



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WELLINGTON DA SILVA FONSECA

**MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE NÚCLEO
AMORFO USANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

DM – 12 / 2010

**Belém, Pará, Brasil.
Maio / 2010**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WELLINGTON DA SILVA FONSECA

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE NÚCLEO AMORFO
USANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Dissertação de Mestrado submetida à coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes

Belém, Pará, Brasil.
Mai / 2010

F676m Fonseca, Wellington da Silva

Modelagem de transformadores de núcleo amorfo usando método de elementos finitos / Wellington da Silva Fonseca; orientador, Marcus Vinicius Alves Nunes.-Belém, 2010.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2010.

1. Transformadores. 2. Método dos elementos finitos. I. Orientador. II. Título.

CDD 22. ed. 621.314

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE NÚCLEO AMORFO USANDO
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Autor: WELLINGTON DA SILVA FONSECA

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(Orientador – ITEC/UFPA)**

**, Prof^a. Dr^a Maria Emilia de Lima Tostes
(Membro ITEC/UFPA)**

**Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(Membro ITEC/UFPA)**

**Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
(Membro Campus Tucuruí/UFPA)**

**Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA**

DEDICATÓRIA

À minha família, minha mãe Nancy do Socorro Fernandes da Silva e meu irmão Rogério da Silva dos Santos, pelo amor incondicional que me dão a cada dia.

Também dedico este trabalho a todos os meus amigos que acreditaram e me apoiaram de alguma forma.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus caminhos e julgar-me merecedor desta realização;

Ao professor Dr. Benedito Antonio Luciano por todo o conhecimento que me passou com tanta clareza, pela amizade que construímos, pelas grandes contribuições, pois sem ele eu talvez não tivesse conseguido concluir esse trabalho;

Ao meu orientador, professor Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes, pelo apoio na orientação deste trabalho, por acreditar no meu potencial e pela amizade;

Aos professores, Dr. Ubiratan Holanda Bezerra e Dr^a. Maria Emília de Lima Tostes, por todo o conhecimento que me passaram nas disciplinas que ministraram e por participar da banca examinadora;

Ao meu amigo, professor Andrey Costa Lopes, por todo conhecimento que me passou, pela amizade, pela paciência;

Ao meu amigo, professor Luis Miguel por me ajudar em varios momento que precisei;

Ao meu amigo, professor João Paulo Abreu Vieira pelo apoio e por participar da banca examinadora;

À equipe dos laboratórios do GVA – Grupo de Vibrações e Acústicas, em especial, ao professor Newton Soeiro e ao meu amigo Fábio;

Ao meu amigo Robert Macy da AJM Eletronic, San Jose, CA, pela contribuição neste trabalho;

Ao Sr. Stevon Schettino da ENERGISA S/A por todo apoio no fornecimento de material para a pesquisa;

A todos os meus amigos que ajudaram na redação deste trabalho: Carlos Robson, Anderson Brasil, Jefferson Santos, Rodolpho Rodrigo.

À Sarah Lopes pelo companheirismo, compreensão e carinho que teve e pelo apoio na redação deste trabalho.

Ao Ph.D. David Meeker por disponibilizar o software *FEMM* para o uso livre.

À FAPESPA pelo apoio financeiro para publicação do meu artigo relacionado a este trabalho;

A todos que de alguma forma contribuíram para esta realização.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE ABREVIações E SIGLAS	XV
RESUMO	XVI
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Estado da Arte e Revisão Bibliográfica	2
1.3 Organização da Dissertação	8
CAPÍTULO 2	
FALHAS EM TRANSFORMADORES	9
2.1 Considerações Iniciais	9
2.2 Análise de Falhas em Transformadores	9
2.3 Conclusões do Capítulo	16
CAPÍTULO 3	
TRANSFORMADORES COM NÚCLEO DE LIGA AMORFA	17
3.1 Considerações Iniciais	17
3.2 Características das ligas amorfas	17
3.3 Processo de Produção	19
3.4 Tratamento Magnetotérmico	21
3.5 Montagem e Desmontagem do Conjunto Núcleo - Bobina	25
3.6 Comparação entre transformadores de núcleo amorfo e núcleo de Ferro-Silício	27
3.7 Conclusões do Capítulo	31

CAPÍTULO 4**FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS E ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS 33**

4.1	Considerações Iniciais	33
4.2	Correntes de Curto-Circuito	33
4.3	Forças Eletromagnéticas Dentro do Transformador	34
4.3.1	Forças Radiais nos Enrolamentos	35
4.3.2	Forças Axiais nos Enrolamentos	39
4.3.2.1	Condição Ideal	39
4.3.2.2	Condição Não-Ideal	41
4.4	Esforços Eletromecânicos e Tipos de Falhas em Transformadores	45
4.4.1	Falhas Provocadas por Forças Radiais	46
4.4.1.1	Enrolamentos Sujeito a Estresses de Tração	46
4.4.1.2	Enrolamentos Sujeito a Estresses de Compressão	46
4.4.2	Falhas Provocadas por Forças Axiais	50
4.4.2.1	Inclinação de Condutores entre Espaçadores Radiais	50
4.4.2.2	Inclinação de Condutores Produzida pela Carga Axial	51
4.5	Conclusões do Capítulo	53

CAPÍTULO 5**O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E O *FEMM* 54**

5.1	Considerações Iniciais	54
5.2	O Método de Elementos Finitos	54
5.3	Estrutura e Funcionamento do <i>FEMM</i>	57
5.4	Interações entre as Grandezas Eletromagnéticas e Mecânicas	59
5.5	Conclusões do Capítulo	62

CAPÍTULO 6**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE TRANSFORMADORES AMORFOS 63**

6.1	Considerações Iniciais	63
6.2	Modelagem de Transformadores	63

6.3	Resultados das Simulações no <i>FEMM</i>	66
6.3.1	Características do Transformador Amorfo de 15kVA	67
6.3.2	Resultados da Simulação Operando em uma Condição Transitória de Curto-Circuito	69
6.4	Conclusões do Capítulo	74
CAPÍTULO 7		
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS		75
7.1	Conclusões	75
7.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		77
APÊNDICE A – Características do Material do Núcleo Amorfo		81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Curva de falhas em transformadores “banheira”	10
Figura 3.1: Processo de solidificação rápida para obtenção de ligas amorfas	21
Figura 3.2: Sistema empregado no tratamento magnetotérmico do núcleo de liga amorfa	23
Figura 3.3: Ciclo térmico para tratamento do núcleo de liga amorfa de um protótipo de 1,0 kVA, 220/110 V, 60 Hz	23
Figura 3.4: Núcleo de liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$ no interior do forno projetado para o tratamento magnetotérmico	24
Figura 3.5: Forno contínuo para tratamento magnetotérmico	24
Figura 3.6: Rolo de fita de material amorfo	25
Figura 3.7: Núcleo prensado para obtenção da forma semi-retangular	25
Figura 3.8: Montagem das bobinas (a) cabeado (b) laminado	26
Figura 3.9: Esquema de montagem da bobina no núcleo	26
Figura 3.10: Esquema de montagem de transformadores amorfos trifásicos (a) Tripex, (b) Núcleo envolvido, (c) Núcleo envolvente	26
Figura 3.11: Estrutura cristalina (a) e amorfa (b)	28
Figura 3.12: Gráfico comparativo de eficiência energética entre transformadores de 2000 kVA em núcleo amorfo e FeSi(GO)	28
Figura 4.1: Densidades campo magnético (axial e radial) e forças resultantes	35
Figura 4.2: Direção das forças nos enrolamentos	36
Figura 4.3: Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças radiais nos enrolamentos e a distribuição da densidade de fluxo axial.	36
Figura 4.4: Método para calculo de estresse de tração médio	38
Figura 4.5: Distribuição do fluxo radial e de força axial em enrolamentos concêntricos iguais	40
Figura 4.6: Forças axiais nos enrolamentos magneticamente balanceados: $F^1 = F^2$	41
Figura 4.7: Forças axiais nos enrolamentos com deslocamento axial: $F_1 < F_2$	42
Figura 4.8: Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças axiais nos enrolamentos e a distribuição de densidade de fluxo de dispersão radial	43
Figura 4.9: Determinação do diagrama de ampère-espiras residuais para enrolamento com derivação em uma extremidade	44
Figura 4.10: a) Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador e b) Deformação forçada (“forced buckling”) no enrolamento interno	47

Figura 4.11: Deformação “livre” no enrolamento interno: <i>Free buckling</i>	48
Figura 4.12: Inclinação dos condutores pela ação de forças axiais – vista lateral (<i>Bending</i>)	51
Figura 4.13: Inclinação de condutores pela ação de forças axiais – seção transversal	52
Figura 5.1: Domínio para ser malhado (a) elemento triangular (b)	55
Figura 5.2: Modelos em 2D com expansão em coordenadas retangulares (a) e cilíndricas (b)	61
Figura 6.1: Cotas do núcleo amorfo	68
Figura 6.2: Curva de magnetização da $\text{Si}_{78}\text{Fe}_{13}\text{B}_9$ amorfa	68
Figura 6.3: Malha de elementos finitos bidimensional do transformador amorfo de 15kVA.	69
Figura 6.4: Densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador: curto-circuito	70
Figura 6.5: Distribuição do fluxo entre os enrolamentos	71
Figura 6.6: Distribuição do fluxo axial	71
Figura 6.7: Distribuição do fluxo radial	72
Figura 6.8: Força axial e radial no enrolamento externo: curto-circuito	72
Figura 6.9: Força axial e radial no enrolamento interno: curto-circuito	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Desenvolvimento das ligas amorfas para núcleos de transformadores.	3
Tabela 1.2: Dados comparativos entre a Nova Liga Amorfa (2605HB1) e a liga convencional.	4
Tabela 2.1: Causas típicas de falhas em transformadores.	10
Tabela 2.2: Número de casos e perdas capitalizadas no ano.	11
Tabela 2.3: Perdas capitalizadas por aplicação.	11
Tabela 2.4: Custos de falhas.	12
Tabela 2.5: Falha nos transformadores por idade.	14
Tabela 2.6: Percentual de faltas para falhas em transformadores de potência.	14
Tabela 2.7: Diagnóstico de avarias de falhas em transformadores de distribuição.	15
Tabela 3.1: Comparação entre transformadores de núcleo amorfo e núcleo de aço-silício	29
Tabela 3.2: Comparativo de perdas entre dois transformadores de 250 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de FeSi (GO)	30
Tabela 3.3: Comparativo de perdas entre transformadores com núcleo de liga amorfa e transformador com núcleo de FeSi (GO)	31
Tabela 6.1: Características dos enrolamentos.	67
Tabela 6.2: Pontos específicos da curva $B-H$	69
Tabela 6.3: Comparação entre simulação e os cálculos analíticos dos Transformadores de núcleo amorfo e de FeSi.	73

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{cc}	Corrente de curto-circuito
$k\sqrt{2}$	Fator de assimetria
S_n	Potência nominal do transformador
V	Tensão nominal
Z	Impedância por unidades do transformador
f	Densidade volumétrica de força magnética
J	Densidade superficial de corrente
B	Densidade de campo magnético de dispersão
B_a	Densidade de fluxo de dispersão axial
N	Número de espiras do enrolamento
I_r	Corrente nominal do enrolamento
H_w	Altura do enrolamento
F_r	Força radial total no enrolamento
D_m	Diâmetro médio do enrolamento
σ_{medio}	Estresse de tração médio
S	Seção transversal
R_{cc}	Resistência em corrente contínua do condutor
ρ	Resistividade do condutor
F_a	Força axial
d_o	Espaço entre os enrolamentos
d_1	Espessura radial do enrolamento externo
d_2	Espessura radial do enrolamento interno
B_r	Densidade de fluxo de dispersão radial
h_{eff}	Comprimento efetivo do caminho do fluxo radial
a	Comprimento do Tap
σ_{crit}	Valor do estresse crítico
E	Módulo de elasticidade do material
e	Espessura do condutor
R	Raio do enrolamento
$E(\delta)$	Módulo de elasticidade incremental no valor crítico
k	Constante para espessura equivalente

N_s	Número de suportes axiais
F_{rmed}	Força radial
l	Distância entre os suportes
h	Altura do condutor
F_a	Força axial
L	Distância entre os espaçadores axiais
m	Número dos espaçadores
s	Comprimento dos espaçadores
c	Módulo equivalente de elasticidade do papel
H	Intensidade de campo magnético
μ	Permeabilidade magnética
E	Vetor campo elétrico
dV	Elemento diferencial de volume
dF	Elemento diferencial de força
u	Vetor unitário à superfície

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

FEA	<i>Finit Elements Analysis</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
FEMM	<i>Finit element method magnetic</i>
CIGRE	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
CEA	<i>Canadian Electricity Association</i>
ZTZ	<i>Scientific and Engineering Centre</i>
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
FeSi(GO)	Ferro-Silício de grãos orientados
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>

RESUMO

Os Materiais amorfos vêm ganhando grande espaço na indústria de transformadores, devido às baixas perdas no núcleo, visto que estes possuem um ciclo de histerese mais estreito quando comparados com os núcleos tradicionais de aço silício. Entretanto, seu custo ainda tem sido um grande fator para pouca inserção deste tipo de equipamento nos sistemas elétricos de potência. Estudos sobre o custo/benefício em termos técnicos de desempenho e robustez devem ser considerados quando se deseja projetar transformadores que utilizam esse tipo de material. A grande contribuição deste trabalho encontra-se na análise do desempenho do transformador de núcleo amorfo diante de curtos-circuitos, visto que tais falhas neste equipamento ocasionam redução da receita, não apenas por gastos com manutenção, mas também porque a concessionária deixa de vender seu produto, energia elétrica, além de poder estar sujeita a penalidades por parte dos órgãos de regulação do setor elétrico. Quando em condições de curto-circuito os enrolamentos dos transformadores ficam submetidos a esforços mecânicos, produzidos por forças de Lorentz, essas forças surgem como resultado do fluxo produzido pelos próprios condutores em paralelo que transportam corrente na mesma direção. Diante disso, estudar o comportamento eletromagnético do transformador é fundamental para obtenção de tais forças. Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o software *Finite Element Method Magnetics (FEMM)*. Esta ferramenta se baseia no método de elementos finitos para realizar os cálculos das magnitudes eletromecânicas e, conseqüentemente, o cálculo das forças atuando nas espiras, as quais permitem realizar os cálculos dos esforços mecânicos. Por fim, este trabalho aborda a aplicação da ferramenta *FEMM* para o cálculo de esforços mecânicos e simulação do comportamento eletromagnético de um transformador de distribuição.

