	Valores projetados para o pré-protótipo com núcleo de liga amorfa	34
Figura 3.2 -	Malha de discretização do domínio sob estudo	37
Figura 3.3 -	Preenchimento do meio saturável	37
Figura 3.4 -	Preenchimento do meio condutor	38
Figura 3.5 -	Curva de magnetização dos materiais ferromagnéticos dos núcleos	38
Figura 3.6 -	Mapa das linhas de campo no interior do núcleo	41
Figura 3.7 -	Detalhe do material amorfo destinado à realização do núcleo	42
Figura 3.8 -	Conjunto núcleo-bobinas do pré-protótipo realizado	43
Figura 3.9 -	Pré-protótipo em sua forma final	43

Capítulo 4

Tabela 4.1 -	Medição das resistências dos enrolamentos do pré-protótipo	46
Tabela 4.2 -	Medição das resistências dos enrolamentos do transformador comercial	46
Tabela 4.3 -	Relações de tensões em vazio	48
Figura 4.1 -	Montagem para o ensaio de curto-circuito	50
Figura 4.2 -	Montagem para o ensaio de circuito aberto	51
Figura 4.3 -	Montagem para a obtenção da relação: tensão versus corrente de excitação	52
Tabela 4.4 -	Tensão de alimentação versus corrente de excitação	52
Figura 4.4 -	Tensão de alimentação em função da corrente de excitação	53
Figura 4.5 -	Montagem para a obtenção das formas de ondas da tensão, corrente de excitação e laço de histerese	54
Figura 4.6 -	Formas de ondas da tensão, corrente de excitação e laço de histerese	55
Figura 4.7 -	Análise percentual das componentes harmônicas da corrente de excitação	56
Tabela 4.5 -	Valores do projeto versus valores obtidos com o pré-protótipo real	58

Capítulo 5

Figura 5.1 -	DSC de uma amostra da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, antes do tratamento magnetotérmico	64
Figura 5.2 -	DSC de uma amostra da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, após do tratamento magnetotérmico	65
Figura 5.3 -	Análise do circuito magnético do núcleo de liga amorfa sob campo magnetizante	66
Figura 5.4 -	Sistema empregado no tratamento magnetotérmico	70
Figura 5.5 -	Ciclo térmico para calibração do forno com amostras de aço	73
Figura 5.6 -	Ciclo térmico para o tratamento do material amorfo do núcleo do pré-protótipo de 100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz	74
Figura 5.7 -	Ciclo térmico para o tratamento do núcleo de liga amorfa do protótipo de 1,0 kVA, 220 V/ 110V, 60 Hz	75
Figura 5.8 -	Núcleos de liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, após do tratamento magnetotérmico	76
Figura 5.9 -	Comportamento do calor específico da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, como recebida e após do tratamento magnetotérmico	78

Capítulo 6

Tabela 6.1 -	Valores eficazes da tensão e da corrente de excitação, a 60 Hz	80
Figura 6.1 -	Tensão de alimentação versus corrente de excitação, a 60 Hz	81
Tabela 6.2 -	Erros relativos na medição das perdas no núcleo	82
Figura 6.2 -	Principais dimensões geométricas do núcleo do protótipo de 1-kVA	84
Tabela 6.3 -	Indução magnética máxima e intensidade de campo magnético no núcleo do protótipo de 1-kVA, a 60 Hz	85
Figura 6.3 -	Curvas de magnetização $B-H$, a 60 Hz, antes e depois do tratamento magnetotérmico	86
Figura 6.4 -	Permeabilidade relativa do material do núcleo, antes e depois do tratamento magnetotérmico	87

Figura 6.5 -	Indução magnética versus potência de excitação, por kg, a 60 Hz	88
Figura 6.6 -	Impedância do ramo de magnetização do núcleo versus corrente de excitação	89
Tabela 6.4 -	Ensaio comparativos entre o protótipo de transformador com núcleo de material amorfo e um transformador comercial com núcleo de FeSi	90
Tabela 6.5 -	Dados comparativos entre valores de projeto e valores experimentais	91
Figura 6.7 -	Forma final do transformador de 1-kVA com núcleo de liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$	92
Figura 6.8 -	Transformador comercial de 1-kVA, com núcleo de FeSi	92

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS
Caracteres Latinos:

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>
\vec{A}	Vetor potencial magnético	-
A_c	Área da coluna central do núcleo de material ferromagnético	cm ²
A_j	Área da janela do núcleo ferromagnético	cm ²
A_n	Área do núcleo ferromagnético	cm ²
at.	Atômico	-
B	Boro	-
B	Indução magnética	T
\vec{B}	Vetor indução magnética	-
B_m	Valor de pico da indução magnética	T
B_s	Indução de saturação	T
B_x	Componente cartesiana da indução magnética segundo a direção x	T
B_y	Componente cartesiana da indução magnética segundo a direção y	T
C	Carbono	
C	Capacitância	F
CA	Corrente alternada	-
CC	Corrente contínua	-
cm	Centímetro	-

Co	Cobalto	-
Cr	Cromo	-
d_a	Densidade da liga amorfa	g/cm^3
d_{cu}	Diâmetro do fio de cobre	cm^2
div	Operador divergente	-
E	Campo elétrico	V/m
\vec{E}	Vetor campo elétrico	-
e	Espessura da fita de liga amorfa	mm
$esp.$	Espiras	-
F	Faraday	-
f	Frequência	Hz
Fe	Ferro	-
F_m	Força magnetomotriz	A
GO	Grão orientado	-
H	Intensidade de campo magnético	A/m
\vec{H}	Vetor intensidade de campo magnético	-
H_c	Força coercitiva	A/m
Hf	Háfnio	-
H_m	Intensidade de campo magnetizante	A/m
H_{mj}	Intensidade de campo magnético no interior da janela do núcleo	A/m
i	Corrente elétrica	A
I_m	Corrente magnetizante, em valor eficaz	A
I_{nom}	Corrente nominal, em valor eficaz	A

I_{rms}	Corrente, em valor eficaz	A
I_0	Corrente de excitação, em valor eficaz	A
I_1	Corrente do circuito primário, em valor eficaz	A
I_2	Corrente do circuito secundário, em valor eficaz	A
J	Densidade de corrente	A/mm ²
\vec{J}	Vetor densidade de corrente	-
\vec{k}	Vetor unitário perpendicular ao plano xy	-
k_e	Fator de empilhamento do material amorfo	-
k_j	Fator de espaçamento da janela	-
k_h	Coefficiente de histerese	-
k_p	Fator de preenchimento	-
L_a	Largura da fita do material amorfo	cm
L_c	Largura da coluna central do núcleo de material amorfo	cm
l_m	Comprimento médio do circuito magnético do núcleo de material amorfo	cm
l_j	Altura da janela	cm
Mo	Molibdênio	-
N	Número de espiras	-
N_1	Número de espiras do enrolamento primário	-
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário	-
Nb	Nióbio	-
Ni	Níquel	-
N_m	Número de espiras do enrolamento magnetizante	-

R	Resistência elétrica	Ω
R_p	Resistência representativa das perdas ativas no núcleo	Ω
R_1	Relutância da coluna central e metade de cada uma das culatras do núcleo de material amorfo	A/Wb
R_2	Relutância das colunas laterais do núcleo de material amorfo	A/Wb
R_d	Relutância de dispersão	A/Wb
rot	Operador rotacional	-
S	Potência aparente	VA
S_{cu}	Seção magnética do cobre	mm ²
S_{geo}	Seção geométrica da coluna central do núcleo de material amorfo	cm ²
Si	Silício	-
S_{mag}	Seção magnética da coluna central do núcleo de material amorfo	cm ²
S_p	Seção geométrica do condutor primário	mm ²
S_s	Seção geométrica do condutor secundário	mm ²
T	Temperatura	°C ou K
t	Tempo	s
TC	Transformador de corrente	-
T_c	Temperatura de Curie	°C
TC's	Transformadores de corrente	-
TP	Transformador de potencial	-

TP's	Transformadores de potencial	-
t_1	Temperatura inicial	°C
t_2	Temperatura final	°C
T_x	Temperatura de cristalização	°C
V	Diferença de potencial	V
V	Potencial escalar	-
V_1	Tensão do primário	V
V_2	Tensão do secundário	V
w_a	Perdas anômalas	W/kg
w_e	Perdas por correntes parasitas	W/kg
w_h	Perdas por histerese	W/kg
w_t	Perdas totais	W/kg
X_m	Reatância de magnetização do núcleo	Ω
X_1	Reatância de dispersão do primário	Ω
X'_2	Reatância de dispersão do secundário, refletida ao primário	Ω
x	Coefficiente de Steinmetz	-
Z_1	Impedância do primário	Ω
Z_2	Impedância do secundário	Ω
Zr	Zircônio	-
<i>Caracteres gregos:</i>		
Φ_d	Fluxo de dispersão	Wb
Φ_m	Fluxo magnetizante	Wb

Φ_2	Fluxo nas colunas laterais	Wb
ϕ	Fluxo magnético	Wb
η	Eficiência do transformador	-
φ	Ângulo do fator de potência	-
λ_s	Magnetostricção de saturação	ppm
μ	Permeabilidade magnética	T.m/A
ρ	Resistividade do material	$\Omega.m$

Capítulo 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Objetivo, motivação e organização da tese

O objetivo deste trabalho de tese é apresentar uma contribuição ao estudo das aplicações de ligas amorfas em núcleos de transformadores, a partir de projetos, realização e ensaios sobre protótipos de transformadores monofásicos com núcleos de liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, sob duas condições: antes e depois de submetidos a tratamento magnetotérmico.

A motivação e a relevância do tema escolhido para o desenvolvimento desta tese, estão ligados diretamente à redução das perdas no núcleos de transformadores, com vistas ao desenvolvimento de transformadores de maior eficiência, com reflexos diretos na conservação de energia e na conservação do meio ambiente.

Em termos de organização, a presente tese está subdividida da seguinte forma:

No *Capítulo 1* é apresentada uma *Introdução Geral*, destacando o objetivo, a motivação, a organização e as contribuições da tese.

O *Capítulo 2* trata de uma breve revisão da literatura sobre o tema da tese. Partindo-se de uma apresentação sumária do que são as ligas amorfas, como produzi-las e suas aplicações gerais na eletroeletrônica, é dedicada ênfase particular às aplicações destes novos materiais em núcleos de transformadores.

No *Capítulo 3*, parte-se do modelo básico de um transformador, para apresentar uma discussão sobre o projeto e a realização de um pré-protótipo de transformador monofásico, 100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz, utilizando como material ferromagnético do núcleo uma liga amorfa do sistema ternário ferro-boro-silício ($\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$).

Como o interesse principal é o estudo do desempenho do material do núcleo do transformador, o maior destaque foi dado às perdas no circuito magnético do equipamento. Neste particular, para efeito de análise, empregou-se o modelo de circuito equivalente, baseando-se em princípios físicos e no modelo matemático da teoria clássica dos circuitos acoplados magneticamente.

Em termos práticos, são apresentados e discutidos os principais aspectos relativos a um pré-protótipo de transformador monofásico de 100 VA, 220 V/110V, 60 Hz, projetado e construído com núcleo de liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa. O desempenho deste transformador é comparado com um outro de igual capacidade, construído com núcleo de material ferromagnético cristalino. Os resultados comparativos são apresentados antes e depois da realização do tratamento magnetotérmico sobre o núcleo de material amorfo.

Ainda no *Capítulo 3*, no item 3.5, é apresentado um estudo de cálculo de campo magnético, baseado no método das diferenças finitas, objetivando analisar o comportamento dos núcleos dos transformadores em termos da indução magnética em seu interior, em função do material ferromagnético empregado.

Os resultados experimentais preliminares, antes da realização do tratamento magnetotérmico sobre o material amorfo do núcleo, são apresentados no *Capítulo 4*, com destaque para os procedimentos de caracterização estrutural do material bruto de têmpera e para os ensaios de determinação dos parâmetros longitudinais e transversais do circuito equivalente do transformador.

No *Capítulo 5* são apresentadas as análises e as discussões dos detalhes práticos da implementação do tratamento magnetotérmico, desenvolvido particularmente para os núcleos do pré-protótipo de 100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz, e para o protótipo de transformador monofásico de 1,0 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz, ambos construídos com núcleo de liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa.

Os desempenhos dos transformadores, após a realização do tratamento magnetotérmico sobre os núcleos de liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa, são apresentados e avaliados no *Capítulo 6*, assumindo como base de comparação dois transformadores

comerciais, com núcleos de FeSi, de potência aparente e relações de tensão idênticas aos transformadores com núcleos de material amorfo referidos no *Capítulo 5*.

As principais conclusões deste trabalho de tese estão apresentadas, de forma sintética, no *Capítulo 7*. E como uma contribuição final, no *Capítulo 8* são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

1.2 Contribuições da tese

No entendimento do autor, as principais contribuições deste trabalho de tese são as seguintes:

1) Um método para a realização do recozimento do material amorfo do núcleo, sob a ação de um campo magnetizante, estando o núcleo já enrolado em sua forma final. A este tratamento, que no presente trabalho o autor atribuiu o nome de *tratamento magnetotérmico*, corresponde na língua inglesa ao termo *annealing*,

2) Uma forma sistemática de apresentar as etapas de projeto, realização, ensaios e análises dos resultados relativos a transformadores monofásicos de baixa potência com núcleos de liga amorfa, antes e depois da realização do tratamento magnetotérmico.

3) Apresentar uma discussão sobre as perdas no núcleo de material amorfo, partindo de resultados experimentais, da corrente de excitação e da análise de suas componentes harmônicas.

Adicionalmente, como decorrência dos estudos teóricos e experimentais da pesquisa desenvolvida durante a elaboração desta tese, foram publicados 13 (treze) trabalhos, cujas sinopses estão apresentadas no *Apêndice*.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada numa breve revisão da literatura sobre as etapas mais significativas no tocante ao desenvolvimento das ligas amorfas no campo da eletroeletrônica, em particular no que diz respeito às aplicações em núcleos de transformadores de distribuição de energia elétrica. Por todo o capítulo é discutido o emprego das ligas amorfas em comparação aos materiais ferromagnéticos cristalinos, tradicionalmente utilizados nos núcleos destes equipamentos, com destaque para a redução das perdas no núcleo pelo uso do material amorfo, sobretudo após a realização do tratamento magnetotérmico.

2.2 Ligas amorfas: o que são e como produzi-las

As ligas amorfas formam um grupo de materiais metálicos não-cristalinos, que se caracterizam por não possuírem, à longa distância, uma estrutura atômica ordenada. O princípio básico de obtenção destes materiais é o da solidificação rápida de metais, a partir de seu estado fundido. Nestes processos, as taxas de resfriamento devem ser elevadas o suficiente, de forma a inibir a cristalização. Desta forma, em valores típicos, na faixa de 10^4 a 10^8 K/s, a solidificação ocorre de forma abrupta, sem que haja tempo para mudanças microestruturais [ANANTHARAMAN, T. R. e SURYANARAYANA, C. (1987)]. Assim, o material atinge o seu estado sólido, mantendo uma estrutura atômica desordenada, semelhante aos líquidos e aos vidros cerâmicos.

Embora as composições químicas das ligas amorfas termicamente estáveis já fossem conhecidas em meados da década dos setentas, as técnicas de obtenção destes materiais só produziam fitas de uns poucos milímetros de largura. Esta limitação, entretanto, passou a ser superada a partir da produção contínua de ligas amorfas, em relativa larga

escala, pelo processo *melt-spinning* e quando NARASIMHAN (1979) desenvolveu e patenteou o processo de *fundição em fluxo planar* (*Planar Flow Casting, PFC*), tornando possível a produção de fitas mais largas e suas aplicações em núcleos de transformadores. Nestes processos, a liga fundida é depositada na forma de jato contínuo sobre um substrato de um volante refrigerado que gira a alta velocidade. Desta forma, o material fundido é solidificado rapidamente ao entrar em contato com o substrato, desprendendo-se do mesmo a uma velocidade tangencial de cerca de 30 km/h, para em seguida ser enrolado de forma contínua, conforme ilustra a Figura 2.1.

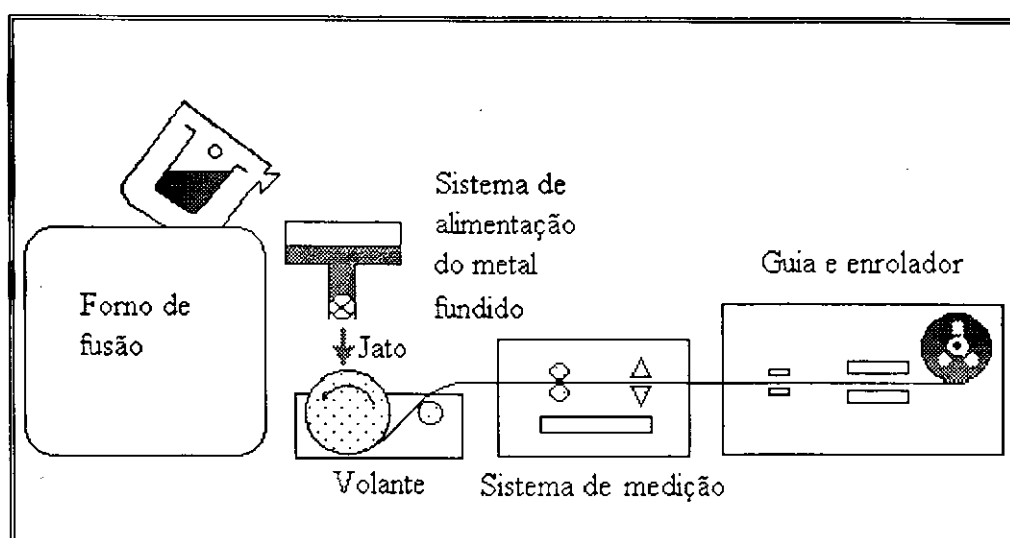


Figura 2.1 - Diagrama de blocos representativo do processo de produção de fitas amorfas.

Atualmente, as técnicas empregadas na produção de ligas amorfas são bastante variadas, podendo ser divididas em técnicas por coquilhamento, atomização e fusão superficial por laser. Nestas diversas técnicas, onde o metal líquido é submetido a taxas de resfriamento de milhares de graus Kelvin por segundo, produtos de morfologia variada podem ser obtidos, como pós de dezenas de microns, fitas de alguns centímetros de largura e dezenas de metros de comprimento, além de camadas superficiais de dezenas de microns de espessura [KIMINAMI (1991)].

Segundo LUBORSKY (1983), o primeiro registro de uma liga metálica não-cristalina, obtida por deposição de vapor, foi feito por KRAMER (1937). Anos depois,

BRENNER et alii (1950) reportavam a obtenção, por eletrodeposição, de ligas metálicas amorfas à base de níquel-fósforo. O próximo passo significativo no desenvolvimento das ligas amorfas foi a publicação do trabalho do físico soviético GUBANOV (1960), que demonstrou a possibilidade de existência do ferromagnetismo nas ligas amorfas e mostrou como realizar o cálculo da temperatura de Curie destes materiais, assumindo uma função de distribuição radial específica dos átomos em torno de um dado átomo. A concretização experimental da previsão de Gubanov se deu através do professor POL DUWEZ e seus colaboradores, no Instituto de Tecnologia da Califórnia, Pasadena, USA [DUWEZ (1960)].

Entretanto, do ponto de vista de aplicações práticas, a liga obtida, $Fe_{75}P_{15}C_{10}$, apresentava a desvantagem de ser bastante quebradiça. Esta desvantagem, porém, começou a ser superada quando CHEN e POLK (1974) introduziram elementos como o silício¹ e o alumínio ao sistema. A partir dessa constatação prática, os metalurgistas de todo o mundo procuraram desenvolver estudos sobre estes novos materiais, buscando estabelecer os fundamentos de sua estabilidade e pesquisando as suas propriedades originais.

De acordo com NG et alii (1991), a fórmula geral, definida na patente de CHEN e POLK (1974), para as ligas amorfas termicamente estáveis é a seguinte: $M_aY_bZ_c$, onde **M** é um ou mais metais do grupo constituído pelo ferro, níquel, cobalto, vanádio e cobre; **Y** representa elementos como o fósforo, boro e carbono; **Z** representa elementos como o alumínio, silício, antimônio, estanho, germânio, índio e berilo; enquanto as letras *a*, *b* e *c* representam os percentuais atômicos. A soma de *a*, *b* e *c* é igual a 100 e suas faixas são: 60 a 90, 10 a 30 e 0,1 a 15, respectivamente.

2.3 Classificação e aplicações gerais na eletroeletrônica

Em termos de classificação, é comum classificar as ligas amorfas em três grupos de combinações metal-metalóides caracterizados, enquanto materiais magneticamente

¹ A adição do silício tende a estabilizar a estrutura ccc da liga à base de ferro, aumentando a sua permeabilidade magnética e reduzindo as perdas específicas. Afinal, o silício, enquanto material semiconductor, aumenta a resistividade da liga.

moles, pela indução de saturação (B_s), coeficiente de magnetostricção (λ_s) e por faixa de frequência de aplicação:

a) À base ferro: $1,4 \text{ T} < B_s < 1,7 \text{ T}$ e $\lambda_s \sim 30 \cdot 10^{-6}$.

De composição básica em torno de 80% at. de ferro e cerca de 20% at. de metalóides (fósforo, boro, carbono ou silício), as perdas apresentadas por tais ligas são suficientemente baixas para que sejam indicadas à realização de circuitos magnéticos na frequência industrial, de 50 Hz a 10 kHz. Dentre as aplicações eletroeletrônicas destas ligas destacam-se: os transformadores de distribuição [NG et alii (1991)], os transformadores para aeronaves [RASKIN e SMITH (1983)], transformadores para instrumentos [MILKOVIC et alii (1977)], [SOINSKI et alii (1988)], fontes chaveadas [BOLL e WARLIMONT (1981)], [HILZINGER (1985)], transdutores [MEYDAN (1981)], blindagem magnética [GÜNTHERRODT (1985)], [RASKIN e DAVIS (1981)] e máquinas elétricas [MISCHLER et alii (1981)], [JANSEN e PROFUMO (1992)].

b) À base de ferro-níquel: $0,7 \text{ T} < B_s < 1,0 \text{ T}$ e $\lambda_s \sim 10 \cdot 10^{-6}$.

De composição básica em torno de 80 % at. de ferro-níquel e em média 20 % at. de metalóides (fósforo, boro, silício ou molibidênio), as melhores aplicações destas ligas estão situadas na faixa de 10 kHz a 50 kHz, onde apresentam perdas inferiores àquelas do item anterior. Alguns exemplos de aplicações das ligas à base de ferro-níquel são: transdutores [MOHRI e KOREKODA (1978)], blindagem magnética, linhas de atraso e alarme antifurto [HILZINGER e WARLIMONT (1990)], [LUBORSKY (1977)].

c) À base de cobalto: $0,5 \text{ T} < B_s < 0,8 \text{ T}$ e $\lambda_s \sim 10^{-6}$.

Apesar de apresentarem baixo valor para a indução de saturação, as ligas amorfas à base de cobalto são materiais magneticamente moles que apresentam propriedades magnéticas também importantes em altas frequências: magnetostricção quase zero, resistência à fadiga e corrosão, além de baixas perdas por histerese e por correntes parasitas. Neste particular, estas ligas amorfas competem com a maioria dos materiais magneticamente duros, na faixa de frequência de 50 kHz a 200 kHz. Além das

aplicações comuns às ligas de ferro-níquel, as ligas à base de cobalto também são empregadas em amplificadores magnéticos, filtros ativos, transformadores ressonantes, moduladores magnéticos, aceleradores lineares, transdutores, sensores, magnetômetros, além de cabeçotes de gravação e reprodução de áudio e vídeo [RASKIN e SMITH (1983)], [BOLL e WARLIMONT (1981)].

A seguir, tomando como base os principais parâmetros elétricos, magnéticos e térmicos, são apresentados na Tabela 2.1, valores típicos de algumas ligas amorfas atualmente produzidas e comercializadas:

Tabela 2.1 - Dados de algumas ligas amorfas comerciais [FISH (1990)], [Allied-Signal (1987)].

Grupo	Composição	B_s (T)	H_c (A/m)	T_c (°C)	T_x (°C)	ρ ($\mu\Omega.cm$)	λ_s (ppm)
Fe-B	Fe ₈₀ B ₂₀	1,57	8,0	374	390	140	-
	Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉	1,56	4,0	415	550	137	27
	Fe ₇₇ Cr ₂ B ₁₆ Si ₅	1,41	-	358	535	138	20
	Fe _{81,5} B ₁₃ Si _{3,5} C ₂	1,61	6,4	370	480	125	-
Fe-Ni	Fe ₄₀ Ni ₄₀ P ₁₄ B ₆	0,75	7,0	250	-	180	-
	Fe ₄₀ Ni ₃₈ Mo ₄ B ₁₈	0,88	-	353	410	138	12
	Fe ₃₉ Ni ₃₉ Mo ₄ B ₁₂ Si ₆	0,75	-	260	450	135	8
Co	Co ₆₉ Fe ₄ Ni ₁ Mo ₂ B ₁₂ Si ₁₂	0,70	-	365	520	136	< 1
	Co ₆₆ Fe ₄ Ni ₁ B ₁₄ Si ₁₅	0,55	-	205	550	142	< 1
	Co ₆₆ Fe ₄ Mo ₂ B ₁₂ Si ₁₆	0,55	-	250	500	135	< 0,3

Em suma, as ligas amorfas à base de Fe-Si, Fe-Ni e Fe-Co apresentam um grande potencial de aplicações na eletroeletrônica, em praticamente todos os tipos de

equipamentos magnéticos: nos eletrônicos, as propriedades são comparáveis às tradicionais ligas comerciais com a vantagem de um custo muito menor, e em aplicações eletrotécnicas, como em máquinas elétricas e transformadores [JOHNSON et alii (1982)], as ligas amorfas à base de Fe-Si competem com as tradicionais ligas cristalinas de Fe-Si, por apresentarem menores perdas em W/ kg [LUBORSKY et alii (1978)], [LUCIANO e KIMINAMI (1992)].

Finalizando este enfoque geral sobre as ligas amorfas, apresentado de forma sumária, um comentário adicional: atualmente, além dos EUA (Allied-Signal Inc.) e Alemanha (Vacuumschmelze GmbH), outros países também já produzem estes materiais, como, por exemplo, o Japão, a Rússia [MOLITOV e SADCHIKOV (1992)] e o Brasil, onde os pioneiros na produção de ligas amorfas ferromagnéticas por resfriamento rápido, usando a técnica *melt-spinnig*, foram o Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP) e o Laboratório de Tecnologia Mecânica do Centro de Tecnologia, no Campus I, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

2.4 Aplicações particulares em núcleos de transformadores

Atualmente, o mercado dos chamados materiais magneticamente moles, destinados a núcleos de transformadores pode ser dividido em quatro grandes famílias: os aços elétricos, as ligas FeNi e FeCo, os ferrites e as ligas amorfas.

Cronologicamente, o desenvolvimento das ligas amorfas potencialmente aplicáveis em núcleos de transformadores teve início em 1975, porém a introdução no mercado destes materiais só veio a ocorrer em 1976.

Este desenvolvimento cronológico, até 1980, ano da introdução da liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. - Desenvolvimento das ligas amorfas para núcleos de transformadores [FISH (1990)].

Composição (% at.)	$Fe_{80}B_{20}$	$Fe_{82}B_{12}Si_6$	$Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$	$Fe_{78}B_{13}Si_9$
Ano de introdução no mercado	1976	1978	1979	1980
Indução de saturação (T)	1,60	1,61	1,61	1,58
Força Coercitiva (A/m, <i>as-cast</i>)	8,0	-	6,4	4,0
Força Coercitiva (A/m, <i>annealed</i>)	-	2,4	3,0	1,6
Temperatura de Curie (°C)	374	374	370	420
Temperatura de Cristalização (°C , 20 K/ min)	390	472	480	560

A liga $Fe_{80}B_{20}$ (METGLAS 2605) foi a primeira liga do sistema binário Fe-B a apresentar indução de saturação superior a 1,5 Tesla. A liga subsequente, $Fe_{82}B_{12}Si_6$ (METGLAS 2605S), obtida a partir do sistema ternário Fe-B-Si, mostrou-se termicamente mais estável que a liga $Fe_{80}B_{20}$, apresentando porém sérios problemas de cristalização e irregularidades superficiais. Para superar esta limitação, a liga $Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$ (METGLAS 2605SC) foi introduzida em 1978 e segundo DAVIS e RASKIN (1981), com esta liga os técnicos da Allied-Signal Inc. (USA) construíram o primeiro transformador com núcleo de metal amorfo, em escala comercial: um transformador de 15 kVA, com núcleo toroidal, projetado por MAS (1980) e construído no Laboratório Lincoln do Instituto Tecnológico de Massachusetts (USA).

Ainda de acordo com aqueles autores, o transformador com núcleo de material amorfo foi confrontado com um transformador comercial com núcleo de aço-silício de igual potência nominal. Realizados os ensaios comparativos, com potência de saída de até 30 kVA, os resultados obtidos foram amplamente favoráveis ao transformador com núcleo de material amorfo, particularmente no que toca às perdas e à corrente de excitação. Houve uma redução de 60% nas perdas totais (87,5% nas perdas do núcleo e

21% nas perdas do cobre) e a corrente de excitação foi reduzida de 2,5 A para 0,12 A. Entretanto, no que diz respeito ao peso, o transformador com núcleo de material amorfo apresentou um aumento de 15% com relação ao seu concorrente.

Particularmente, comparando-se as composições apresentadas na Tabela 2.1, percebe-se que a liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$ (METGLAS 2605S-2) é a que no conjunto de propriedades se mostra mais adequada ao uso em núcleos de transformadores de distribuição. Esta liga, conforme BAILEY et alii (1986), foi empregada no primeiro transformador de distribuição com núcleo de metal amorfo instalado nos EUA.

Atualmente, existem no mercado ligas amorfas à base de ferro-silício, ferro-níquel e ferro cobalto, nas mais variadas composições. Dentre estas, as de composições básicas em torno de 80% at. de ferro e 20% at. de metalóides são as que reúnem características mais adequadas às aplicações em núcleos de transformadores que operam na frequência industrial. Esta constatação provém de estudos experimentais, realizados com diversas composições, onde, em particular, a liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ tem sido aquela que vem demonstrando melhor desempenho [FISH (1990), NG et alii (1991), MASUMOTO (1994)].

A tendência observada nos projetos de transformadores e nas próprias ligas amorfas tem sido reduzir as perdas; conforme apresentado no trabalho de SCHULZ et alii (1988) e de acordo com o levantamento feito por LOWDERMILK et alii (1989), reproduzido na Tabela 2.3, tomando como base um transformador de distribuição de 25 kVA.

Tabela 2.3 - Tendência de redução das perdas nos núcleos de material amorfo.

Ano	Perdas no núcleo (W)
1982	35
1985	28
1986	18
1989	16

Esta tendência de redução das perdas no núcleo dos transformadores, com a introdução das ligas amorfas, também resultou em melhorias tecnológicas nos materiais cristalinos, propiciando o desenvolvimento de aços-silício mais eficientes, conforme pode ser observado na ilustração da Figura 2.2.

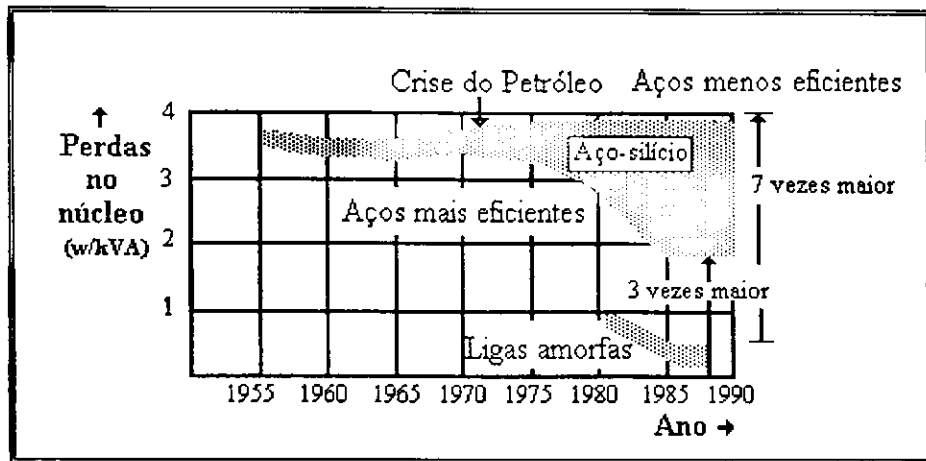


Figura 2.2. - Redução das perdas nos núcleos, com a introdução das ligas amorfas [CURRAN (1989)].