ABSTRACT

The amorphous materials are becoming broadly used in transformers industry, due to the low losses in its core, since they have a hysteresis loop narrower compared to the traditional cores of silicon steel. However, its cost of these materials is a great factor against its use in electric power systems. Study the cost / benefit in terms of technical performance and robustness must be considered when we want to design transformers which use this material type. The main contribution of this work is the performance analysis of the transformer in short-circuits, since the equipment failures cause a reduction in revenue, not only for expenses maintenance, but also because the concessionaire does not sell its product, electric energy, and it could be submitted to penalties by regulatory agency in the electricity sector. Under short-circuit conditions, the windings of transformers are submitted to mechanical efforts produced by Lorentz forces, these forces arise as a flux result produced by conductors in parallel that carry current in the same direction. In this case, study the electromagnetic behavior of the transformer is essential for obtaining such forces. To develop this work, the software *Finite Element Method Magnetics (FEMM)* was used. This tool is based on the finite element method in the calculations of the electromechanical magnitudes and, consequently, the calculation of forces acting in the spires, which allow the calculations of the strain. Finally, this paper deals with the application of the FEMM tool to calculate the mechanical effort and the simulation of the electromagnetic behavior of a distribution transformer.

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido à necessidade de equipamentos mais eficientes para os sistemas elétricos, muitas pesquisas foram realizadas nos últimos anos em transformadores, principalmente na busca por novos materiais para o núcleo e os enrolamentos. Na década de 80 entraram no mercado mundial os transformadores com núcleo constituído de liga amorfa, desde então, estes transformadores começaram a ganhar uma grande fatia do mercado, sendo um negócio lucrativo tanto para as empresas que os comercializam, quanto para as concessionárias que os utilizam em sua rede de distribuição.

Os transformadores são equipamentos essenciais para o funcionamento dos sistemas elétricos de potência. São dispositivos de custo significativo, comparativamente aos custos totais de uma instalação em sistemas potência. Os procedimentos para sua substituição ou reparo são igualmente onerosos para a empresa proprietária, podendo comprometer a receita das mesmas, visto que além de seus gastos com a aquisição de novos transformadores e com a manutenção, quando há um dano em um desses equipamentos, as concessionárias deixam de vender seu produto. Outro efeito negativo com a parada de um transformador, seja para manutenção ou substituição, é para os clientes das concessionárias, sejam estes do ramo empresarial (Indústrias, prédios comerciais, entre outros) ou próprio consumidor residencial, que sofrem com a perda de qualidade no fornecimento da energia e o desconforto em suas residências.

Assim, o estudo do custo/benefício em termos técnicos de desempenho e robustez deve ser considerado quando se deseja projetar transformadores que utilizam esse tipo de material. Neste sentido, danos em transformadores ocorrem,

principalmente, quando seus enrolamentos estão expostos a correntes de curto-circuito, pois os enrolamentos dos transformadores ficam submetidos nestas condições a esforços mecânicos, produzidos por forças de Lorentz, fato este a ser avaliado neste trabalho. Dentre os efeitos causados pelas correntes transitórias, podem-se citar as vibrações internas, que provocam deterioração na isolação, fadiga mecânica nos condutores/enrolamentos e danos nas estruturas de sustentação dos enrolamentos [1]. As forças de Lorentz em alguns casos de surtos podem até esmagar as bobinas atingidas. Caso essa deformação mecânica nas bobinas ocasionem deformação no empilhamento das fitas amorfas que constituem o núcleo, esse transformador precisa passar por um processo de recuperação dos circuitos elétricos (bobinas e material isolante) e magnético (núcleo de liga amorfa) para voltar a ter suas características iniciais.

1.2. ESTADO DA ARTE e REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No início do século XX, Hadfield e outros, estudando as propriedades eletromagnéticas das ligas Fe-Si (Ferro-Silício), verificaram que a resistividade do Ferro era bastante aumentada com a adição de Silício. Isso contribuiu para a redução das perdas devido às correntes de *Foucault*.

A partir daí, começou a fabricação e utilização de aço-silício para transformadores. Primeiramente, foram desenvolvidos aços de grãos não-orientados, o que facilitava o fluxo orientar-se em qualquer direção (anisotropia magnética).

Em 1934, Norman Goss propõe um método de produção de chapas de aço-silício mas com grãos orientados (GO). Essas fitas fornecem uma direção preferencial de magnetização e, portanto, ideal para uso em transformadores, uma vez que a distribuição do fluxo magnético é constante.

Atualmente, existem três grandes famílias de chapa de aço-silício:

1. Normal: (RGO – *Regular Grain Oriented*);
2. Alta Indução: (HGO – *High permeability Grain Oriented, ou HiB*);
3. Com Refino de Domínios: (DR – *Domain refined*).

Em um artigo antológico [2], o professor Pol Duwez relatou o experimento realizado em 1959, mediante o qual ele e seus orientandos W. Klement Jr. e R. H.

Willens obtiveram a primeira liga amorfa do sistema binário Au-Si. Essa liga, contendo 75% de ouro e 25 % de silício, foi a precursora das ligas amorfas do sistema ternário Fe-P-C ($\text{Fe}_{75}\text{P}_{15}\text{C}_{10}$), sendo considerada como o protótipo de todas as ligas amorfas ferromagnéticas que foram largamente estudadas nos anos subsequentes, resultando na obtenção de ligas do sistema ternário, definidas na patente [3].

O desenvolvimento dos núcleos de transformadores de liga amorfa começa em 1975 e o material para os transformadores começa a chegar ao mercado em 1976.

A liga de ferro e boro $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ (METGLAS 2605) foi a primeira no mercado com uma maior indução de saturação na faixa de 1,5 Tesla. A liga $\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_6$ (METGLAS 2605S) foi mais estável termicamente do que a anterior, mas apresenta sérios problemas de cristalização e irregularidades de superfície. Para superar esses problemas uma nova liga foi proposta em 1978, que se mostrou mais adequada e estável, a liga de $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13,5}\text{Si}_{3,5}\text{C}_2$ (METGLAS 2605SC). Este tipo de liga amorfa foi desenvolvida pela *Allied-Signal, Inc.* (E.U.A.). Funcionários da empresa, juntamente com pesquisadores do Laboratório Lincoln, em 1981, colocaram em operação o primeiro transformador com núcleo de liga amorfa para comercialização, sendo este um transformador monofásico toroidal de 15 kV [4].

Finalmente, em 1980, se introduziu a liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, que é a base das que são atualmente utilizadas. Este desenvolvimento cronológico, até 1980, ano de introdução da liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, é apresentado na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1.1 – Desenvolvimento das Ligas amorfas para núcleos de Transformadores [5].

Composição (% at.)	$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$	$\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_6$	$\text{Fe}_{81}\text{B}_{13,5}\text{Si}_{3,5}\text{C}_2$	$\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$	FeSi (GO)
Ano de introdução no mercado	1976	1978	1979	1980	1935
Indução de Saturação (T)	1,60	1,61	1,61	1,58	1,89
Força coerciva (A/m, <i>as-cast</i>)	8,0	-	6,4	4,0	-
Força coerciva (A/m, <i>annealed</i>)	-	2,4	3,0	1,6	10,0
Temperatura de Curie (°C)	374	374	370	420	-
Temperatura de cristalização (°C, 20 k/min)	390	472	480	560	-

A única empresa no mundo até 2005 que fabricava a fita de material amorfo era a *Allied Signal* – USA, essa empresa possuía uma patente que se expirou em 2005, o que incentivou a entrada de outros concorrentes no mercado. Assim, em outubro de 2005 [6], a Hitachi anunciou a criação de um novo material de fita amorfa (2605HB1) que tinha uma maior densidade de fluxo magnético, menores perdas no núcleo e

produzia menos ruído sonoro do que o material de metal amorfo normalmente utilizado até agora (2605SA1).

O novo material tem uma densidade de fluxo magnético 5% maior, uma redução de perdas no ferro de 10%, reduzindo o ruído audível para 10dB. Além disso, este novo material pode reduzir o tamanho do núcleo, em comparação com o outro tipo de fita amorfa. O tamanho resultante do transformador é equivalente aos que usam ferro silício de grão orientado.

Estes novos dados são comparados com o material convencional na tabela 2:

Tabela 1.2 – Dados comparativos entre a Nova Liga Amorfa (2605HB1) e a liga convencional.

Propriedades	Nova liga Amorfa	Liga Amorfa Convencional
Indução de Saturação B_s (T)	1,64	1,56
Perdas no Ferro : P_c (W/kg), 50 Hz, 1.3T	0,063	0,07

Nesta dissertação serão utilizados os dados característicos do transformador com núcleo constituído da liga amorfa $Fe_{78}Si_{13}Si_9$ para análise de perdas no núcleo dos transformadores de núcleo amorfo em comparação aos transformadores convencionais de FeSi (GO) e a investigação de curto-circuito.

A investigação dos fenômenos oriundos de curto-circuito e a energização de transformadores podem ser realizadas de diferentes maneiras, empregando-se, para tanto, técnicas diversas. Dentre elas destacam-se os:

- Métodos analíticos para o cálculo das correntes e estimativas das forças;
- Métodos que se valem de técnicas do Método dos Elementos Finitos;
- Métodos que fazem uso de sistemas de medição com capacidade para armazenamento/análise em tempo real das informações de interesse.

Ressalta-se que o método que utiliza sistemas de medição foge ao escopo desta proposta de dissertação, motivo pelo que não é abordado no presente trabalho.

Investigações referentes a curtos-circuitos e seus efeitos danosos sobre transformadores constituem-se em temas cotidianos para os profissionais do setor há muitas décadas. Porém, foi a partir dos anos 70 que se verificou um aumento significativo do número de falhas nestes dispositivos. Tal fato pode ser relacionado a

fatores como: aumento das potências nominais dos transformadores e das capacidades crescentes de curto-circuito dos sistemas elétricos [7].

Sobre esse assunto, diversas publicações utilizam-se das potencialidades do Método de Elementos Finitos para desenvolver estudos referentes aos estresses originados pelos curtos-circuitos, seja em transformadores de potência ou de distribuição. As referências [8] e [9] apresentam o cálculo das forças eletromagnéticas devido aos curtos-circuitos utilizando o método mencionado. A referência [8] apresenta ainda as fórmulas para cálculos das forças eletromagnéticas axiais e radiais, a partir da expressão da densidade de força e baseado em expressões aproximadas de correntes transitórias que se manifestam durante curtos-circuitos trifásicos. Os resultados das simulações são comparados com as fórmulas utilizadas em cálculos de projetos convencionais de transformadores, referentes aos curtos-circuitos trifásicos. As análises realizadas permitiram concluir que as fórmulas convencionais utilizadas para se efetuar cálculos de forças radiais, na fase de projeto, podem necessitar de ajustes para os enrolamentos localizados dentro das janelas (área vazada no interior do núcleo), devido à influência do núcleo de ferro. É recomendado no artigo que a força axial seja determinada utilizando métodos numéricos.

A referência [9] faz uso do MEF para efetuar o cálculo das forças eletromagnéticas. Para tanto, utiliza como dado de entrada o valor do primeiro pico da corrente de curto-circuito trifásico que circula nos enrolamentos. Os resultados dos testes computacionais mostram que as componentes axiais das forças são mais intensas nas extremidades dos enrolamentos e o deslocamento se dá na direção axial. Por outro lado, as componentes radiais produzem estresses de tração no enrolamento externo e estresses de compressão no enrolamento interno.

A referência [10] utiliza o método conhecido como *Finite Elements Analysis* (FEA) bi e tridimensional, para modelar um transformador monofásico do tipo núcleo envolvente. As análises foram efetuadas levando-se em consideração a influência da curvatura dos enrolamentos, o desalinhamento axial e a localização dos tap's, para verificar o efeito das forças nessas situações. As influências exercidas pelos efeitos *Skin* e de proximidade na distribuição das forças também foram consideradas. A confrontação dos resultados obtidos para os modelos 2D e 3D mostram que existe uma boa correlação para regiões que podem ser modeladas em 2D. Contudo, em relação ao 3D, permite que se examine assimetrias e se calcule forças na região dos enrolamentos

localizada fora da janela do núcleo, o que não é possível em análises 2D. Não foi verificada uma grande influência produzida pelos efeitos *Skin* e de proximidade na força total.

Na referência [11] é utilizado o método conhecido como $T - \Omega$ melhorado (onde T representa o potencial vetor elétrico e Ω é o potencial escalar magnético). Este procedimento é usado para determinar o campo transitório tridimensional das correntes parasitas e as forças eletromagnéticas que agem nos enrolamentos de grandes transformadores. A aplicação desse método permite que T e Ω sejam determinados separadamente dentro de regiões condutoras e não condutoras. A solução do problema torna-se exequível fazendo o uso do Método dos Elementos Finitos. As simulações realizadas no MEF para calcular as densidades de força axial e radial ao longo da altura da bobina permitiram concluir que a densidade de força axial perto das extremidades dos enrolamentos é maior do que aquelas próximas à região central da bobina. Isto se deve ao efeito da densidade de fluxo magnético de dispersão na direção radial e da distribuição não-uniforme de ampere-espira ao longo dos enrolamentos.

A referência [12] analisa a resistência aos curtos-circuitos de transformadores do tipo núcleo envolvente através de investigações da resistência mecânica de seus condutores e das vibrações de suas bobinas. As vibrações das bobinas são estimadas por meio de um método numérico considerando o movimento do óleo e a não-linearidade da rigidez do grupo de bobinas. Os resultados foram comparados aos dados obtidos em medições realizadas em um transformador modelo, constatando-se que o nível de esforços nos condutores, fornecidos pelos cálculos numéricos, é apropriado para avaliar a resistência mecânica dos condutores às forças originadas em decorrência dos curtos-circuitos.

Cálculos dos estresses de curtos-circuitos são apresentados na referência [13]. É descrito um método computacional para o cálculo de forças axiais nos enrolamentos sem, no entanto, recorrer a simplificações que comprometam os resultados. Para tanto, as fórmulas mais adequadas para efetuar os cálculos numéricos são implementadas computacionalmente e uma rotina é utilizada para efetuar os cálculos dos estresses.

A resposta dinâmica dos transformadores submetidos a forças axiais de curto-circuito é analisada em [14] e [15]. Na parte I do estudo, discute-se o efeito sobre os

enrolamentos e sobre as estruturas de fixação (*Clampings*) de forma individual. Na parte II, a avaliação é realizada considerando ambas as partes de maneira combinada. As forças dinâmicas encontradas, a partir das forças eletromagnéticas geradas, mostram-se completamente diferentes para as duas situações analisadas.

As vibrações axiais dos enrolamentos dos transformadores sobre curto-circuito são consideradas em [16] e [17]. Em [16] é apresentado um modelo para estudar as vibrações axiais baseado no sistema massa-mola. Enquanto que a referência [17] propõe um modelo não-linear que varia com o deslocamento dos enrolamentos. As equações de vibração não-lineares são solucionadas fazendo uso de um método numérico. A resposta ao deslocamento foi obtida para o transformador sob condições de forças eletromagnéticas devido aos curtos-circuitos, concluindo-se que condições de altas correntes provocam uma vibração instável dos enrolamentos.