Assim, no rastro desta corrida tecnológica e disputa de mercado, surgiram os aços-silício de grãos super orientados, as chapas HiB (de alta permeabilidade) e as chapas ranhuradas, que são chapas HiB com tratamento superficial por meio de raio laser.

Sobre este assunto, a Tabela 2.4 apresenta um quadro bastante significativo, onde estes três tipos de materiais são confrontados, tomando como referência um transformador hipotético de 100 kVA, 50 Hz [BAVAY (1989), GIANNASTASIO et alii (1989) e VICAUD (1986)].

Tabela 2.4 - Quadro comparativo de materiais para núcleos de transformadores.

Parâmetros Comparativos	Chapa HiB 23	Chapa ranhurada 23	Liga amorfa Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉
Massa do circuito magnético (kg)	150	150	200
Indução Magnética (T)	1,7	1,7	1,4
Perdas no Núcleo (W/kg)	0,86	0,81	0,15
Fator de empilhamento	0,96	0,96	0,85

O que a Tabela 2.4 evidencia são as baixas perdas no núcleo de material amorfo. Entretanto, devido aos baixos valores da indução de saturação e do fator de empilhamento (relação entre o espaço ocupado pelo material magnético e o espaço total ocupado pelo material empilhado), o núcleo de liga amorfa apresenta maior peso e volume que aqueles de materiais cristalinos. Em termos de projeto, volume e peso são fatores que devem ser considerados, tanto em transformadores quanto em máquinas elétricas rotativas. Nestes equipamentos, as perdas nos enrolamentos podem ser maiores ou menores que nos núcleos de material cristalino tradicional (aço-silício), dependendo do projeto [BOYD et alii (1984)], [ALEXANDROV et alii (1987)], [SCHULZ et alii (1988)].

Nestes projetos, uma das maiores dificuldades encontrada pelo projetista são as propriedades mecânicas do material amorfo e a necessidade da realização de tratamento térmico após a confecção do núcleo, para que o mesmo alcance seu potencial pleno de menores perdas e potência de excitação [NG et alii (1991)]. Apesar destas dificuldades, os benefícios potenciais dos transformadores de distribuição com núcleo de material amorfo (TDMA) têm motivado esforços no sentido de aplicações extensivas destes equipamentos.

De acordo com dados do início de 1993, publicados pela Revista Eletricidade Moderna (número 240, março de 1994), o total de TDMA já ultrapassa cento e vinte e cinco mil unidades. Destas, a maioria está instalada nos EUA e mais de trinta e dois mil

estão instaladas no Japão e outros países como a Alemanha, a Irlanda, a Itália, a Polônia, o Reino Unido e o Canadá. Segundo HASEGAWA (1991), na Europa, o tamanho médio dos transformadores de distribuição é maior que nos EUA e no Japão. Convencionalmente, os transformadores de distribuição europeus são baseados nos tipos núcleo empilhado; enquanto na maioria dos modelos japoneses os TDMA são fabricados seguindo a tecnologia do núcleo enrolado [NG et alii (1991)].

Em termos de potência nominal, nos dias atuais, já são fabricados TDMA monofásicos de até 100 kVA e trifásicos de até 2,5 MVA. Para efeito de comparação, tomando como base valores fornecidos pela Allied Signal, Inc. (USA), são apresentados nas Tabelas 2.5 e 2.6 os valores das perdas no núcleo e das perdas nos enrolamentos de transformadores de distribuição, confrontando os materiais do núcleo: aço-silício versus metal amorfo.

Tabela 2.5 - Comparação de perdas em transformadores de distribuição, trifásicos, em função do material do núcleo [HASEGAWA (1991)].

Potência do Transformador (kVA, 3 ϕ)	Perdas no núcleo (W)	Perdas no núcleo (W)	Perdas no cobre (W)	Perdas no cobre (W)
	Aço-silício	Liga amorfa	Aço-silício	Liga amorfa
100	180	55	1 750	1 648
160	210	90	3 100	2 954
250	310	130	3 500	3 440
400	415	160	4 600	4 625
630	575	220	6 000	5 835
1 000	1 129	374	5 983	5 626
2 500	2 251	843	13 234	13 401

Tabela 2.6- Comparação de perdas em transformadores, monofásicos, em função do material do núcleo [HASEGAWA (1991)].

Potência do Transformador (kVA, 1 ϕ)	Perdas no núcleo (W)		Perdas no cobre (W)	
	Aço-silício	Liga amorfa	Aço-silício	Liga amorfa
10	29	12	111	102
25	57	16	314	330
50	87	29	462	455
75	122	37	715	715
100	162	49	933	944

Diante do exposto até então, fica patente o melhor rendimento dos TDMA. Entretanto, segundo NG et alii (1991), o custo inicial destes transformadores são cerca de 25 a 50% mais elevados do que os transformadores com núcleo de aço-silício comercializados atualmente. Por outro lado, como contra ponto ao custo inicial relativamente elevado, os TDMA oferecem o ganho econômico proporcionado pela redução das perdas, 24 horas por dia, ao longo dos 30 anos ou mais de vida útil. Assim, levando em conta o custo total, somando-se os custos das perdas em carga, os custos das perdas em vazio e adicionado-se o preço pago inicialmente pelo transformador, é razoável afirmar que o TDMA se auto financia em poucos anos.

2.5 Modelamento e configurações do conjunto núcleo-bobinas

O transformador é um equipamento cujo princípio de funcionamento baseia-se na indução eletromagnética, decorrente do acoplamento entre duas ou mais bobinas (circuitos elétricos) através de um núcleo fechado, constituído, geralmente, de material ferromagnético (circuito magnético). De larga aplicação na eletroeletrônica, a função mais comum do transformador é transferir energia elétrica de um circuito de entrada para

um circuito de saída, elevando ou baixando os valores de tensão e corrente, mantendo a frequência invariável. Na prática, entretanto, esta transferência de energia do primário para o secundário, através do circuito magnético, é acompanhada por perdas em ambos os circuitos: elétricos e magnético.

De uma forma genérica, em termos de configurações, os transformadores monofásicos podem ser construídos com uma das duas formas: com os enrolamentos envolvidos em torno dos dois lados de um núcleo retangular, ou com os enrolamentos envolvendo uma coluna central de um núcleo constituído de três colunas, conforme a ilustração da Figura 2.3.

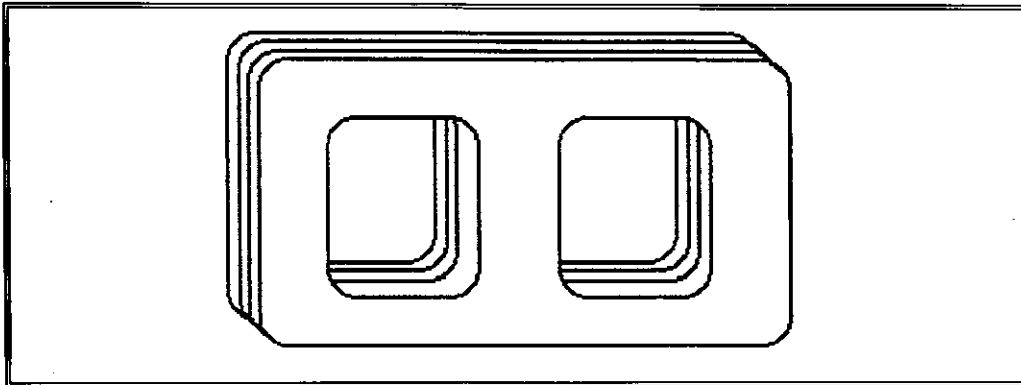


Figura 2.3. - Núcleo com três colunas

Idealmente, para efeito de análise e levantamento de um modelo básico, o transformador pode ser representado, sob as seguintes condições:

- Não são consideradas as perdas das bobinas;
- Não existe fluxo de dispersão: todo o fluxo magnético ϕ está confinado no núcleo, concatenando todas as espiras dos enrolamentos;
- A relutância do núcleo é nula, o que equivale a não levar em conta as perdas no material ferromagnético;

Em resumo: um transformador ideal seria um equipamento sem perdas, com um enrolamento de entrada e um enrolamento de saída, cujas relações entre tensões,

correntes e impedâncias nos seus terminais podem ser expressas pelas equações 2.1 a 2.4.

A Figura 2.4 mostra um esquema de transformador monofásico ideal.

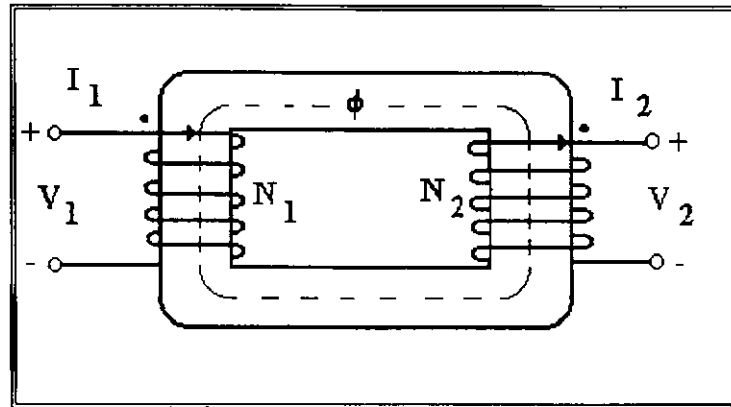


Figura 2.4 - Esquema do transformador ideal.

Assim, considerando o esquema representativo mostrado na Figura 2.4; as relações terminais de correntes e tensões, com N_1 espiras no primário e N_2 espiras no secundário, são determinadas a partir da lei de Faraday:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (2.1)$$

como as perdas estão sendo desprezadas,

$$V_1 I_1 \cos \varphi = V_2 I_2 \cos \varphi, \quad (2.2)$$

ou seja,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (2.3)$$

Por fim, partindo-se das equações (2.1) e (2.3), obtêm-se uma relação entre as impedâncias do primário e secundário do transformador ideal:

$$\frac{V_1/I_1}{V_2/I_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.4)$$

As equações (2.1) a (2.4), obtidas a partir do modelo do transformador ideal, são bastante úteis para análises e levantamento de modelos para o transformador real.

Deve-se ressaltar, que as suposições feitas para o transformador ideal são difíceis de ser alcançadas. Isto porque os enrolamentos das bobinas possuem, de fato, resistência elétrica, nem todo o fluxo magnético enlaça concomitantemente todas as bobinas, a permeabilidade magnética do material do núcleo não é infinita e quando o material do núcleo é submetido a um fluxo variante com o tempo, surgem as chamadas perdas no núcleo, inversamente relacionadas com a eficiência do equipamento.

Portanto, para efeito de análise e levantamento de um modelo para o transformador real, todas essas imperfeições devem ser levadas em conta. Neste sentido, de acordo com SEN (1989), podem ser empregados dois métodos:

1. Um modelo de circuito equivalente, baseado em princípios físicos, ou;
2. Um modelo matemático, baseado na teoria clássica dos circuitos acoplados magneticamente [SLEMON e STRAUGHEN (1982)].

Ambos os métodos podem servir para o estudo do desempenho do transformador real. Entretanto, o modelo do circuito equivalente é o que fornece um melhor entendimento do fenômeno físico envolvido.

Assim, adotando como base o modelo do circuito equivalente para o transformador ideal e adicionando-se as representações das resistências dos enrolamentos, reatâncias de dispersão, reatância de magnetização e uma resistência que represente as perdas no núcleo, o transformador real pode ser representado pelo circuito equivalente conforme a Figura 2.5.

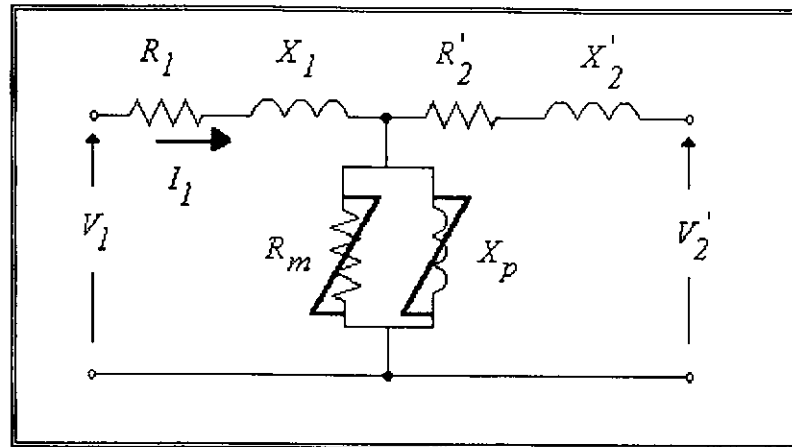


Figura 2.5 - Circuito equivalente de um transformador real.

Onde: V_1 é a tensão de alimentação do primário;

R_1 é a resistência do enrolamento primário;

X_1 é a reatância de dispersão do primário;

R_p é a resistência representativa das perdas ativas no núcleo;

X_m é a reatância de magnetização;

R'_2 é a resistência do enrolamento secundário, refletido ao primário;

X'_2 é a reatância de dispersão do secundário, refletida ao primário; e

V'_2 é a tensão do secundário, refletida ao primário.

Neste modelo, os parâmetros ditos longitudinais são lineares: resistências e reatâncias de dispersão, enquanto os parâmetros ditos transversais, X_m e R_p , são não-lineares e representam as perdas no núcleo.

Uma vez que as impedâncias, no circuito equivalente, relacionam as componentes de tensão e corrente, na frequência fundamental, a corrente I_1 deve ser representativa desta componente. Contudo, há de se considerar que a corrente magnetizante, em função da não linearidade magnética do núcleo, possui outras componentes harmônicas, sendo a de ordem três a mais significativa. Esta observação é importante do ponto de vista de

perdas e da própria medição desta corrente, pois se o valor eficaz desses harmônicos atingir 50% da componente fundamental, o valor eficaz da corrente de entrada será $(1+0,5^2)^{1/2} = 1,12$ vezes o valor da componente fundamental [SLEMON (1974)].

Uma das vantagens em se determinar um modelo equivalente para o transformador, é a possibilidade do estudo antecipado de seu comportamento, a partir de técnicas de análise de circuito ou empregando técnicas computacionais (identificação e estimação de parâmetros), incluindo a não-linearidade [NETO et alii (1991)]. A inclusão da não-linearidade é importante pois os transformadores funcionam com variações temporais de fluxo que colocam, às vezes, o ponto de operação um pouco acima do joelho da curva de saturação.

2.6 Perdas e eficiência do transformador

As perdas de potência num transformador são divididas, classicamente, em duas componentes: as perdas no cobre e as perdas no núcleo. As primeiras, causadas pelo efeito Joule nas bobinas dos enrolamentos, variam com a corrente da carga, e não há como controlá-las. Enquanto, as segundas, atribuídas aos fenômenos de histerese e correntes parasitas, permanecem constante por toda a vida útil do equipamento.

2.6.1 - Perdas totais

Para efeito de análise, costuma-se dividir as perdas totais por quilograma, por volume do material ferromagnético, por ciclo, em três componentes:

$$w_t = w_h + w_e + w_a, \quad (2.5)$$

onde w_t , w_h , w_e e w_a são, respectivamente, as perdas totais, as perdas por histerese (no limite $f \rightarrow 0$), as perdas por correntes parasitas e as perdas anômalas, todas expressas em W/kg.

b) Perdas por histerese

As perdas por histerese, fenômeno atribuído à movimentação das paredes dos domínios magnéticos e à reorientação dos momentos magnéticos, contém informações

importantes relativas ao material do núcleo. Analiticamente, a histerese dinâmica pode ser determinada pela equação (2.6) ou pela expressão empírica desenvolvida por Steinmetz, recorrendo a resultados experimentais para valores máximos da indução magnética entre 0,2 e 1,5 T, de acordo com a equação (2.7):

$$w_h = f \oint H \cdot dB, \quad (2.6)$$

$$w_h = k_h B_m^x f, \quad (2.7)$$

onde:

- k_h é o coeficiente de histerese e depende do tipo de material;
- B_m é o valor máximo da indução magnética, dada em Tesla;
- f é a frequência, em Hertz; e
- x é o coeficiente de Steinmetz, situado entre 1,4 e 2,4, dependendo do material.

O fenômeno da histerese também pode ser representado, graficamente, pela área circunscrita pela trajetória cíclica no plano B-H, conforme ilustra a Figura 2.6, destacando dois materiais atualmente usados em núcleos de transformadores: o aço ao silício de grão orientado (GO) e a liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$.

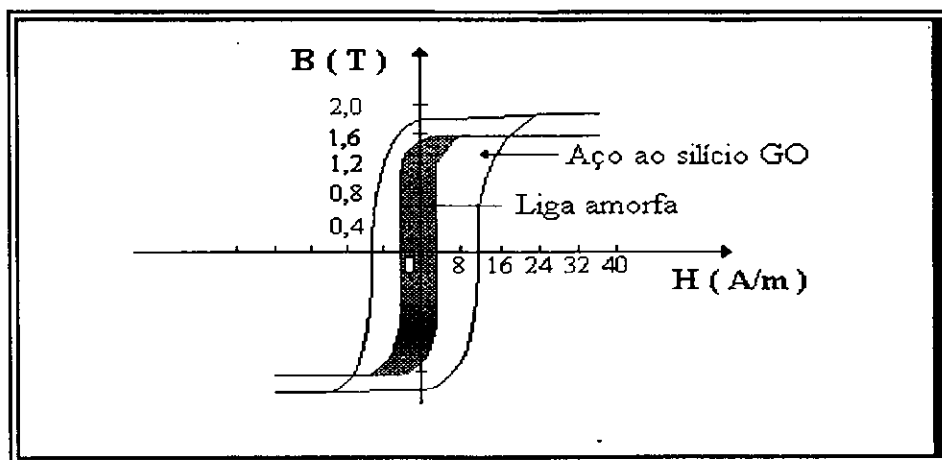


Figura 2.6 - Curvas de histerese para o aço ao silício GO e a liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa [HASEGAWA (1992)].

c) Perdas por correntes parasitas

As correntes parasitas, enquanto fenômeno indesejável em núcleos de equipamentos eletroeletrônicos, precisam ser minimizadas. Neste sentido, tradicionalmente, tem sido empregados materiais ferromagnéticos cristalinos de resistividade elevada e chapas laminadas as mais finas possíveis. Nos dias atuais, entretanto, a tendência é o uso crescente de ligas amorfas, apresentadas em forma de fitas longas e extremamente delgadas.

Particularmente, considerando uma excitação de fluxo senoidal, é possível demonstrar que no caso de fitas delgadas, nas quais a espessura e seja muito menor que a largura das mesmas, as perdas por correntes parasitas podem ser calculadas pela expressão:

$$w_e = (\pi \cdot f \cdot e \cdot B_m)^2 / 6\rho \quad , \quad (2.8)$$

onde ρ é a resistividade do material, dada em $\Omega \cdot m$, f é a frequência, em Hz, e B_m é a indução magnética máxima, dada em Tesla [SLEMON e STRAUGHEN (1982)]. Na equação (2.8), a distribuição do fluxo nas lâminas do material é considerada uniforme.

d) Perdas anômalas

De acordo com o modelo de PRY e BEAN (1958) e PFÜTZNER et alii (1991), as perdas anômalas são atribuídas às correntes parasitas adicionais causadas pelos movimentos das paredes de Bloch. A velocidade da parede será proporcional à largura d do domínio no estado desmagnetizado, sob a condição que todas as respectivas paredes sejam móveis e que seu número seja constante durante o processo dinâmico de magnetização. Com essas precondições,

$$w_a \propto f B^2 d \quad (2.9)$$

Inserindo as equações (2.7), (2.8) e (2.9) em (2.5) e dividindo por f , as perdas totais, por ciclo, passam a ser dadas por:

$$w_t / f = k_h B_m^x + (\pi \cdot e \cdot B_m)^2 \cdot f / (6 \rho) + w_a / f \quad (2.10)$$

2.6.2 Eficiência

Como nas máquinas elétricas em geral, a eficiência ou rendimento de um transformador é a relação entre a potência útil de saída e a potência de entrada; e segundo a NBR 5380 da ABNT (1993), este rendimento é calculado pela equação:

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \text{perdas}}{P_{\text{entrada}}}, \quad (2.11)$$

onde Σperdas são as perdas no cobre, adicionadas às perdas totais no núcleo, e P_{entrada} representa a potência ativa de entrada. Ainda segundo a NBR 5880, o rendimento deve ser determinado para as condições nominais e fator de potência no secundário igual a 1, salvo indicação em contrário

2.7 Medidas elétricas e magnéticas: bases teóricas

Os ensaios sobre transformadores, usualmente, envolvem medidas elétricas e magnéticas. As primeiras podem ser realizadas com instrumentos analógicos ou digitais, sem maiores dificuldades, desde que realizadas dentro do que especificam as normas técnicas ou de acordo com as recomendações de alguns livros-textos específicos: DEL TORO (1994), McPHERSON e LAMORE (1990), SEN (1989), GROSSNER (1983), SAINT-JEAN (1976), SLEMON e STRAUGHEN (1982), LANGSDORF (1974), entre outros. As medidas magnéticas, entretanto, são mais difíceis de se fazer e menos exatas do que as elétricas, por duas razões principais: primeiro, porque o fluxo magnético não é medido como tal, mas sim pelo efeito produzido por ele, através da força eletromotriz induzida e segundo, como maior dificuldade, destaca-se o fato de os caminhos dos fluxos magnéticos não serem tão definidos como são os das correntes elétricas nos circuitos elétrico. Por isso, as medidas magnéticas são, em geral, efetuadas de forma indireta.

De acordo com GOLDING e WIDDIS (1963), as medidas magnéticas podem ser classificadas em ensaios CC e em CA, porquanto nos dois casos, encontram-se métodos e objetivos diferentes. O gênero CC pode ser subdividido em medições de intensidade de

campo, fluxo, permeabilidade, curvas B-H e laços de histerese. Enquanto as medições em CA relacionam-se, principalmente, com as perdas nos materiais magnéticos sob condições de magnetização alternadas [STOUT (1975)].

Tradicionalmente, na realização de medidas magnéticas tem sido empregados os seguintes equipamentos: o galvanômetro balístico [LAWS (1938)], o fluxímetro, os permeâmetros de Burrows, de Iliovici, de Koepsel e de Fahy [JACOBS e NADIN (1968)], além de gaussímetros, baseados no "efeito Hall" [STOUT (1975)], ou magnetômetros de amostra vibrante e de Josephson [OLIVEIRA Jr. (1987)].

Para os ensaios referentes às perdas no ferro, o exemplo clássico é o emprego do método Epstein, que consiste em medir as perdas diretamente com a ajuda de um wattímetro, para uma dada frequência e uma indução magnética fixada.

De uma forma geral, o tratamento dos dados das perdas no material magnético parte de condições preestabelecidas: a indução magnética máxima igual a 1,0 ou 1,5 T e frequência de 50 ou 60 Hz. Contudo, quando se deseja uma informação mais completa, podem ser realizados dois procedimentos: No primeiro, a indução magnética máxima é mantida constante e a frequência é variada; no segundo, a frequência é fixa e o que varia é a indução magnética máxima. Caso seja necessário um conjunto completo de curvas, densidades e frequências adicionais podem ser usadas. Em geral, a unidade de base escolhida para o tratamento dos dados é o W/kg.

Teoricamente, como apresentado no item 2.6.1, as perdas nos materiais ferromagnéticos submetidos à variação de fluxo magnético, causado por corrente alternada, são separadas em três componentes, conforme descrito por PFÜTZNER et alii (1991), BAVAY (1989) e FISH (1990):

a) as perdas por histerese, por ciclo, consideradas constantes com a frequência, são determinadas experimentalmente fazendo a frequência tender a zero (perdas por histerese estática);

b) as perdas representadas pelas correntes parasitas clássicas; e

c) as perdas anômalas, causadas, principalmente, por movimento das paredes de Bloch, as quais segundo OVERSHOTT (1976), são responsáveis por cerca de 50% das perdas totais, em se tratando de materiais cristalinos.

As perdas anômalas podem ser definidas, de forma simplificada, como sendo o que resta após as perdas por histerese e por correntes parasitas terem sido subtraídas das perdas totais, conforme a representação gráfica da Figura 2.7.

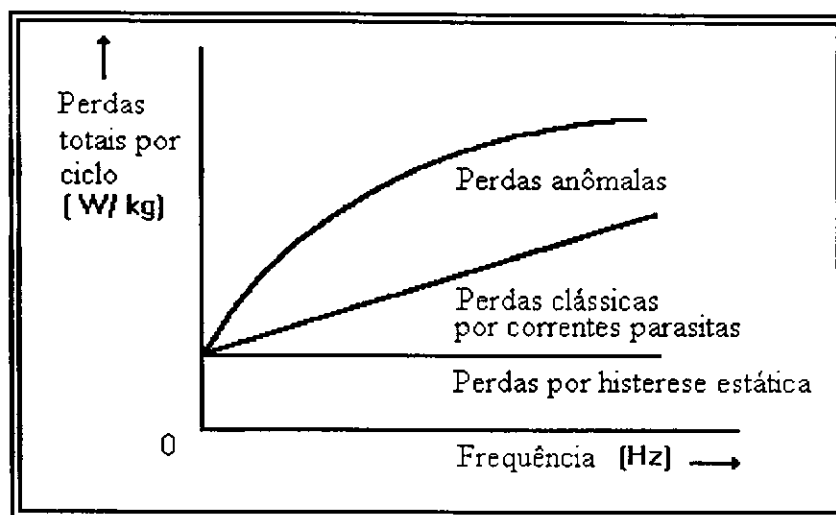


Figura 2.7 - Divisão das perdas totais em suas partes constituintes [SHILLING e HOUZE Jr. (1974)].

SHILLING e HOUZE Jr. (1974), tomando como base a teoria e técnicas de observações de domínios, apresentam um estudo sobre o comportamento magnético do Fe-Si 3%, separando as perdas e discutindo a permeabilidade e a magnetostrição do material, correlacionando-os com as estruturas dos domínios.

Uma metodologia de procedimentos experimentais para a determinação das perdas em lâminas de materiais ferromagnéticos cristalinos é apresentada por SENS e UETI (1987). Nesse trabalho, o citado autor também apresenta os procedimentos estatísticos para a obtenção das equações gerais, representativas das perdas magnéticas específicas, envolvendo variação da indução magnética, da frequência e da forma de onda do fluxo magnético. O equipamento empregado nos ensaios experimentais foi o quadro de Epstein, nas dimensões de 280 mm x 30 mm.

Estudos experimentais para a determinação das perdas em ligas amorfas são descritos por BLUNDELL et alii (1979), apresentando um equipamento capaz de manter a indução magnética na forma senoidal, para determinar a amplitude e a fase da componente fundamental do campo magnetizante.

FLORES FILHO et alii (1991) desenvolveram um sistema de teste-medição de grandezas magnéticas, implementado no Laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que segundo os autores, permite a caracterização de materiais magnéticos como o ferro laminado, o ferro ao silício de grão orientado e a liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$.

Um equipamento capaz de realizar a caracterização magnética de fitas amorfas também foi desenvolvido no Laboratório de Materiais Magnéticos do Instituto de Física da USP - LMM/IFUSP. Com este equipamento, que é dotado de sistema de aquisição de dados, é possível se obter os valores de H_c , B_m , B_s , permeabilidade inicial e máxima [LANCAROTTE e JUSTO (1987)].

2.8 Necessidade do tratamento magnetotérmico

Segundo TAUB (1984), citando LUBORSKY et alii (1975), uma liga amorfa submetida a um processo de recozimento no qual um campo magnético seja direcionado ao longo da fita, durante o processo de relaxamento, pode melhorar sensivelmente a força coercitiva e a relação de densidade de fluxo no material. A ação do campo magnético, favorecida pela mobilidade atômica, proporcionada pelo aumento da temperatura, induz uma ordenação química de curta distância, tendo como resultado um aumento da permeabilidade magnética, decorrente da anisotropia magnética induzida.

Especificamente, para núcleos de transformadores, esta melhoria do desempenho magnético da liga amorfa pode ser verificada a partir da redução das perdas por histerese e correntes parasitas. Nestes equipamentos, segundo BOUDREUX (1983), a anisotropia magnética deve ser alta o suficiente para manter a taxa remanência/ indução de saturação próxima de 1, mas suficientemente baixa para manter uma coercividade (força coercitiva)

relativamente baixa, de maneira que as perdas ativas e a potência de excitação do núcleo sejam as mais baixas possíveis.

2.8.1 Tratamento magnetotérmico segundo diferentes autores

Para diferentes composições de ligas amorfas, diversas são as metodologias empregadas na realização do tratamento magnetotérmico. Em particular, no que toca à liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, são apresentados na Tabela 2.6 valores típicos dos parâmetros temperatura, tempo e campo magnético, de acordo com diferentes autores.

Tabela 2.6 - Valores típicos dos parâmetros temperatura, tempo e campo magnetizante.

Referências	Temperatura (°C)	Tempo (hora)	Campo Magnético (A. esp./ m)
ALVES, F. & PERRON, J. C. (1992)	200-300-430	1	-
BAYLEY et alii. (1986)	400	2	800
HILZINGER, H. R. e HERZER, G. (1988)	420	-	800
JOHNSON, L. A. et alii (1982)	365	-	800
MAKINO, A. et alii. (1994)	370	1	-
PANKHURST, Q. A. et alii. (1992)	440	1/4	-
SASAKI, T. et alii. (1987)	400	2	800
SCHULZ, R. et alii. (1888)	360	2	-
SHISHIDO, H. et alii. (1985)	200-350-425	1	1.600
TAN, K. (1986)	400	2	800
WASHKO, S. D. et alii. (1981)	350	2	800

Os resultados apresentados na Tabela 2.6, em geral, dizem respeito a pequenas amostras de ligas amorfas, geralmente em forma de pequenos núcleos toroidais com diâmetros de algumas dezenas de milímetros.

Provavelmente por razões comerciais, detalhamentos da metodologia para tratamentos magnetotérmicos em núcleos de transformadores de maiores porte raramente são divulgados na literatura técnica específica, mesmo em nível internacional.

No Brasil, uma experiência sobre a realização de tratamento magnetotérmico em um núcleo toroidal de um transformador de corrente, utilizando a liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, foi publicada por HOMRICH (1990), em sua dissertação de mestrado, e posteriormente no 3º Seminário sobre Materiais Magnéticos, por FLORES FILHO e HOMRICH (1991).

Segundo HOMRICH & FLORES FILHO, a liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, quando tratada termicamente, apresenta-se vantajosa magneticamente em comparação com a liga convencional de ferro-silício de grão orientado ($\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$), até determinado valor de indução magnética (0,8 T). O TC realizado com material amorfo tratado magnetotermicamente apresentou melhor classe de exatidão que um TC idêntico, porém construído com núcleo de $\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$, justamente pelo fato de a liga amorfa apresentar menores perdas e maior permeabilidade.

Recentemente, ALTOÉ, M. V. P. et alii. (1994), publicaram um estudo comparativo entre as perdas magnéticas totais do Fe-6.4wt%Si, da liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ e do material nanocristalino $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. Para o tratamento magnetotérmico da liga amorfa os valores dos parâmetros temperatura, tempo e campo magnetizante foram assumidos como sendo: 400°C, 2 h e 1200 A.esp/m.

Nesta tese, é apresentada no *Capítulo 5*, uma metodologia para o tratamento magnetotérmico em núcleos de transformadores, construídos com liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa, enrolada na configuração núcleo envolvente.

Capítulo 3

PROJETO E REALIZAÇÃO

3.1 Introdução

No projeto e na realização de transformadores é importante que se conheça as características magnéticas do material do núcleo. Nos primeiros transformadores, os núcleos eram construídos com chapas laminadas de aço carbono. Nos dias atuais, entretanto, os materiais empregados podem ser agrupados em três grandes categorias: os aços de grãos não-orientados (laminados a quente), os aços de grãos orientados (laminados a frio) e nas últimas duas décadas, as ligas amorfas. Para estes últimos materiais, um dos pontos fundamentais é a escolha da composição da liga adequada. Nesta escolha, a faixa de frequência de utilização, a indução de saturação e o coeficiente de magnetostrição são os principais parâmetros que norteiam o tipo de liga a ser utilizada [BOLL e WARLIMONT (1981)].

Por isso, em função de suas propriedades físicas e eletromagnéticas, a liga Fe₇₈B₁₃Si₉ foi o material escolhido para a realização do núcleo do transformador monofásico a ser apresentado neste capítulo. Antes, porém, será apresentada uma breve revisão sobre o modelo básico do transformador, incluindo a não-linearidade do material do núcleo, sem particularizá-lo, e sua repercussão sobre as perdas e a eficiência deste equipamento.

3.2 Projeto do pré-protótipo: material e método

Diferentemente das chapas de aço ao silício de grãos orientados (GO), empregadas tradicionalmente em núcleos de transformadores, as ligas amorfas são apresentadas em forma de longas fitas, bastante finas, cerca de 1/10 da espessura das chapas de aço ao silício GO atualmente empregadas em núcleos de transformadores.

De fato, esta característica particular das ligas amorfas impõe dificuldades de realização prática de núcleos com estes materiais, o que implica numa abordagem específica para a definição do projeto.

Pelo método tradicional, projetar um transformador é uma tarefa que envolve cálculos extensos e repetitivos. E para se ter uma idéia mais clara desta afirmação, basta considerar que, uma vez escolhida a forma construtiva do transformador e fixados, portanto, o formato do núcleo, o espaço destinado ao material isolante, a geometria das bobinas, o sistema de refrigeração e as bitolas dos condutores, são necessários pelo menos três parâmetros para definir perfeitamente um projeto: a indução do núcleo, a seção do núcleo e a altura da janela. Por sua vez, os índices de mérito mais importantes que servirão para julgar o mesmo projeto são cinco: as perdas no cobre, as perdas no núcleo, a impedância percentual, a corrente de excitação e, finalmente, o preço do material ativo (cobre e material ferromagnético) [IVANOFF, 1964].

A complexidade do problema sugere, portanto, que se busque o máximo de ordem na separação e na colocação dos problemas. Neste Capítulo, optou-se por dividir o enfoque em duas etapas, a saber: primeiro, a escolha da configuração geométrica do núcleo de material amorfo; e segundo, a manipulação dos parâmetros independentes (indução magnética, seção do núcleo e altura da janela) na procura da melhor combinação de valores das grandezas dependentes (perdas no cobre, perdas no núcleo, impedância percentual, corrente de excitação e custo do material ativo).

a) *Configuração geométrica*: teoricamente, os transformadores com núcleo de liga amorfa podem ser realizados com até 24 configurações para o conjunto núcleo-bobinas [BOYD e BORST (1984)]. Na prática, entretanto, o primeiro desafio que se apresenta é como obter um núcleo compacto, a partir de uma fita longa, contínua, com espessura média de 30 μm , bastante maleável e bastante exigente no que se refere à ferramenta de corte. Efetivamente, de imediato, o núcleo toroidal seria aquele que, em princípio, traria menos problemas. Entretanto, esta configuração, embora seja a que empregue o material magnético com mais eficiência, em termos de confinamento do fluxo e menor presença de entreferros, não tem sido, a mais empregada em transformadores de potência ou de distribuição, sendo mais adequada a transformadores de corrente.

Desta forma, como a potência nominal máxima dos protótipos de transformadores a serem projetados e construídos não ultrapassava 1,0 kVA, optou-se por uma geometria do tipo núcleo envolvente, na qual os enrolamentos do primário e do secundário foram enrolados concentricamente em torno da coluna central, de acordo com a Figura 3.1.

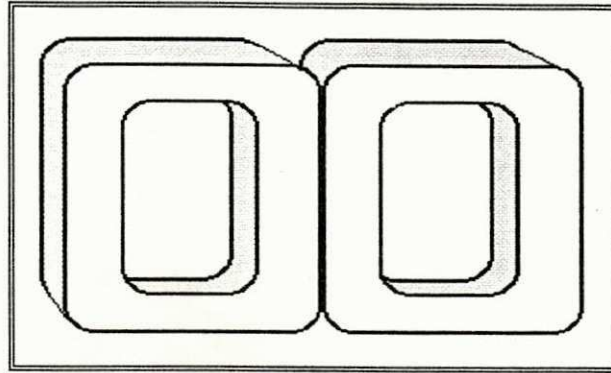


Figura 3.1 - Configuração geométrica do núcleo de material amorfo.

b) *Manipulação dos parâmetros independentes*: Os valores destes parâmetros básicos são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros básicos do projeto do pré-protótipo.

Regime de Operação	Intermitente
Potência Aparente, S	100 VA
Número de fases	1
Frequência, f	60 Hz
Relação de tensões	220 V/ 110 V
Seção magnética, cm ²	10,00
Fator de empilhamento, Ke	0,80
Seção geométrica, cm ²	12,50
Fator de preenchimento, Kp	0,33
Densidade de corrente, J	3,5 A/ mm ²
Altura da janela, cm	3,57
Largura da liga amorfa, L _a	5,08 cm
Indução magnética máxima, B _m	1,4 T

Para o dimensionamento do núcleo, tomou-se como base os valores nominais do transformador sob estudo e algumas características físicas e eletromagnéticas da liga amorfa, fornecidas pelo fabricante [ALLIED-SIGNAL (1987)].

Para o cálculo da seção magnética do núcleo de transformadores, diferentes fórmulas empíricas são apresentadas na literatura técnica, por diferentes autores que tratam deste assunto: [KUHLMANN, 1959], [IVANOFF, (1964)], [SLEMON, 1974], [JUDD E KRESSER, (1977)], [SLEMON e STRAUGHEN, (1982)], [GROSSNER (1983)], MARTIGNONI (1987), [McLYMAN, (1988)], [SARAIVA, 1988], [HOMRICH, (1990)].

Dentre estas, a fórmula proposta por MARTIGNONI (1987), desenvolvida para o cálculo da seção magnética de núcleos ferromagnéticos cristalinos construídos com chapas padronizadas em perfis E-I, foi a escolhida, por melhor se adaptar à geometria assumida para o núcleo de material amorfo:

$$S_{mag} = 7,5 \sqrt{\frac{S}{f}} \quad (3.1)$$

A seção geométrica foi determinada a partir da relação entre a seção magnética e o fator de empilhamento (relação entre o espaço líquido ocupado pelo material magnético e o espaço total ocupado pelo material empilhado):

$$S_{geo} = S_{mag} / K_e \quad (3.2)$$

Idealmente, a forma geométrica da coluna central deveria ser quadrada. Entretanto, como na presente aplicação a largura da liga amorfa é um parâmetro constante, a largura da coluna central (L_c) passou a ser determinada pela relação seguinte:

$$L_c = S_{geo} / L_a \quad (3.3)$$

Admitindo-se a indução magnética como sendo senoidal, o número de espiras (N) de cada enrolamento pode ser determinado a partir da seguinte relação:

$$N = V / (4,44 f B_m S_{mag}) \quad (3.4)$$

onde V é a tensão nominal do enrolamento, em valor rms.

As seções dos condutores do primário e do secundário são determinadas a partir das seguintes relações:

$$S_p = S/(JV_1) \quad (3.5)$$

$$S_s = S/(JV_2) \quad (3.6)$$

Considerando que os ampères-espiras de um dos enrolamentos do transformador ocupem metade da área da janela disponível para os enrolamentos primário e secundário, o valor rms da corrente, em ampères, pode ser calculada de acordo com a expressão seguinte:

$$I_{rms} = K_j A_j J / 2N \quad (3.7)$$

onde, A_j é a área geométrica da janela do núcleo e K_j é o fator de espaçamento, cujo valor no presente projeto foi considerado igual a 1/3.

Por outro lado, assumindo a variação do fluxo magnético como sendo senoidal, o valor rms da tensão induzida pode ser calculado a partir da lei de Faraday:

$$V_{rms} = 4,44fNS_{mag}B_m \quad (3.8)$$

Portanto, desta forma, a capacidade nominal (S) do transformador com núcleo de liga amorfa foi calculada efetuando-se o produto das equações (3.7) e (3.8):

$$S = 2,22fB_m JK_j A_j S_{mag} \quad (3.9)$$

A seguir, tomando como base os parâmetros da Tabela 3.1 e as equações (3.1) a (3.9), são apresentados na Tabela 3.2 os valores projetados para a realização do pré-protótipo sob estudo (100 VA, 220 V/110V, 60 Hz).

Tabela 3.2 - Valores de projeto para o pré-protótipo com núcleo de liga amorfa.

PARÂMETROS	VALORES DE PROJETO
Largura da coluna central, cm	2,46
Nº de espiras do primário	589
Nº de espiras do secundário	295
Seção do condutor primário, mm ²	0,129
Seção do condutor secundário, mm ²	0,259
Largura da janela, cm	1,23
Densidade da liga amorfa, d _a	7,18 g/ cm ²
Massa do núcleo, kg	1,32
Densidade do cobre, d _{cu}	8,95 g/ cm ²
Massa do cobre, kg	0,256
Perdas no núcleo (vazio), W	0,26
Perdas no cobre (I _{nom.}), W	4,33
Rendimento, %	95,61

A seguir, algumas considerações sobre projeto e otimização:

Projetar um transformador com núcleo de liga amorfa, mesmo de pequena potência, não é uma tarefa simples. Preliminarmente, tabelas, curvas características e especificações técnicas dos materiais elétricos, magnéticos e isolantes são os pontos de partida para que as especificações finais do equipamento sejam atingidas. Entretanto, para que tais especificações sejam atendidas com boa precisão, mínimo de custo, máxima eficiência, mínimo peso ou volume, uma otimização total seria necessária. Infelizmente, nesta tarefa, geralmente uma série de suposições são feitas, as quais, às vezes, não somente são conflitantes, como também podem levar a resultados distintos daqueles que a técnica de otimização busca atingir.

Assim, atingir, simultaneamente, um ponto ótimo para as variáveis envolvidas requer algum esforço analítico. Isto porque, é preciso considerar que, uma vez escolhida a

forma construtiva do transformador, e fixados, portanto, o formato do núcleo, a geometria das bobinas, as bitolas dos condutores, etc., restam ainda pelo menos três parâmetros para que o projeto esteja definido: a densidade de fluxo magnético, a seção geométrica das colunas e a altura da janela do núcleo.

Matematicamente, são cinco funções de no mínimo três variáveis a serem estudadas, simultaneamente, dependendo do critério a ser preestabelecido. Desta forma, ainda de forma matemática, no espaço definido pela associação de valores das três variáveis independentes, seria necessário procurar pontos de melhor combinação das cinco variáveis dependentes, conforme demonstrado nos trabalhos de GARBARINO (1954), IVANOFF (1964) e JUDD e KRESSLER (1977).

Nota-se, portanto, que o problema torna-se complexo, não só pelo número de variáveis presentes, mas pela extensão das operações de cálculos, sugerindo o uso de computador [ODESSEY (1974)].

Adicionalmente, é importante salientar que uma solução otimizada pode não ser definitiva. Uma mudança na política tarifária, por exemplo, pode afetar completamente uma solução otimizada.

3.3 Cálculo das induções magnéticas pelo método das diferenças finitas

a) *Metodologia*: o emprego de material amorfo em núcleos de transformadores requer técnicas especiais e a observação de dois parâmetros importantes, principalmente em nível de projeto: o fator de empilhamento e o valor de saturação da indução magnética no interior do núcleo. Em termos práticos, o fator de empilhamento está relacionado com o volume do núcleo na proporção direta, enquanto a indução magnética máxima se relaciona na proporção inversa.

Já no tocante à distribuição da indução magnética no interior do núcleo, uma análise preliminar mais apurada só se tornou possível com o advento de modernas técnicas numéricas e eficientes aplicativos para cálculos de campos eletromagnéticos, geralmente baseados nos métodos das diferenças finitas ou dos elementos finitos [SABONNADIÈRE e KONRAD (1992)].

No presente trabalho, para estudar o efeito da indução magnética no interior do núcleo do pré-protótipo empregou-se um programa computacional de cálculo de campos, baseado no método das diferenças finitas: O DIFIMÉDI [LAJOIE-MAZENC et alii (1980)]. Este programa, desenvolvido por uma equipe de pesquisadores do Laboratório de Eletrotécnica e Eletrônica Industrial do Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, França, foi repassado para o uso de pesquisadores do Departamento de Engenharia Elétrica - CCT/UFPB, dentro do convênio CAPES/COFECUB.

Composto por módulos conversacionais, o DIFIMÉDI permite ao usuário o cálculo de campo eletromagnético criado por fontes elétricas ou magnéticas, num dado instante, de acordo com a seguinte estrutura:

MÓDULO DE ENTRADA: definição do problema, das condições de fronteiras, do vetor potencial magnético e das permeabilidades dos meios;

MÓDULO DE RESOLUÇÃO: levando em consideração a não-linearidade do material ferromagnético, por iterações sucessivas;

MÓDULO DE SAÍDA GRÁFICA: permite a visualização e a impressão das linhas de campo eletromagnético no interior do núcleo, de forma bidimensional;

MÓDULO DE EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS: capaz de fornecer as induções magnéticas no centro de diferentes malhas, assim como o fluxo magnético através de toda a superfície sob estudo.

O DIFIMÉDI trata de problemas bidimensionais (sistemas planos e sistemas de revolução) de materiais ferromagnéticos em regime linear ou saturado, por iterações sucessivas. As funções estudadas podem ser o vetor potencial magnético \vec{A} ou o potencial escalar V enquanto as condições de fronteiras podem ser do tipo:

- Neumann: $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0$ ou $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$;

- Dirichlet: $\vec{A} = 0$, $\vec{A} \neq 0$ ou $V = 0$ e $V \neq 0$; ou

- Mistas (Dirichlet e Neumann).

A aplicação específica do DIFIMÉDI, para efeito de análise do projeto do pré-protótipo apresentado neste capítulo, tomou como ponto de partida a representação bidimensional do núcleo de liga amorfa no plano cartesiano.

O passo inicial, antes da utilização do programa, consistiu em determinar as dimensões geométricas do domínio sob estudo. No caso específico, o núcleo do transformador foi discretizado por meio de uma malha, como mostra a Figura 3.2.

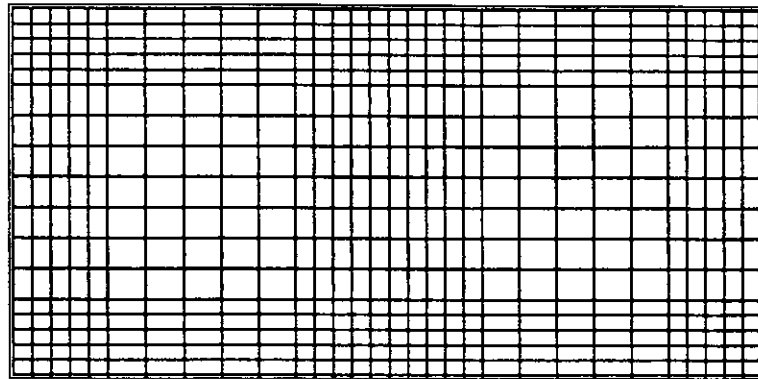


Figura 3.2 - Malha de discretização do domínio sob estudo.

A Figura 3.3 apresenta o preenchimento dos meio magnético saturável (liga amorfa). Os espaços não preenchidos representam, na janela do núcleo, o meio não-saturável (espaço destinado aos condutores e materiais dielétricos).

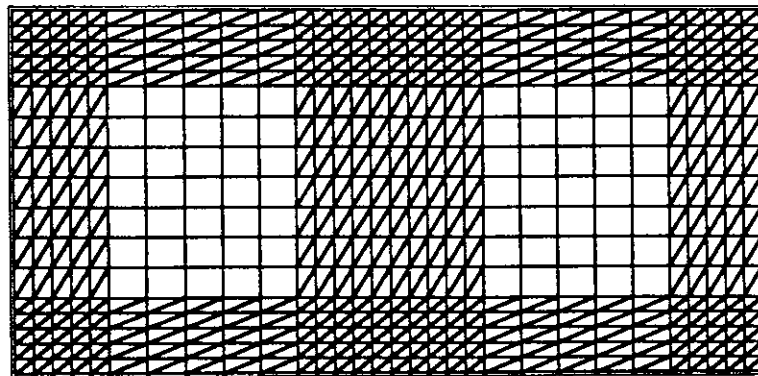


Figura 3.3 - Preenchimento do meio saturável.

A Figura 3.4 representa o preenchimento do meio condutor (enrolamentos do primário e do secundário).

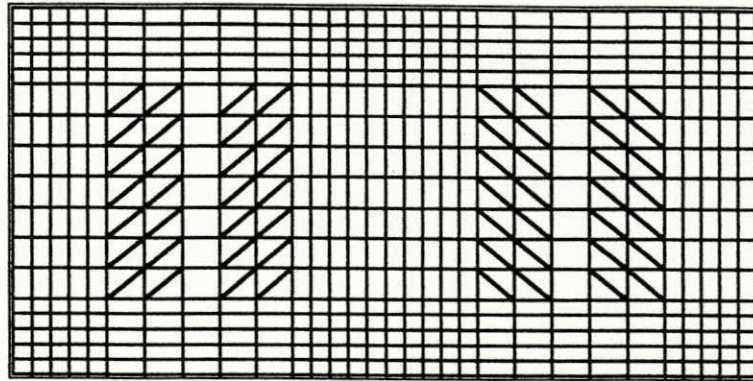


Figura 3.4 - Preenchimento do meio condutor.

Objetivando comparar a densidade de fluxo magnético (indução magnética) no interior do núcleo do transformador, em função do material ferromagnético utilizado, e levando em consideração as características de não-linearidade dos mesmos, foram fornecidas ao programa DIFIMÉDI os valores B (T) e H (A/m) relativos às caracterizações magnéticas de dois materiais: a liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa (antes do tratamento magnetotérmico) e o FeSi do núcleo de um transformador comercial. Estes valores foram obtidos experimentalmente, a partir da tensão induzida no secundário (Lei de Faraday) e da corrente de excitação do primário (Lei de Ampère), e com eles foram traçadas as curva inicial de magnetização dos dois materiais, conforme mostradas na Figura 3.5.

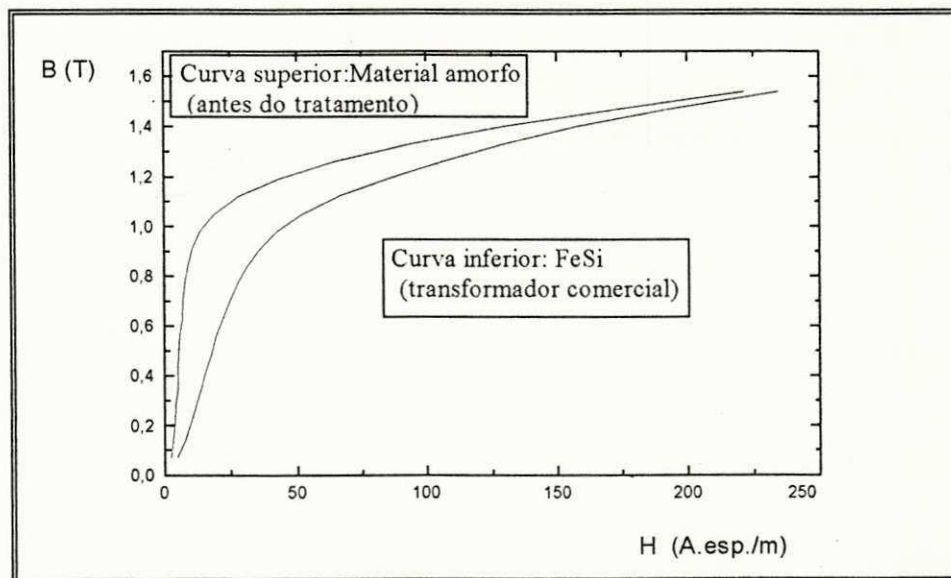


Figura 3.5 - Curvas de magnetização dos materiais ferromagnéticos dos núcleos.

Definidos os dados de entrada (problema estático, vetor potencial magnético, condições de contorno de Dirichlet, sistema de coordenadas cartesianas e permeabilidades dos meios), o programa DIFIMÉDI realiza o cálculo do campo magnetostático \vec{B} , criado pela corrente elétrica nos enrolamentos do transformador, partindo da relação:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (3.10)$$

De acordo com a equação (3.10), em casos bidimensionais (2D) o vetor potencial magnético \vec{A} terá divergente nulo e apenas uma componente na direção perpendicular ao plano cartesiano, xy:

$$\text{div}\vec{A} = 0 \quad (3.11)$$

$$\vec{A} = A\vec{k} \quad (3.12)$$

Sendo o campo magnético originado pela corrente elétrica e o meio ferromagnético considerado como isotrópico, a indução magnética pode ser determinada a partir das equações de Maxwell, sob forma local, em regime quase-estático e da relação constitutiva:

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \text{ (Lei de Ampère)} \quad (3.13)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \text{ (Lei da conservação do fluxo)} \quad (3.14)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \text{ (Relação constitutiva)} \quad (3.15)$$

onde: \vec{H} é a intensidade de campo magnético, ou campo magnético, \vec{J} a densidade de corrente elétrica e μ a permeabilidade do material ferromagnético.

Relacionando as Equações (3.13), (3.14) e (3.15), tem-se:

$$\text{rot}(1/\mu)\vec{B} = \text{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad (3.16)$$

Como o $\text{rot}\vec{A} = (\partial A / \partial y)\vec{i} - (\partial A / \partial x)\vec{j}$, as componentes cartesianas de \vec{B} serão, respectivamente:

$$B_x = \partial A / \partial y \quad (3.17)$$

$$B_y = -\partial A / \partial x \quad (3.18)$$

É oportuno observar que a Equação (3.15) só é válida se o material for considerado isotrópico. Por outro lado, caso a *anisotropia magnética* seja levada em conta, a permeabilidade magnética μ não mais poderá ser considerada um escalar. Neste caso, deverá ser tratada como um *tensor de permeabilidade*, sob a notação $\|\mu\|$. E além disso, se o fenômeno da saturação magnética for incluído, a relação B(H) deverá ser reescrita na forma seguinte:

$$\vec{B} = \|\mu(H)\| \vec{H} \quad (3.19)$$

A inclusão do *tensor de permeabilidade* tornaria o estudo bem mais preciso. Todavia, tal procedimento resultaria num aumento considerável no grau de complexidade do cálculo do campo magnético.

b) *Resultados e discussão*: objetivando estabelecer uma análise comparativa do desempenho do material do núcleo, tomou-se como referência um protótipo de transformador de 100 VA, 220/110, 60 Hz. Admitindo-se a configuração geométrica do tipo núcleo envolvente, realizou-se o cálculo de campo magnético sobre dois materiais: o material amorfo, e o FeSi, material cristalino, comumente usado em núcleos de transformadores de distribuição.

Os cálculos da indução magnética máxima, para diferentes valores da corrente de excitação, para cada o material, foram realizados através do programa computacional DIFIMÉDI. Considerando iguais as dimensões geométricas do núcleo de liga amorfa e do núcleo de FeSi, os resultados mostraram que, abaixo do joelho da curva B-H, a liga amorfa atinge valores de induções máximas superiores ao FeSi, para o mesmo valor de corrente. Por exemplo: para uma corrente de excitação correspondente a 10 % da corrente nominal do primário, os valores obtidos para a induções magnéticas máximas

foram: 0,78 T para a liga amorfa e 0,03 T para o FeSi [LUCIANO e KIMINAMI (1993)]. Ainda, para efeito de análise comparativa, foram realizados cálculos das induções magnéticas máximas para uma corrente de excitação correspondente a 3,0 % da corrente nominal do primário para um transformador comercial de igual capacidade que o transformador de liga amorfa sob estudo. Os valores obtidos foram de 0,14 T, para o transformador comercial, e 0,50 T para o transformador com núcleo de liga amorfa [LUCIANO e KIMINAMI (1995)].

Fazendo-se a comparação entre as curvas da Figura 3.5, percebe-se que o valor da indução de saturação do material magnético cristalino é superior ao do material amorfo. Porém, a permeabilidade do material amorfo é bem superior a do material cristalino para valores inferiores a 1,4 T (7,0 A/m), o que sinaliza baixas perdas por histerese, baixa força coercitiva e, conseqüentemente, baixa potência de excitação.

A importância de uma baixa potência de excitação para um núcleo de um transformador pode ser percebida a partir da relação entre a potência reativa absorvida e a potência nominal do equipamento. Isto porque, quando a energia reativa é fortemente tarifada, é aconselhável escolher um transformador onde a relação corrente de excitação e corrente nominal(I_0/I_n) seja mínima [LUCIANO e FECHINE (1991)].

O módulo de saída gráfica permite a visualização ou a impressão gráfica das linhas de campo eletromagnético no interior do sistema bidimensional considerado, conforme mostra a Figura 3.6.

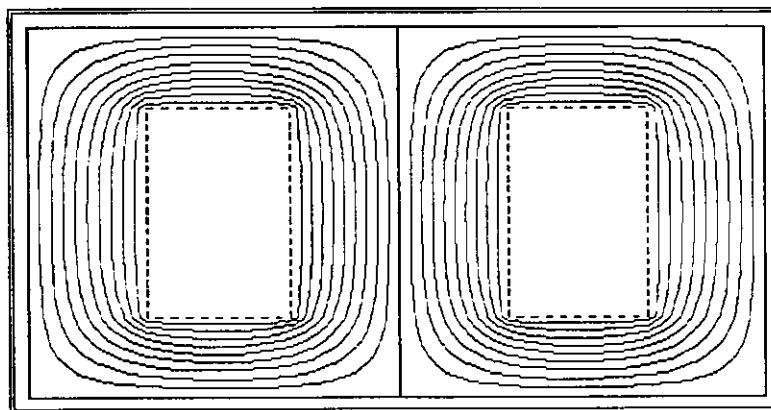


Figura 3.6 - Mapa das linhas de campo no interior do núcleo

3.4 Realização do pré-protótipo

Efetivamente, na realização do pré-protótipo, a construção do núcleo de liga amorfa se constituiu na tarefa mais laboriosa. Isto porque o material amorfo é comercializado em forma de fita longa e contínua, enrolada em um carretel, o que torna necessário para a construção do núcleo, o corte em vários pedaços de fita amorfa, os quais durante o processo de enrolamento, devem ser mantidos juntos, temporariamente, até que todo o conjunto forme o núcleo total. Este processo, praticamente artesanal, requer habilidade e paciência por parte de quem o executa, pois é grande a dificuldade de se conseguir que a parte magneticamente ativa, sem dispositivos de calços e prensagem, se constitua num conjunto mecanicamente rígido, capaz de suportar condições adversas durante o funcionamento [LUCIANO (1992)].

As Fotografias 3.7, 3.8 e 3.9 mostram detalhes do material amorfo e do pré-protótipo realizado em duas etapas de sua construção.



Figura 3.7 - Detalhe do material amorfo destinado à realização do núcleo.

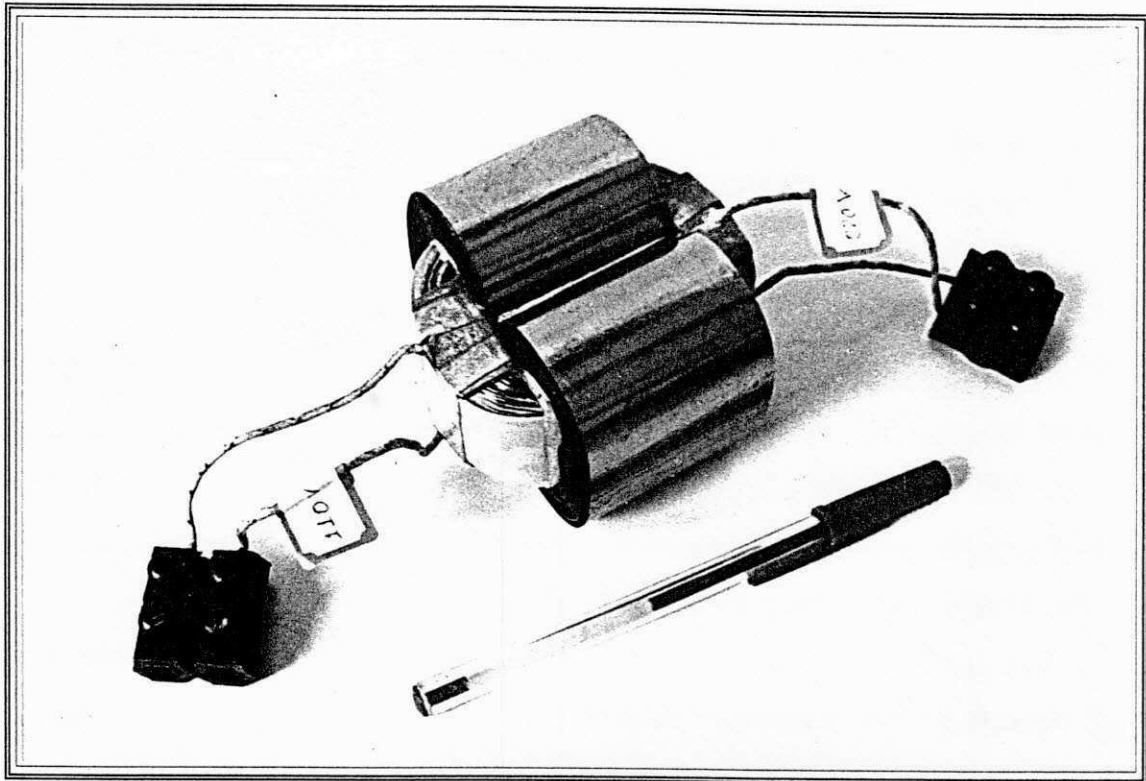


Figura 3.8- Conjunto núcleo-bobinas do pré-protótipo realizado.

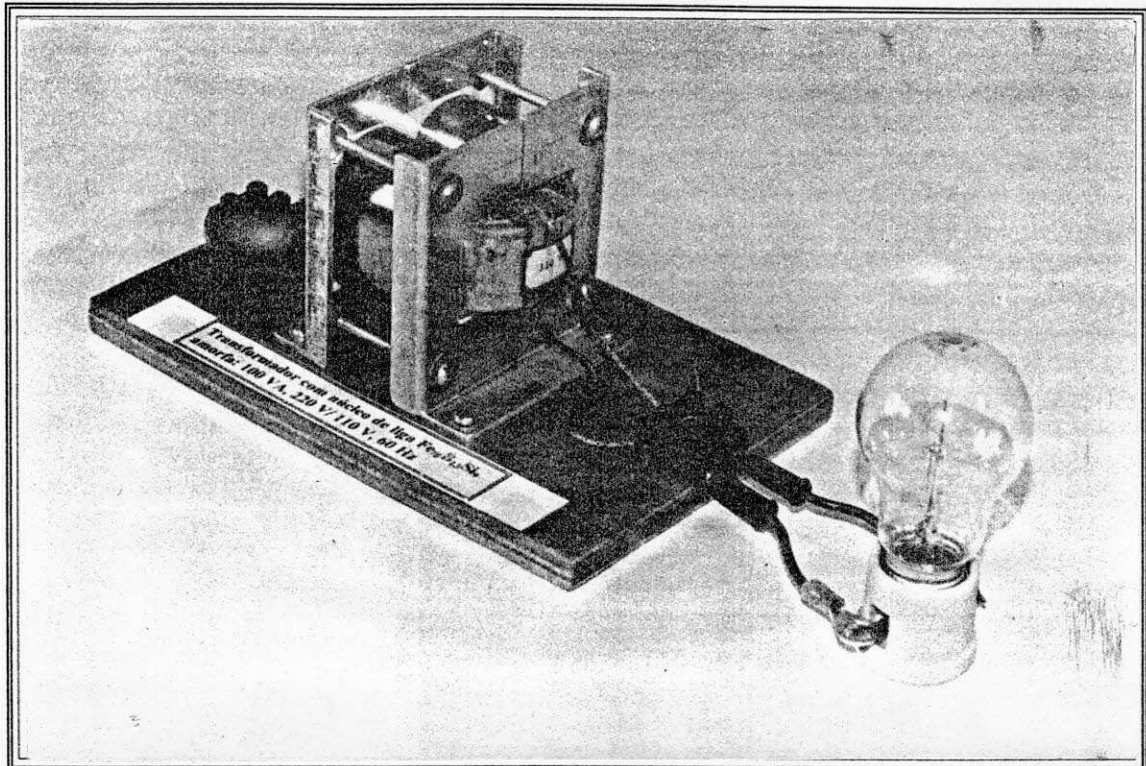


Figura 3.9 - Pré-protótipo em sua forma final

Finalizando, seguem-se algumas observações, de ordem prática, relativas à construção de um núcleo de liga amorfa, semelhante ao apresentado neste trabalho:

- É recomendável evitar o manuseio do material com as mãos desprotegidas. A fita amorfa é bastante fina e cortante. Sugere-se, portanto, a utilização de luvas protetoras, isentas de substâncias que possam comprometer o material do núcleo durante o tratamento térmico.