Nas referências [18] e [19] são efetuadas investigações de faltas internas nos transformadores de distribuição utilizando o programa "*Finite Elements Analysis*" (FEA). A referência [18] apresenta um método para detecção de faltas internas causadas por curtos-circuitos entre espiras. Os resultados contemplaram simulações para a condição de operação normal e para situações de faltas típicas. A análise final do comportamento do transformador foi obtida associando o modelo estabelecido para o dispositivo a um programa de análise circuital. Para finalizar, os estudos computacionais foram confrontados com dados de campo e os resultados serviram para confirmar a eficácia do FEA na simulação de faltas internas em transformadores de distribuição. Na referência [19] foi implementado um novo modelo para simular faltas internas, desta vez, combinando o programa do FEA a um modelo de degradação do isolante.

Através da pesquisa bibliográfica realizada nesta fase do trabalho, foi possível constatar na literatura pesquisada a existência de uma série de publicações que contemplam, de forma direta ou indireta, os estudos de curto-circuito em transformadores através dos elementos finitos - MEF. Analogamente, uma vez que o foco desta dissertação é a avaliação de esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores amorfos, técnicas numéricas, sob o enfoque do MEF, serão incorporadas ao trabalho devido à necessidade de comparar os resultados fornecidos pelo método analítico, considerando que o MEF é uma técnica de grande aceitação por parte da comunidade científica.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Concluída nesta introdução, o estado da arte e a revisão bibliográfica referente à análise proposta na dissertação, segue-se a apresentação da dissertação em mais cinco capítulos.

O capítulo 2 tem por objetivo principal estabelecer marcos teóricos a respeito dos efeitos de curtos-circuitos sobre a integridade dos transformadores. Nesse sentido, são apresentados os tipos e origem das faltas a que são comumente submetidos estes dispositivos. Dados estatísticos da desativação de equipamentos em decorrência dos efeitos de fenômenos transitórios e a sua correlação com as causas são apresentados.

No capítulo 3, apresentam-se as principais características das ligas amorfas, o processo de produção dos núcleos amorfos e as características construtivas destes transformadores.

O capítulo 4 visa à definição teórica e caracterização de componentes das forças eletromagnéticas que constam nos enrolamentos do transformador em condições de curto-circuito. Na seqüência, são apresentadas as fórmulas para o cálculo analítico das forças radiais e axiais as principais falhas devidas a estas forças.

No capítulo 5, é feita uma breve explanação a respeito do método de elementos finitos aplicado a eletromagnetismo em baixas frequências, o cálculo de forças eletromecânicas utilizando o MEF e são apresentadas as principais características do software *FEMM – finite element method magnetic*.

No capítulo 6, é feita a modelagem do transformador de núcleo amorfo, análise das perdas totais no núcleo através do modelo e comparação dos resultados dos cálculos analíticos com os das simulações.

Finalizando, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões do trabalho, com proposições para futuros trabalhos na área de pesquisa.

FALHAS EM TRANSFORMADORES

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Muito embora as falhas a que os transformadores estão expostos já sejam bastante conhecidas e os sistemas de proteção utilizados na rede sejam bastante eficientes, tanto para problemas advindos dos fenômenos naturais, quanto para aqueles provenientes de faltas nos sistemas elétricos, torna-se necessário implementar medidas para minimizar tanto o tempo em que o equipamento fica fora de funcionamento quanto a frequência com que as falhas ocorrem, devidas muitas vezes aos esforços mecânicos, uma vez que tais falhas resultam em perdas de receita além de impacto na qualidade do serviço.

Assim, este capítulo tem como objetivo descrever os aspectos gerais, financeiros e gerenciais que envolvem as falhas mecânicas dos transformadores e apresentar dados estatísticos sobre a ocorrência de eventos de faltas associados aos estresses mecânicos.

2.2 ANÁLISE DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

Um determinante na ocorrência de falhas diz respeito à deterioração, ao longo de sua vida útil, das características mecânicas e elétricas dos materiais utilizados na fabricação dos transformadores, assim, de um modo geral, as falhas podem ser classificadas como sendo de origens elétricas, mecânicas e térmicas [20].

Falhas em transformadores podem ocorrer como resultado de diferentes causas e condições. Geralmente, as falhas podem ser definidas como na tabela 2.1 [20], onde estão relacionadas as causas típicas de falhas em transformadores, utilizando como

forma de classificação a sua natureza, ou seja, se devida a causas internas ou externas ao equipamento.

Tabela 2.1: Causas Típicas de falhas em transformadores.

Interna	Externa
Deterioração do sistema isolante	Descargas atmosféricas
Perda da pressão dos enrolamentos	Operação de chaveamentos
Sobreaquecimento	Sobrecarga
Umidade	Faltas no sistema (curto-circuito)
Contaminação do óleo isolante	
Descargas parciais	
Defeitos de projeto e fabricação	
Ressonância dos enrolamentos	

Adicionalmente às falhas relacionadas na tabela anterior, também podem ocorrer falhas nas buchas, nos tap's e em outros acessórios dos transformadores.

A figura 2.1 ilustra a curva que expressa uma estimativa do número das falhas, em função do tempo de vida, para transformadores de potência. Esta é denominada curva de “modelo de falhas” de transformadores (ou curva da “banheira”) e evidencia que os períodos mais críticos, em termos de probabilidade de falha de um transformador, ocorrem no início de sua operação e depois de decorridos alguns anos de funcionamento do equipamento.

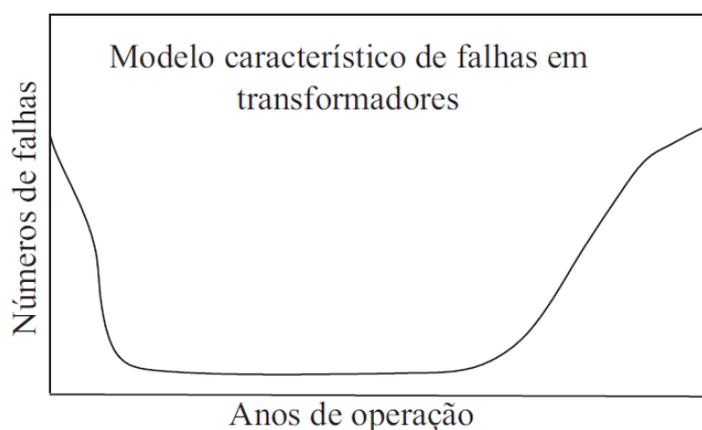


Figura 2.1: Curva de falhas em transformadores “banheira”

A referência [20] descreve a curva da “banheira” da seguinte forma: a primeira parte refere-se às desativações que sucedem nos primeiros anos de vida e que podem estar relacionadas com qualquer tipo de falha de natureza interna (como por exemplo, defeitos causados por falhas de projeto ou de construção) ou externa; a segunda parte da curva apresenta uma taxa de ocorrência baixa de falhas e, praticamente, constante, que também pode estar associada a qualquer tipo de falta; e a última parte corresponde

às falhas devidas ao envelhecimento dos dispositivos. Neste caso, os defeitos podem estar relacionados, principalmente, com a perda da resistência mecânica do sistema de isolamento dos enrolamentos, que tendem a degradar-se com o envelhecimento.

Os custos relacionados com os reparos e/ou substituições das unidades transformadoras avariadas, principalmente as de potência, são muito altos. Para ilustrar essa questão, foi realizado um levantamento entre os anos de 1997 e 2001 com o objetivo de obter informações sobre desativações de transformadores de potência, associando-as a causas e custos. Concessionários de diversos países participaram dessa pesquisa enviando as informações requeridas. Do total de casos obtidos junto às empresas colaboradoras, 94 continham informações conclusivas que propiciaram a criação de um banco de dados e os registros de desativações foram convertidos em gastos anuais. Os resultados desta pesquisa estão sintetizados na referência [21], na forma de gráficos e tabelas. Nas tabelas 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 são apresentados alguns dados apresentados na pesquisa.

Tabela 2.2: Número de Casos e perdas capitalizadas no ano

Ano	Nº Casos	Gastos Totais (U\$)	Danos à Propriedade (U\$)	Interrupção de Negócios (U\$)
1997	19	40.779.507	25.036.673	15.742.834
1998	25	24.932.235	24.897.114	35.121
1999	15	37.391.591	36.994.202	397.389
2000	20	150.181.779	56.858.084	93.323.695
2001	15	33.343.700	19.453.016	13.890.684
Total	94	286.628.811	163.239.089	123.389.722

Tabela 2.3: Perdas capitalizadas por aplicação

Ano	Transformador Elevador (U\$)		Transformador Industrial (U\$)		Transformador de Distribuição (U\$)		Desconhecida*		Total Anual	
1997	29.201.329	3	2.239.393	4	5.243.075	11	4.095.710	1	40.779.507	19
1998	15.800.148	8	3.995.229	6	5.136.858	11			24.932.235	25
1999	3.031.433	4	24.922.958	4	6.116.535	6	3.320.665	1	37.391.591	15
2000	123.417.788	10	24.724.182	4	2.039.810	6			150.181.779	20
2001	32.082.501	11			1.261.199	4			33.343.700	15
Total	203.533.199	36	55.881.762	18	19.797.476	38	7.416.375	2	286.628.811	94

*A aplicação do transformador não foi informada.

Tabela 2.4: Custos de falhas

Causas das Falhas	Número	Dólares pagos (U\$)
Falhas na isolação	24	149.967.277
Projeto / material	22	64.696.051
Desconhecido	15	29.776.245
Contaminação do óleo	4	11.836.367
Sobrecarga	5	8.568.768
Fogo / explosão	3	8.045.771
Sobretensão	4	4.959.691
Manutenção/Operação	5	3.518.783
Inundação	2	2.240.198
Perdas em conexões	3	2.186.725
Descargas atmosféricas	3	657.935
Umidade	1	175.000
Total	94	286.628.811

Falhas na isolação – Esta categoria exclui aquelas falhas onde há evidência de faíscas de sobretensões na linha. Há geralmente quatro fatores que são responsáveis pela deterioração do isolamento: pirólise (calor), oxidação, acidez e umidade. Mas a umidade é relatada separadamente. A idade média dos transformadores que falham devido ao isolamento foi 18 anos.

Projeto/Material – Esta categoria inclui condições como: folgas, má soldagem, isolamento do núcleo inadequado, forças de curto-circuito inferiores e objetos estranhos deixados no tanque.

Contaminação do óleo – Esta categoria pertence àqueles casos em que a contaminação do óleo pode ser estabelecida como a causa da falha. Isto inclui sedimentos e traços de carbono.

Sobrecarga – Esta categoria pertence àqueles casos em que geralmente a sobrecarga real pode ser estabelecida como causa de falha. Isto inclui somente aqueles transformadores que sustentam carga que excede sua capacidade padrão (de placa).

Fogo/Explosão – Esta categoria pertence aos casos em que o fogo ou explosão fora do transformador podem ser estabelecidos como causa de falha. Esta não inclui falhas internas que resultam em fogo ou explosão.

Sobretensão – Esta categoria inclui sobretensões de chaveamento, picos de tensão, falhas de linha/centelhamento e outras anormalidades de transmissão de distribuição. Esta parte significativa de falhas do transformador sugere que deve ser dada mais atenção às proteções de sobretensão, ou adequação da amarração das bobinas e forças de curto-circuito.

Manutenção/Operação – Manutenções e operações impróprias e inadequadas foi a causa principal de falhas quando se inclui sobrecarga, conexões folgadas e umidade. Esta categoria inclui ajustes de controles impróprios e inadequados, perdas de elemento refrigerante, acumulação de poeira e óleo, e corrosão. Manutenções inadequadas suportam a culpa pela não descoberta de problemas iniciais simples quando havia bastante tempo para corrigi-los.

Inundação – Devido a causas naturais ou provocadas pelo homem. Esta também inclui deslizamentos.

Perdas em conexões – Esta categoria inclui acabamentos e manutenções na fabricação das conexões elétricas. Um problema é a combinação imprópria de metais não similares embora isto tenha diminuído bastante de alguma forma nos últimos anos. Outro problema são apertos impróprios de conexões aparafusadas. Conexões folgadas podem ser incluídas na categoria manutenção, mas geralmente se costuma relatar separadamente.

Descargas atmosféricas – Sobretensões de descargas atmosféricas são consideradas bem poucas em número relativamente ao que apontam os estudos anteriores já publicados. A menos que haja confirmação de picos de descargas atmosféricas, uma falha do tipo destas sobretensões de descargas atmosféricas são categorizadas apenas como sobretensões.

Umidade – A categoria umidade inclui falhas causadas por vazamentos de tubos, vazamentos da carcaça, entrada de água no tanque através de vazamentos de buchas e presença de água no óleo de isolamento. Umidade poderia ser incluída no item manutenção/operação ou falha de isolamento, mas costuma-se relatar separadamente.

O envelhecimento do sistema de isolamento reduz ambas, a resistência padrão dielétrica e a resistência mecânica do transformador. Com a idade, o transformador está sujeito a faltas que resultam em altas forças radiais e de compressão (axiais). Como a carga aumenta, com o crescimento do sistema, aumentam os estresses de operação. Nas falhas de envelhecimento do transformador, normalmente o isolamento do condutor está enfraquecido ao ponto que não pode sustentar o estresse mecânico de uma falta. O isolamento entre voltas sofre uma falha dielétrica ou uma falta que causa

folga da pressão de amarração dos enrolamentos, o que reduz a capacidade do transformador de suportar forças de curto-circuito futuras.

Tabela 2.5: Falhas nos transformadores por Idade

Idade de Falha (Anos)	Número de Falhas	Custo de Falha (U\$)
0 – 5	9	11.246.360
6 – 10	6	22.465.881
11 – 15	9	3.179.291
16 – 20	9	10.518.283
21 – 25	10	16.441.930
Acima de 25	16	15.042.751
Idade Desconhecida	35	207.734.306

Na tabela 2.6 são apresentados dados obtidos em uma pesquisa [22] envolvendo transformadores de potência, tendo sido a mesma realizada com o objetivo de estabelecer estatísticas de falhas de transformadores de potência relacionando-as com os componentes eletromecânicos atingidos.

Tabela 2.6: Percentual de faltas para falhas em transformadores de potência.

Componente	CIGRE*	CEA*	Doble Engineering	ZTZ – Service clientes*	África do Sul
Buchas/acessórios	29	29	35	45	14
Tap – changer	15	39	16	9	24
Isolação principal	12	16	9	17	30
Enrolamento (envelhecimento)	31	16	16	12	17
Enrolamento (deformação)	31	16	12	10	17
Núcleo	2	10	7	7	15

*CIGRE: *International Council on Large Electric Systems*; CEA: *Canadian Electricity Association*; ZTZ – *Service: Scientific and Engineering Centre* (Ucrânia)

Transformadores de potência são os maiores, os mais pesados, e freqüentemente, os mais caros equipamentos em um sistema de potência. Obviamente, cuidados apropriados são necessários durante o transporte, instalação, operação e manutenção destes equipamentos. Devido aos aspectos mencionados e, principalmente, ao seu elevado custo, unidades para substituição nem sempre estão disponíveis. Assim sendo, e uma vez que o tempo de reparo pode ser relativamente longo, é importante avaliar a condição de cada unidade em operação no sistema elétrico. Uma pesquisa internacional realizada pelo CIGRE [23], sobre grandes transformadores de potência, mostra uma taxa de falha de 1-2% por ano. Este valor pode parecer pequeno, mas como já dito, uma única falta em um grande transformador normalmente resulta em vultosas despesas para a concessionária.

Um dos fatores a ser considerado é o sistema de isolamento, já mencionado na seção anterior, como sendo um dos mais frequentes causadores de falhas em transformadores. O sistema isolante utilizado consiste de materiais orgânicos e/ou inorgânicos, essencialmente óleo mineral e papel. A referência [24] atribui a possível ocorrência de falha na isolamento à redução/mudança no comportamento dielétrico e também à redução da existência mecânica do papel isolante dos enrolamentos.

Outra pesquisa, desta vez focando transformadores de distribuição e, em nível nacional, foi realizada pela COELBA (Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia) [25], objetivando levantar as taxas de falha dos transformadores de suas regionais. O levantamento foi realizado em 1309 transformadores substituídos devido à ocorrência de falhas. O resultado do levantamento está resumido na tabela 2.7.

Tabela 2.7: Diagnóstico de avarias de falhas em transformadores de distribuição.

Avaria / Diagnóstico	Número de Unidade	Percentual
Penetração de água	60	4,58
Baixo nível de isolamento	80	6,11
Curto-circuito externo	497	37,96
Curto-circuito interno	202	15,43
Descargas atmosféricas	30	2,29
Interrupção no painel	16	1,22
Sobrecarga	320	24,45
Total	1309	100

A tabela permite constatar que o maior número de ocorrência de falhas é devido às faltas consideradas externas ao dispositivo, neste caso, curtos-circuitos. Do total de falhas diagnosticadas nos transformadores de distribuição, 37,96% são decorrentes desse tipo de falta.

As pesquisas apresentadas não deixam dúvida quanto às causas de defeitos, tanto em transformadores de potência quanto de distribuição, ou seja, apontam que a maioria dos problemas é atribuída, direta ou indiretamente, às falhas na isolamento, provocadas pela diminuição da resistência dielétrica dos isolantes, devido às deformações ocasionadas pelas várias causas típicas de falhas.

As deformações ameaçam a integridade mecânica dos enrolamentos dos transformadores e são influenciadas por forças excessivas provocadas por curtos-circuitos, problemas ocasionados durante o transporte (por exemplo, acidentes), forças dinâmicas durante a operação normal (Ex.: vibrações), redução da pressão sobre os enrolamentos e estruturas de suporte, implicando uma redução da resistência mecânica

do equipamento, porém observa-se que a razão mais comum de deformações mecânicas sofridas pelos condutores utilizados nos enrolamentos, tanto de transformadores de distribuição como de potência, são os esforços mecânicos originados pelos curtos-circuitos [1].

2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados diversos dados estatísticos sobre as principais causas de falhas em transformadores de distribuição e de potência, oriundos de pesquisas realizadas em empresas do setor elétrico de diversos países, abordando principalmente dados quantitativos e dados financeiros. Foi feita também a explanação das principais causas de falhas que acometem transformadores.

CAPÍTULO 3

TRANSFORMADORES COM NÚCLEO DE LIGA AMORFA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta as principais características das ligas amorfas. Nele será apresentado o processo de produção dos núcleos amorfos para transformadores e serão abordadas as principais características construtivas destes transformadores.

Os transformadores de liga amorfa entraram no mercado na década de 80, assim sendo, será feita uma análise da evolução destes equipamentos, fazendo um comparativo entre os transformadores de núcleo aço-silício e núcleo de liga amorfa, abordando os benefícios econômicos e ambientais com o uso de transformadores eficientes com núcleo de liga amorfa.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS AMORFAS

Uma fórmula geral do tipo $M_aY_bZ_c$ foi definida para ligas amorfas termicamente estáveis, sendo M, um ou mais dos metais do conjunto formado por aço, níquel, cobalto e cromo; Y representa os elementos do grupo formado por fósforo, boro e carbono; Z representa alumínio, silício, antimônio, germânio e berílio; e a, b e c constituem fatores que estão na faixa de 60 a 90, 10 a 30 e 0.1 a 15 respectivamente sendo que $a+b+c = 100$. A combinação utilizada em transformadores é do tipo aço – boro – silício.

O desenvolvimento cronológico das ligas amorfas, como já foi visto na revisão bibliográfica através da referência [4], é resumidamente o seguinte: $Fe_{80}B_{20}$ (1976), $Fe_{82}B_{12}Si_6$ (1978), $Fe_{81.5}B_{13}Si_{3.5}C_2$ (1979), $Fe_{78}B_{13}Si_9$ (1980), sendo esta última a utilizada atualmente em todos os projetos de sistemas de energia elétrica.

Tendo em vista a caracterização das ligas metálicas amorfas, a seguir são apresentadas suas propriedades físicas mais relevantes:

- a) *Espessura das Lâminas*

Os metais amorfos admitem uma espessura nominal das lâminas do núcleo da ordem de magnitude de aproximadamente 10 vezes menor que os materiais comerciais, como o ferro-silício. Esta é uma das razões pelas quais eles apresentam baixos valores de perdas no núcleo. Entretanto, um maior número de laminações implica aumento dos custos de produção. Cortar estes materiais requer técnica avançada e perícia, visto tratar-se de um material com alto grau de dureza.

b) Dureza

Os metais amorfos são extremamente duros, da ordem de 4 vezes maior que os aços usados como materiais elétricos convencionais. Esta característica além de dificultar sua laminação também a torna variável, uma vez que não é possível garantir a mesma espessura durante todo o corte da lâmina. As ferramentas de corte não possuem grau de exatidão estável, desregulando-se durante o processo.

c) Fator de Empilhamento

A combinação das características de alta dureza, lâminas de espessura muito baixa e variável, com superfície rugosa, contribuem para um fator de empilhamento baixo, da ordem de 80%, comparado com 95% dos aços usados como materiais elétricos convencionais. Conseqüentemente, a área de seção reta do núcleo destes transformadores é cerca de 18% maior que dos transformadores com núcleo de ferro-silício.

d) Efeito de Recozimento

Aços elétricos convencionais, por serem magneticamente orientados, têm stress elástico bem menor que metais amorfos. Estes, por não serem *a priori* magneticamente orientados e terem elevado stress elástico introduzido durante o processo de fabricação, devem ser imperativamente recozidos.

O recozimento na presença de um campo magnético longitudinal melhora significativamente suas propriedades magnéticas, tais como indução de saturação, força coerciva, perdas ativas e potência de excitação, promovendo a relaxação estrutural do material.

O alto stress interno das ligas amorfas é resultado da solidificação rápida, não permitindo a formação de cristais no material e deixando-o instável. A relaxação estrutural obtida pelo tratamento térmico e magnético realizado durante o recozimento em temperaturas abaixo da cristalização leva o material a um estado semi-estável. Entretanto, reduz a ductibilidade do material, deixando-o mais rígido e quebradiço.

e) *Indução de Saturação*

Os materiais amorfos têm em geral uma composição de 80% de ferro e 20% de boro. Esta composição leva estes materiais a terem uma indução de saturação 20% menor quando comparado aos materiais de ferro puro para mesma temperatura. De fato, tanto o aumento da temperatura, quanto o aumento de Boro + Silício na liga amorfa diminuem sua indução de saturação crescentemente.

f) *Magnetostricção*

A alteração das dimensões físicas de um material magnético quando magnetizado causa ruído e/ou perdas no núcleo. Ligas amorfas baseadas em ferro exibem uma magnetostricção linear de saturação comparável à do ferro-silício de grão orientado, assim como os níveis de ruído de ambas as ligas são praticamente os mesmos.

g) *Massa e Volume*

Em decorrência do aumento na área de seção reta, conseqüência do maior fator de empilhamento, o volume dos transformadores com núcleo de material amorfo é maior que os de ferro-silício em mais de 15%, em função da menor indução de saturação dos materiais amorfos; novamente é necessário aumento da área de seção reta do núcleo para que se tenha o mesmo valor de fluxo magnético, o que implica maior quantidade de material necessário para sua construção. A conseqüência direta disso é o aumento da massa do núcleo do transformador (em média 15%).

h) *Perdas e Eficiência*

Os Metais amorfos apresentam características magnéticas conhecidamente favoráveis ao estabelecimento de indução magnética. O ciclo de histese (vide apêndice A) do material é estreito e alta permeabilidade magnética é encontrada. Estas propriedades garantem um projeto de um circuito magnético com baixa corrente de magnetização e alta eficiência em ampla faixa de potência.

3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO

Existem diversas técnicas de fabricação das ligas amorfas, dentre elas: moagem mecânica, pulverização e *melt-spinning*.

O processo de moagem mecânica é uma forma especial de reação no estado sólido – sendo uma moagem de alta energia em que uma liga é o resultado de sucessivas quebras onde ocorre a fundição a frio das partículas componentes. Isso leva

à síntese de fases cristalinas metaestáveis, soluções sólidas supersaturadas, fases amorfas e produção de estruturas nanocristalinas [26]. Esta técnica tem sido comprovada como uma rota viável de processamento no estado sólido para fabricação de vidros metálicos. Muitos dos materiais amorfos e nanoestruturados são fabricados por este método [27].

Outra possibilidade de obtenção de um sólido amorfo é a pulverização, que é um processo que consiste em “soprar” o metal ainda no estado líquido, formando, assim, pós amorfos.

Existem outras maneiras de se evitar a cristalização e obter sólidos amorfos. Uma delas é partir da fase vapor ao invés do líquido [28]. O vapor, por sua vez, pode ser obtido pelo aquecimento de um sólido cristalino, ou de um líquido ou até bombardeando a superfície de um sólido com íons acelerados, num processo chamado de *cathode sputtering*. O vapor é então resfriado ultra-rapidamente pelo contato com uma superfície fria. A temperatura baixa reduz a mobilidade atômica e dificulta a cristalização. Desta maneira é possível obter filmes finos amorfos, com espessura menor que 1 μm .

Além do método mencionado acima, existe a possibilidade de se obter um sólido amorfo pela precipitação resultante da reação entre dois líquidos. Um exemplo típico deste método é a redução de um sal de níquel por hipofosfito de sódio. Como resultado, obtém-se sobre um substrato (ou objeto imerso na solução) uma camada fina de um filme depositado duro e brilhante. Este filme é uma liga amorfa de níquel e fósforo. Este processo é utilizado industrialmente e apresenta vantagens com relação à niquelação eletroquímica [28].

Uma maneira de se obter um sólido amorfo é evitar a sua cristalização durante a solidificação. A solidificação ultra-rápida a partir do líquido é talvez a maneira mais utilizada para obter sólidos amorfos. Um material metálico é depositado dentro de um tubo de quartzo ou de alumina. O tubo tem uma fenda na extremidade inferior. O metal líquido é pressionado através do furo por um gás inerte (normalmente argônio). Um filete de metal incide em uma roda polida de cobre, de alta condutividade térmica, refrigerada e que gira em alta velocidade. O filete do metal líquido solidifica-se ultra-rapidamente formando uma fita com algumas dezenas de micrometros de espessura. A roda de cobre pode estar contida em uma câmara contendo gás inerte (normalmente argônio ou nitrogênio). Este aparelho é muito conhecido pela sua designação em inglês “*melt-spinning*” e com ele pode-se obter uma taxa de resfriamento na faixa de

10^7 a 10^9 K/s, alta o suficiente para evitar a cristalização do material, obtendo-se, assim, uma fita amorfa longa e delgada. Esta técnica tem sido utilizada com sucesso na fabricação de ligas metálicas amorfas.

Assim, em meados de 1970, devido às técnicas que até então eram utilizadas só se produzia fitas de poucos milímetros de largura. Esta limitação começou a ser superada com a produção contínua de ligas amorfas em maior escala, pelo processo *meltspinning*, quando Narasimhan [29] desenvolveu e patenteou o processo de fundição em fluxo planar (*PFC - Planar Flow Casting*), tornando possível a produção de fitas mais largas e sua aplicação em núcleos de transformadores.

Esses processos podem atingir de 30 a 100 km/h, para em seguida ocorrer o enrolamento de forma contínua.

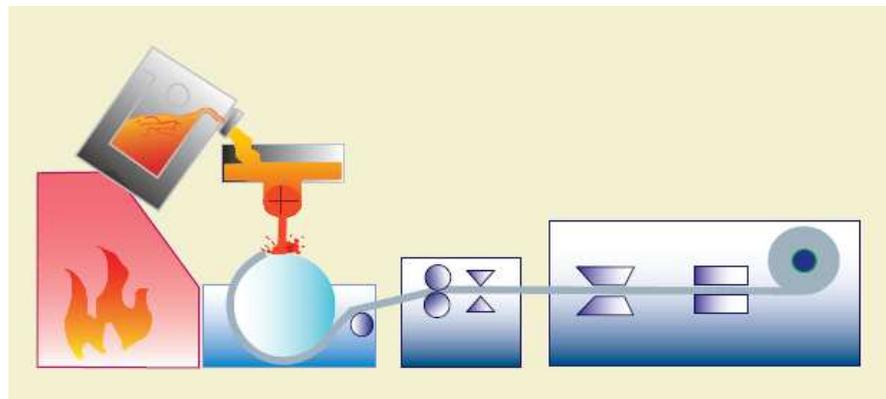


Figura 3.1: Processo de solidificação rápida para obtenção de ligas amorfas

[AlliedSignal Product Guide]

3.4 TRATAMENTO MAGNETOTÉRMICO

Durante o processo de confecção do núcleo de transformadores, são introduzidas tensões mecânicas internas, que tendem a mudar as propriedades magnéticas da liga amorfa em relação ao seu estado original (estado bruto de têmpera). Essas alterações são indesejáveis por comprometer alguns parâmetros importantes que afetam a eficiência do transformador ao longo de seu ciclo de operação, como indução de saturação (B_s), força coerciva (H_c), perdas ativas (W/kg) e potência de excitação (VA/kg). Essas tensões precisam então ser aliviadas para que as características magnéticas favoráveis do material do núcleo sejam recuperadas, e algumas até melhoradas, como o aumento da indução de saturação e a redução da coercividade. Em termos práticos, isso tem sido obtido por meio de tratamento

térmico, sob a ação de campo magnético, aqui referido como tratamento magnetotérmico [30].

O objetivo do tratamento térmico é prover a relaxação estrutural do material amorfo, diminuindo o número de vazios, visto que as ligas amorfas, obtidas por solidificação rápida, encontram-se em desequilíbrio, devendo atingir o equilíbrio metaestável sempre que o sistema dispuser de mobilidade atômica suficiente, o que é favorecido por meio da temperatura.

Já a imposição de um campo magnético longitudinal durante o ciclo térmico visa introduzir uma anisotropia magnética favorável (permeabilidade magnética elevada) na direção do fluxo magnético líquido produzido pelas bobinas do primário e do secundário do transformador.