- A fita deve ser enrolada sobre um carretel de fácil desmontagem, cujas dimensões sejam as mais próximas possíveis da largura da fita, para que as camadas de fitas enroladas se mantenham alinhadas nas faces do núcleo.

- Uma vez enrolado o núcleo, deve-se providenciar o fechamento deste, a fim de evitar que o mesmo venha a se desenrolar. FLORES FILHO e HOMRICH (1991) recomenda que tal fechamento deve ser executado com uma cinta metálica da própria liga amorfa, ou um outro material de coeficiente de dilatação linear semelhante e que resista à temperatura de recozimento. Recomenda-se também manter o núcleo protegido da umidade.

- É recomendável que os materiais dielétricos usados como suporte do núcleo e como isolantes entre as espiras e o próprio núcleo sejam capazes de suportar a temperatura do *tratamento magnetotérmico*. Materiais à base de fibra de vidro ou mica são os mais recomendáveis.

- Após a realização do *tratamento magnetotérmico*, uma camada de verniz isolante poderá ser usada como proteção final do núcleo.

Capítulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

PRELIMINARES

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de ensaios experimentais preliminares realizados sobre o pré-protótipo de transformador projetado e construído com núcleo de liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa. O objetivo destas investigações práticas é a comparação entre as previsões de projeto e os resultados obtidos com o pré-protótipo em real grandeza, antes de o núcleo ter sido submetido a qualquer tratamento térmico, para posterior comparação de desempenho com um transformador comercial, de potência aparente e relação de tensão idênticas, porém construído com núcleo de FeSi.

4.2 Ensaios experimentais: antes do tratamento magnetotérmico

Seguem-se os resultados dos ensaios experimentais realizados sobre o pré-protótipo de transformador de 100 VA, 220 V/ 110 V, 60 Hz, projetado e construído com núcleo de liga amorfa, conforme apresentado no Capítulo 3. Os referidos ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da NBR 5380 [ABNT (1993)].

4.2.1 - Determinação das resistências dos enrolamentos:

A determinação das resistências dos enrolamentos é importante para o levantamento do modelo equivalente do transformador, pois serve como parâmetro diretamente ligado às perdas no cobre.

Utilizando-se multímetros digitais, foram realizadas medições das resistências dos enrolamentos primários e secundário. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Medição das resistências dos enrolamentos do pré-protótipo.

Instrumentos	Enrolamento primário (220 V, fio número 26)	Enrolamento secundário (110 V, fio número 23)
Multímetro Yokogawa 7533-06	19,1 Ω	5,80 Ω
Multímetro Siemens B1021	19,6 Ω	5,85 Ω
Multímetro Re-Son Mic- 2200	19,1 Ω	5,80 Ω

Para efeito de comparação, foram realizadas medições, nas mesmas condições e com o mesmo instrumental, em um transformador comercial, projetado e construído com valores nominais de tensões, potência aparente e frequência idênticas àquelas do pré-protótipo de 100 VA, construído com núcleo de liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa. Os resultados destas medições estão apresentados na Tabela 4.2.

As medições foram realizadas com multímetros diferentes, para não ocorrer dúvidas quanto a ordem de grandeza do valor da resistência efetivamente medida.

Tabela 4.2 - Medição das resistências dos enrolamentos do transformador comercial.

Instrumentos	Enrolamento primário (220 V)	Enrolamento secundário (110 V)
Multímetro Yokogawa 7533-06	8,1	3,0
Multímetro Siemens B1021	8,2	3,1
Multímetro Re-Son Mic- 2200	8,1	3,0

Comparando-se as Tabelas 4.1 e 4.2, pode-se observar que os valores das resistências dos enrolamentos do transformador comercial resultaram menores que as dos enrolamentos do pré-protótipo com núcleo de liga amorfa. Certamente, esta diferença reside no fato de o transformador comercial ter sido projetado para operar com densidade de corrente menor que a do pré-protótipo com núcleo de liga amorfa.

Dos resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, duas considerações devem ser feitas: primeiro, o multímetro realiza a medição empregando corrente contínua, porém o transformador é utilizado, na prática, com corrente alternada; e segundo, os valores das resistências devem ser corrigidos para a temperatura de operação do equipamento, visto que, ainda segundo a NBR 5380 [ABNT (1993)], a resistência elétrica varia com a temperatura, de acordo com a seguinte relação:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{t_2 + 234,5}{t_1 + 234,5} \quad (4.1)$$

onde, R_1 e R_2 são as resistências dos enrolamentos, medidas em Ω , nas temperaturas t_1 e t_2 , medidas em $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

R_1 e R_2 podem também ser medidas diretamente por meio de uma ponte de Wheatstone ou ponte Kelvin. Tais medições fornecem as resistências dos enrolamentos em corrente contínua (CC), o que pode diferir bastante dos valores das resistências em corrente alternada devido à distribuição não-uniforme deste tipo de corrente no interior dos condutores (efeito pelicular). Isto pode ser verificado pela determinação da resistência equivalente a partir do ensaio de curto-circuito e comparando este resultado com a resistência equivalente CC referida ao lado primário do transformador [SLEMON e STRAUGHEN (1982)].

4.2.2 - Relação de tensões em vazio

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos ensaios de relação de tensões em vazio sobre o pré-protótipo com núcleo de material amorfo (liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa) e sobre o transformador comercial com núcleo de FeSi.

Tabela 4.3 - Relações de tensões em vazio.

(V ₁)	(V ₂)	Núcleo Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉ (V ₁ /V ₂)	(V ₁)	(V ₂)	Núcleo FeSi (V ₁ /V ₂)
40	20,2	1,98	40	20,1	1,99
60	30,3	1,98	60	30,2	1,98
80	40,5	1,98	80	40,1	1,99
100	50,5	1,98	100	50,2	1,99
120	60,7	1,98	120	60,1	1,99
140	70,5	1,99	140	70,2	1,99
160	80,9	1,98	160	80,1	1,99
180	91,0	1,98	180	90,1	1,99
200	100,9	1,98	200	100,1	1,99
220	110,9	1,98	220	110,1	1,99
240	120,9	1,98	240	120,1	1,99

Nestes ensaios foram utilizados dois instrumentos para medir as tensões (método dos dois voltímetros): 01 multímetro digital, marca YOKOGAWA 7533-06, e um medidor digital de grandezas elétricas (DIGITAL POWER METER), marca YOKOGAWA, modelo 2533E AC, classe de exatidão 0,1 %.

4.2.3 - Teste em carga nominal:

Objetivando testar os valores de tensão e de corrente nominal do transformador, realizou-se um ensaio com o pré-protótipo alimentado pelo lado de 110 V, por meio de um autotransformador variável (220V/110V), empregando como carga uma lâmpada incandescente de 100 W (220 V).

Além do autotransformador variável, foram utilizados os seguintes instrumentos de medição:

- 02 amperímetros analógicos, classe 0,5;
- 02 voltímetros analógicos, classe 0,5;
- 01 wattímetro (escalas de 40, 120, 240, 480 V e 5A), classe 1,0.

Os valores obtidos foram os seguintes:

- tensão do primário = 110 V;
- corrente do primário = 0,897 A;

- tensão do secundário = 220 V;
- corrente do secundário = 0,445 A;
- leitura do wattímetro = 110 W.

Repetindo as medições, utilizando o medidor de grandezas elétricas (DIGITAL POWER METER - YOKOGAWA), os resultados foram os seguintes:

- tensão do primário = 110,25 V;
- corrente do primário = 0,888 A;
- tensão do secundário = 199,9 V;
- corrente do secundário = 0,495 A;
- leitura do wattímetro = 98,4 W;
- leitura da potência reativa = 11,1 var;
- leitura da potência aparente = 97,4 VA;
- fator de potência = 0,994

4.2.4 - Ensaio de curto-circuito:

O ensaio de curto-circuito, realizado de acordo com a montagem apresentada na Figura 4.1, é importante para a determinação dos chamados parâmetros longitudinais (impedância, reatância e resistência) e sobretudo para a determinação das perdas no cobre. Neste ensaio, foram empregados os seguintes instrumentos:

- 01 autotransformador variável: 220 V/ 0-240 V, corrente máxima = 6,3 A, kVA máximo = 1,5 kVA;
- 01 amperímetro analógico, classe 0,5;
- 01 voltímetro analógico, classe 0,5;
- 01 wattímetro analógico, classe 1,0.

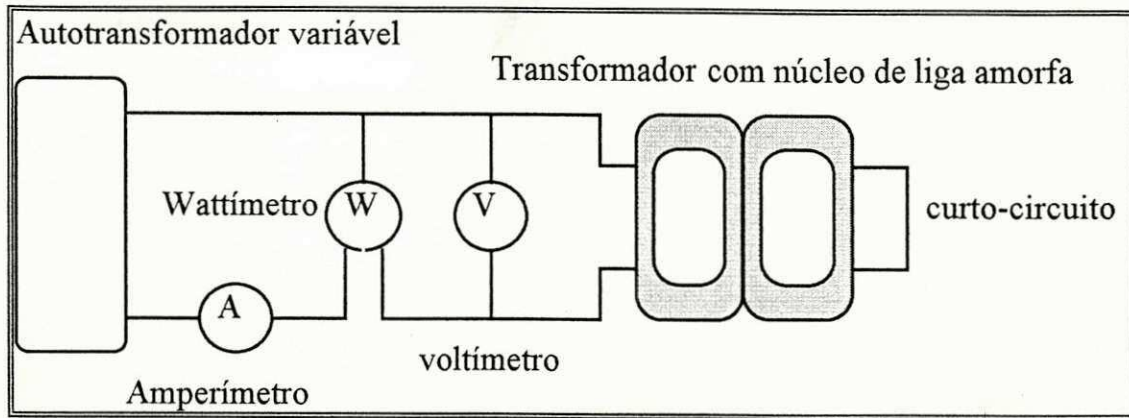


Figura 4.1 - Montagem para o ensaio de curto-circuito.

Na realização do ensaio, as indicações dos instrumentos de medição foram as seguintes:

- Tensão de curto-circuito = 19,0 V;
- Potência de curto-circuito = 4,0 W;
- Corrente de curto-circuito = 0,45 A

4.2.5 - Ensaio de circuito aberto:

Um exame no circuito equivalente, mostrado na Figura 2.5, no capítulo anterior, mostra que se o secundário do transformador real estiver em aberto, uma tensão imposta no lado primário irá atuar sobre um circuito composto pela impedância do primário $Z_1 = R_1 + jX_1$, em série com a impedância de excitação, composta por $X_m \parallel R_p$, aqui referidos como parâmetros transversais. Como Z_1 é muito pequeno em comparação à impedância de excitação, a impedância vista do primário é, basicamente, aquela do ramo de magnetização, ou seja, a reatância de magnetização e a resistência representativa das perdas no material magnético do núcleo. Estas considerações indicam que se o secundário do transformador sob teste estiver em circuito aberto, um voltímetro, um amperímetro e um wattímetro, fornecerão leituras da corrente magnetizante e das perdas no material magnético do núcleo.

No ensaio experimental, realizado de acordo com a montagem representada na Figura 4.2, as indicações dos instrumentos de medição foram as seguintes:

- Tensão de circuito aberto = 220 V;
- Corrente de circuito aberto = 50,0 mA;
- Potência de circuito aberto = 0,73 W.

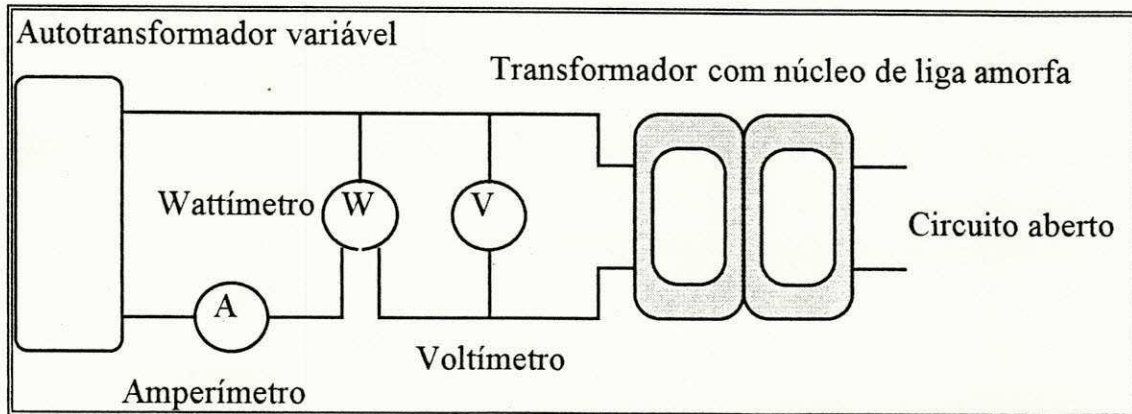


Figura 4.2 - Montagem para o ensaio de circuito aberto

Evidentemente, que a leitura simultânea dos instrumentos conectados de acordo com a Figura 4.2 favorecerá uma leitura da corrente de excitação adicionada das correntes drenadas pelo voltímetro e pela bobina de potencial do wattímetro. Isto justifica, em parte, a diferença entre o valor de projeto e aquele efetivamente medido experimentalmente, conforme indicado na Tabela 4.3. Por sua vez, o wattímetro ao medir as perdas em vazio, o faz incluindo a potência consumida no voltímetro e na bobina de potencial de si próprio. Adicionalmente, deve-se levar em consideração o erro introduzido nas medições de corrente devida a forma de onda, sabidamente não senoidal, e na posição do ponteiro, bem próximo ao início da escala do wattímetro.

4.2.6 - Tensão de alimentação (lado de baixa tensão) versus corrente de excitação:

O circuito empregado para este fim está representado na Figura 4.3. Neste ensaio os instrumentos utilizados foram os seguintes: um autotransformador variável: 220 V/ 0-240 V, corrente máxima = 6,3 A, kVA máximo = 1,5 kVA; um amperímetro digital e um voltímetro analógico, classe 0,5.

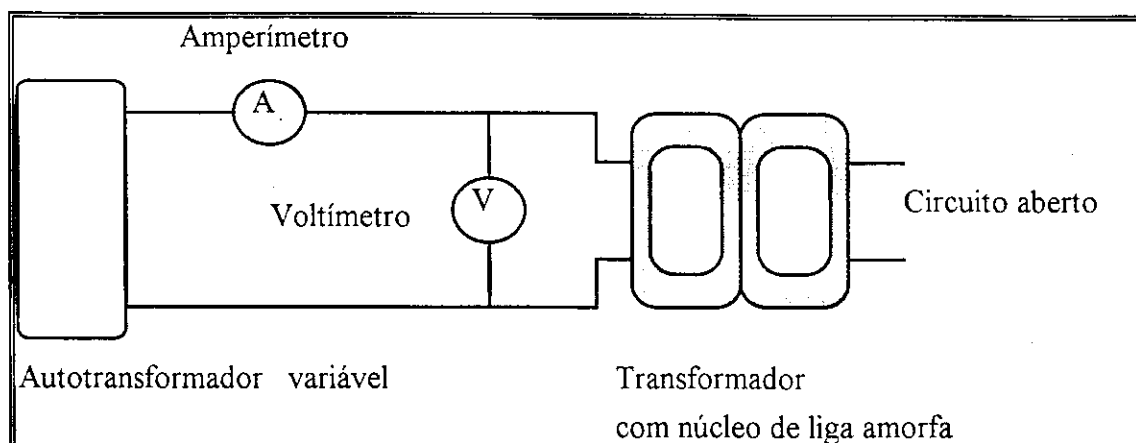


Figura 4.3 - Montagem para a obtenção da relação: tensão de alimentação versus corrente de excitação.

Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Tensão de alimentação versus corrente de excitação.

Tensão do primário, V_p (V)	Corrente em vazio, I_0 (mA)
20	1,96
30	2,35
40	2,85
50	3,04
60	3,83
70	5,35
80	10,50
90	28,5
100	64,90
110	120,00
120	186,0

A Figura 4.4 apresenta graficamente os valores relacionados na Tabela 4.4.

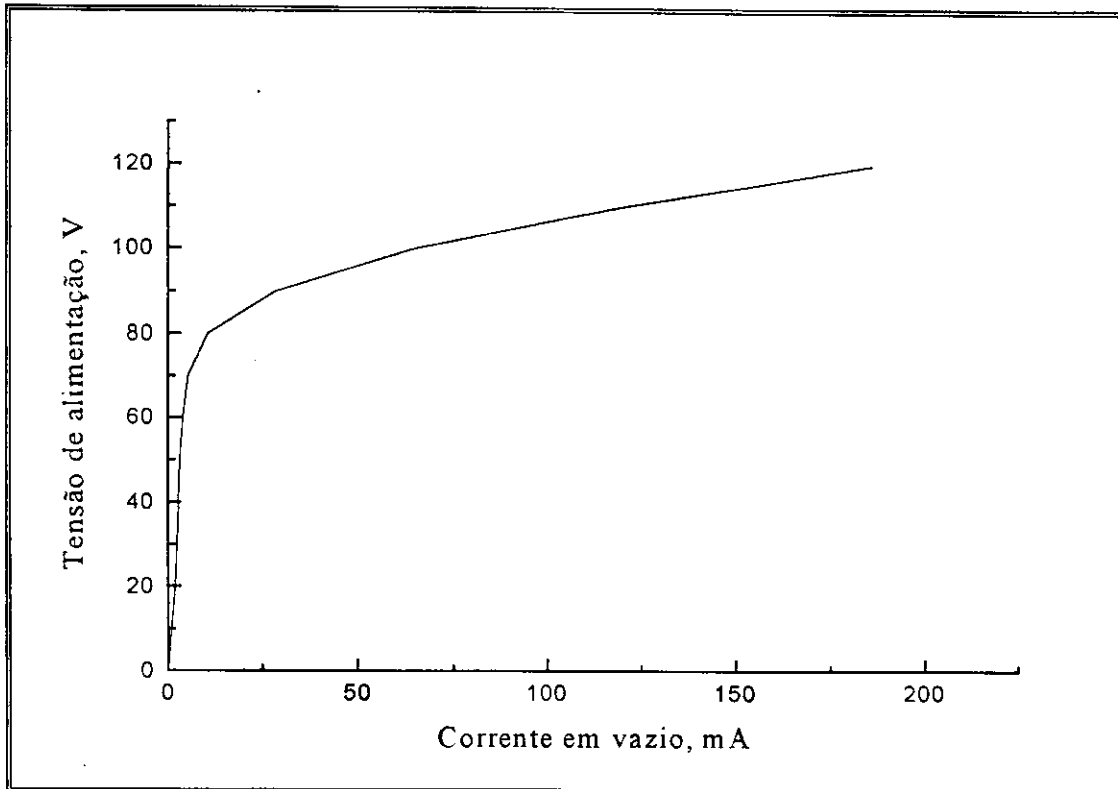


Figura 4.4 - Tensão de alimentação em função da corrente de excitação.

A NBR 5380/1993 (ABNT) observa que mesmo com uma tensão de alimentação senoidal, esta pode ser distorcida pelos harmônicos existentes na corrente de excitação, dos quais o terceiro, o quinto, o sétimo e o nono são predominantes. Portanto, a citada Norma aconselha que para a medição de perdas em vazio com uma tensão com forma de onda distorcida, deve-se introduzir uma correção no valor das perdas, para referi-las à tensão senoidal pura.

4.2.7 - Histerese e corrente de excitação

Sabe-se que os materiais ferromagnéticos são não-lineares ao longo de toda a curva de magnetização. E, de fato, os resultados apresentados na Tabela 4.4 confirmam este comportamento para a liga amorfa empregada na construção do núcleo do pré-prototipo apresentado neste trabalho.

Diante do exposto, e sabendo-se sobretudo da importância do conhecimento prévio do laço de histerese dinâmica e da corrente de excitação para uma avaliação das perdas no núcleo do equipamento sob estudo, montou-se uma bancada de testes para a

determinação da curva de histerese e da corrente de magnetização do núcleo de liga amorfa do pré-protótipo de transformador aqui apresentado.

A histerese dinâmica ou laço B-H contém informações importantes a respeito do material magnético do núcleo. A área circunscrita pelo laço B-H está relacionada com as perdas, e a amplitude relaciona-se com a indução magnética [McLYMAN (1988)].

A Figura 4.5 apresenta o esquema de montagem da bancada de testes para a obtenção do laço de histerese do núcleo na tela de um osciloscópio de dois canais.

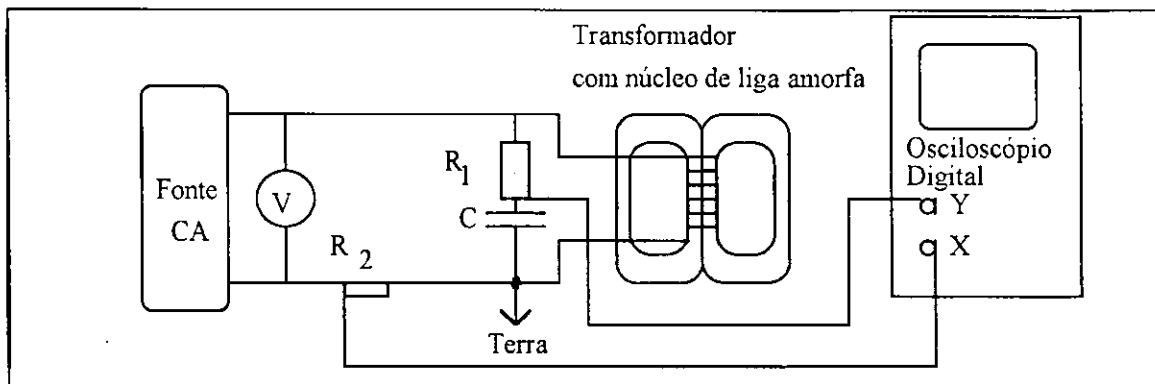
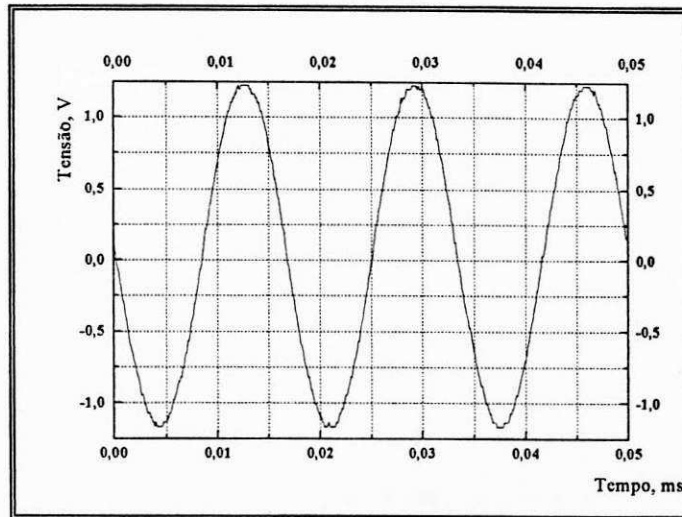


Figura 4.5 - Montagem para a obtenção das formas de ondas da tensão, corrente de excitação e laço de histerese.

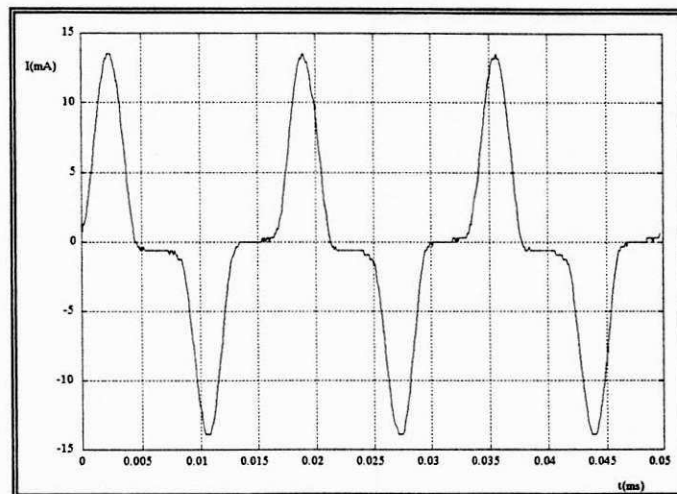
Na montagem da Figura 4.5 foram utilizados os seguintes instrumentos e componentes de circuito:

- 01 osciloscópio HP, modelo 54503, 500 MHz;
- 01 voltímetro analógico, classe 0,5;
- 01 resistor $R_1 = 460 \text{ k } \Omega$;
- 01 resistor $R_2 = 47 \text{ } \Omega$;
- 01 capacitor $C = 1,47 \text{ } \mu\text{F}$;
- 01 autotransformador variável: 220 V/ 0-240 V, corrente máxima = 6,3 A, kVA máximo = 1,5 kVA;

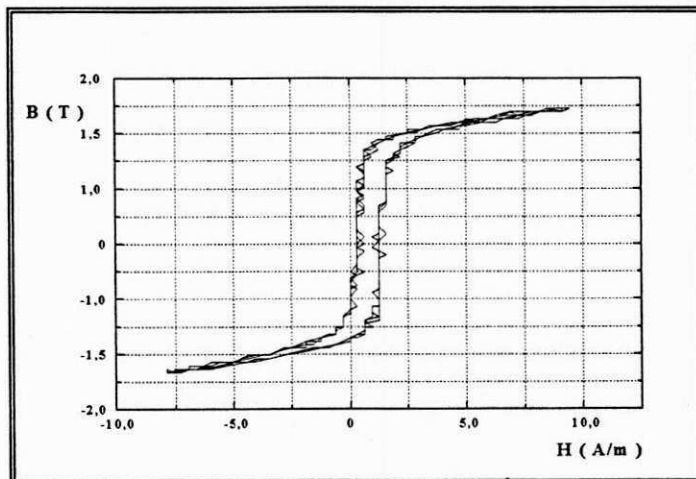
Na Figura 4.6 são apresentadas: (a) a saída gráfica da tensão sobre o capacitor V_C , (b) o sinal proporcional à corrente de excitação e (c) o laço de histerese, resultante da composição dos dois sinais nos canais XY.



(a) Tensão sobre o capacitor



(b) Corrente de excitação



(c) Laço de histerese

Figura 4.6 - Formas de ondas da tensão, corrente de excitação e laço de histerese

Na obtenção das curvas apresentadas nas figuras 4.6a e 4.6b, os sinais proporcionais à tensão e corrente de excitação foram transferidos da memória do osciloscópio para um microcomputador, tipo PC, por meio de uma interface GPIB [IEEE 488]¹. O laço de histerese mostrado na Figura 4.6c foi obtido fazendo-se a composição destes dois sinais e empregando-se a saída gráfica do programa MATLAB².

Observe-se que o sinal de fluxo magnético poderia ser determinado por meio de integração numérica da forma de onda da tensão induzida no transformador. Como também, numericamente, a distorção da corrente de excitação, no caso específico do núcleo de material amorfo, pode ser estudada a partir da análise das harmônicas contidas em sua forma de onda, conforme apresentada na Figura 4.7.

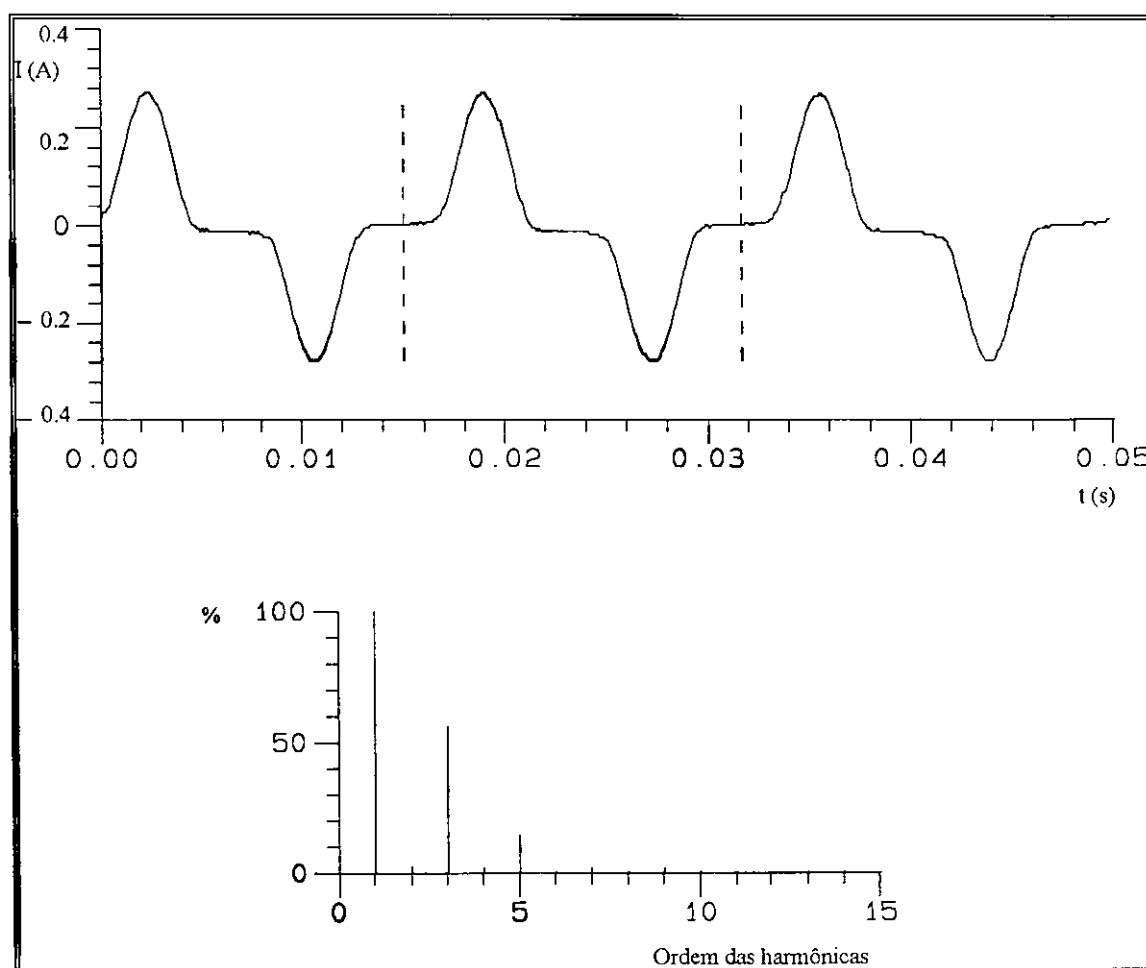


Figura 4.7 Análise percentual das componentes harmônicas da corrente de excitação

¹ Hewlett-Packard (1987). *Tutorial Description of the Hewlett-Packard Interface Bus-Hewlett-Packard Company*

² The Math Works Inc. (1992). *MATLAB Interactive Scientific and Engineering Software*.