Para que o tratamento magnetotérmico seja realizado com êxito é imperativo que durante o processo a temperatura do núcleo seja mantida abaixo da temperatura de cristalização e da temperatura de Curie. Acima desse valor a liga amorfa deixa de ser um material ferromagnético, de alta permeabilidade, para se tornar um material paramagnético, de baixa permeabilidade. Adicionalmente, deve ser ressaltado que após o processo magnetotérmico o material do núcleo perde a ductibilidade inicial, tornando-se mais rígido e quebradiço, o que requer cuidados adicionais em sua manipulação [31].

Na figura 3.2, é apresentado o esquema da montagem experimental destinada à realização do tratamento magnetotérmico da liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, utilizada na confecção do núcleo de um transformador monofásico de baixa potência [32]. Para evitar qualquer problema com o material amorfo do núcleo ou com os materiais elétricos e isolantes do circuito magnetizante, o tratamento magnetotérmico foi realizado sob atmosfera de gás argônio (Ar) com elevadíssimo grau de pureza.

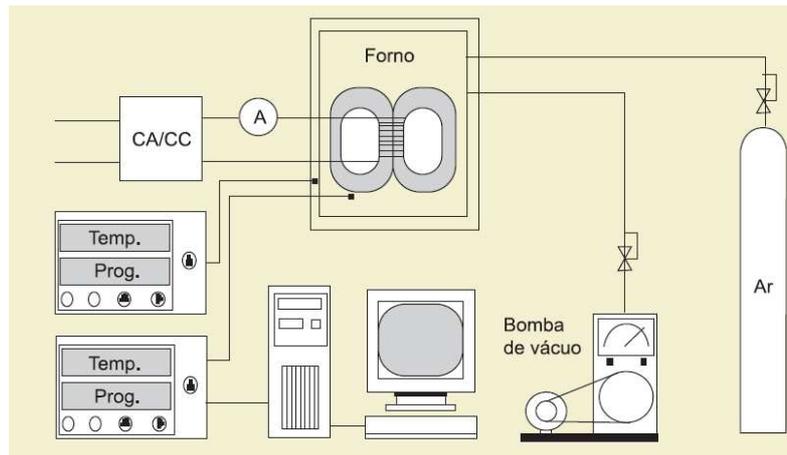


Figura 3.2: Sistema empregado no tratamento magnetotérmico do núcleo de liga amorfa

Na referência [33] é mostrado o ciclo térmico correspondente ao tratamento magnetotérmico do núcleo de um protótipo de 1 kVA, 220/110 V, 60 Hz (figura 3.3).

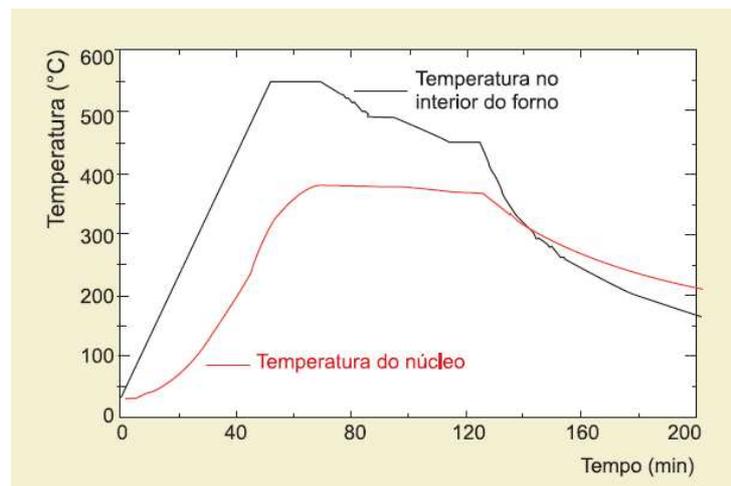


Figura 3.3: Ciclo térmico para tratamento do núcleo de liga amorfa de um protótipo de 1,0 kVA, 220/110 V, 60 Hz

As curvas superior e inferior representam a temperatura do interior do forno e a temperatura na superfície do núcleo de liga amorfa, respectivamente, ambas medidas por meio de termopares adequadamente posicionados no interior do forno, como mostrado na figura 3.4.



Figura 3.4: Núcleo de liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$ no interior do forno projetado para o tratamento magnetotérmico.

Deve-se ressaltar que, diferentemente do experimento apresentado na referência [33], realizado em laboratório com cunho científico, no tratamento magnetotérmico feito em núcleos de liga amorfa, os produzidos em ambiente industrial para fins comerciais, não há necessidade do emprego de atmosfera controlada. Na Figura 3.5 é apresentado um forno contínuo para tratamento magnetotérmico do núcleo de liga amorfa industrial.



Figura 3.5: Forno contínuo para tratamento magnetotérmico [Vijai Elétrica do Brasil Ltda]

3.5 MONTAGEM E DESMONTAGEM DO CONJUNTO NÚCLEO - BOBINAS

A confecção do núcleo de liga amorfa, partindo da fita enrolada produzida na fábrica, é uma tarefa difícil e requer equipamentos e pessoal especializados.

Na prática, o primeiro desafio é obter um núcleo compacto a partir de uma fita longa e contínua, bastante maleável, que exige uma ferramenta de corte bem adequada. Nas figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11, obtidas na referência [34], são apresentadas para ilustrar a confecção do núcleo-bobina e os esquemas de montagem trifásicos, começando a partir de um rolo de fita de material magnético amorfo.



Figura 3.6: Rolo de fita de material amorfo

Em seguida, o rolo passa para a forma semi-retangular (figura 3.6)

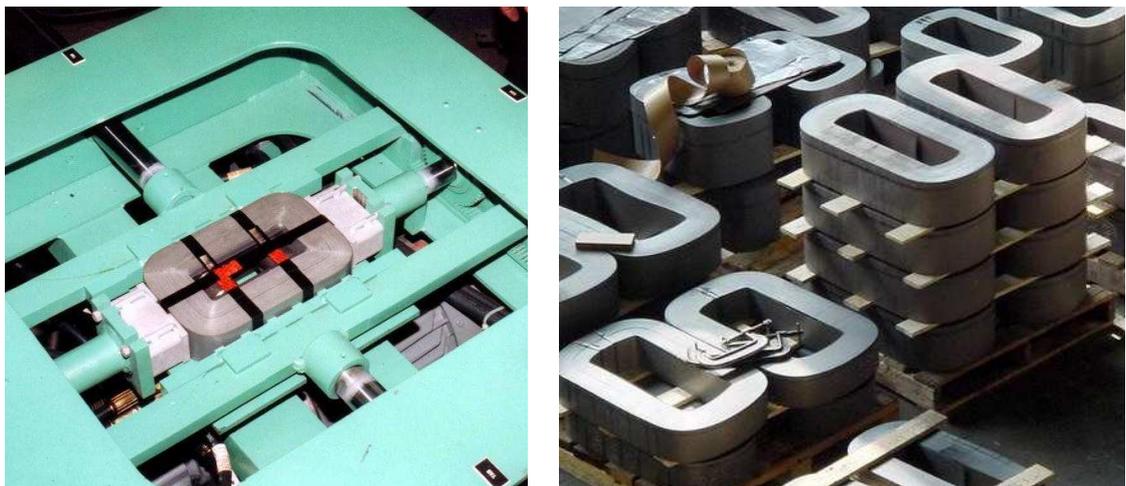


Figura 3.7: Núcleo prensado para obtenção da forma semi-retangular

Na figura 3.8 é apresentada a montagem das bobinas.



Figura 3.8: Montagem das bobinas (a) cabeado (b) laminado

Posteriormente o núcleo é cortado e é feita a inserção das bobinas conforme a seqüência ilustrada na figura 3.9.

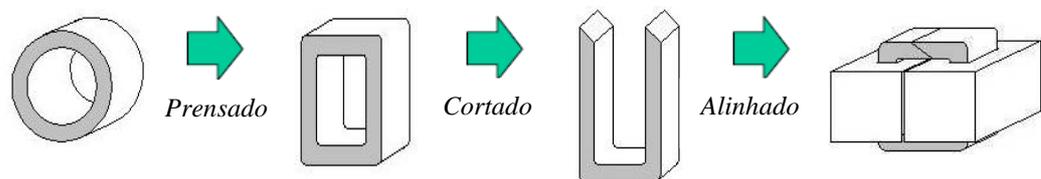


Figura 3.9: Esquema de montagem da bobina no núcleo

Podendo assumir as três configurações apresentadas na figura 3.10 para modelos trifásicos.

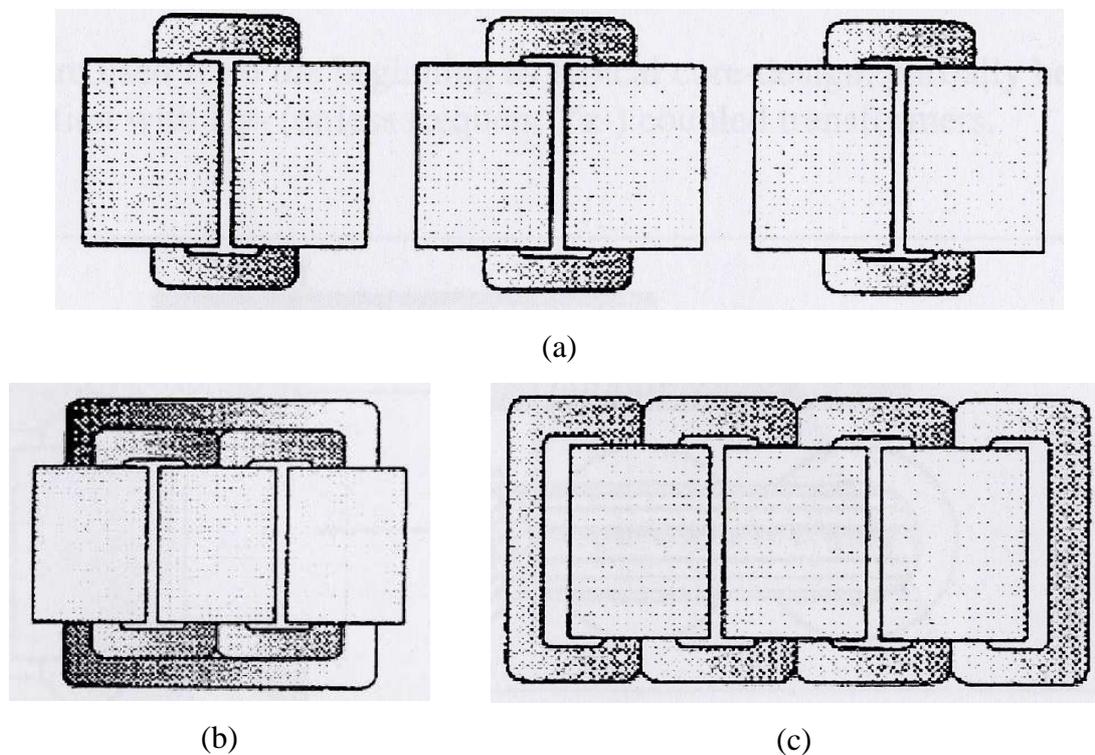


Figura 3.10: Esquemas de montagem de transformadores amorfos trifásicos (a) Tripex, (b) Núcleo envolvido, (c) Núcleo envolvente.

O segundo desafio é manter a integridade do núcleo durante o processo de desmontagem do conjunto núcleo-bobinas, como, por exemplo, no caso de uma manutenção.

Essas dificuldades já foram superadas nas linhas de montagem das indústrias que dominam a tecnologia de fabricação de transformadores com núcleo de liga amorfa. Entretanto, quando a manutenção é realizada fora do ambiente da fábrica, alguns obstáculos persistem. Nesse caso, os responsáveis pela manutenção ou recuperação de transformadores avariados devem conhecer bem as características peculiares das ligas amorfas, em particular seus aspectos mecânicos e magnéticos após o tratamento magnetotérmico. Exemplos:

- 1) O material do núcleo, por ser muito fino, só deve ser manipulado com as mãos protegidas por luvas de algodão, a fim de evitar cortes e oxidação decorrente do suor depositado sobre a superfície do material magnético;
- 2) O tratamento magnetotérmico diminui a ductilidade do material amorfo, deixando-o mais rígido e quebradiço;
- 3) Os eventuais resíduos desprendidos nas junções do núcleo nos processos de abertura dos núcleos para retirada das bobinas, particularmente nas superposições das lâminas, podem se misturar com o óleo e serem depositados no fundo do tanque [4].

3.6 COMPARAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES DE NÚCLEO AMORFO E NÚCLEO DE AÇO-SILÍCIO

Os átomos da liga amorfa não ficam dispostos em estrutura de grãos, mas ficam dispostos aleatoriamente. Após o tratamento magnetotérmico sob um campo magnético, esta liga apresenta baixas perdas e ganhos excelentes nas suas propriedades magnéticas e químicas, em comparação com o material convencional. Na figura 3.11 é apresentado um comparativo entre estruturas.

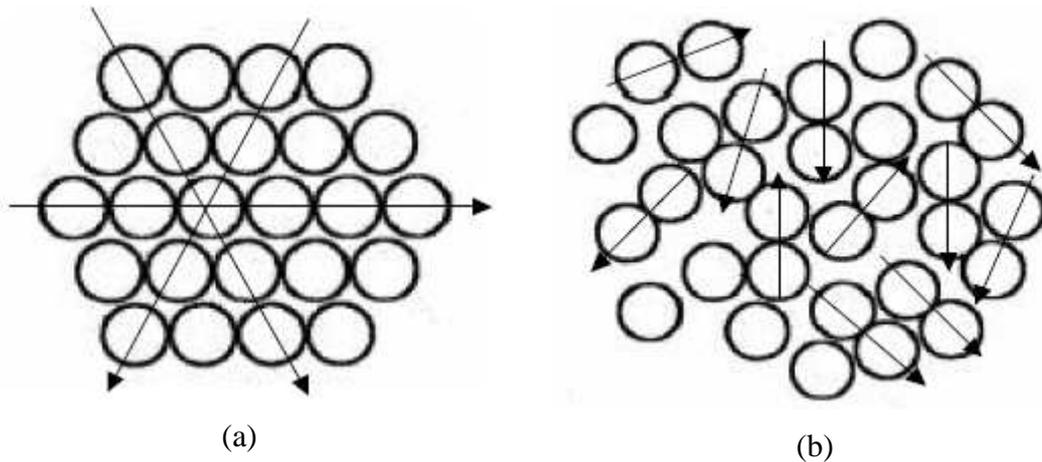


Figura 3.11: Estrutura cristalina (a) e amorfa (b)

Os transformadores com núcleo de material amorfo apresentam sensíveis vantagens em relação aos de aço-silício, principalmente no que tange às perdas a vazio. Além disso, observam-se também significativas reduções na corrente de excitação e no ruído audível.

Diversos trabalhos foram realizados para comparação entre os dois tipos de transformadores. Na figura 3.12 é apresentado um gráfico comparativo da eficiência energética entre o transformador de núcleo amorfo e transformador de núcleo de FeSi(GO), ambos com potência de 2000kVA, obtido na referência [34].

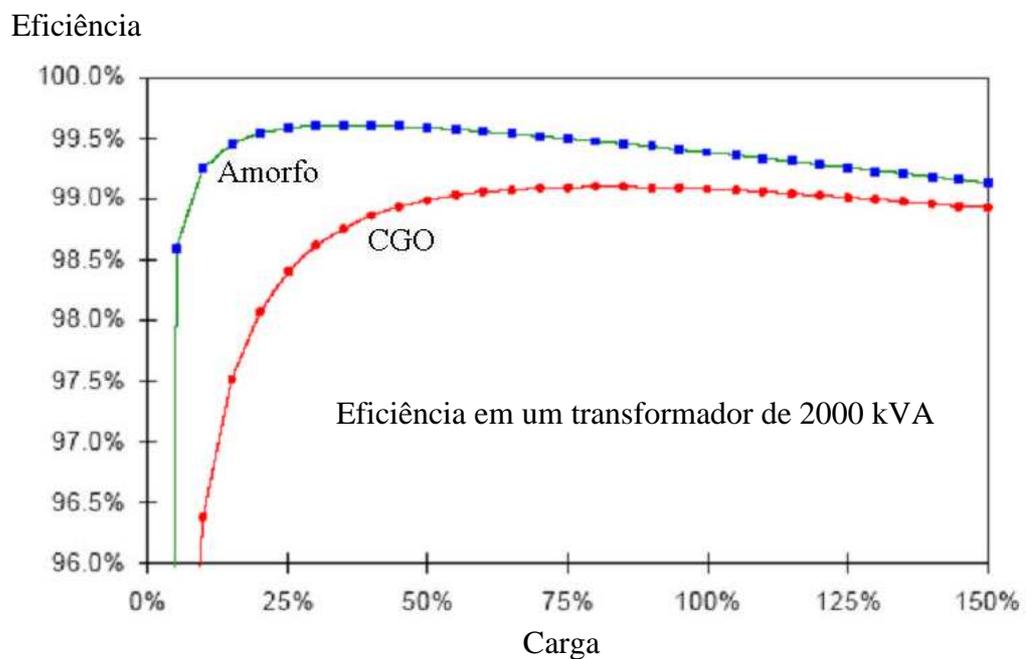


Figura 3.12: Gráfico comparativo de eficiência energética entre transformadores de 2000 kVA em núcleo amorfo e FeSi(GO).

A referência [35] apresenta dados comparativos entre o transformador de núcleo FeSi(GO) e o transformador de núcleo amorfo demonstrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Comparação entre transformadores de núcleo amorfo e núcleo de aço-silício

Tipo	Amorfo						Aço-Silício				
	kVA	Perdas a vazio (W)	Perdas c/ carga (W)	%I exc	%Z	Massa (lb)	Perdas a vazio (W)	Perdas c/ carga (W)	%I exc.	%Z	Massa (lb)
1Φ	10	12	102	0.31	1.6	318	29	111	0.60	1.8	300
	15	16	141	0.27	1.6	422	41	143	0.70	1.9	321
	25	18	330	0.15	1.9	441	57	314	0.36	2.25	406
	50	29	455	0.13	2.7	719	87	462	0.23	3.2	709
	75	37	715	0.09	3.3	944	122	715	0.38	3.0	821
	100	49	944	0.09	3.0	1131	162	933	0.21	2.6	961
3Φ	75	51	925	0.14	4.0	2030	142	956	0.31	4.1	2000
	150	90	1397	0.10	3.9	2870	216	1429	0.24	3.5	2900
	300	165	1847	0.10	3.9	4360	412	2428	0.14	5.1	3600
	500	230	3282	0.09	4.8	6090	610	3589	0.18	4.6	4900
	750	327	4468	0.07	5.75	6600	713	5206	0.15	5.75	6800

No que diz respeito ao desempenho comparativo de transformadores monofásicos e trifásicos com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de aço ao silício de grãos orientados (GO) na presença de cargas causadoras de harmônicos, trabalhos foram realizados tomando como base unidades de diferentes potências nominais: 500 kVA, 250 kVA e 100 kVA [36] - [37].

No trabalho de Hasegawa e Pruess [36] é relatado o estudo de caso de dois transformadores trifásicos de 500 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de ferro-silício GO. Eles foram monitorados numa planta industrial, durante um final de semana, tendo fornos a arco como principais cargas elétricas. Tomando como referência a alimentação senoidal a 60 Hz e dados de catálogos, as perdas em vazio e as perdas em carga para o transformador com núcleo de liga amorfa que seriam, respectivamente, 160 W e 4 484 W, foram cerca de 200% superiores aos valores esperados. Já o aumento das perdas no transformador com núcleo de ferro-silício foram 400% superiores. A explicação para esse aumento das perdas fundamenta-se no largo espectro de componentes harmônicas introduzidas na excitação dos transformadores pelos fornos a arco.

Prosseguindo os estudos sob condições harmônicas, foram avaliados os desempenhos de dois transformadores de 250 kVA: um, com núcleo de liga amorfa, e outro com núcleo de ferro-silício GO laminado a frio. Os resultados, apresentados de

forma resumida na Tabela 4.2, foram divulgados pela Associação de Pesquisa Elétrica e Desenvolvimento da Índia (ERDA), tomando como referência uma planta industrial dotada de vários dispositivos comandados por eletrônica de potência, como acionadores e controladores de velocidade de máquinas elétricas.

Tabela 3.2: Comparativo de perdas entre dois transformadores de 250 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de FeSi GO [36].

Perdas (W)	<i>Sem distorção harmônica</i>		<i>Com 26% de distorção harmônica total de corrente</i>	
	Núcleo de liga amorfa	Núcleo de FeSi (GO)	Núcleo de liga amorfa	Núcleo de FeSi (GO)
Histerese	99	155	99	155
Correntes parasitas	33	311	74	698
Perdas totais no núcleo	132	466	173	853
Bobina (carga média)	966	1084	1553	1671
Carregamento	55%	58%	55%	58%
Perdas Totais	1098	1550	1726	2524

Examinando-se os valores apresentados na Tabela 3.2, verifica-se que tanto sob condições senoidais, quanto sob condições harmônicas, o transformador com núcleo de liga amorfa apresenta menores perdas. Verifica-se, também, que a introdução de componentes harmônicas resulta no aumento das perdas totais e, por conseguinte, no aumento da temperatura, o que reduz a vida útil do transformador.

Segue, na Tabela 3.3, um exemplo de estudo sobre o efeito das distorções harmônicas em transformadores instalados num sistema de distribuição de energia elétrica localizado na Índia. Nesta Tabela as perdas entre transformadores com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de Fe-Si são apresentadas, incluindo o efeito das distorções harmônicas totais. As perdas total e linear foram medidas com e sem distorção harmônica, respectivamente.

Tabela 3.3: Comparativo de perdas entre transformadores com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de FeSi GO [37].

Material do núcleo	<i>Transformadores trifásico de 100 kVA (Zona Rural)</i>		<i>Transformadores trifásico de 250 kVA (Planta Industrial)</i>	
	Liga Amorfa	FeSi (GO)	Liga Amorfa	FeSi (GO)
Perda total (W)	700	1300	1726	2525
Perda Linear (W)	679	710	1098	1550
Perda adicional (W)	21	590	628	975
DHT de corrente (%)	3.5	2.3	26	26
DHT de tensão (%)	2.6	1.4	15	15

Conforme se pode perceber, a partir da Tabela 3.3, a distorção harmônica total depende do tipo de carga elétrica. Na zona rural, a taxa de distorção harmônica é menor que na planta industrial, porque na zona rural há um número menor de cargas causadoras de distorção nas formas de ondas de tensão e corrente. Nos dois casos, as perdas adicionais são ocasionadas pelo aumento das distorções harmônicas presentes nas linhas dos sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo que nos transformadores com núcleo de liga amorfa essas perdas são menores que nos transformadores com núcleo de Fe-Si.

Verifica-se, portanto, que a presença dos harmônicos afeta o desempenho dos transformadores, aumentando suas perdas, elevando sua temperatura de operação e, em consequência, reduzindo sua vida útil.

Ainda fazendo a comparação entre os transformadores de núcleo amorfo e núcleo de FeSi (GO) é apresentada a tabela 3.4, onde é feita a comparação das características físicas entre os dois transformadores.

3.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, primeiramente, foram apresentadas as principais características das ligas amorfas metálicas, revendo-se sucintamente o seu desenvolvimento histórico até à liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$ que hoje é a liga mais utilizada na construção dos núcleos dos transformadores.

Em um segundo momento foi feita a apresentação dos principais processos de produção das ligas amorfas, dando-se ênfase ao processo conhecido como *melt-spinning*, que é o processo utilizado para fabricação da fita que compõe os núcleos dos transformadores amorfos. Após isso, foi explicado o tratamento magnetotérmico a que os núcleos são submetidos, enfatizando que este tratamento visa prover a relaxação

estrutural do material amorfo, diminuindo o número de vazios, visto que esta liga é obtida através de solidificação rápida, introduzindo-se, assim, uma isotropia magnética bastante favorável para magnetização e desmagnetização do núcleo através do fluxo magnético produzido pelas bobinas do primário e do secundário do transformador.

Na seqüência, são mostrados os passos para montagem destes transformadores e os cuidados que deve se ter para com o seu manuseio, principalmente em caso de manutenção dos mesmos.

Por fim, foi feita a comparação entre os transformadores de núcleo amorfo e de FeSi(GO), mostrando-se que os transformadores amorfos apresentam uma redução das perdas no circuito magnético do núcleo: histerese, correntes parasitas e perdas anômalas em relação aos transformadores de FeSi(GO) e em termos comparativos, sob condições senoidais, essa redução pode atingir a faixa de 65 a 90%. Sob condições harmônicas foi verificado que as perdas totais, também, são menores nos transformadores com núcleo de liga amorfa, conforme os exemplos apresentados neste trabalho.

Portanto, do ponto de vista da eficiência energética e da qualidade de energia, os transformadores amorfos apresentam significativas vantagens sobre os transformadores convencionais de FeSi(GO).

FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS E ESFORÇOS ELETROMECHANICOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo apresenta-se uma formulação analítica para a fundamentação teórica das correntes de curto-circuito e das forças e esforços eletromecânicos a que os transformadores poderão ser submetidos através da apresentação de uma metodologia analítica para cálculo das componentes de forças axiais e radiais e dos esforços originados pelas forças e da descrição dos diferentes tipos de esforços eletromecânicos passíveis de ocorrência em transformadores. Tem-se também a identificação dos principais tipos de falhas provocadas por esses estresses nos enrolamentos concêntricos de transformadores.

4.2. CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

As correntes de curto circuito, além de serem uma das mais frequentes causas de falhas em transformadores, encontram-se também entre as faltas que apresentam maior severidade, em termos de impacto sobre as estruturas de sustentação de transformadores [1]. Em condições normais de operação, o campo magnético de um transformador concentra-se preferencialmente no material ferromagnético do núcleo, assim sendo, o fluxo de dispersão é relativamente pequeno.

Sob a ação de um curto-circuito a densidade de fluxo de dispersão aumenta significativamente e, por conseguinte, as forças que atuam nos enrolamentos também crescem.

Considerando que o fluxo de dispersão pode ser expresso em função da corrente nas bobinas e que a força resultante é dada em [38], pode-se concluir que os enrolamentos ficam sujeitos a forças proporcionais ao quadrado da corrente, independentemente do tipo de arranjo dos enrolamentos.

Uma vez que os maiores estresses experimentados pelos enrolamentos são provocados por faltas originadas de curto trifásico, é comum projetar-se transformadores para resistir ao maior pico da corrente de curto-circuito trifásica em seus terminais, considerando para efeito de cálculo que o dispositivo esteja conectado a um sistema supridor com um barramento infinito [39]e [40]. Nesse contexto, a expressão utilizada para determinar a pior condição de curto-circuito (I_{cc}) para um transformador é apresentada a seguir:

$$I_{cc} = \frac{k\sqrt{2} \times S_n \times 10^6}{\sqrt{3} \times V \times Z} \quad (4.1)$$

$k\sqrt{2}$ é o fator de assimetria

S_n é a potencia nominal do transformador [MVA]

V é a tensão nominal [V]

Z é a impedância por unidades do transformador

O fator de assimetria é calculado a partir dos parâmetros do circuito e do transformador. Quanto ao tempo de duração das faltas, considera-se que este não seja um fator agravante dos estresses mecânicos [40], uma vez que as máximas forças são verificadas durante a ocorrência do primeiro pico da corrente.

A norma IEC - 60079 [41], em sua parte 5, estabelece que a máxima duração para um curto-circuito é de 2 segundos para transformadores com impedâncias inferiores a 5%, e de 3 segundos para impedâncias iguais ou superiores a 5%.

4.3. FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS DENTRO DO TRANSFORMADOR

As forças eletromagnéticas [41]-[42] nos enrolamentos de um transformador são geradas pela interação entre a densidade de corrente e a densidade do campo magnético. Estas forças podem ser calculadas de acordo com a equação (4.2):

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (4.2)$$

\vec{f} : densidade volumétrica de força magnética (N/m³);

\vec{J} : densidade superficial de corrente (A/m²);

\vec{B} : densidade de campo magnético de dispersão (T).

Na Figura 4.1, obtida através de simulações no software *FEMM* – finite element method magnetic, pode-se observar que a densidade do campo magnético é axial durante todo o comprimento do enrolamento, exceto nas extremidades onde existe tanto a componente axial quanto a componente radial e as forças resultantes.

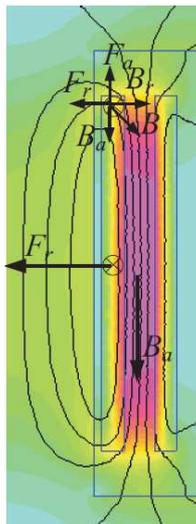


Figura 4.1: Densidades campo magnético (axial e radial) e forças resultantes

As forças entre espiras de um mesmo enrolamento (primário ou secundário) de um transformador são de atração. Por outro lado, se as correntes que circulam em ambos os enrolamentos têm sentidos opostos, as forças entre as espiras de enrolamentos distintos são de repulsão. Estes efeitos estarão sempre presentes quando um transformador está em operação, independentemente do regime de funcionamento [43].

4.3.1. FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS

As componentes radiais das forças em um transformador com enrolamentos concêntricos podem ser calculadas com precisão através de um método analítico clássico descrito em [40]. Na figura 4.2 é apresentado a direção das forças nos enrolamento externo e interno são do sinal oposto e no meio refrigerante entre os enrolamentos há um campo magnético, é devido a este meio que os condutores tendem a se repelir por forças tangenciais que são apontadas para a parte externa no condutor externo e para dentro no condutor interno. O enrolamento externo fica sujeito a uma força radial que age para fora e tende a esticar o condutor, produzindo um estresse de

tração nas espiras (*hoop stress*). Por outro lado, o enrolamento interno experimenta forças radiais similares, porém dirigidas na direção do núcleo e cuja ação é de comprimir ou esmagar as espiras. Este efeito é denominado estresse de compressão (*compressive stress*).