A análise percentual das componentes harmônicas da corrente de excitação, mostrada na Figura 4.7, estabelece a predominância das harmônicas de terceira e quinta ordem como responsáveis pela distorção da forma de onda desta corrente com relação à sua componente fundamental.

Observe-se que os valores das ordenadas da Figura 4.7, muito embora expressos em ampères, são os valores da tensão medida pelo osciloscópio sobre o resistor de 47Ω , inserido no circuito da Figura 4.5.

Este resultado experimental a cerca da corrente de excitação, confirma a necessidade de se considerar a não-linearidade do núcleo no modelamento do transformador, refletida na forma de onda destorcida da corrente de excitação. Ainda em termos de modelamento, a corrente de excitação pode ser dividida em duas componentes: uma em fase com a tensão de alimentação, representativa das perdas no núcleo, e uma outra em quadratura, conhecida como corrente de magnetização.

Portanto, o desempenho do transformador pode ser afetado pela presença das harmônicas de duas formas: no que toca às perdas no núcleo, causadas pelas correntes parasitas e histerese, que tendem a aumentar na medida em que a frequência aumenta, assim como pelo efeito pelicular que também aumenta com a frequência.

Na análise das harmônicas foi empregado o programa de manipulação de curvas DSN, desenvolvido por HECTOR (1990).

4.4 Projeto e realização: resultados preliminares

A Tabela 4.5 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e aqueles de projeto, realização do pré-protótipo de transformador com núcleo de liga amorfa, com valores nominais: 100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz.

Tabela 4.5 - Valores do projeto versus valores obtidos com o pré-protótipo real.

PARÂMETROS	VALORES DE PROJETO	PRÉ-PROTÓTIPO REAL
Seção geométrica da coluna central, cm ²	12,50	13,36
Largura da coluna central, cm	2,46	2,63
Largura da janela, cm	1,23	1,70
Altura da janela, cm	3,69	3,50
Área da janela, cm ²	4,54	5,95
Largura total do núcleo, cm	7,38	8,87
Altura total do núcleo, cm	6,15	6,23
Profundidade do núcleo, cm	5,08	5,08
Volume total do núcleo, cm ³	230,56	280,72
Volume do material magnético, cm ³	184,43	239,00
Massa do núcleo, kg	1,32	1,05
Perdas no núcleo, W	0,26	0,73
Número de espiras do primário	589	587
Corrente nominal do primário, A	0,454	0,445
Corrente de excitação (em vazio), mA	22,7	50,0
Seção do condutor primário, mm ²	0,129	0,128
Número de espiras do secundário	295	293
Corrente nominal do secundário, A	0,909	0,890
Seção do condutor secundário, mm ²	0,259	0,258
Seção ocupada pelas bobinas, cm ²	1,52	-
Volume ocupado pelas bobinas, cm ³	28,79	-
Massa total das bobinas, kg	0,256	0,432
Perdas nas bobinas, W	4,33	4,00
Massa do conjunto (núcleo + bobinas), kg	1,48	1,50
Rendimento (Eficiência), %	95,61	95,70

Idealmente, a seção geométrica da coluna central do transformador sob estudo deveria ser quadrada; o que resultaria num valor de aproximadamente 3,15 cm para a largura desta coluna. Entretanto, devido à limitação de disponibilidade de liga amorfa nesta dimensão, optou-se por uma coluna central retangular que atendesse à relação: *seção geométrica = largura da fita amorfa x largura da coluna central*.

No cálculo do número de espiras dos enrolamentos primários e secundários, optou-se por utilizar 1,4 T como o valor máximo permissível para a densidade de fluxo magnético. Este valor está abaixo do joelho da curva B-H do material amorfo e garante um uso mais otimizado do material do núcleo.

Observando-se a Tabela 4.5, verificam-se algumas diferenças entre alguns valores de projeto face aos obtidos com o pré-protótipo em real grandeza. Os destaques são para as perdas no núcleo, o valor da corrente de excitação, a massa do núcleo e a massa total das bobinas. As justificativas são as seguintes:

No que tange às perdas do núcleo, o valor medido de 0,73 W corresponde a 2,8 vezes o valor calculado no projeto. De fato, esta diferença é significativa e a sua origem está no erro de leituras de potência ativa menores que 1,0 W. Uma discussão a este respeito é apresentada no Capítulo 6, item 6.3.2.

No tocante à corrente de excitação, a diferença decorre da força magnetomotriz adicional necessária para prover a magnetização dos entreferros distribuídos ao longo do núcleo. A presença destes entreferros e o baixo fator de empilhamento justificam a diferença entre os valores calculados e medidos para a massa do núcleo. Quanto aos valores calculados e medidos para a massa total das bobinas, a diferença está na inclusão dos materiais isolantes e do carretel de suporte na determinação da massa total das bobinas do pré-protótipo.

A experiência adquirida com o projeto e a realização do pré-protótipo de 100 VA, motivou um novo desafio: projetar e construir com o material amorfo ainda disponível (cerca de 9,5 kg), um protótipo de transformador de 1,0 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz.

Este protótipo foi então projetado e construído, apesar da limitação no tocante a largura da fita amorfa (5,08 cm), buscando-se aproveitar e explorar, da melhor forma possível, as potencialidades magnéticas do material.

O resultado, foi um protótipo de transformador com menos peso, menos volume e rendimento superior a um transformador comercial, de valores nominais idênticos, porém construído com núcleo de material cristalino (FeSi).

Por outro lado, sabe-se que uma característica importante de um transformador é a relação:

$$\frac{V_1 \cdot I_0}{V_1 \cdot I_n} = \frac{k \text{ var}}{kVA} \quad (4.2)$$

A equação (4.2) mostra que a corrente de excitação é proporcional à potência de excitação dos transformadores. Assim sendo, quando a energia reativa é fortemente tarifada, escolher um transformador com baixa corrente de excitação é o recomendável [LUCIANO e FECHINE (1991)].

Neste particular, é oportuno observar que experimentalmente, as correntes de excitação do pré-protótipo 100 VA, assim como pelo protótipo de 1,0 kVA, mostraram-se superiores aos respectivos valores sugeridos em nível de projeto. Isto, de fato, é um indicativo que o material do núcleo precisa ter a sua permeabilidade melhorada e sugere a realização de um tratamento magnetotérmico, a exemplo do que será apresentado no Capítulo 5.

Estes valores experimentais serão apresentados e discutidos no Capítulo 6.

Capítulo 5

TRATAMENTO MAGNETOTÉRMICO

5.1 Introdução

Observações experimentais têm demonstrado que durante o processo de confecção do núcleo de transformadores são introduzidas tensões mecânicas internas que tendem a mudar as propriedades magnéticas da liga amorfa empregada, em relação ao seu estado bruto de têmpera. Estas alterações não são desejáveis, por comprometer alguns parâmetros importantes no que diz respeito à eficiência do transformador ao longo de seu ciclo de operação, tais como a indução de saturação (B_s), a força coercitiva (H_c), as perdas ativas (W/kg) e a potência de excitação (VA/kg). Estas tensões precisam, portanto, ser aliviadas para que as características magnéticas favoráveis do material do núcleo sejam recuperadas e algumas delas até melhoradas, como o aumento da indução de saturação e a redução da coercitividade. Isto, efetivamente, tem sido obtido por meio de tratamento térmico, sob a ação de campo magnético, referido no presente trabalho como tratamento magnetotérmico [GRAHAN JR. e EGAMI, 1980].

O objetivo deste tratamento magnetotérmico é prover a relaxação estrutural do material amorfo do núcleo, diminuindo o número de vazios, posto que as ligas amorfas, obtidas por solidificação rápida, encontram-se num estado de não-equilíbrio, devendo relaxar para o estado de equilíbrio metaestável, sempre que o sistema dispuser de mobilidade atômica suficiente, possibilitada pela temperatura.

O estado de não-equilíbrio é devido a alta velocidade de solidificação imposta, não permitindo que os átomos do sistema atinjam suas posições de equilíbrio, ainda na fase líquida, antes de se solidificarem. Já o estado de equilíbrio metaestável é o estado no qual os átomos estão arranjados na mesma configuração que a liga estaria no estado líquido, se assim fosse possível, nesta temperatura.

A transição do estado de não equilíbrio para estados mais próximos do equilíbrio metaestável é denominado relaxação estrutural. Em termos práticos, esta relaxação é

obtida sempre que uma liga amorfa é recozida abaixo de sua temperatura de cristalização. Particularmente, de acordo com o fabricante, o valor desta temperatura para a liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa é de 550 °C [ALLIED-SIGNAL, 1987].

Neste capítulo são apresentados e discutidos os tratamentos magnetotérmicos realizados sobre dois núcleos de liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa: um referente ao pré-protótipo de transformador de 100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz e um outro, dividido em duas partes idênticas, a ser empregado no protótipo de 1,0 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz. Os parâmetros temperatura (380 °C), tempo (1 hora) e campo magnético (800 A.esp/m) aplicados foram assumidos tomando por base os valores médios apresentados na Tabela 2.6, no capítulo 2, referente à revisão da literatura.

5.2 Caracterização estrutural da liga Fe₇₈B₁₃Si₉

Objetivando controlar e acompanhar a amorficidade do material amorfo antes e após o tratamento magnetotérmico, foram realizados ensaios de Análise por Raios-X e Calorimetria Diferencial de Varredura (*Differential Scanning Calorimetry* - DSC)

O primeiro passo no sentido da análise estrutural da liga sob estudo foi submetê-la à difração de raios-X, pois este ensaio permite a confirmar, ou não, o estado amorfo do material, após a realização do tratamento magnetotérmico, identificando as fases presentes.

Por DSC foi possível determinar a temperatura de cristalização, que seria a temperatura limite superior para a realização do tratamento magnetotérmico, e a entalpia ou energia envolvida no processo, simulando as condições do tratamento térmico do material no interior do forno, na presença de ar e em atmosfera controlada (argônio).

Os equipamentos utilizados para realizar os ensaios nas amostras do material amorfo sob estudo foram os seguintes:

a) Difração de Raios-X:

Local: Laboratório de Microscopia- DEMa/UFSCar;

Equipamento: Difratorômetro de Raios-X, modelo HZT-4;

Método: as amostras foram colocadas em tubo de molibidênio e submetidas à radiação na linha α do Cr, numa velocidade de varredura de 2°C/min.

Resultados: Consultando microfichas e o manual *Powder Diffraction File Alphabetical Index Inorganic Phases (1980)*, foram identificadas as fases presentes nas amostras do material amorfo submetido aos ensaios no DSC. Nas amostras submetidas ao ciclo térmico inferior à temperatura de cristalização, ficou constatada a conservação do estado amorfo.

b) Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC):

Local: Laboratório de Solidificação- DEMa/UFSCar;

Equipamento: Thermische Analyse NETZSCH DSC 404;

Atmosfera: Ar;

Cadinho: Alumina;

Temperatura final: 820 °C;

Procedimentos preliminares: antes de o núcleo de material amorfo ser colocado no interior do forno, foram preparadas pequenas amostras deste material, com área individual de aproximadamente 2,5 cm² e massa total de cerca de 30 mg. Antes de ser colocado no interior do cadinho do DSC, estas amostras foram submetidas a uma limpeza química superficial com tetracloreto de carbono e um aparelho de ultra-som.

Durante o tratamento magnetotérmico, um cadinho com amostras, preparadas de acordo com os procedimentos descritos no parágrafo anterior, esteve presente junto do núcleo e próximo do termopar, no interior do forno. O objetivo era a verificação da ocorrência ou não de cristalização do material amorfo, o que será discutido no item 5.4.

Resultados: Por DSC, não foi detectada nenhuma cristalização do material amorfo; nem antes e nem depois da realização do tratamento magnetotérmico. Esta afirmação pode ser feita, comparando-se os valores das entalpias anteriores e posteriores ao tratamento térmico das amostras, no DSC, em condições semelhantes àsquelas do interior do forno.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os gráficos do DSC referentes a estas amostras, destacando os valores da entalpia de cristalização e os valores limite superiores das temperaturas, abaixo das quais o tratamento magnetotérmico deve ser realizado.

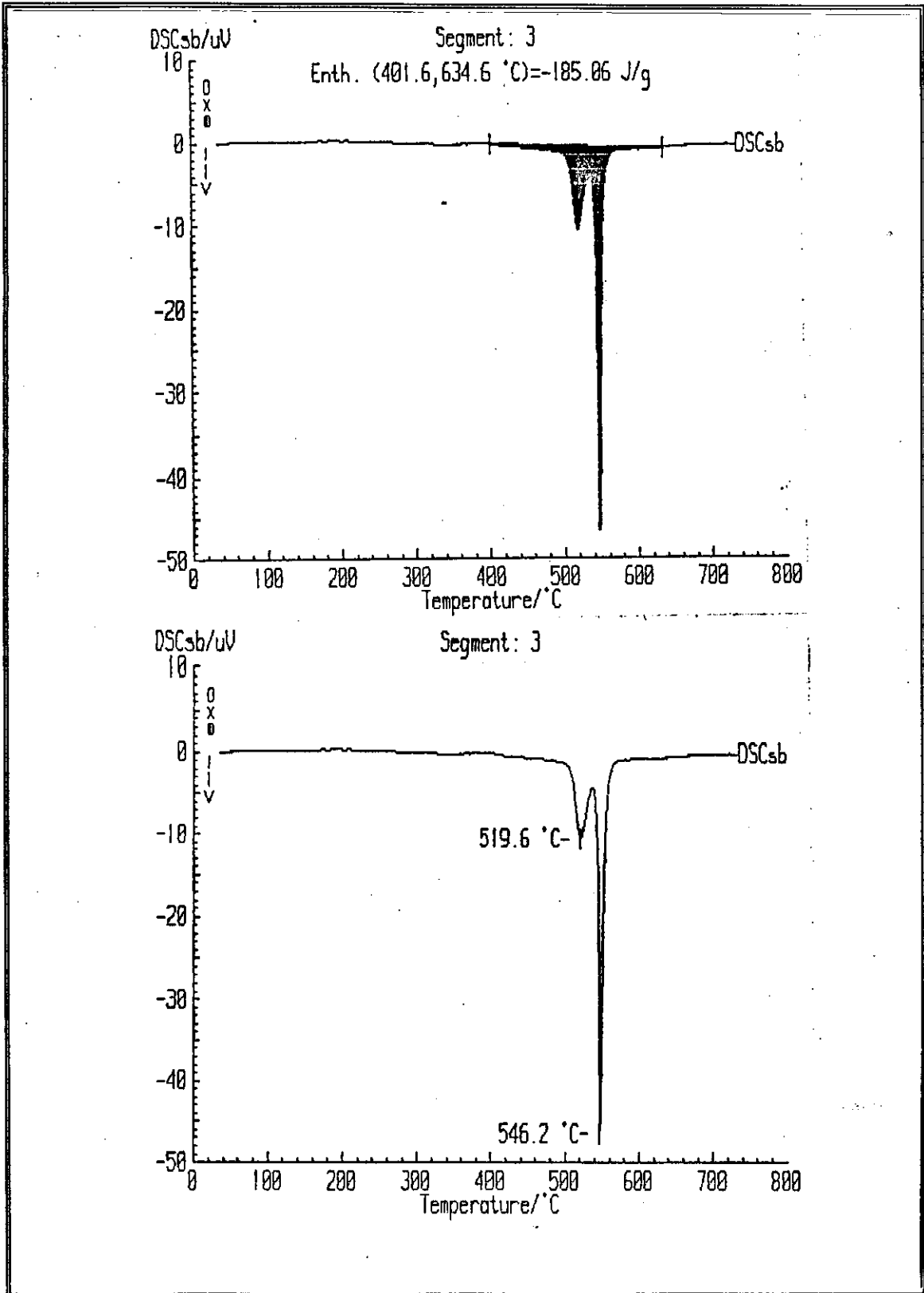


Figura 5.1 - DSC da amostra da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, antes do tratamento magnetotérmico.

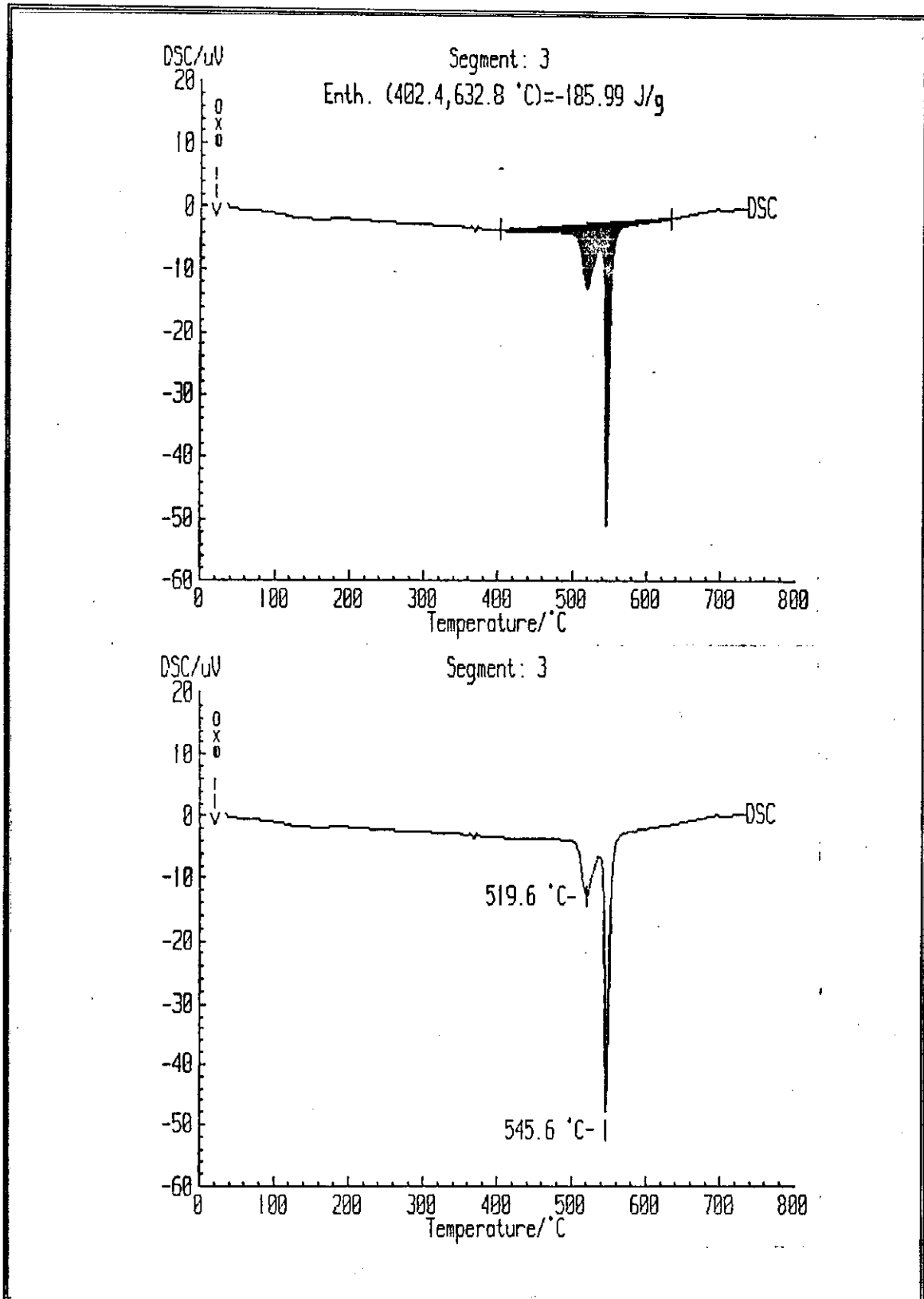


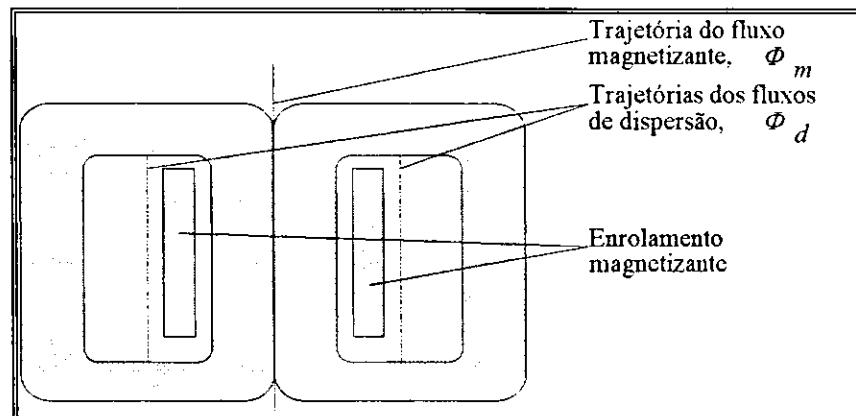
Figura 5.2 - DSC da amostra da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, após o tratamento magnetotérmico.

Conforme pode ser verificado nas Figuras 5.1 e 5.2, para diferentes taxas de aquecimento, foram detectados picos entre 519,6 °C e 546,2 °C. Portanto, estes resultados confirmam que o estabelecimento do patamar de 380 °C para o tratamento magnetotérmico é inferior à temperatura de cristalização do material amorfo.

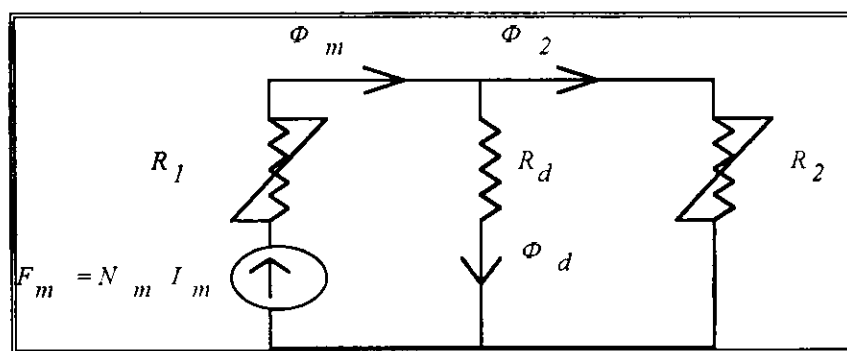
5.3 Tratamento magnetotérmico

5.3.1 - Análise do circuito magnético

Optando-se pelo modelo do circuito equivalente, o primeiro passo é reduzir os aspectos mais significativos do núcleo de material amorfo e do enrolamento magnetizante, representados na Figura 5.3a, em termos de relutância, fluxos e forças magnetomotrizes, conforme a Figura 5.3b.



(a) representação do núcleo, do enrolamento magnetizante e fluxos magnéticos



(b) circuito magnético equivalente.

Figura 5.3- Análise do circuito magnético do núcleo de liga amorfa sob campo magnetizante.

Onde: F_m representa a força magnetomotriz do enrolamento magnetizante;

N_m , o número de espiras deste enrolamento; I_m a corrente magnetizante;

R_1 , a relutância da coluna central e metade de cada uma das seções das culatras;

R_d , a relutância de dispersão, relativa ao espaço de ar entre o enrolamento e o núcleo;

R_2 , a relutância das colunas laterais e o restante das seções das culatras;

Φ_m e Φ_d , respectivamente, o fluxo magnetizante e o fluxo de dispersão; e

Φ_2 representa os fluxos nas colunas laterais.

Deve-se observar que a trajetória do fluxo magnetizante inclui a coluna central e cerca da metade de cada uma das seções da culatra, e que a trajetória relativa ao fluxo Φ_2 consiste das duas colunas externas e do restante das seções das culatras. Na realidade, esta trajetória consiste de duas partes separadas fisicamente mas, por causa da simetria, elas podem ser consideradas como estando em paralelo, do ponto de vista magnético.

Ainda com relação ao circuito magnético representativo, mostrado na Figura 5.3b, deve-se observar que embora a relutância de dispersão R_d seja linear, as relutâncias R_1 e R_2 dependem da geometria e do material que as compõem e são, portanto, não-lineares.

Neste caso, para uma análise rigorosa do circuito, a curva de magnetização da liga amorfa se faz necessária, demandando um processo iterativo que após a convergência permita o cálculo das induções magnéticas, dividindo-se os fluxos magnéticos pelas áreas das regiões de interesse.

5.3.2 - Cálculo da corrente magnetizante

Examinando a Figura 5.3a, percebe-se que, por simetria, a lei de Ampère pode ser aplicada à trajetória fechada do comprimento médio de cada metade do núcleo:

$$\oint \vec{H}_m \cdot d\vec{l}_m = N_m \cdot I_m \quad (5.1)$$

Assim, assumindo o valor de 800 A/m para o campo magnetizante e considerando que o comprimento $l_m = 15,98$ cm ,

$$N_m \cdot I_m = 127,84 A \cdot esp. \quad (5.2)$$

Portanto, adotando-se um número de 80 espiras, serão requeridos 1,6 A para prover o campo magnetizante de 800 A/m necessário para o tratamento magnetotérmico.

Consultando a Tabela de fios de cobre para transformadores apresentada por SARAIVA (1988), e assumindo a densidade de corrente de 3,0 A/mm², verifica-se que o fio indicado é o de seção 0,533 mm² (fio N° 24), posto que:

$$\frac{1,6A}{3,0A/mm^2} = 0,533mm^2 \quad (5.3)$$

Uma vez dimensionada a bitola do fio de cobre, resta examinar se as 80 espiras caberão na janela do núcleo (seção da janela > seção ocupada pelo cobre).

Como a seção ocupada pelo cobre = $\sum N_m \cdot S_{cu} = 42,66mm^2$ é bem inferior à seção disponível da janela = 425mm², conclui-se que a realização do enrolamento é perfeitamente viável, permitindo inclusive que o número de espiras possa ser aumentado, caso haja a necessidade de diminuição da intensidade de corrente.

Adotando-se o mesmo procedimento de cálculos e as mesmas imposições em termos de número de espiras e campo magnetizante, foi possível calcular a bitola do fio e a intensidade de corrente elétrica necessários para prover a realização do tratamento magnetotérmico no núcleo de 1,0 kVA. Neste caso, como o comprimento médio do circuito magnético do núcleo é $l_m = 26,3 \text{ cm}$, uma corrente magnetizante de 2,63 A e um fio de seção 0,88 mm² (fio N° 19) são suficientes.

$$N_m I_m = 210,4A. esp. \quad (5.3)$$

Note-se que neste dimensionamento não foi levado em conta a dispersão do fluxo magnetizante através da janela do núcleo, traduzida numa indutância de dispersão. Porém, caso seja necessário levar em consideração este efeito, uma corrente adicional I_{mj} pode ser calculada pela equação [PATEL (1981)]:

$$I_{mj} = \frac{H_j l_j}{N_m}, \quad (5.4)$$

onde H_j é a intensidade de campo magnético e l_j é a altura do espaço interior da janela do núcleo.

5.3.3 - Realização dos isolamentos elétricos e térmicos

Durante o tratamento magnetotérmico, o fio magnetizante é submetido a uma temperatura de cerca de 380 °C, por 1 hora. Neste nível de temperatura, certamente, o verniz isolante do fio de cobre, assim como os demais materiais isolantes usuais entre a parte viva e o núcleo de material, entram em processo acelerado de degradação, o que propicia o contato entre os circuitos elétricos e magnéticos. Portanto, para evitar este inconveniente, é proposto um isolamento elétrico e térmico especial, à base de fibra de vidro e mica, dispondo os enrolamentos em quatro camadas isoladas entre si e do núcleo.

5.3.4 - Características do forno e do controlador de temperatura

Para a realização do tratamento magnetotérmico, foi especificado e adquirido um forno com controlador de temperatura e bomba de vácuo, cujas características principais são apresentadas a seguir:

- Potência: 4 kW;
- Tensão de alimentação: 220 V;
- Temperatura máxima de operação: 800 °C;
- Resistência elétrica: Kantal "A1";
- Termoelemento: termopar tipo K (Cromel/Alumel);
- Dimensões internas : [196,7 x 200,2 x 255,0] mm;
- Controlador: microcontrolado, com 3 ciclos de rampa de aquecimento e patamar, saída para TRIAC (controle por ângulo de fase), 2 saídas de relés (5A/ 250 VAC), alarme de rompimento de termopar e sobretemperatura no *display*, controle P.I.D, programação via teclas com memória não volátil (EEPROM), acompanhamento do processo em 2 *displays*, de 4 dígitos, erro de leitura menor que 1 %.

A Figura 5.4 apresenta detalhes do sistema empregado no tratamento magnetotérmico.

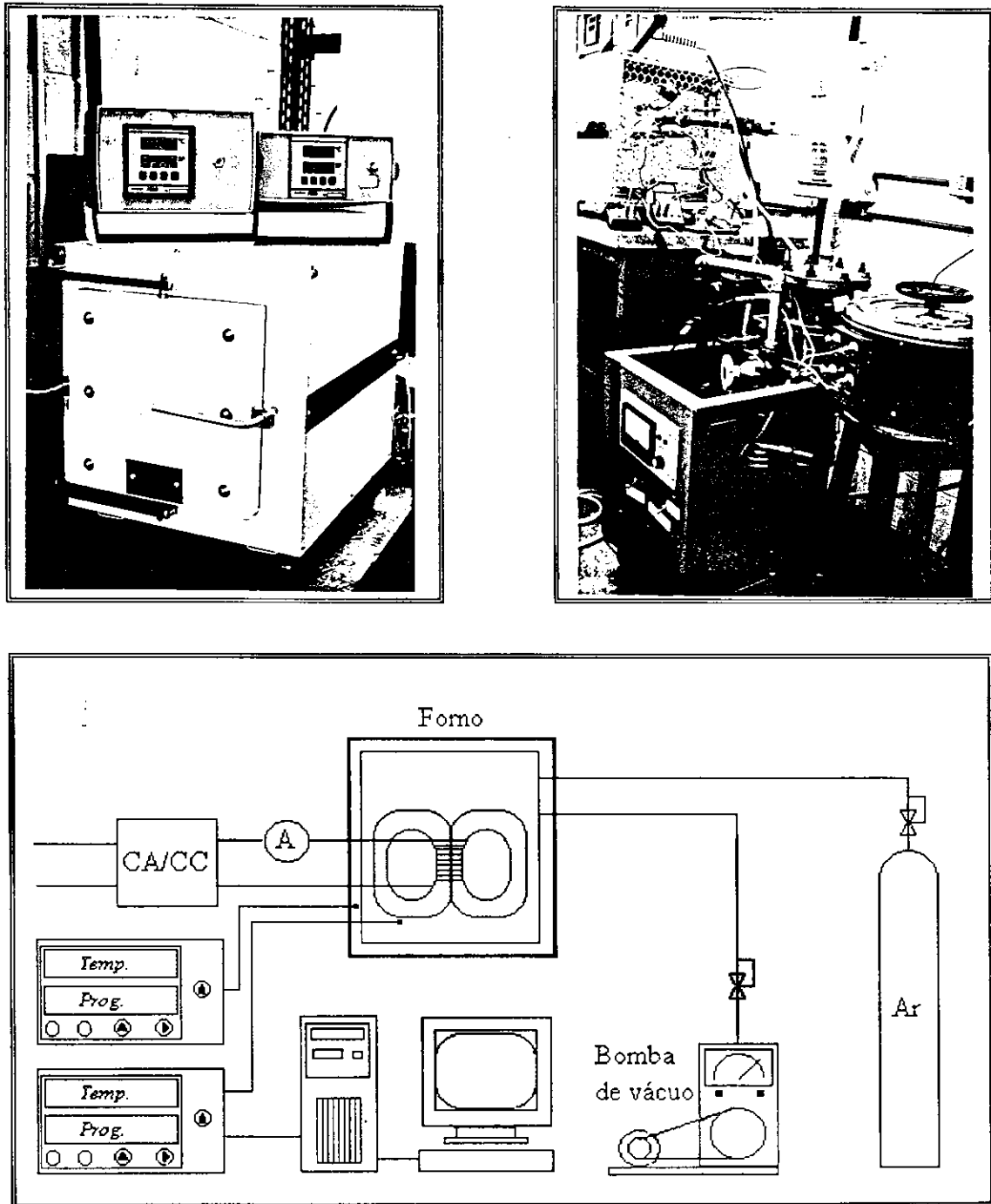


Figura 5.4 - Sistema empregado no tratamento magnetotérmico.