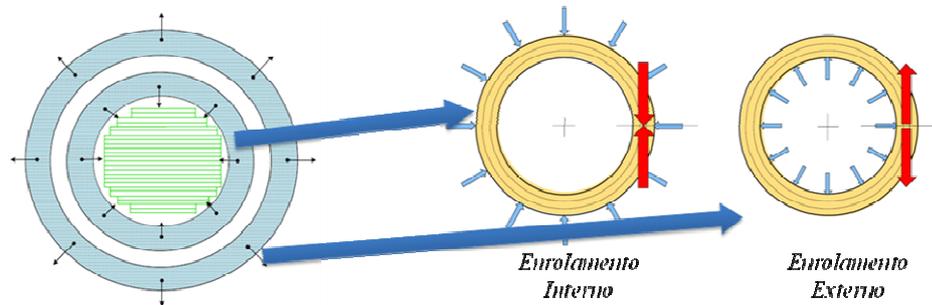


Figura 4.2: Direção das forças nos enrolamentos.

Na Figura 4.3 são apresentadas as forças radiais resultantes nos enrolamentos internos e exteriores em consequência da interação do campo axial durante toda a linha central da corrente que circula em torno dos enrolamentos, saindo no enrolamento interno e entrando no externo. O comportamento da densidade de fluxo axial é representado pelo diagrama em forma de trapézio no detalhe constante do lado direito do desenho. Observa-se que esta grandeza apresenta um valor máximo e constante na região entre os enrolamentos e decresce à medida que se aproxima da superfície externa do enrolamento externo e da superfície interna do enrolamento interno.

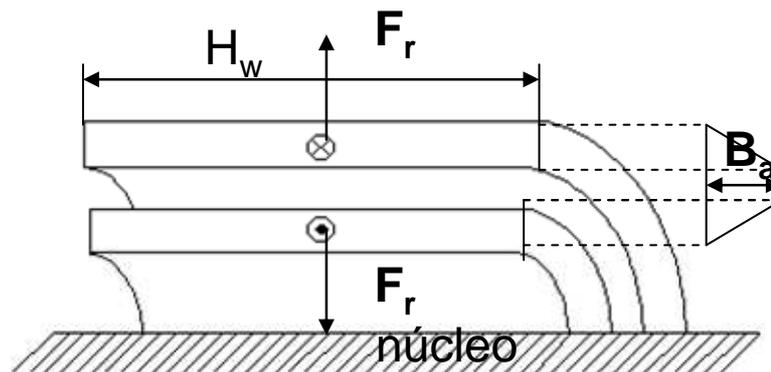


Figura 4.3: Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças radiais nos enrolamentos e a distribuição da densidade de fluxo axial.

Desconsiderando o fluxo de dispersão nas extremidades, os ampère-espiras (NI) de cada enrolamento são responsáveis por produzir o campo axial B_a , que é máximo na zona do ar entre enrolamentos. A densidade de fluxo magnético de

dispersão no ponto médio entre os enrolamentos pode ser determinada pela equação [1] (4.3)

$$B_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 4\pi \cdot NI_r}{10^7 \cdot H_w} \quad [\text{T}] \quad (4.3)$$

B_a : densidade de fluxo de dispersão axial (T);

N: número de espiras do enrolamento;

I_r : corrente nominal do enrolamento (A);

H_w : altura do enrolamento (m);

$4\pi 10^{-7}$: Permeabilidade do vácuo.

A força magnetomotriz total, NI_r , de cada enrolamento encontra-se imersa em uma densidade de fluxo médio igual a $1/2B_a$. Assim, as forças radiais atuando sobre um enrolamento de diâmetro D_m e altura H_w podem ser determinadas com auxílio da equação [1] (4.4):

$$F_r = \frac{2\pi^2 (NI_r)^2 D_m}{H_w} 10^{-7} \quad [\text{N}] \quad (4.4)$$

F_r : força radial total no enrolamento (N);

D_m : diâmetro médio do enrolamento (m).

O estresse de tração médio no enrolamento externo é calculado considerando-se uma camada cilíndrica, conforme mostra a figura 4.4, à qual o enrolamento externo pode ser comparado. Muito embora a força não seja aplicada no interior do enrolamento, mas sim distribuída linearmente através de sua dimensão, a força equivalente pode ser obtida fazendo o produto da pressão exercida vezes a área da superfície interna total.

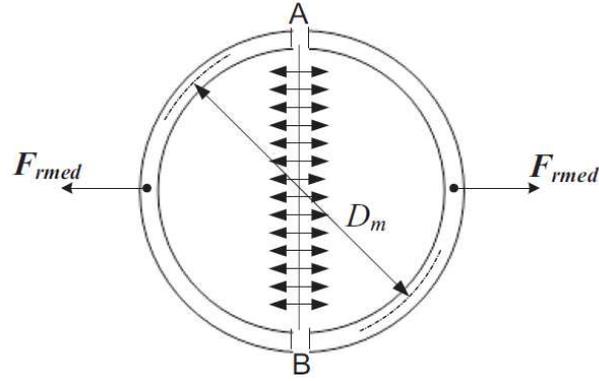


Figura 4.4: Método para cálculo de estresse de tração médio.

A força radial média F_{rmed} , mostrada na figura 4.4, que age nas duas metades do enrolamento é equivalente à pressão sobre o diâmetro, enquanto que a força total radial (F_r dada pela equação 4.4) é equivalente à pressão sobre a circunferência de comprimento πD_m . Assim, tem-se que $F_{rmed} = F_r/\pi$ e é dada por:

$$F_{rmed} = \frac{2\pi(NI_{max})^2 D_m}{H_w} 10^{-7} \text{ [N]} \quad (4.5)$$

Esta força age em ambas extremidades do diâmetro AB da figura 4.4, isto é, na seção reta do condutor, igual a duas vezes aquela de todo o enrolamento.

Assim, se o enrolamento tem n espiras de seção transversal S , o estresse de tração médio no enrolamento externo pode ser calculado pela equação (4.6):

$$\sigma_{medio} = \frac{(NI_{max})^2 \pi D_m}{H_w \cdot N \cdot S} 10^{-7} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.6)$$

Ou,

$$\sigma_{medio} = \frac{I_{max}^2}{H_w} \cdot \frac{N\pi D_m}{S} 10^{-7} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.7)$$

Pode-se notar que $N\pi D_m$ é o comprimento total do condutor no enrolamento. Assim, multiplicando-se o numerador e o denominador da equação (4.7) pela resistividade do condutor na temperatura de 75 °C, chega-se à equação (4.8):

$$\sigma_{medio} = \frac{I_{max}^2}{\rho H_w} \cdot \frac{R_{cc}}{10^{-7}} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.8)$$

R_{cc} : resistência em corrente contínua do condutor (Ω);

ρ : resistividade do condutor na temperatura de 75° C ($\Omega.m$).

O estresse de tração no primeiro pico da corrente de curto-circuito, assumindo um fator de assimetria igual a 1,8, é obtido substituindo $I_{max} = 1,8\sqrt{2} I_r/Z_{pu}$ na equação (4.8), onde I_r e $Z(pu)$ são, respectivamente, a corrente nominal do enrolamento e a impedância percentual do equipamento. Assim tem-se:

$$\sigma_{medio} = \frac{(1,8\sqrt{2})^2 I_r^2 \cdot R_{cc}}{Z^2 \cdot \rho \cdot H_w \cdot 10^7} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.10)$$

4.3.2. FORÇAS AXIAIS NOS ENROLAMENTOS

O cálculo analítico das componentes radiais da densidade de fluxo magnético de dispersão em um transformador com enrolamentos concêntricos não é tão simples e nem tão preciso quanto o cálculo da densidade de fluxo de dispersão na direção radial. Contudo, alguns métodos existentes podem fornecer resultados aproximados para arranjos de enrolamentos menos complexos onde possam ser efetuadas simplificações, como por exemplo, a desconsideração da curvatura. As equações para cálculos de forças eletromagnéticas axiais e estresse mecânicos foram obtidas das referências [38], [39] e [40].

As forças axiais devem ser analisadas sob duas condições distintas, as quais geram componentes de forças também diferenciadas. Essas duas situações são designadas por condição ideal e não-ideal.

4.3.2.1. CONDIÇÃO IDEAL

Em transformadores com distribuição uniforme da força magnetomotriz em bobinas concêntricas, com condição ideal, as forças axiais que ocorrem devido à densidade de fluxo radial produzem campos em suas duas extremidades das bobinas e são direcionadas para o ponto médio enrolamentos. Essas forças surgem como resultado do fluxo produzido pelos condutores em paralelo no mesmo sentido. Na Figura 4.5 são apresentadas a ilustração da densidade de fluxo magnético e as forças axiais em ambos os enrolamentos para a referida situação. Ele pode ser visto na figura, embora haja uma grande força por unidade de comprimento nas extremidades dos

enrolamentos, a força cumulativa de compressão é maior na metade da altura das bobinas nos enrolamentos exteriores e interiores.

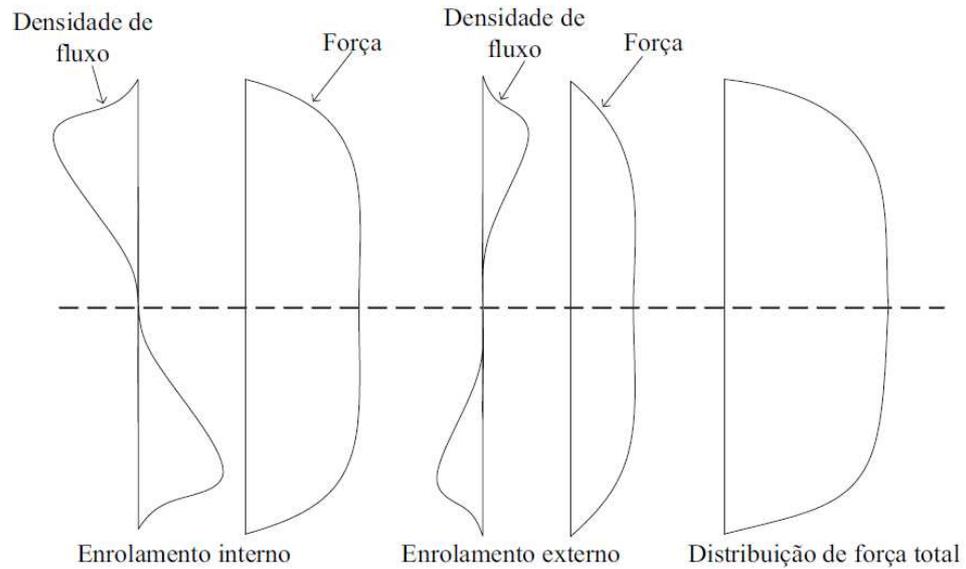


Figura 4.5: Distribuição do fluxo radial e de força axial em enrolamentos concêntricos iguais.

Para esta condição ideal pode ser obtida diretamente, a soma de compressão axial perto do ponto médio para ambas as bobinas. O resultado final é dado pela equação (4.11):

$$F_a = \frac{2\pi^2}{10^7} \frac{(NI_r)^2}{H_w^2} \pi D_m \left(d_0 + \frac{d_1 + d_2}{3} \right) \quad (4.11)$$

NI_r : força magnetomotriz dos enrolamentos (A-espiras);

D_m : diâmetro médio do transformador, considerando ambos enrolamentos (m);

H_w : altura dos enrolamentos (m);

d_0 : espaço entre os enrolamentos (m);

d_1 e d_2 : espessura radial dos enrolamentos (m).

A referência [39] define uma segunda componente da força axial também para a condição ideal, esta componente surge como resultado da interação entre a corrente de um enrolamento e o fluxo de dispersão produzido pelo outro enrolamento que concatena o primeiro, e vice-versa. Na figura 4.6 é apresentada essa situação.

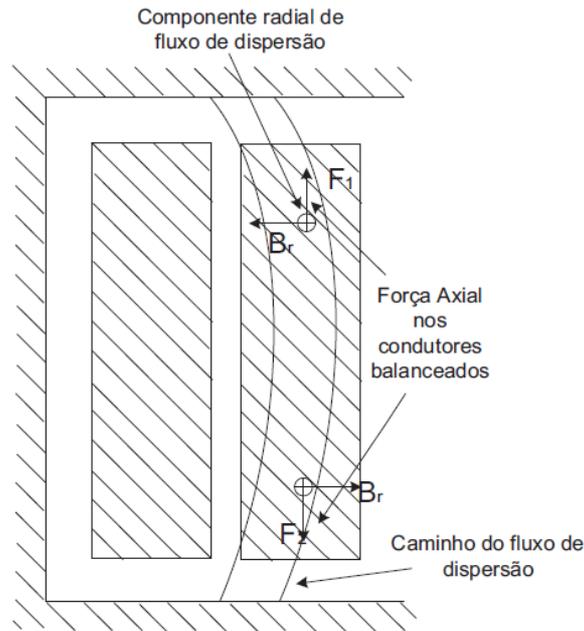


Figura 4.6: Forças axiais nos enrolamentos magneticamente balanceados: $F_1=F_2$.

Nota-se pela figura 4.6 que a inclinação do fluxo na região próxima às partes superior e inferior do enrolamento externo favorece o surgimento de uma componente da densidade de fluxo de dispersão radial e, em consequência da interação deste campo com a corrente, surge uma componente axial da força eletromagnética. Observa-se também, que as forças axiais nas duas metades da bobina estão em direções opostas, uma vez que a corrente está na mesma direção. Tendo em vista a suposição de condições ideais definidas anteriormente, em que os ampère-espiras estão balanceados de modo que o fluxo de dispersão mantém simetria, essas forças serão iguais e opostas.

4.3.2.2. CONDIÇÃO NÃO-IDEAL

Situações distintas das anteriores, que proporcionam acréscimo significativo na força axial são consideradas condições não-ideais. Nestas circunstâncias, as forças axiais são difíceis de serem calculadas através de métodos analíticos. Isso ocorre, principalmente, pela dificuldade de se levar em conta a curvatura dos enrolamentos e a presença do núcleo ferromagnético, o que é possível desde que se faça uso de soluções complexas derivadas de modelos computacionais [40].

As condições não-ideais que contribuem para o aumento das forças axiais nos enrolamentos são diversas, dentre elas pode-se citar: o desbalanceamento dos ampère-espiras dos enrolamentos concêntricos; o deslocamento axial dos enrolamentos; o encolhimento axial do papel isolante que pode vir a ocorrer durante a secagem e montagem dos enrolamentos e o uso de derivação (tape).

O deslocamento axial entre os enrolamentos concêntricos constitui-se num aspecto construtivo que dificulta o pleno balanceamento das forças magnetomotrizes dos enrolamentos, alterando a distribuição do fluxo de dispersão no interior do transformador e produzindo forças axiais desiguais e opostas, atuando em cada metade do enrolamento. Na figura 4.7 é ilustrada essa situação não-ideal.