Na Figura 5.4, a fotografia superior esquerda representa a vista frontal e lateral do forno; a fotografia superior direita apresenta a vista traseira do forno, a bomba de vácuo

e o sistema elétrico do campo magnetizante e na figura inferior, o diagrama de blocos, representa o sistema empregado no tratamento magnetotérmico

5.3.5 - Atmosfera do tratamento

Para evitar qualquer problema com o material amorfo do núcleo ou com os materiais elétricos e isolantes do circuito magnetizante, é recomendável que o tratamento magnetotérmico seja realizado na atmosfera de um gás que seja: não oxidante, não carburante e não redutor. No tratamento aqui apresentado, o gás utilizado foi o argônio ultrapuro (99,98 % de pureza).

5.3.6 - Calibração do forno

Em metalurgia, um procedimento usual é realização de tratamento térmico com o material a ser tratado imerso em banho de sais. Esse procedimento garante um aquecimento rápido do material a ser tratado, exatamente à temperatura do banho de sais, sendo esse aquecimento realizado de modo homogêneo. Entretanto, para o tratamento aqui apresentado, tal procedimento seria totalmente inadequado, tendo em vista que o núcleo de material amorfo deve ser tratado num ambiente de atmosfera inerte e submetido concomitantemente a um campo magnético originário de uma bobina magnetizante. Desta forma, a transmissão de calor das paredes internas do forno até o núcleo de material amorfo se dá, basicamente, por radiação, o que na faixa temperatura do processo torna-se bastante ineficiente.

Neste particular, a calibração do forno, em função da massa relativamente grande a ser tratada, requer atenção especial, conforme sugere a metodologia apresentada a seguir:

a) Metodologia

Inicialmente, antes de colocar qualquer amostra no interior do forno, realizou-se um teste de vedação no mesmo, acionando a bomba de vácuo e fazendo a leitura do vacuômetro. Havendo sido detectado vazamentos, foram tomadas as providências devidas no sentido de saná-los. Em seguida, ainda sem nenhuma amostra no interior do forno, programou-se um ciclo de tratamento com taxa de aquecimento de 9,2 °C/min, patamar de 300°C, tempo de permanência de 60 minutos e taxa de resfriamento igual à

taxa de aquecimento: tempo total de 2 horas. A resposta do controlador P.I.D. mostrou-se oscilante em torno do patamar, entre 317 °C e 294°C, tornando necessários ajustes nas constantes proporcional, integral e derivativa, tomando como base o método desenvolvido por Ziegler-Nichols e apresentado por BERTUCCI NETO (1990).

Realizados alguns ciclos, os parâmetros do controlador foram ajustados e o forno passou a atingir o patamar no tempo programado e nele permanecendo com oscilações menores que 1 °C.

Uma vez ajustado o ciclo do forno em vazio, o passo subsequente foi colocar uma massa de aço equivalente à massa do material amorfo a ser ensaiado, e repetir o ciclo anteriormente programado, com o objetivo de estudar a influência da massa inserida no processo de controle de temperatura.

É oportuno observar que o controle de temperatura do forno é realizado com base na temperatura detectada pelo termopar alojado junto à resistência de aquecimento do forno. Enquanto um outro termopar, colocado o mais próximo possível da parte superior da amostra a ser submetida ao ciclo térmico, é o responsável pelo acompanhamento da temperatura da citada amostra.

b) Resultados para um núcleo de material amorfo de 1,29 kg

Dado a limitação da quantidade de material amorfo disponível, uma alternativa para a simulação do desempenho do ciclo térmico do forno quando do tratamento magnetotérmico previsto, foi a utilização de uma massa de aço igual a 1,3 kg, aproximadamente igual à massa do núcleo de material amorfo a ser tratado (1,29 kg). A Figura 5.5 apresenta o ciclo térmico referente a esta simulação.

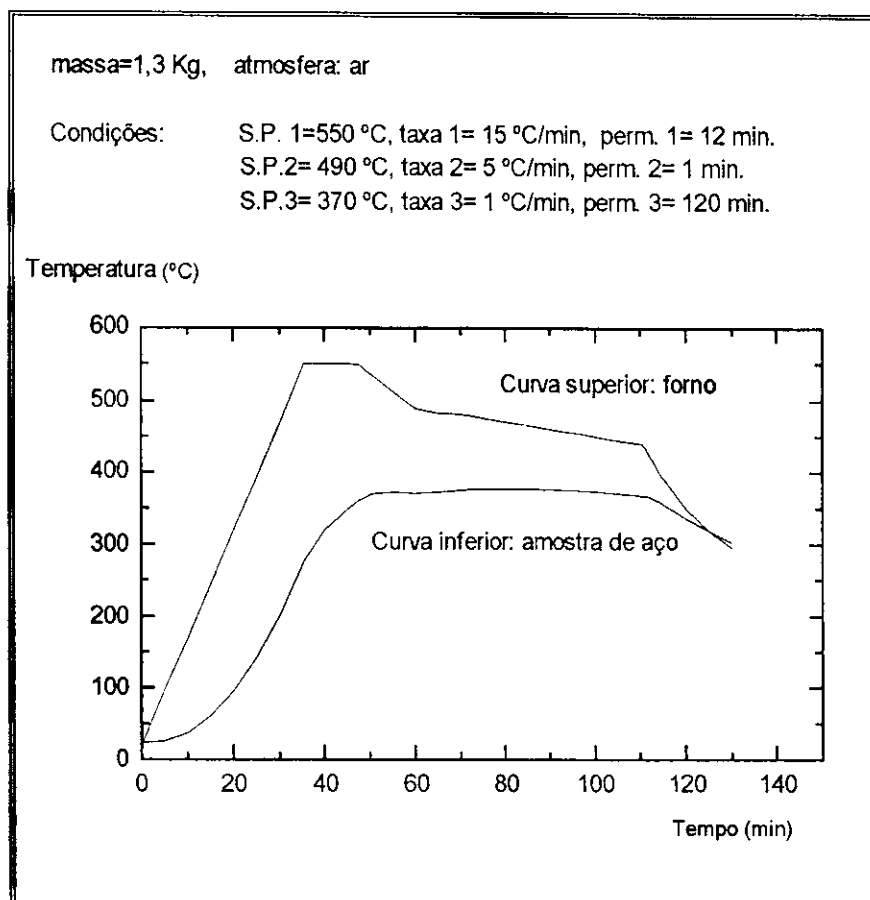


Figura 5.5 - Ciclo térmico para calibração do forno com amostra de aço.

A experiência adquirida no estabelecimento do ciclo térmico empregando a amostra de aço possibilitou a definição das condições apropriadas para a realização do tratamento magnetotérmico sobre o núcleo de liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa, de acordo com os seguintes procedimentos:

- 1) O núcleo a ser tratado foi instalado no interior do forno e executadas as ligações elétricas para o campo magnetizante;
- 2) Realizado o teste de continuidade do circuito elétrico, o forno foi fechado e estabelecido um vácuo de 2×10^{-2} Torr no seu interior;
- 3) Em seguida, o vácuo foi “quebrado” com o preenchimento da câmara do forno com o gás argônio, numa taxa de 5 litros/min, para em seguida ser novamente estabelecido o vácuo e repetido o processo por três vezes, para garantir uma limpeza gradativa da atmosfera (*lavagem com argônio*) sob a qual o tratamento magnetotérmico será realizado;

4) Nesta etapa, recomenda-se que se faça uma verificação rigorosa quanto à existência de vazamentos de gás e quanto à continuidade do circuito do campo magnetizante;

5) O forno então foi ligado e monitorizadas a sua temperatura e a temperatura do núcleo;

6) Para aplicar o campo magnetizante esperou-se que a temperatura do núcleo atingisse 200 °C, procurando em seguida mantê-lo numa temperatura média de 375 °C, por 1 hora, antes de desligar o forno e esperar que o núcleo volte, naturalmente, à temperatura ambiente e o forno possa ser aberto. A Figura 5.6 apresenta o ciclo térmico descrito.

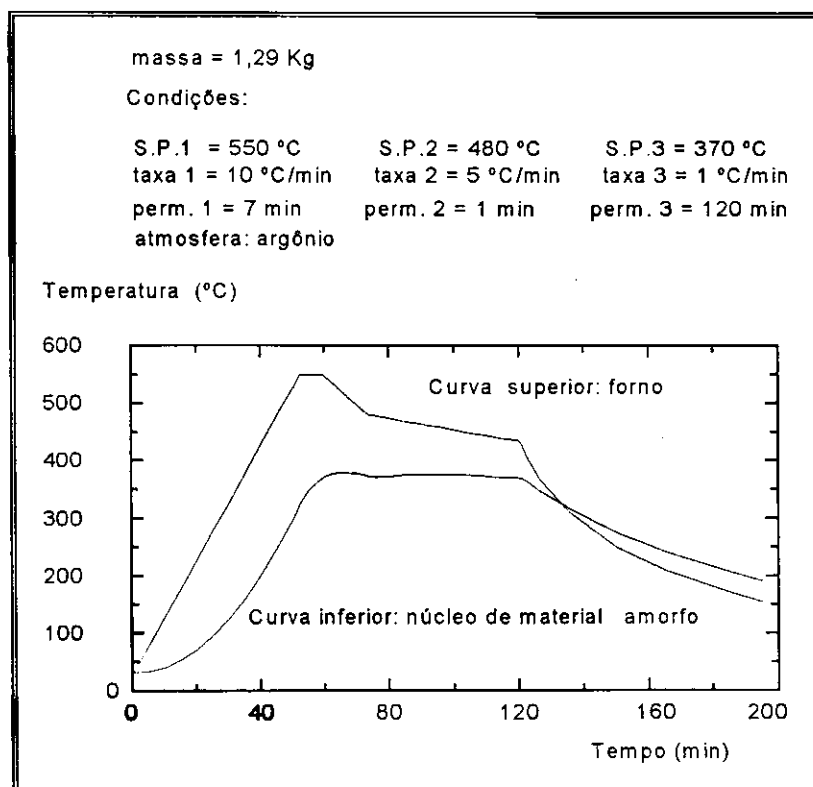


Figura 5.6 - Ciclo térmico para o tratamento do material amorfo do núcleo do pré-protótipo de 100 VA, 220 V/ 110 V, 60 Hz.

c) Resultados para um núcleo de material amorfo de 9,0 kg

Para o tratamento magnetotérmico do núcleo do protótipo de 1 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz, adotou-se procedimentos idêntico àqueles empregados na realização do mesmo tratamento no núcleo do pré-protótipo de 100 VA, 220 V/ 110 V, 60 Hz.

Neste caso, por se tratar de uma massa maior e pelo fato de o núcleo admitir simetria, o tratamento foi realizado com o núcleo separado em duas partes, cada uma com massa de 4,5 kg, obedecendo as seguintes condições de programação do forno:

- S.P. 1 = 550 °C, taxa de aquecimento 1= 10 °C/min, permanência 1= 22 min;
 - S.P. 2= 490 °C, taxa de resfriamento 2= 5 °C/min, permanência 2= 8 min;
 - S.P. 3= 490 °C, taxa de resfriamento 3= 2 °C/min, permanência 3= 25 min;
- onde, S.P. corresponde ao termo inglês *Set Point*.

A Figura 5.7 apresenta o ciclo térmico correspondente ao tratamento magnetotérmico do núcleo do protótipo de 1 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz.

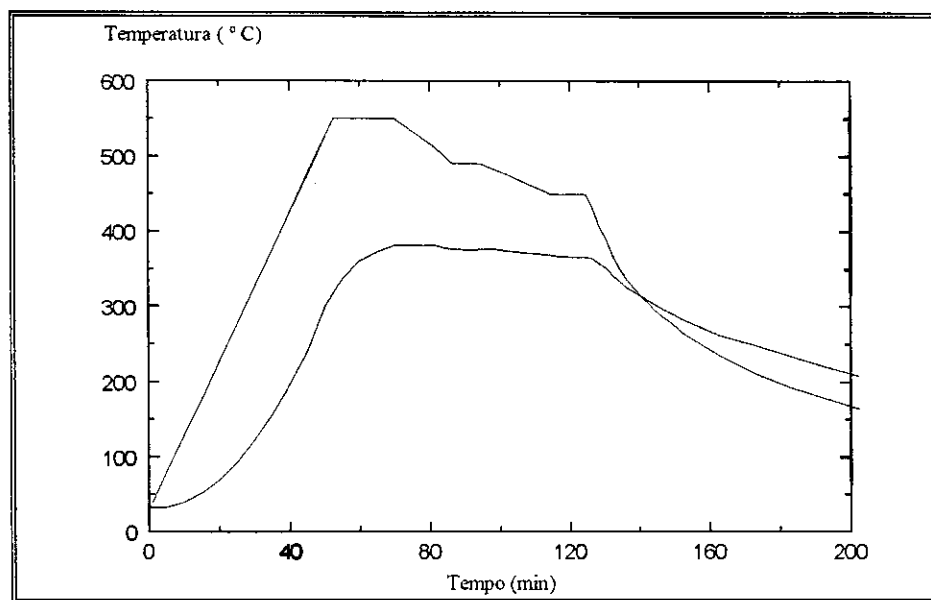
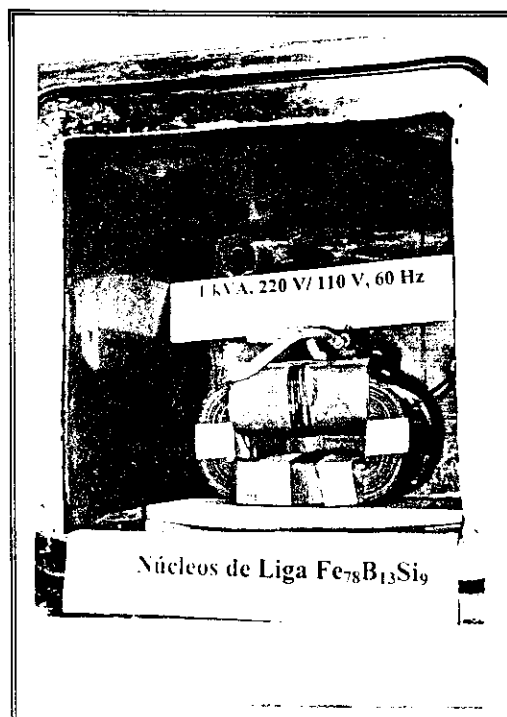
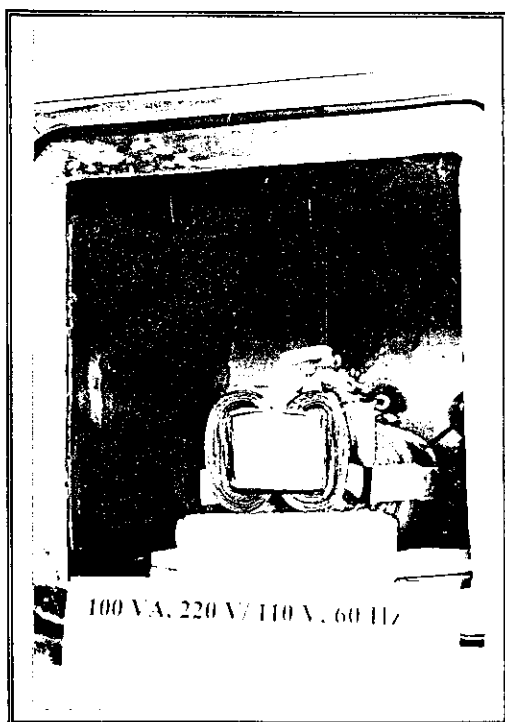


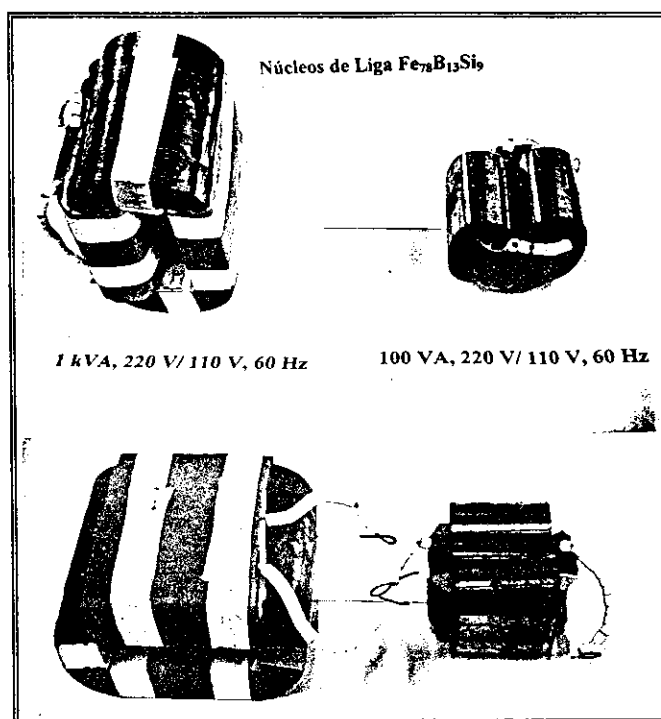
Figura 5.7 - Ciclo térmico para o tratamento do núcleo de liga amorfa do protótipo de 1,0 kVA, 220 V/ 110 V, 60 Hz.

Nas Figura 5.8 são apresentados alguns detalhes dos núcleos de liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, logo após a realização do tratamento magnetotérmico.



(a) núcleo do pré-protótipo de 100 VA

(b) metade núcleo do protótipo de 1,0 kVA.



(c) núcleos de 100-VA e duas partes do núcleo do transformador de 1-kVA.

Figura 5.8 - Núcleos de liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, após o tratamento magnetotérmico.

5.4 Comportamento da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, como recebida e após o tratamento magnetotérmico

Preliminarmente, o comportamento da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ foi avaliado por Raios-X e DSC, utilizando-se amostras nas condições como recebida (*as cast*), anterior ao tratamento magnetotérmico. A análise por Raios-X confirmou o estado amorfo do material. Por DSC, simulou-se as condições do ciclo térmico a que o material do núcleo seria submetido durante o tratamento magnetotérmico. A determinação da entalpia e da temperatura de cristalização ofereceram informações que permitiram confirmar a escolha acertada da temperatura de 380 °C para o patamar do tratamento magnetotérmico.

A possível ocorrência de picos de cristalização durante o tratamento magnetotérmico também foi analisada por DSC. Os resultados apresentados mostraram que a amostra, após a simulação, apresentou pico de cristalização idênticos, em temperatura e entalpia, à amostra na condição como recebida (*as cast*), o que permite concluir que não ocorreu cristalização.

Durante a realização do tratamento magnetotérmico foram colocadas amostras do material amorfo juntas ao núcleo. As análises por DSC apresentaram picos similares àqueles obtidos com a amostra anterior ao tratamento, tanto no que se refere à temperatura de cristalização, quanto no que tange à entalpia, permitindo concluir que não houve cristalização durante o tratamento magnetotérmico.

E por último, um estudo do comportamento do calor específico das amostras como recebida e após o tratamento magnetotérmico veio confirmar a ocorrência da relaxação estrutural, conforme ilustrado na Figura 5.9.

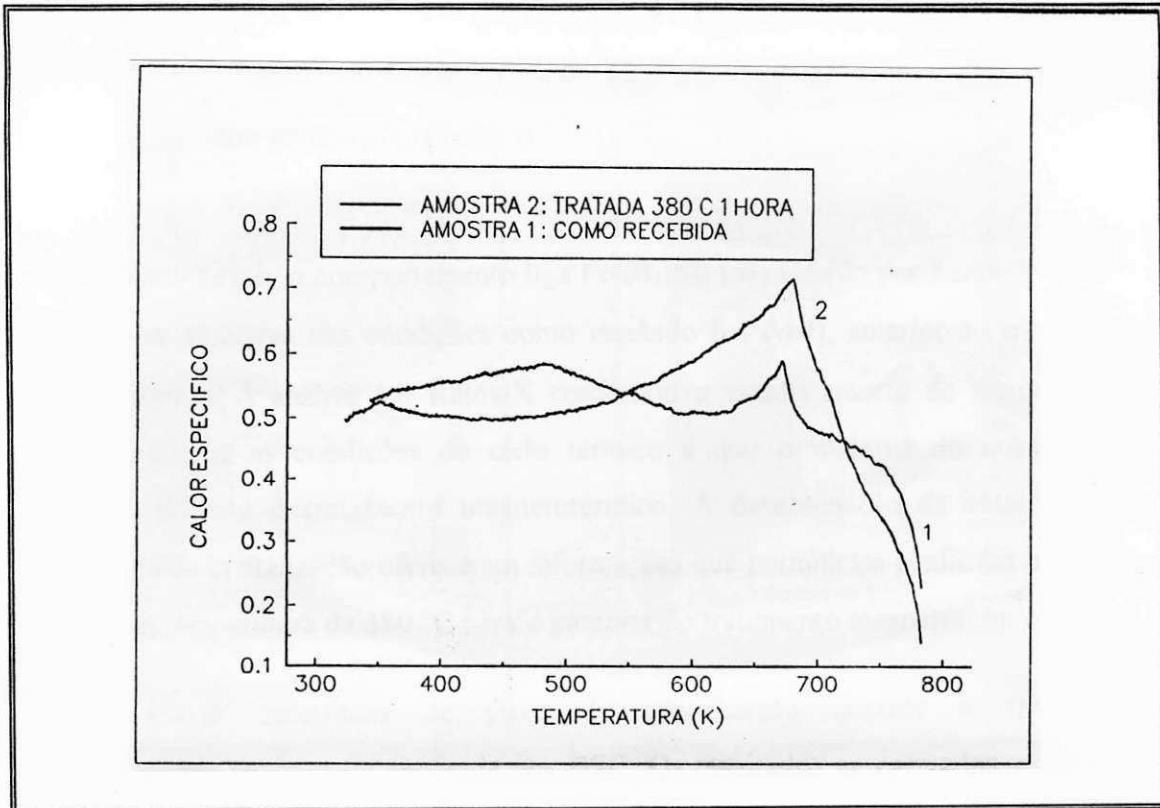


Figura 5.9 - Comportamento do calor específico de uma amostra do material amorfo: como recebida e após o tratamento magnetotérmico.

Capítulo 6

RESULTADOS APÓS O TRATAMENTO MAGNETOTÉRMICO

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados comparativos de desempenho do protótipo de transformador de 1,0 kVA, 220 V/110V, 60 Hz, projetado e construído com núcleo de liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa, antes e depois da realização do tratamento magnetotérmico sobre o material do núcleo, conforme descrito no capítulo 5. Como base de referência foi utilizado um transformador comercial, de valores nominais idênticos, porém construído com núcleo de FeSi.

6.2 Ensaio Experimentais

6.2.1 Tensão de alimentação versus corrente de excitação.

Um ensaio preliminar que permite avaliar e comparar o comportamento magnético do núcleo de material amorfo, submetido ao tratamento magnetotérmico, com relação a um núcleo de FeSi de um transformador comercial, pode ser realizado com o emprego de um autotransformador variável, um miliamperímetro, um voltímetro e, caso haja disponibilidade, um wattímetro capaz de medir, com exatidão, valores de potência ativa inferiores a 1,0 W.

A montagem experimental para realização deste ensaio é semelhante àquela que a ABNT recomenda para o ensaio de circuito aberto, conforme apresentada na Figura 4.2, no Capítulo 4.

Foram realizados ensaios comparativos entre o transformador com núcleo de liga amorfa (após a realização do tratamento magnetotérmico) e um transformador comercial com valores nominais idênticos: 1,0 kVA, 220 V/ 110 V, 60 Hz.

A Tabela 6.1 apresenta os valores eficazes das grandezas medidas pelo voltímetro e pelo miliamperímetro, respectivamente.

Tabela 6.1 - Valores eficazes da tensão e da corrente de excitação, a 60 Hz.

	Núcleo de material amorfo	Núcleo de FeSi (comercial)
Valor rms da tensão de entrada (V)	Valor eficaz da corrente de excitação (mA)	Valor eficaz da corrente de excitação (mA)
0	0,00	0,00
2	3,00	17,33
4	4,00	28,90
6	4,74	38,46
8	5,37	46,20
10	5,90	52,8
20	7,95	78,10
30	9,73	96,80
40	11,73	112,50
50	14,20	129,20
60	18,62	144,00
70	25,89	160,00
80	40,50	178,00
90	69,20	197,50
100	117,5	220,00
110	198,5	247,00
120	400,0	285,00
130	-	322,00

A Figura 6.1 apresenta, graficamente, os valores relacionados na Tabela 6.1.

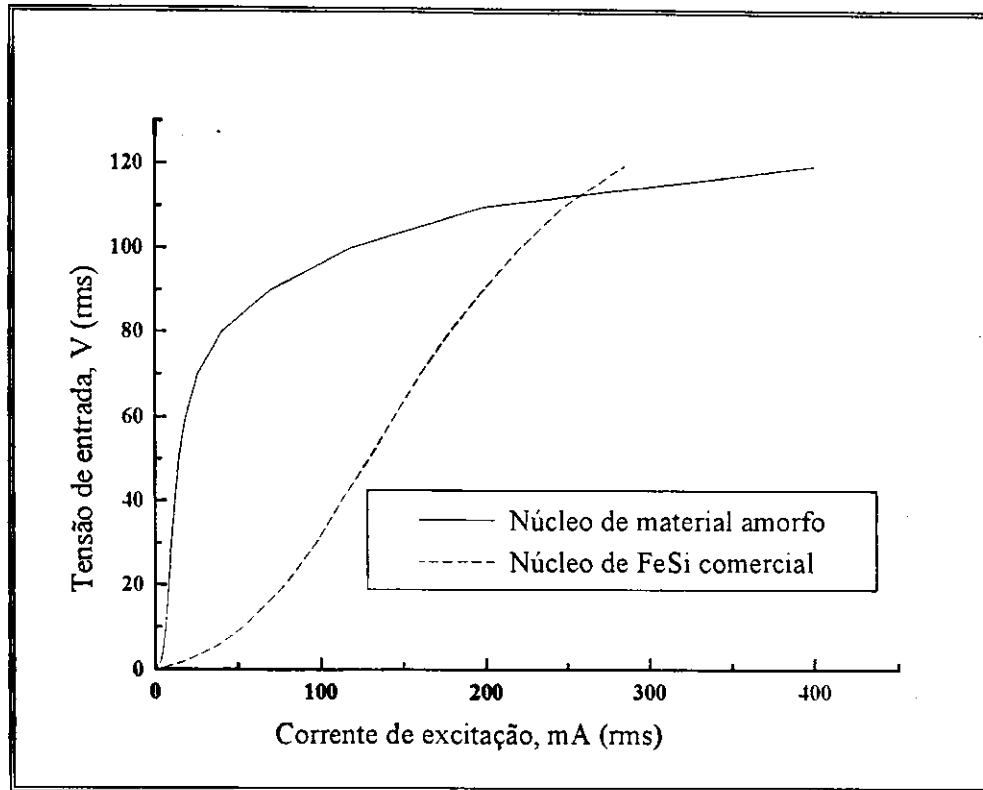


Figura 6.1 - Tensão de alimentação versus corrente de excitação, a 60 Hz.

Conforme pode-se observar, tanto na Tabela 6.1, quanto na curva *Tensão de alimentação X Corrente de excitação*, a partir da tensão de 110 V a corrente de excitação do núcleo de material amorfo cresce de forma muito mais rápida do que a corrente de excitação do transformador com núcleo de FeSi comercial. Isto se justifica pelo fato de o material possuir uma indução de saturação inferior (cerca de 1,56 T) à indução de saturação do FeSi comercial (aproximadamente 2,0 T). Por outro lado, observa-se que abaixo deste valor de tensão, em comparação com o transformador comercial, a corrente de excitação do protótipo com núcleo de material amorfo é nitidamente menor.

6.2.2 Discussão sobre os erros na medição da potência ativa

Observe-se que na Tabela 6.1 não foram apresentados os valores da potência ativa. De fato, apresentar valores de leituras de potência ativa menores que 1,0 W, seria assumir como verdadeiras medições inferiores à resolução do instrumento empregado: um wattímetro digital, calibre 2000 W, "precisão": +/- (1% + 1 dígito).

Por outro lado, ainda na linha de análise de erros, deve ser levado em consideração o erro potencial associado à medição direta das perdas de potência ativa nos núcleos.

Este erro pode ser estimado a partir das próprias grandezas envolvidas na medição das perdas P no núcleo: a tensão V , a corrente I , e o ângulo de fase ϕ entre elas.

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial P}{\partial \phi} \Delta \phi. \quad (6.1)$$

Assim, desde que a tensão e a corrente possam ser medidas por voltímetros ou amperímetros com classe de exatidão suficientemente baixas, os erros absolutos ΔV e ΔI podem ser consideradas praticamente nulos, o que torna o incremento da potência simplificado e dependente do erro de fase $\Delta \phi$.

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \phi} \Delta \phi \quad (6.2)$$

A equação (6.2) representa o erro absoluto. Porém, uma expressão mais rica em informações pode ser obtida, algebricamente, a partir do erro relativo:

$$\left| \frac{\Delta P}{P} \right| = |-\tan \phi \Delta \phi| = |\tan \phi| |\Delta \phi|. \quad (6.3)$$

Análiticamente, a equação (6.3) mostra que na medida em que ϕ se aproxima de 90° , $|\tan \phi|$ aproxima-se de infinito. Portanto, $\Delta \phi$ deve ir para zero, de modo a permitir que o erro relativo seja o menor possível.

Para ilustrar esta discussão, são apresentados na Tabela 6.2, diversos valores de erros para diferentes valores de ϕ . É interessante notar que o erro cresce drasticamente na medida em que ϕ se aproxima de 90° .

Tabela 6.2 - Erros relativos na medição das perdas no núcleo [TAN et alli (1995)].

ϕ	60°	70°	80°	85°	87°	88°
$\Delta P/P$ (%)	9,1	14,4	29,7	59,8	99,8	149,9

Diante destas limitações, impostas pelo método clássico de medição das perdas totais no núcleo, empregando-se voltímetro, amperímetro e wattímetro (analógicos ou digitais), encontra-se em fase de desenvolvimento um instrumento virtual para a medição das características magnéticas de núcleos de transformadores. Em termos de concepção, este instrumento é semelhante àquela proposta por CARMINATI e FERRERO (1992). Ou seja, é baseado na aquisição e processamento numérico de dois sinais elétricos: a corrente de excitação e a força eletromotriz induzida (FEM). Na etapa atual, dois alunos de Iniciação Científica, sob a orientação do autor da presente tese, desenvolveram a arquitetura de *hardware* e, atualmente, encontram-se desenvolvendo um *software* que permitirá a saída gráfica, na tela de um microcomputador ou impressora, dos sinais de corrente, tensão e curvas de histerese dos núcleos [SILVA, CAMACHO e LUCIANO (1995)]. Com este método, certamente, será possível a caracterização do material ferromagnético do núcleo, com uma margem de erro menor do que aquelas apresentadas na Tabela 6.2.

6.2.3 Determinação das características eletromagnéticas, a partir dos valores V - I .

Dado que o instrumento virtual ainda se encontra em fase de desenvolvimento, as características B - H dos núcleos de liga amorfa e FeSi (transformador comercial) foram obtidas a partir dos valores da tensão aplicada e da corrente de excitação.

Para a obtenção dos valores de B e H , partindo-se dos valores eficazes de V e I , faz-se necessário o conhecimento da geometria do núcleo e do número de espiras dos enrolamentos.

Considerando o fluxo magnético no interior do núcleo como sendo senoidal, a densidade de fluxo se relaciona com o valor eficaz da tensão pela lei de Faraday:

$$B_{max} = \frac{V_{rms}}{4,44NA_{mag}f} \quad (6.4)$$

onde: B_{max} é o valor máximo da densidade de fluxo magnético para cada valor eficaz da tensão V_{rms} , N é o número de espiras do enrolamento, A_{mag} é a seção magnética da coluna central do núcleo e f é a frequência, em Hz.

O valor eficaz da corrente elétrica I se relaciona com a intensidade de campo magnético H pela lei circuital de Ampère:

$$H = \frac{NI}{l_m} \quad (6.5)$$

onde l_m representa o comprimento médio do circuito magnético do núcleo.

A Figura 6.2 apresenta as principais dimensões geométricas do núcleo do protótipo de 1-kVA, realizado com a liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$. Observe-se que, devido a simetria, na Figura 6.2 está representando metade deste núcleo.

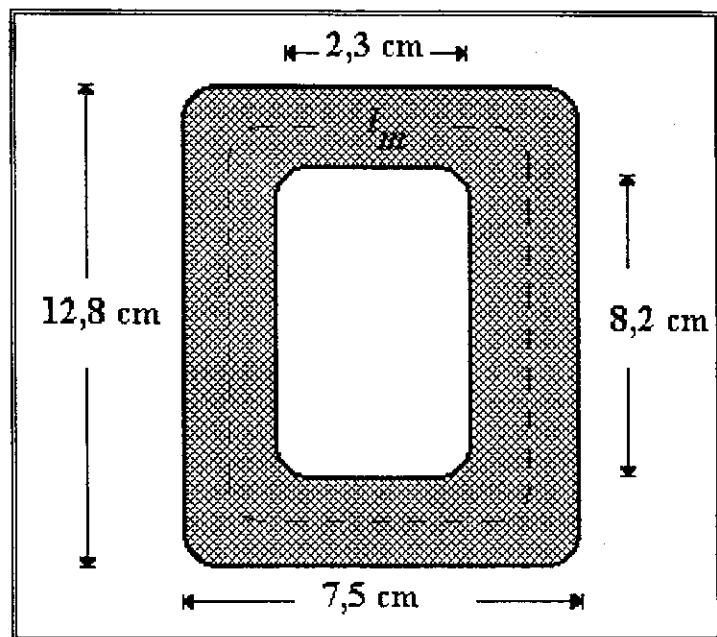


Figura 6.2 - Principais dimensões geométricas do núcleo do protótipo de 1-kVA.

Às dimensões geométricas, apresentadas na Figura 6.2, devem-se acrescentar os valores do comprimento do núcleo (profundidade de 10,16 cm) e do número de espiras do enrolamento secundário (98 espiras). Estas informações, juntamente com o valor do fator de empilhamento K_e (admitido como sendo 0,8), tornam-se necessárias para o cálculo da seção magnética da coluna central do núcleo.

$$A_{mag} = K_e A_{geo} \quad (6.6)$$

onde: A_{geo} é a área geométrica da coluna central.

Portanto, substituindo os valores do número de espiras, da seção magnética e da frequência na equação (6.4); e os valores do número de espiras e do comprimento médio do circuito magnético do núcleo na equação (6.5), obtém-se a Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Indução magnética máxima e intensidade de campo magnético no núcleo do protótipo de 1-kVA, a 60 Hz.

Indução máxima, B_{max} (T)	Campo magnético, antes do tratamento, H (A.esp/m)	Campo magnético, após o tratamento, H (A.esp/m)
0,1	5,1	1,9
0,2	6,2	2,7
0,3	8,4	3,4
0,4	10,8	4,1
0,5	13,5	5,1
0,6	17,3	6,5
0,7	22,8	9,2
0,8	36,3	14,2
0,9	64,0	23,2
1,0	111,0	38,6
1,1	182,9	65,6
1,15	228,6	83,7
1,2	280,9	130,6

A partir da Tabela 6.3, que relaciona os valores da intensidade de campo magnético e da indução magnética máxima e no interior do núcleo do protótipo de 1-kVA, é possível a caracterização $B-H$ do material amorfo, antes e depois da realização do tratamento magnetotérmico, conforme apresentada na Figura 6.3.

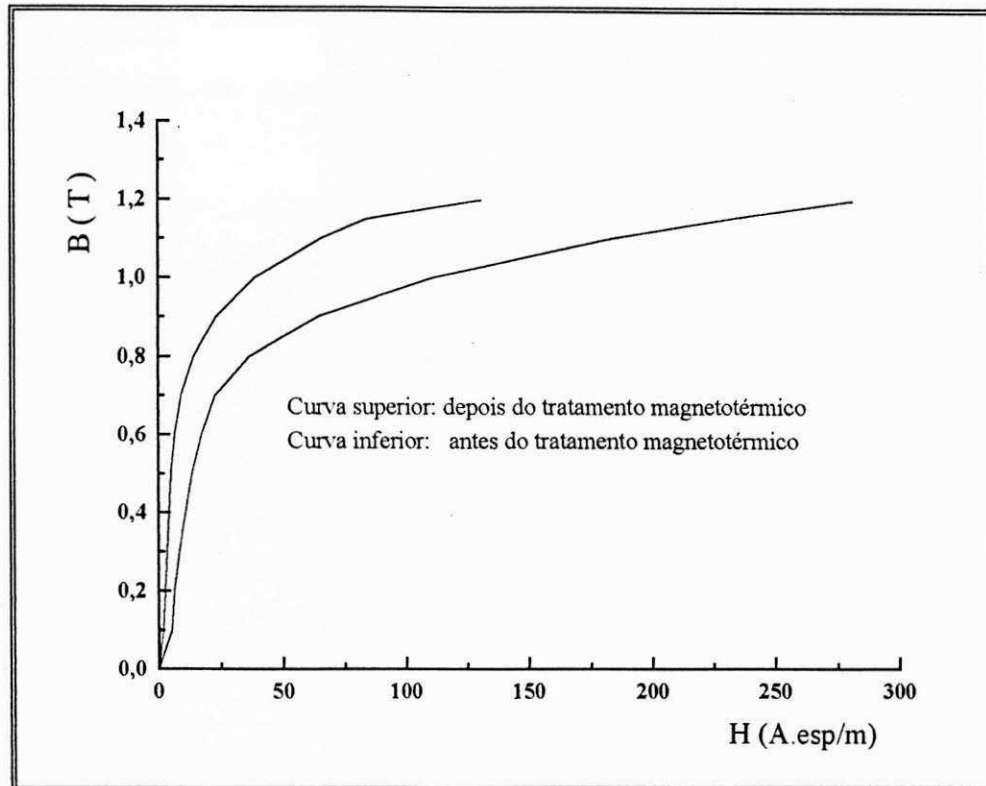


Figura 6.3 - Curvas de magnetização $B-H$, a 60 Hz, antes e depois do tratamento magnetotérmico.

Conforme pode-se observar na Figura 6.3, o efeito do tratamento magnetotérmico sobre o núcleo do protótipo de 1-kVA foi o aumento de sua permeabilidade magnética, caracterizada pela maior inclinação da característica $B-H$, sobretudo na região anterior ao joelho da curva, em torno de 1,0 T.

Esta melhoria da permeabilidade magnética fica evidenciada na Figura 6.4, que relaciona a permeabilidade relativa do material amorfo, em função da indução magnética ao longo da característica $B-H$ mostrada na Figura 6.3, antes e depois da realização do tratamento magnetotérmico.

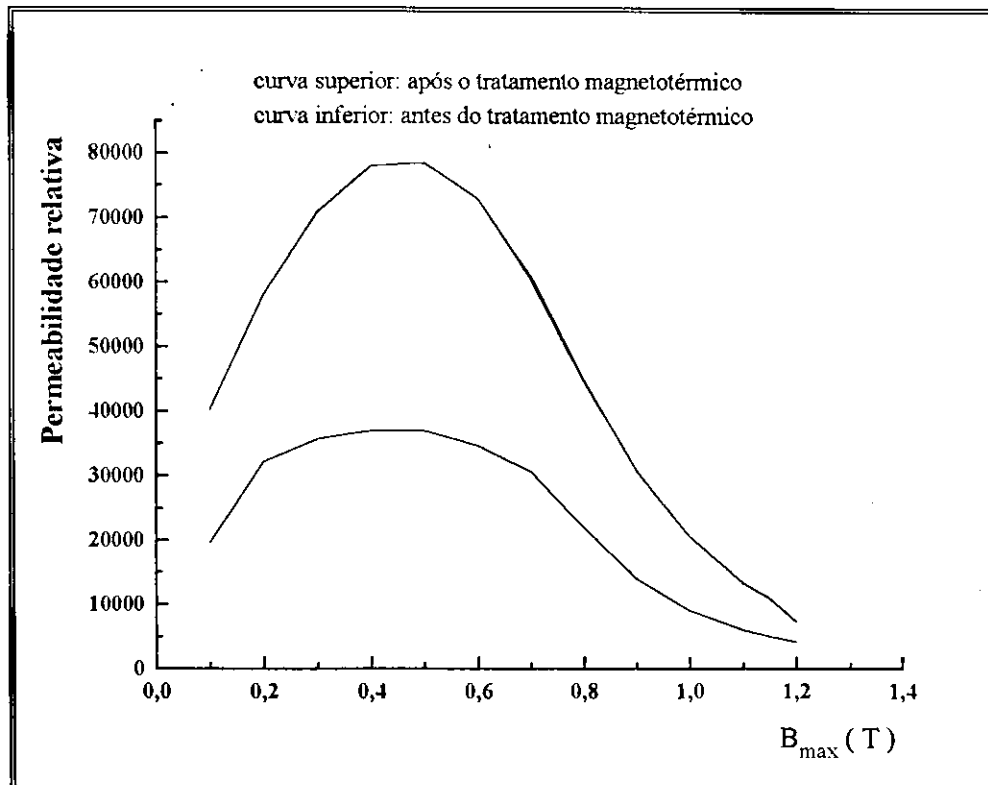


Figura 6.4 - Permeabilidade relativa do material do núcleo, antes e depois do tratamento magnetotérmico.

A Figura 6.3 também permite concluir que, após o tratamento magnetotérmico, houve uma redução na corrente de excitação, para um mesmo valor da indução magnética. Este fato, leva a uma outra possibilidade de avaliação do desempenho eletromagnético dos transformadores envolvidos, que é a análise da indução magnética em função da potência de excitação.

De fato, o conhecimento da potência de excitação é importante, posto que quanto menor for a potência de excitação, menor será a quantidade de energia que o transformador irá necessitar para manter-se magnetizado e suprir suas perdas no núcleo.

Esta relação entre a indução magnética e a da potência de excitação, pode ser obtida a partir dos valores de V e I , listados na Tabela 6.1, ou representada, graficamente, conforme mostra a Figura 6.5.

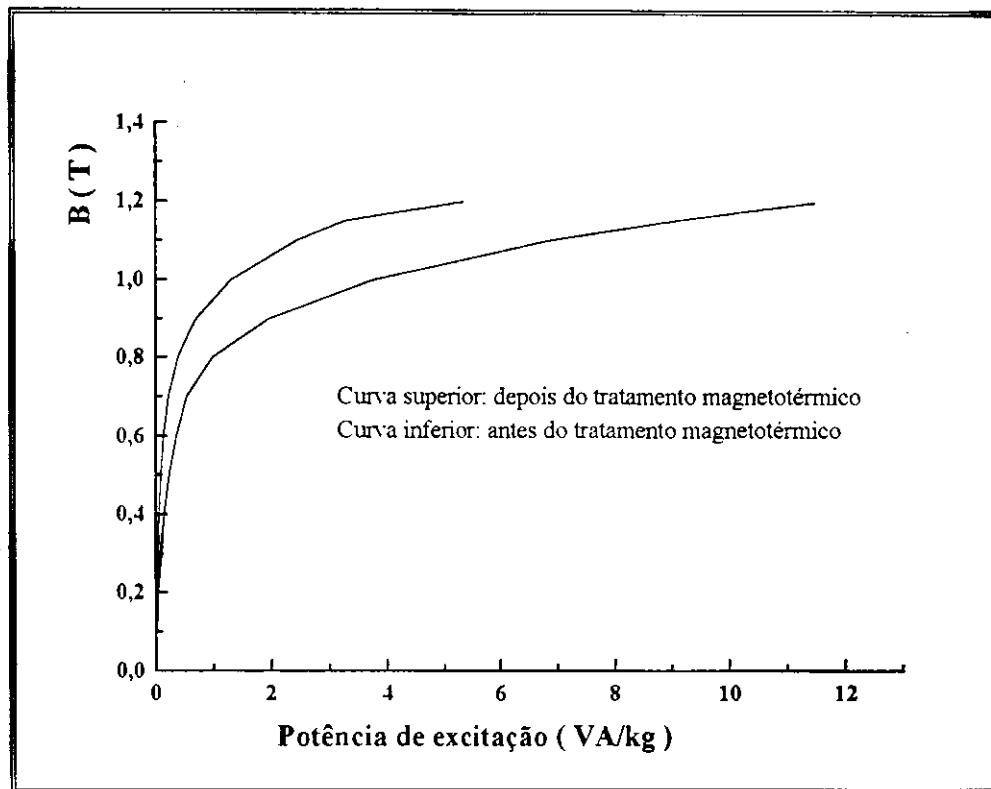


Figura 6.5 - Indução magnética versus potência de excitação, por kg, a 60 Hz.

Partindo-se do circuito equivalente, um transformador com o circuito secundário aberto e alimentado pelo primário, ou vice-versa, pode ser representado por uma impedância variável em função da corrente de excitação. Esta impedância caracteriza o ramo de magnetização e é representada por uma resistência, equivalente aos efeitos das perdas no núcleo, em paralelo com uma reatância, associada ao fluxo principal.

O caráter não-linear desta impedância pode ser observado nos dois gráficos apresentados na Figura 6.6. Estes gráficos, apresentados separadamente por questão de compatibilidade de escalas e melhor clareza, ilustram e confirmam o comportamento da impedância de excitação em função da corrente de excitação, antes e depois da realização do tratamento magnetotérmico.

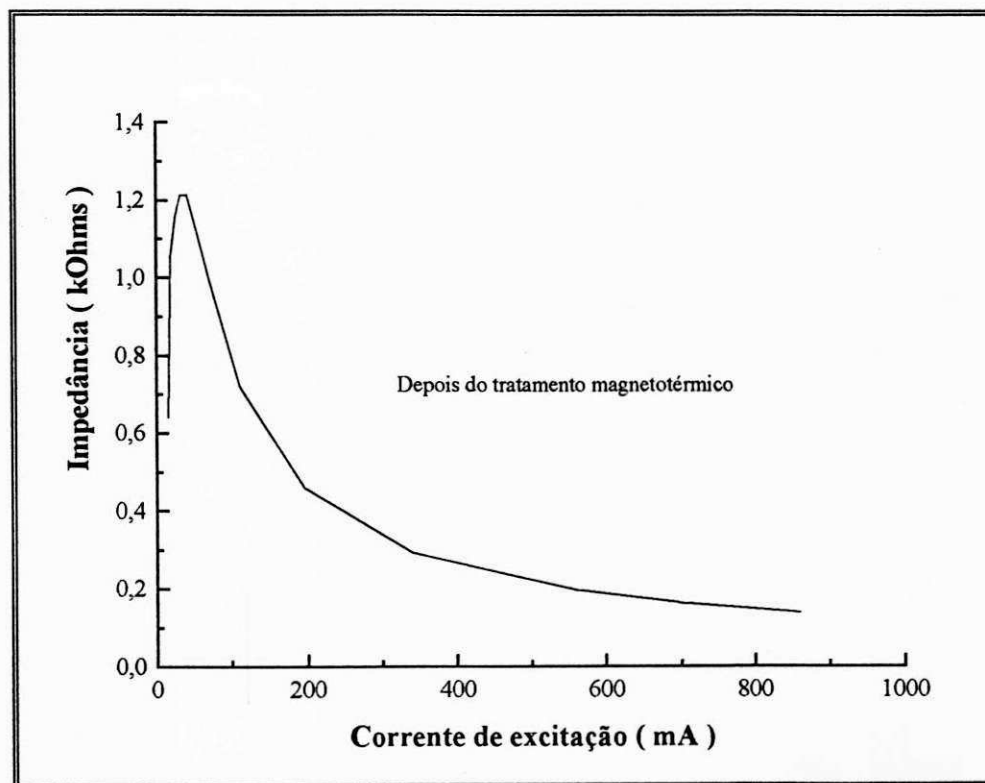
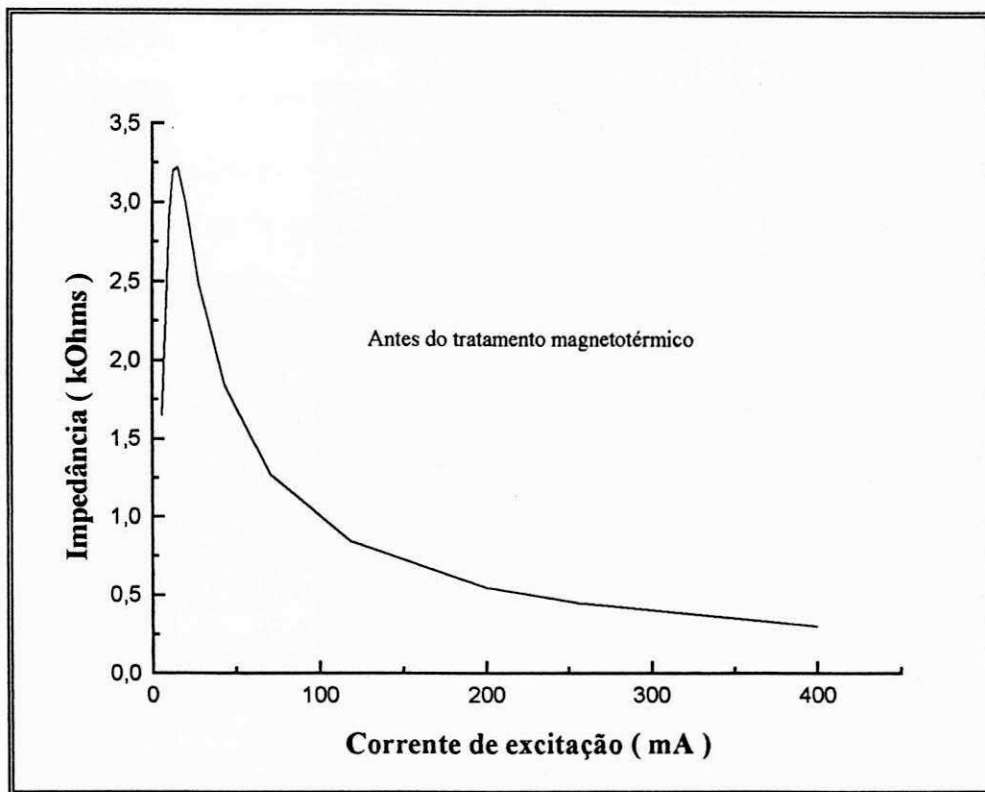


Figura 6.6 - Impedância do ramo de magnetização do núcleo versus corrente de excitação.

6.4 Comparação de desempenho

A Tabela 6.4 apresenta os resultados de ensaios experimentais realizados com o objetivo de estabelecer as bases de comparação entre o protótipo de transformador de 1-kVA, 220 V/220 V, 60 Hz, projetado e construído com núcleo de material amorfo, e um outro transformador comercial, com os mesmos valores nominais, porém construído com núcleo de FeSi.

Tabela 6.4 - Ensaios comparativos entre o protótipo de transformador com núcleo de material amorfo e um transformador comercial com núcleo de FeSi.

Transformador com núcleo de material amorfo: 1,0 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz.	Transformador comercial: 1,0 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz.
Ensaio em vazio:	Ensaio em vazio:
tensão de circuito aberto, $V_{ca} = 110 \text{ V}$	tensão de circuito aberto, $V_{ca} = 110 \text{ V}$
Potência de circuito aberto, $P_{ca} = 2,5 \text{ W}$	Potência de circuito aberto, $P_{ca} = 19 \text{ W}$
Corrente de excitação = 0,14 A	Corrente de excitação = 0,24 A
Ensaio de curto-circuito:	Ensaio de curto-circuito:
Tensão de curto-circuito, $V_{cc} = 10,2 \text{ V}$	Tensão de curto-circuito, $V_{cc} = 10,2 \text{ V}$
Corrente de curto-circuito, $I_{cc} = 4,4 \text{ A}$	Corrente de curto-circuito, $I_{cc} = 4,5 \text{ A}$
Potência de curto-circuito, $P_{cc} = 41,5 \text{ W}$	Potência de curto-circuito, $P_{cc} = 44,0 \text{ W}$
Medição das resistências:	Medição das resistências:
Resistência do primário, $R_p = 1,1 \Omega$	Resistência do primário, $R_p = 1,1 \Omega$
Resistência do secundário, $R_s = 0,35 \Omega$	Resistência do secundário, $R_s = 0,35 \Omega$

Com base nos cálculos de projeto e nos resultados experimentais, a Tabela 6.5 apresenta dados que permitem comparar diretamente os valores de projeto, os valores reais obtidos com o protótipo realizado e aqueles obtidos com o transformador comercial.

Tabela 6.5 - Dados comparativos entre valores de projeto e valores experimentais.

PARÂMETROS COMPARATIVOS	VALORES DE PROJETO	PROTÓTIPO REAL	TRANSFORMADOR COMERCIAL
Seção geométrica da coluna central, cm ²	36,89	48,39	40,0
Largura da coluna central, cm	3,70	4,80	5,00
Largura da janela, cm	1,82	2,30	2,50
Altura da janela, cm	10,89	8,20	15,40
Área da janela, cm ²	19,82	18,86	38,50
Largura total do núcleo, cm	11,10	12,80	20,4
Altura total do núcleo, cm	14,59	15,0	15,2
Profundidade do núcleo, cm	10,16	10,16	8,0
Volume total do núcleo, cm ³	1645,40	1671,30	2480,64
Volume do material magnético, cm ³	1242,66	1253,48	1864,64
Massa do núcleo, kg	8,92	9,00	12,64
Perdas no núcleo, W	2,3	2,5	19,0
Número de espiras do primário	192	192	-
Corrente nominal do primário, A	4,54	4,50	4,50
Corrente de excitação (em vazio), A	0,13	0,14	0,24
Seção do condutor primário, mm ²	1,4	1,3	1,3
Número de espiras do secundário	96	98	-
Corrente nominal do secundário, A	9,09		9,00
Seção do condutor secundário, mm ²	2,4	2,6	2,6
Seção ocupada pelas bobinas, cm ²	6,8	-	-
Volume ocupado pelas bobinas, cm ³	180	-	-
Massa total das bobinas, kg	1,62	1,06	-
Perdas nas bobinas, W	44	41,5	44
Massa do conjunto (núcleo + bobinas), kg	10,54	10,06	-
Rendimento (Eficiência), %	96	95,6	93,7

As figuras 6.7 e 6.8 apresentam as fotografias da forma final do protótipo de 1-kVA, projetado e construído com núcleo de liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa, e do transformador comercial, com núcleo de FeSi, tomado como referência comparativa.

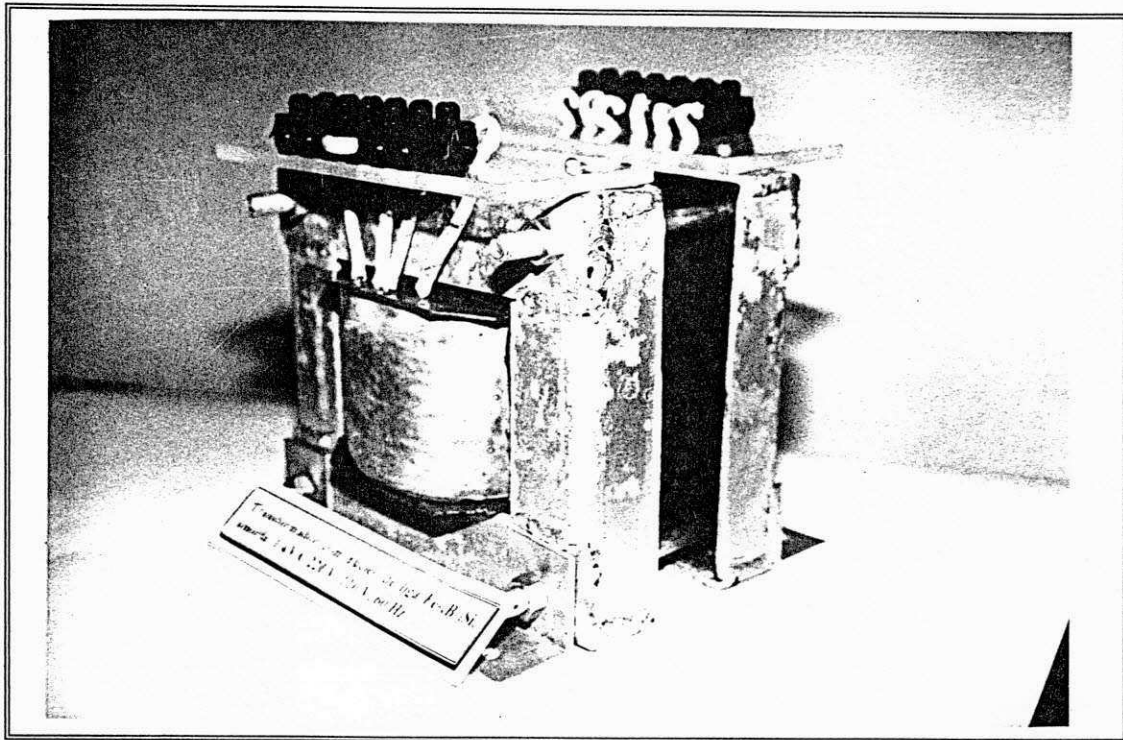


Figura 6.7 - Forma final do protótipo do transformador de 1-kVA, com núcleo de liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa.

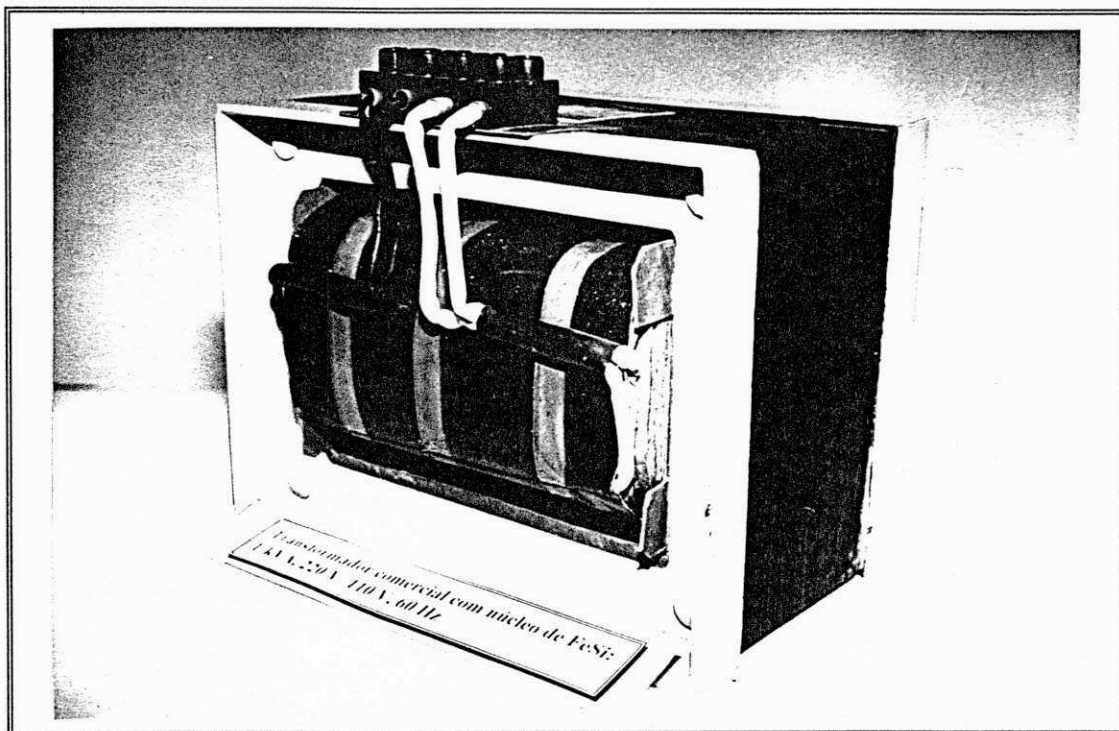


Figura 6.8 - Transformador comercial de 1-kVA, com núcleo de FeSi.

6.5 Discussões dos resultados

Os dados apresentados na Tabela 6.4 permitem inferir, por comparação, os seguintes índices de mérito:

a) O volume total do núcleo de material amorfo representa 67,4% do volume correspondente ao núcleo de FeSi do transformador comercial. Portanto, houve uma redução de 32,6%, em termos de volume de material ferromagnético;

b) A massa do núcleo de material amorfo é 28,8% menor que a massa do núcleo de FeSi do transformador comercial;

c) A corrente de excitação do protótipo com núcleo de material amorfo é 41% inferior à corrente de excitação do transformador comercial com núcleo de FeSi;

d) Finalmente, confirmando as expectativas teóricas, o protótipo de transformador com núcleo de material amorfo apresentou um rendimento (eficiência) superior (95,6%) ao transformador comercial com núcleo de FeSi (93,7%).

Capítulo 7

Conclusões

Partindo de uma revisão bibliográfica sobre as aplicações de ligas amorfas na eletroeletrônica, e em particular para o uso em transformadores de baixa potência, foram realizados estudos teóricos e experimentais envolvendo a liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa, produzida pela Allied-Signal Inc. (USA), sob a designação comercial Metglas 2605S-2.

Efetivamente, o que se verifica é que a realização de um transformador com núcleo de liga amorfa, partindo da fita enrolada, como produzida na fábrica, é uma tarefa difícil e requer equipamentos e pessoal especializados.

Na prática, o primeiro desafio que se apresenta é como obter um núcleo compacto, a partir de uma fita longa, contínua, com espessura média de 30 μm , bastante maleável e bastante exigente no que se refere à ferramenta de corte. De imediato, o núcleo toroidal seria aquele que, em princípio, traria menos problemas. Entretanto, esta configuração, embora seja a que empregue o material magnético com mais eficiência, em termos de confinamento do fluxo e menor presença de entreferros, não tem sido, efetivamente, a mais empregada em transformadores de potência ou de distribuição. Em geral, a configuração toroidal tem sido mais empregada em transformadores de corrente.

Desta forma, como a potência nominal máxima dos protótipos de transformadores a serem projetados e construídos não ultrapassava 1,0 kVA, optou-se por uma geometria do tipo núcleo envolvente, na qual os enrolamentos do primário e do secundário foram enrolados concêntricamente em torno da coluna central.

O núcleo assim concebido, foi construído em duas etapas: numa primeira, o material amorfo foi cortado e enrolado sobre o carretel, em torno do qual foram previamente envolvidos os enrolamentos do primário e do secundário. Preenchida a metade da janela do carretel, a segunda etapa do procedimento foi completar o envolvimento do material amorfo em torno do carretel, completando assim a outra metade da janela e conseqüentemente o núcleo. Deve-se salientar que, neste processo, o material amorfo fica submetido a esforços mecânicos de tração e compressão que necessitam ser aliviados

por meio de um tratamento térmico, sob a ação de um campo magnético, para que as propriedades magnéticas do material amorfo sejam restabelecidas e sobretudo, seja induzida uma anisotropia magnética que torne o desempenho do núcleo de material amorfo superior ao seu estado como recebido de fábrica (*as-cast*).

Os núcleos de material amorfo dos transformadores foram então submetidos a um tratamento térmico, acompanhado de um campo magnético, num sistema especialmente construído e montado para este fim no Laboratório de Solidificação do DEMa/UFSCar.

Amostras do material amorfo foram colocadas juntas aos núcleos e, após o tratamento magnetotérmico, verificou-se que as mesmas, quando submetidas a esforços mecânicos, mostraram-se quebradiças.

Os resultados obtidos por DSC e por levantamento das curvas B-H, antes e depois da realização do *tratamento magnetotérmico*, mostraram que efetivamente ocorreu a desejada relaxação estrutural do material do núcleo. Estes resultados também foram confirmados por meio de ensaios em vazio, ou de circuito aberto, onde as perdas nos núcleos se apresentaram menores que aquelas obtidas antes da realização do tratamento. Desta forma a previsão teórica, baseada em estudos publicados na literatura técnica específica, e os resultados de simulação computacional, por cálculo de campo, viram-se confirmadas experimentalmente.

Os estudos e os resultados experimentais realizados também permitiram concluir que, em comparação com as ligas de FeSi comerciais empregadas em núcleos de transformadores, a permeabilidade da $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa apresenta-se superior até o ponto correspondente ao joelho da curva B-H de magnetização. A partir deste ponto, o material amorfo entra rapidamente no regime de saturação, tendo como conseqüência o aumento acentuado da corrente de excitação e das perdas no núcleo. Fazendo-se, portanto, a comparação entre o FeSi e a liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa, verificou-se que o núcleo de FeSi possui permeabilidade magnética inferior à $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa até o joelho da curva B-H de magnetização. A partir deste ponto, ocorre uma inversão: o material amorfo tem a sua permeabilidade reduzida de forma quase abrupta, sobretudo após o tratamento magnetotérmico, enquanto o núcleo de FeSi tem a sua permeabilidade reduzida de forma menos acentuada, isto porque a sua indução de saturação é superior àquela da $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa. Em termos quantitativos, os valores obtidos para a indução em torno do joelho da curva de magnetização foram os seguintes: 1,2 T para o núcleo de

FeSi do transformador comercial, 1,0 T para a liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa, antes do tratamento magnetotérmico e 1,4 T, após a sua realização.

Neste trabalho, tendo em vista o seu caráter de pesquisa e desenvolvimento, não foram levantados os custos totais para a produção do pré-protótipo de 100 VA e do protótipo de 1,0 kVA, isto porque o interesse maior era o de, ao projetar e construir transformadores com material amorfo, dominar o processo de tratamento magnetotérmico e apresentar alguma contribuição neste campo do conhecimento técnico-científico. Isto porém, não significa que o fator custo seja irrelevante; pelo contrário, quando se está propondo uma alternativa tecnológica que implica em substituição de um material tradicionalmente utilizado por um novo material, o fator custo deve ser considerado.

Finalizando, vale salientar que ao lado dos aspectos econômicos, decorrentes da redução das perdas no núcleo, sobretudo quando o transformador opera em vazio, podem ser acrescidos os de conservação ambientais, na medida em que a utilização de transformadores mais eficientes reduz as necessidades de geração, diminuindo a emissão de poluentes, e no caso da geração hidráulica, significando menos áreas alagadas. Portanto, levando em consideração as dimensões continentais de um país como o Brasil, e o número de transformadores instalados em seu sistema de distribuição, a proposta de substituição dos tradicionais transformadores com núcleo de material cristalino por transformadores com núcleo de material amorfo é algo que a presente tese espera ter suscitado a viabilidade.

Capítulo 8

Sugestões para Trabalhos Futuros

Como prosseguimento ou desdobramento do tema focalizado nos estudos apresentados neste trabalho de tese, este capítulo apresenta, a título de sugestões, as seguintes linhas de pesquisas:

1. Otimização do processo relativo ao tratamento magnetotérmico do núcleo de material amorfo, objetivando reduzir a parcela de energia elétrica envolvida e, por conseqüência, o custo por unidade produzida;
2. Desenvolvimento de um sistema de malha fechada para a realização do tratamento magnetotérmico, empregando um microcomputador, em tempo real;
3. Estudo da influência dos materiais dielétricos sobre os núcleos de liga amorfa imersos em óleo isolante, sobretudo no que toca aos aspectos de corrosão e estabilidade magnética;
4. Empregar programas de cálculo de campo que envolvam os métodos dos elementos finitos e comparar os resultados obtidos com o método das diferenças finitas, a partir das características B-H da liga amorfa, antes e depois do tratamento magnetotérmico.
5. Desenvolvimento de um sistema de medição que, partindo dos valores da força eletromotriz induzida no secundário do transformador e da corrente de excitação do núcleo, possa realizar, digitalmente, o processamento destes sinais e, num mesmo ambiente computacional, a caracterização magnética do material, os cálculos de campos, a análise de amplitude das componentes harmônicas das correntes de excitação e a emissão do relatório técnico do ensaio, via impressora, ou um outro meio de comunicação visual.

6. Otimização do projeto do transformador com núcleo de liga amorfa, procurando minimizar a reatância de dispersão.

7. Realizar estudos comparativos, específicos para o uso em núcleos de transformadores, entre a liga amorfa $Fe_{78} B_{13} Si_9$ e o seu potencial concorrente: as ligas nanocristalinas Fe-M-B ($M \equiv Zr, Hf$ ou Nb).

APÊNDICE

A. Sinopse dos trabalhos publicados durante a elaboração da tese

01. Título: Utilização de ligas amorfas em núcleo de transformadores		
Autores: Benedito Antonio Luciano e Evandro Fachine		
Publicação: Anais do XI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - Grupo XIII, Cigré-Comitê Nacional Brasileiro/ Furnas.		
Local: Rio de Janeiro - RJ		
Ano: 1991	Vol.: Grupo XIII	Páginas: 05 p.
<p>Resumo: Apresenta uma análise comparativa entre os materiais ferromagnéticos cristalinos e as ligas amorfas empregadas em núcleos de transformadores. São apresentados e discutidos aspectos relativos à obtenção destes materiais, a influência da composição Fe-B-Si na indução de saturação, na corrente de excitação e na redução das perdas em vazio nestes equipamentos.</p>		

02. Título: Ligas Amorfas: um material alternativo para uso em núcleo de transformadores		
Autor (es): Benedito Antonio Luciano e Evandro Fachine		
Publicação: Revista ELETROBRASIL	Editora: Pentatec	
Local: São Paulo - SP		
Ano: 1991	Vol.: 14	Páginas: 35-37
<p>Resumo: É apresentado um breve histórico de como as ligas amorfas evoluíram no campo da eletroeletrônica, até as suas aplicações em núcleos de transformadores, seguido da apresentação do estado da arte desta aplicação específica, em nível nacional.</p>		

03. Título: Transformadores com núcleos de ligas amorfas: fator de conservação de energia		
Autor: Benedito Antonio Luciano		
Publicação: Revista ELETRICIDADE MODERNA		Editora: Aranda
Local: São Paulo - SP		
Ano: 1992	Vol.: 224	Páginas: 26-30
<p>Resumo: Analisa o desempenho das ligas amorfas em núcleos de transformadores, em substituição aos tradicionais materiais cristalinos até então empregados, discutindo a influência dos materiais no rendimento destes equipamentos, apresentando como realizar estudos sobre a indução magnética por meio de cálculo de campo, tecendo considerações práticas sobre a realização de núcleos de ligas amorfas e qual o impacto econômico da utilização destes materiais em transformadores de sistemas de distribuição.</p>		

04. Título: Desempenho de transformadores com núcleo de liga amorfa		
Autor (es): Benedito Antonio Luciano e Claudio Shyinti Kiminami		
Publicação: Anais do Congresso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais		
Local: DEMa/ UFSCar - São Carlos - SP		
Ano: 1992	Vol.: Único	Páginas: 179-183
<p>Resumo: Apresenta e discute, de forma comparativa, parâmetros de projeto de transformadores com núcleo de material amorfo e aço-silício. Um exemplo de cálculo de campo magnético no interior do núcleo, utilizando um programa baseado no método das diferenças finitas, também é apresentado.</p>		

05. Título: Estudo de diferentes materiais magnéticos em núcleos de transformadores e máquinas elétricas, utilizando o método das diferenças finitas		
Autores: Benedito A. Luciano, Evandro Fachine, Roberto S. de Siqueira e Rosa Tânia M. Vaz		
Publicação: Anais do Congresso de Eletromagnetismo Aplicado		
Local: PUC - Belo Horizonte - MG		
Ano: 1992	Vol.: 1	Páginas: 77-86
Resumo: Apresenta um estudo comparativo das aplicações de diferentes materiais utilizados na construção de circuitos magnéticos de máquinas elétricas e transformadores. Destaque é dado aos novos materiais, como as ligas amorfas do sistema ternário Fe-B-Si e os ímãs permanentes dos tipos SmCo e NdFeB.		

06. Título: Aplicações elétricas e magnéticas de metais solidificados rapidamente			
Autor (es): Benedito Antonio Luciano e Claudio Shyinti Kiminami			
Publicação: Anais do III Seminário de Materiais no Setor Elétrico - UFPR/ COPEL			
Local: Curitiba - PR			
Ano: 1992	Vol.: 1	Capítulo: VI	Páginas: 56-61
Resumo: Apresenta uma discussão sobre as aplicações eletroeletrônicas dos metais solidificados rapidamente, em equipamentos tais como: transformadores de distribuição, transformadores para aeronaves, transformadores de corrente, máquinas a ímãs permanentes, blindagem magnética, sensores, transdutores, transformadores para fontes chaveadas, cabeçotes de leitura e gravação e alarmes antifurto.			

07. Título: Análise sobre a aplicação de novos materiais em uma máquina elétrica a ímã permanente		
Autor (es): Benedito Antonio Luciano e Claudio Shyinti Kiminami		
Publicação: Anais do 10° CBECIMAT		
Local: Águas de Lindóia - SP		
Ano: 1992	Vol.: 1	Páginas: 881-884
<p>Resumo: Com base no conjunto de propriedades dos novos ímãs permanentes, Sm-Co e Nd-Fe-B, e das ligas amorfas do sistema ternário Fe-B-Si, são avaliadas as vantagens e desvantagens do uso desses materiais para aplicações em rotores e estatores de máquinas elétricas rotativas. Cálculos da indução magnética, por cálculo de campo, baseado no método das diferenças finitas, ilustram um projeto de uma máquina com ímãs permanentes no rotor e material amorfo no estator. Incremento no torque e baixa relação peso/potência também são evidenciados.</p>		

08. Título: As ligas amorfas e suas aplicações		
Autor : Benedito Antonio Luciano		
Publicação: V Simpósio de Ensino de Física do Nordeste. UFPB/ UEPB		
Local: Lagoa Seca - PB		
Ano: 1993	Vol.:	Páginas: 11 p.
<p>Resumo: Apresenta um breve relato sobre o desenvolvimento científico e tecnológico das ligas amorfas, procurando manter uma ordem cronológica, destacando as suas aplicações no âmbito da eletroeletrônica, particularmente, em núcleos de transformadores.</p>		

09. Título: Aspectos tecnológicos sobre as aplicações de ligas amorfas em núcleos de transformadores		
Autor : Benedito Antonio Luciano		
Publicação: Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. DEMa/ UFSCar		
Local: São Carlos - SP		
Ano: 1993	Vol.: 1	Páginas: 83 p.
Resumo: Revisão de álgebra vetorial, leis fundamentais da eletrotécnica, as equações de Maxwell, materiais e circuitos magnéticos, o transformador, as ligas amorfas e transformadores com núcleos de ligas amorfas.		

10. Título: Novos materiais na medição de energia elétrica		
Autor: Benedito Antonio Luciano		
Publicação: Revista ELETROBRASIL	Editora: Pentatec	
Local: São Paulo - SP		
Ano: 1993	Número: 27	Páginas: 22-26
Resumo: Apresenta uma discussão sobre as possibilidades e limitações no emprego de novos materiais em equipamentos de medição de energia elétrica, sobretudo no que se refere à redução das perdas, melhoria de desempenho, diminuição na manutenção e aumento da vida útil destes equipamentos. Sem propor mudanças significativas na topologia dos equipamentos de uso corrente, são sugeridas aplicações de ligas amorfas e novos ímãs permanentes em medidores eletromecânicos de energia elétrica e, especificamente, ligas amorfas em transformadores para instrumentos: TC's e TP's.		

11. Título: Novos materiais em medidores de energia elétrica e transformadores		
Autores: Benedito A. Luciano, Claudio S. Kiminami e Misael E. de Moraes		
Publicação: Anais do XII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica		
Local: Centro de Convenções de Recife - PE		
Ano: 1994	Número: 052/140-B	Páginas: 26 p.
<p>Resumo: São analisadas algumas possibilidades de aplicações de novos materiais em medidores de energia elétrica, do tipo eletromecânico, em transformadores para instrumentos e em transformadores de distribuição. Particularmente, são focalizadas as ligas amorfas e os novos ímãs permanentes dos tipos Nd-Fe-B e Sm-Co.</p>		
12. Título: Transformador com núcleo de liga Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉ amorfa: projeto, realização e ensaios		
Autores: B. A. Luciano, M. E. de Moraes, W. L. A. Neves e C. S. Kiminami.		
Publicação: Anais do Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo		
Local: Florianópolis - SC		
Ano: 1995	Número:	Páginas: 299-302
<p>Resumo: São apresentados e discutidos o projeto e realização de um protótipo de transformador monofásico, de baixa potência: 100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz, construído com núcleo de liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa. Empregando cálculo de campo e ensaios experimentais, é feita a comparação deste equipamento com um outro de igual capacidade, porém construído com núcleo de aço-silício de grão orientado. Os cálculos de projeto, face aos resultados experimentais, mostraram-se satisfatórios.</p>		

13. Título: Transformador com núcleo de material amorfo: efeito do tratamento magnetotérmico		
Autores: Benedito Antonio Luciano e Claudio Shyinti Kiminami.		
Publicação: 50° Congresso Anual da ABM		
Local: São Pedro - SP		
Ano: 1995	Número:	Páginas:
<p>Resumo: Este trabalho apresenta e discute os resultados do projeto, simulação digital, realização prática e ensaios experimentais relativos a um protótipo de transformador de 100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz, construído com núcleo de material amorfo. Nestes estudos, levou-se em consideração o fato de o material amorfo utilizado sofrer alterações em seu comportamento magnético quando submetido a esforços mecânicos durante o processo de manufatura do núcleo. Estas alterações, previstas teoricamente, foram verificadas experimentalmente, comparando-se os desempenhos do protótipo, antes e depois da realização do tratamento magnetotérmico sobre o núcleo. São igualmente apresentados, para efeito de comparação, os resultados dos ensaios experimentais sobre um transformador comercial, de mesma capacidade que o protótipo com núcleo de material amorfo, porém construído com núcleo de material ferromagnético tradicional (FeSi).</p>		

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5880- Transformadores de potência. Método de ensaio*. Rio de Janeiro, maio 1993, 59 p.
- ACESITA. *Aço ao silício de grão orientado (GO)*. Belo Horizonte, 1989, 20 p.
- ALEXANDROV, N., SCHULZ, R. e ROBERGE, R. *Amorphous alloys for distribution transformers: design considerations and economic impact*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, NO. 2, p. 420-424, 1987.
- ALLIED-SIGNAL. *METGLAS Amorphous magnetics alloys*, 1987, 23 p.
- ALTOÉ, M. V. P. *Magnetic properties of rapidly quenched iron-based alloys*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, NO. 133, p. 317-320, 1994.
- ALVES, F. e PERRON, J. C. *Influence of annealing treatments on permeability aftereffects in some iron- or cobalt-based amorphous alloys*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 112, p. 337-340, 1992.
- ANANTHARAMAN, T. R. e SURYANARAYANA, C. *Rapidly solidified metals: a technological overview*. Switzerland-Germany-UK-USA: Trans Tech Publications, 1987, 260 p.
- BAILEY, D. J., LOWDERMILK, L. A. e LEE, A. C. *Field performance of amorphous metal core distribution transformers*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 54-57, p. 1618-1620, 1986.
- BAVAY, J. C. *Les tôles magnétiques à grains orientés. L'amélioration des Performances*. RGE, No. 11, p. 32-36, 1989.
- BERTUCCI NETO, Victor. *Desenvolvimento dos controladores PID*. Dissertação de Mestrado apresentada junto ao Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, São Carlos, 1990, 131p.
- BLUNDELL, M., OVERSHOTT, K. J. e GRAHAM JR., C. D. *Power loss measurements in amorphous alloys*. Journal of Applied Physics, Vol. 50, NO. 3, p. 1598- 1600, 1979.
- BOLL, R. e WARLIMONT, H. *Applications of amorphous magnetic materials in electronics (invited)*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-17, NO. 6, p. 3053-3058, 1981.
- BOUDREUX, D. S. *Glassy metals: magnetic, chemical and structural properties*. Ed. R. Hasegawa, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 170, 1983.
- BOYD, E. L. e BORST, J. D. *Design concepts for an amorphous metal distribution transformer*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, NO. 11, p. 3365-3372, 1984.

- CARMINATI, Edoardo e FERRERO, Alessandro. *A virtual instrument for the measurement of the characteristics of magnetic materials*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 41, NO. 6, p. 1005-1009, dec. 1992.
- CHAPMAN, Stephen. J. *Electric machinery fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1991, 716 p.
- CHEN, H. S. e POLK, D. E. *US Patent No. 3856513*, 1974
- CURRAN, P. M. *NURAC Committee on Energy Conservation*, San Francisco, 1989.
- DEL TORO, Vincent. *Fundamentos de máquinas elétricas*. Rio de Janeiro: Editora Prentice-Hall do Brasil Ltda., 1994, 550 p.
- DUWEZ, P. *Metallic glasses - historical background*. Topics in Applied Physics, Vol. 46, p. 19-23, 1960.
- ELETRICIDADE MODERNA. São Paulo: Aranda Editora, Ano XXII, n. 240, 1994.
- FISH, Gordon E. *Soft magnetic materials*. Proceedings of the IEEE, Vol. 78, No. 6, p. 974-972, 1990.
- FLORES FILHO, A. F., HOMRICH, R. P., PINTO, A. C. M. "Computer aided testing - CAT " aplicado ao ensaio magnético de materiais magnético. São Paulo: Anais do 3º Seminário sobre Materiais Magnéticos, ABM, p. 149-161, 1991.
- FLORES FILHO, A. F e HOMRICH, R. P. *Transformador de corrente com metal amorfo*. São Paulo: Anais do 3º Seminário sobre Materiais Magnéticos, ABM, p. 163-185, 1991.
- GARBARINO, H. L. *Some properties of the optimum power transformer design*. AIEE Trans. Part III-A: Power Apparatus and Systems, Vol. 73, p. 675-683, 1954.
- GIANNASTASIO, E., FALTERMEIER, Jean-Francis e SACOTTE, M. *L'apport des matériaux dans l'évolution des transformateurs de distribution*. RGE, N°11, p.13-18, 1989.
- GOLDING, E. W. e WIDDIS, F. C. *Electrical Measurements and Measuring Instruments*. Fifth Edition, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltda., London, 1963, 952 p.
- GRAHAN JR., C. D. e EGAMI, T. *Magnetic properties of amorphous materials*. Metals Technology, p. 244-247, jun. 1980.
- GROSSNER, Nathan R. *Transformer for electronic circuits*. Ed. McGraw-Hill, USA, 1983, 467 p.
- GUBANOV, A. I. *Quasi-classical theory of amorphous ferromagnetics*. Soviet Physics Solid State, Vol. 2, p. 468- 471, 1960.

- GÜNTHERRODT, H.-J. *Intruduction to rapidly solidified materials*. Rapidly Quenched Metals, S. Steeb, H. Warlimont (eds.), Elsevier Science Publishers B. V., p. 1591-1598, 1985.
- HASEGAWA, R. *Soft Magnetic properties of metallic glasses*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, No. 41, p. 79-85, 1984.
- HASEGAWA, R. *Application of rapidly solidified metals in the USA and Japan*. Bern: Technische Rundschau, 1991, 8 p.
- HECTOR, J. *DSN: Un logiciel de manipulation de curbes-manuel de reference*. Toulouse: Laboratoire d'electrotechnique et d'electronique industrial, E.N.S.E.E.I.H.T., 1990, 32 p.
- HILZINGER, H-R e WARLIMONT, H. *The significance of rapid solidification thecnology for the production of special metallic materials*. Siemens Review R&D, p. 11-14, 1990.
- HILZINGER, H. R. *Applications of metallic glasses in electronic industry*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-21, NO. 5, 1985, p. 2020-2025.
- HILZINGER, H. R. e HERZER, G. *Effect of crystallization on the magnetic properties in iron-rich metallic glasses*. Materials Science and Engineering, N° 99, p. 101-104, 1988.
- IVANOFF, Dimetri. *Projeto de transformadores com computadores digitais*. Tese de Livre Docência da Cadeira 37 - Eletrotécnica Fundamental e Medidas, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1964, 102 p.
- JANSEN, C. C. e PROFUMO, F. *A low-loss permanent-magnet brushless dc motor utilizing tape wound amorphous iron*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-28, NO. 3, p. 646-651, 1992.
- JACOBS, P. e JADIN, V. *Mesures électriques: courant continu, courant alternatif à basse fréquence*. Paris: Ed. Dunod, 1968, 472 p.
- JOHNSON, L. A., CORNELL, E. P., BAILEY, D. J. e HEGYI, S. M. *Application of low loss amorphous metals in motor and trasnsformers*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, NO. 7, p. 2109-2114, 1982.
- JONES, V. *The unified theory of electrical machines (Chap. 4)*. London: Butterworths, p. 24-34, 1967.
- JUDD, F. F. e KRESSLER, D. R. *Design optimization of small low-frequence power transformers*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-13, NO. 4, p.1058-1069, 1977.
- KIMINAMI, C. S. *Materiais e processos avançados: metais solidificados rapidamente*. São Paulo: Instituto Latino-Americano de Tecnologia - IBM Brasil, 1991, 121p.

- KUHLMANN, J. F. *Diseño de aparatos eléctricos*. México: Compañía Editorial Continental, 3ª Ed., 1980, 559 p.
- LAJOIE-MAZENC, M., HECTOR, J. e FAUCHER, J. *Notice d'utilisation de difimedi - code conversationnel de calcul du champ dans les structures magnétiques*. Toulouse: L.E.E.I., 1980.
- LANCAROTTE, M. S. e JUSTO, D. G. *Traçador de curvas de histerese magnética*. São Paulo: Anais do Seminário de Materiais Magnéticos, ABM, p. 315-324, 1987.
- LANGSDORF, A. F. *Theory of alternating current machinery*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., 1974, 666 p.
- LAWS, F. A. *Electrical measurements*. Second Edition, New York: McGraw-Hill Book Co. Inc., 1938, 739 p.
- LOWDERMILK, L. A., SAMPAT, M. P. e NAGEL, W. D. *Amorphous transformer symposium*. Tokyo: CRIEP I/EPRI, march 22-23, 1989.
- LUBORSKY, F. E. *Applications of amorphous alloys*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-14, NO. 5, p. 1008-1012, 1977.
- LUBORSKY, F. E. *Amorphous metallic alloys*. Butterworths Monographs in Materials, Butterworths & Co (Publishers) Ltd., p. 1- 8, 1983.
- LUBORSKY, F. E., BECKER, J. J., FRISCHMANN, P. G. e TOMPKINS, R. E. *Potential of amorphous alloys for application in magnetic devices*. Journal of Applied Physics, Vol. 49, NO. 3, p. 1769-1774, 1978.
- LUBORSKY, F. E., BECKER, J. J. e McCARY, R. O. *Magnetic annealing of amorphous alloys*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-11, 1975, p. 1644-1649.
- LUCIANO, B. A. e KIMINAMI, C. S. *Cálculo de campo magnético em um núcleo de metal vítreo*. (Trabalho apresentado no I ERCEMat, Campina Grande, nov. 1993).
- LUCIANO, B. A. *Transformadores com núcleos de ligas amorfas: fator de conservação de energia*. Revista Eletricidade Moderna, Aranda Editora, Ano XXI, N° 224, 1992, p. 26-30.
- LUCIANO, B. A. *As ligas amorfas e suas aplicações*. (Trabalho apresentado no V Simpósio de Ensino de Física do Nordeste, Lagoa Seca, 21-23 jun. 1993).
- LUCIANO, B. A. e FECHINE, E. *Utilização de ligas amorfas em núcleo de transformadores*. (Trabalho apresentado no XI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GEM - XIII, Rio de Janeiro, 06-10 out. 1991).

- LUCIANO, B. A. e KIMINAMI, C. S. *Aplicações elétricas e magnéticas de metais solidificados rapidamente*. (Trabalho apresentado no I Seminário de Materiais no Setor Elétrico, Curitiba, 17-20 ago. 1992).
- LUCIANO, B. A., MORAIS, M. E., NEVES, W. A. e KIMINAMI, C. S. *Transformador com núcleo de liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa: projeto, realização e ensaios*. (Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Florianópolis, 14-17 maio 1995).
- LUCIANO, B. A. e KIMINAMI, C. S. *Transformador com núcleo de material amorfo: efeito do tratamento magnetotérmico*. (Trabalho apresentado no 50º Congresso Anual da ABM, São Pedro, 01-04 ago. 1995).
- MAKINO, A., SUSUKI, K., INOUE, A. e MASUMOTO, T. *Magnetic properties and core losses of nanocrystalline Fe-M-B (M=Zr, Hf or Nd) alloys*. Materials Science and Engineering A179/A180, 1994, p. 127-131.
- MARTIGNONI, Alfonso. *Transformadores*. Rio de Janeiro: Editora Globo, 7. ed. revisada, 1987, 307 p.
- MAS, J. A. *Design and performance of power transformers with metallic glasses cores*. IEEE Power Electronic Specialists Conference, June, 1980.
- MASUMOTO, T. *Recent progress in amorphous metallic materials in Japan*. Materials Science and Engineering. Elsevier Sequoia, A179/A180, p. 8-16, 1994.
- Mc PHERSON, George e LAMORE, Robert D. *An introduction to electrical machines and transformers*. 2. ed. Singapore: John Wiley & Sons, 1990, 571 p.
- McLYMAN, Colonel Wm. T. *Transformer and inductor design handbook*. Second Edition, Revised and Expanded. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc., 1988, 416 p.
- MEYDAN, T., BLUNDELL, M. G. e OVERSHOTT, K. J. *An improved force transducers using amorphous ribbon cores*. IEEE Transactions on Magnetics, VOL. MAG-17, NO. 6, p. 3376-3378, 1981.
- MILKOVIC, N., LUBORSKY, F. E., CHEN, D. e TOMPKINS, R. E. *Electronic transformer using amorphous materials*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-13, NO. 5, p. 1224-1226, 1977.
- MISCHLER, W. R., ROSEMBERRY, G. M., FRISCHMANN, P. G. and TOMPKINS, R. E. *Test results on a low loss amorphous iron induction motor*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, NO. 6, p. 2907-2911, 1981.
- MIT - ELECTRICAL ENGINEERING STAFF. *Magnetic circuits and transformers*. New York: Ninth Printing, John Wiley & Sons, Inc. London: Chapman & Hall, 1954, 718 p.

- MOHRI, K. e KOREKODA, S. *New force transducers using amorphous ribbon cores*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-14, NO. 5, p. 1071-1075, 1978.
- MOLOTILOV, B. V. e SADCHIKOV, V. V. *Amorphous soft magnetic materials and their application*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, NO. 112, p. 235-257, 1992.
- NARASHIMHAN, M. C. *U.S. Patente No. 41425771*, 1979.
- NETO, L. M., BISPO, D. e SIMONI, F. A. *Single-phase transformers: a non-linear analysis*. Florianópolis: Anais do Brazilian Power Electronics Conference, SOBRAEP/UFSC, p. 327-332, 1991.
- NG, H. W., HASEGAWA, R., LEE, A. C. e LOWDERMILK, L. A. *Amorphous alloy core distribution transformer*. Proceedings of the IEEE, Vol. 79, No. 11, p. 1608-1623, 1991.
- ODESSEY, P. H. *Transformer design by computer*. IEEE Transactions on Manufacturing Technology, p. 1-17, 1974.
- OLIVEIRA Jr., N. *Ensaio magnéticos*. São Paulo: Anais do Seminário sobre Materiais Magnéticos, ABM, p. 5-28, 1987.
- OVERSHOTT, K. J. *The use of domain observations in understanding and improving the magnetic properties of transformer steels*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-12, NO. 6, p. 840-845, 1976.
- PANKHURST, Q. A., GIBBS, M. R. J. e THOMAS, A. P. *Moment distribution in $Fe_{78}B_{13}Si_9$ ribbons by mössbauer spectroscopy*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 104-107, p. 111-112, 1992.
- PASSAGLIA, R. e ZANNELLA, S. *Stacked transformer cores using amorphous POWERCORE strip*. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 27, NO. 6, p. 5265-5267, 1991.
- PATEL, R. *Predicting Leakage Inductance of the Transformer*. Power Conversion International, p. 14-20, nov./dec., 1981.
- PFÜTZNER, H., SCHÖNHUBER, P., ERBIL, B., HARASKO, T. e KLINGER, T. *Problem of Separation for Crystalline and Consolidated Amorphous Soft Magnetic Materials*. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 27, NO. 3, p. 3426-3432, 1991.
- PRY, R. H. e BEAN, C. P. *Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model*. Journal of Applied Physics, Vol. 29, NO. 3, p. 532- 533, 1958.
- RASKIN, D. e DAVIS, A. L. *Metallic glasses: a magnetic alternative*. IEEE Spectrum, vol. 18, n. 11, p. 28-33, nov. 1981,.

- RASKIN, D. e SMITH, C. H. *Applications of amorphous metals: progress and prospects*. Amorphous Metallic Alloys, Butterworths Monographs in Materials, Chapter 20, p. 381-400, 1983.
- SABONNADIÈRE, J. C. e KONRAD, A. *Computing EM fields*. IEEE Spectrum, p. 52-56, nov. 1992.
- SAINT-JEAN, B. *Electrotechnique et machines électriques*. Paris: Editions Eyrolles, 1976, 373 p.
- SARAIVA, D. B. *Materiais elétricos*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1988, 251 p.
- SASAKI, T., SHIMOMURA, E. e YAMADA, K. *Variation of power losses with stress in amorphous sheets for power applications*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-23, NO. 5, p. 3587-3589, 1987.
- SCHULZ, R., CHRETIEN, N., ALEXANDROV, N., AUBIN, J. e ROBERGE, R. *A new design for amorphous core distribution transformer*. Material Science and Engineering, NO. 99, p. 19-21, 1988.
- SEN, P. C. *Principles of electric machines and power electronics*. John Wiley & Sons, 1989, 603 p.
- SENS, M. A. e UETI, E. *Determinação das características histeréticas e parasíticas em lâminas de materiais magnéticos para corrente alternada*. São Paulo: Anais do Seminário sobre Materiais Magnéticos, ABM, p. 325-379, 1987.
- SHILLING, J. W. e HOUZE Jr., G. L. *Magnetic properties and domain structure in grain-oriented 3% si-fe*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-10, NO. 2, p. 195-223, 1974.
- SHISHIDO, H., KAN, T. e ITO, Y. *The magnetic domain and properties of amorphous ribbons*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-21, NO. 1, p. 49-52, 1985.
- SILVA, L. E. B., CAMACHO, M. A. G. e LUCIANO, B. A. *Instrumento virtual para análise dos parâmetros elétricos e magnéticos de transformadores*. (Trabalho apresentado, em forma de painel, no 47º Congresso da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, São Luiz, 9-14 jul. 1995).
- SLEMON, G. R. *Equipamentos magnetelétricos, Vol. 1*. São Paulo: Ed. Livros Técnicos e Científicos, 1974, 240 p.
- SLEMON, G. R. e STRAUGHEN, A. *Electrical machines*. Philippines: Addison-Wesley Publishing Company, 1982, 575 p.
- SOINSKI, M., BULICA, W., CIESLEWICZ, K. e SZCZYGLOWSKI, J. *Current transformer with cut core made of metallic glass ribbon*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-24, NO. 2, p. 1871-1873, 1988.

- STOUT, M. B. *Curso básico de medidas elétricas, Vol.2*. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos; Ed. da Universidade de São Paulo, 1975, 512 p.
- TAN, Dong F., VOLLIN, Jeff L. e CUK, Slobodan M. *Effective control of error in a direct measurement of core-loss power*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-31, NO. 3, p. 2280-2284, 1995.
- TAN, K. S. *Amorphous ribbon domain refinement by scribing*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-22, NO. 3, p. 188-191, 1986.
- TAUB, A. I. *A new method for stress relieving amorphous alloys to improve magnetic properties*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-20, NO. 4, p. 564-570, 1984.
- VICAUD, A. *Synthèse de l'étude des verres métalliques: applications transformateurs de distribution*. EDF/DER/ERMEL/HM 65-2052, 1986.
- WASHKO, S. D., OSBORN, M. L. e VEERARAGHAVEN, W. G. *Origin of losses in 2.54 cm wide metglas alloy 2605SC*. Journal of Applied Physics 52(3), p. 1899-1904, 1981.