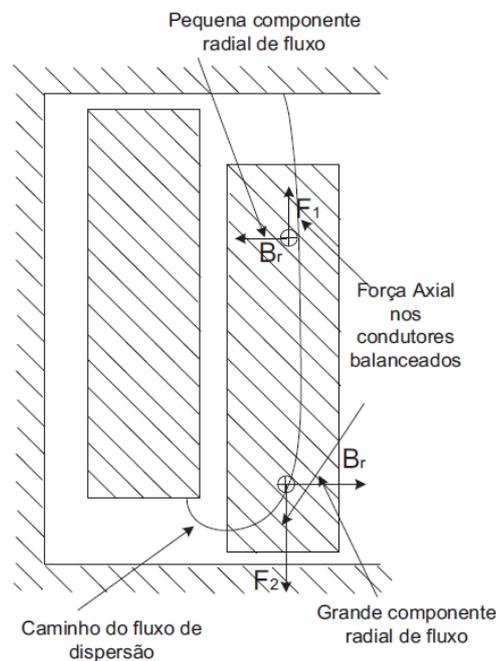


Figura 4.7: Forças axiais nos enrolamentos com deslocamento axial: $F_1 < F_2$.

Como pode ser observado na figura 4.7, para essa condição tem-se que $F_1 < F_2$ e, portanto, existirá uma força líquida no enrolamento que tenderá a aumentar o deslocamento ainda mais.

Situação similar é observada quando existe a presença de tapes utilizados na regulação da tensão. O uso de tape altera a distribuição de fluxo magnético no interior do transformador. Essa situação também pode ocasionar o aparecimento de forças axiais desiguais nas metades superior e inferior das bobinas, causando uma força resultante capaz de danificar as estruturas de suporte dos enrolamentos [1].

Apesar das dificuldades e imprecisões que os métodos analíticos impõem aos cálculos das forças axiais para as condições não ideais, alguns métodos aproximados são úteis na fase de projeto do transformador, pois permitem ao projetista determinar, prontamente, se um dado arranjo de enrolamentos resultará ou não em altas forças axiais. O método dos ampère-espiras residuais é um método analítico que produz resultados confiáveis.

O método dos ampère-espiras residuais disponibiliza fórmulas de razoável precisão e que conduzem a resultados confiáveis. Este se fundamenta no princípio de que qualquer arranjo de enrolamentos concêntricos, no qual a soma de forças magnetomotrices é nula, divide-se em dois grupos, cada um tendo ampère-espiras balanceados, um produzindo um campo axial e o outro um campo radial [39]. Os ampère-espiras radiais originam os fluxos radiais e, por conseguinte, as forças axiais entre os enrolamentos. Este método é usado para estimar as forças axiais em arranjos com enrolamentos assimétricos como ilustrado pela figura 4.8, que mostra uma configuração onde o enrolamento externo possui derivação em uma extremidade. Pode-se notar que a assimetria causa uma concentração de fluxo na região em que ocorre o desequilíbrio de ampère-espiras e, portanto, nesse local, as forças serão mais intensas.

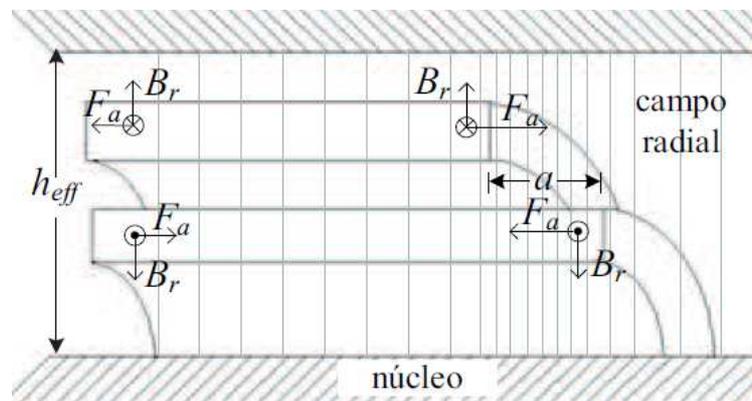


Figura 4.8: Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças axiais nos enrolamentos e a distribuição de densidade de fluxo de dispersão radial.

O método para determinação da distribuição de ampère-espiras radiais é ilustrado na figura 4.9.

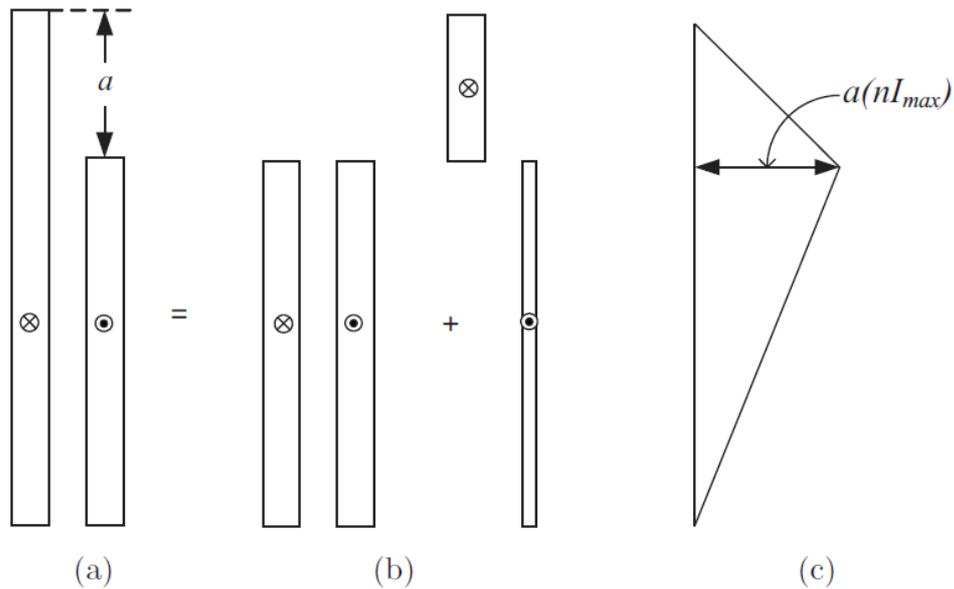


Figura 4.9: Determinação do diagrama de ampère-espiras residuais para enrolamento com derivação em uma extremidade.

Na figura 4.9(a) é apresentado um enrolamento concêntrico com uma derivação em uma das extremidades do enrolamento externo, de comprimento a , relativa ao comprimento total sem derivação. Os dois arranjos da figura 4.9 (b) representam grupos de ampère-espiras balanceados que, quando superpostos, reproduzem a configuração original de ampère-espiras. O diagrama das forças-magnetomotrizes radiais, plotado em função da altura do enrolamento, está ilustrado na figura 4.9(c), apresentando um formato triangular. O valor máximo alcançado é de $a(NI_{max})$, em que (NI_{max}) representa a força-magnetomotriz do enrolamento interno ou do externo.

Para o cálculo das forças axiais é necessária a determinação da densidade de fluxo radial produzido pelos ampère-espiras radiais. Em outras palavras, deve-se conhecer o comprimento efetivo do caminho para a densidade de fluxo radial para todos os pontos ao longo do enrolamento. Para essa finalidade, considera-se que esse comprimento é constante e que não varia com a posição axial do enrolamento [40]. Mesmo com essa simplificação obtém-se resultados com precisão satisfatória.

Assim, pode-se efetuar o cálculo das forças de compressão axial pelo método mencionado, sendo necessário para tanto, o conhecimento das seguintes grandezas:

O comprimento efetivo do caminho do fluxo radial, h_{eff} , (ver figura 4.8), que é diferente para cada arranjo de tape;

A densidade do fluxo radial médio no diâmetro médio do transformador (B_r), dado pela equação 4.12, mostrada na seqüência;

O valor médio dos ampère-espiras é igual a $(1/2)a(NI_{\max})$, sendo a o comprimento do tape (ou derivação), expresso como uma fração do comprimento total do enrolamento sem derivação.

A densidade de fluxo médio no diâmetro médio do transformador é dada pela equação 4.12.

$$B_r = \frac{4\pi}{10^4} \cdot \frac{a(NI_{\max})}{2h_{\text{eff}}} [T] \quad (4.12)$$

A força axial no outro enrolamento do transformador de (NI_{\max}) ampère-espiras máximos pode ser determinada através da equação (4.13).

$$F_a = \frac{2\pi a(NI_{\max})^2}{10^7} \cdot \frac{\pi D_m}{h_{\text{eff}}} [N] \quad (4.13)$$

O tipo de derivação mostrado anteriormente tem a finalidade tão somente de evidenciar a influência da inserção de tapes no desempenho dos campos de dispersão e forças eletromagnéticas em transformadores. Outros arranjos de tapes podem ser utilizados, inclusive possibilitando um melhor balanceamento das forças magnetomotrizes ao longo da coluna e, conseqüentemente, originando forças de menor intensidade [39].

4.4. ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS E TIPOS DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

Este item se propõe a abordar os aspectos relacionados com os estresses mecânicos originados em decorrência das forças eletromagnéticas, bem como os tipos de falhas associados aos estresses.

É importante destacar que os mecanismos de falhas em transformadores de núcleo envolvido diferem dos mecanismos de falhas em transformadores de núcleo envolvente. Tipos de falhas para ambos tipos de configuração dos enrolamentos podem ser encontrados em [44]. A referência analisa, também, a capacidade inerente de resistência ao movimento dos condutores dos enrolamentos para esses dois tipos de arranjo das bobinas. Fatores como: rigidez do sistema de isolamento, firmeza dos

sistemas de fixação das bobinas, resistência mecânica dos condutores e a elasticidade do corpo das bobinas, são destacados como sendo fundamentais na determinação da resposta dos enrolamentos às forças eletromagnéticas.

4.4.1. FALHAS PROVOCADAS POR FORÇAS RADIAIS

Forças radiais produzem efeitos diferentes nos enrolamentos externo e interno de transformadores. As forças dirigidas para fora provocam estresse de tração no enrolamento externo, enquanto que estresses de compressão são desenvolvidos nos enrolamentos sujeitos às forças dirigidas para o centro da coluna. Para enrolamentos concêntricos, a suportabilidade mecânica do enrolamento externo depende da resistência da força de tração do condutor. Por outro lado, a resistência mecânica do enrolamento interno depende das estruturas de suporte providenciadas para os condutores. É comum a ocorrência da deformação radial do enrolamento interno, enquanto que o rompimento do enrolamento externo é mais difícil de ocorrer.

4.4.1.1. ENROLAMENTOS SUJEITOS A ESTRESSE DE TRAÇÃO

Em decorrência de forças radiais, o enrolamento externo de um transformador é o que fica sujeito ao estresse de tração ou *hoop stress*. A intensidade do estresse pode ser estimada de acordo com equação 4.10.

Nos condutores utilizados em enrolamentos compactos, tipo disco ou em qualquer uma das camadas de enrolamentos multi-camadas, verifica-se uma força de tração uniforme. Essa força, dependendo de seu valor, poderá causar danos à isolação do condutor, caso o estresse de tração exceda o limite de escoamento do condutor. Contudo, a probabilidade de falha nos enrolamentos sujeitos a esse tipo de estresse é pequena, uma vez que normalmente são usados condutores dimensionados para um valor de carga de prova de 0,2 % [38].

4.4.1.2. ENROLAMENTOS SUJEITOS A ESTRESSE DE COMPRESSÃO

Este tipo de esforço é experimentado pelos enrolamentos internos de um transformador, em decorrência das cargas de compressão radial a que podem ficar expostos. A compressão pode manifestar-se de duas maneiras distintas. Uma delas

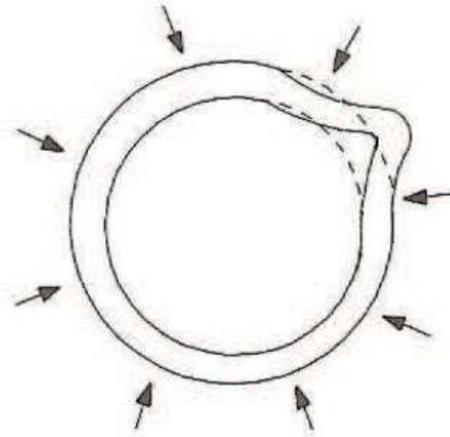


Figura 4.11: Deformação “livre” no enrolamento interno: *Free buckling*.

Os dois tipos de deformações relatados podem ser vistos como um conjunto seqüencial de falhas, que iniciam no condutor mais externo do enrolamento interno e caminham no sentido do condutor mais interno deste enrolamento (próximo ao núcleo) [38]. Existem muitos fatores que podem favorecer a ocorrência da deformação dos enrolamentos, dentre os quais pode-se citar: enrolamentos “frouxos”, uso de materiais com características inferiores às mínimas requeridas, excentricidade dos enrolamentos, baixa resistência das estruturas de suporte em relação ao condutor, etc.

A técnica utilizada para conferir aos enrolamentos uma suportabilidade mecânica suficiente para resistir às forças radiais é obtida pelo uso de um número adequado de suportes, que estejam em contato direto com o núcleo e uniformemente espaçados ao redor da circunferência [40].

Um condutor sujeito à forças radiais normalmente é modelado como um anel circular, sujeito a uma carga radial uniformemente distribuída. Neste caso, o valor de estresse crítico é determinado com base na utilização ou não de suportes axiais [23]. Para os casos de enrolamentos desprovidos de estruturas de sustentação axial, ou seja, que não possuem espaçadores axiais para aumentar a resistência aos esforços de compressão, o valor do estresse crítico pode ser calculado pela equação (4.14).

$$\sigma_{\text{crit}} = \frac{E \cdot e^2}{4 \cdot R^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.14)$$

σ_{crit} : valor do estresse crítico (N/m²);

E: módulo de elasticidade do material (N/m²);

e : espessura do condutor (m);

R : raio do enrolamento (m).

De outro lado, a determinação do valor do estresse crítico em enrolamentos providos de suportes axiais, e que sejam causados por esforços de compressão, pode ser realizada pela equação (4.15).

$$\sigma_{\text{crit}} = \frac{E(\delta) \cdot (ke^2) \cdot N^2}{12 \cdot D^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.15)$$

$E(\delta)$: módulo de elasticidade incremental no valor crítico (N/m²);

e : espessura do condutor (m);

k : constante para espessura equivalente;

D : diâmetro do enrolamento (m);

N : número de suportes axiais.

Os enrolamentos internos que estejam sujeitos à forças radiais que possam provocar deformação do tipo “forçada” (ver figura 4.10(b)) necessitam de suportes internos, de maneira a prevenir qualquer movimento do enrolamento para dentro. O estresse nesta situação é função da distância entre os suportes e da dimensão dos condutores, cujo valor é dado pela equação 4.16.

$$\sigma = \frac{F_{\text{med}} \cdot l^2}{2 \cdot h \cdot e^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.16)$$

σ : estresse crítico do enrolamento (N/m²);

F_{med} : força radial (N/m);

l : distância entre os suportes (m);

h : altura do condutor (m);

e : espessura do condutor (m).

O projeto de enrolamentos, com resistência mecânica suficiente para suportar os estresses de tração, é relativamente mais fácil do que o projeto mecânico do estresse de compressão. Isto decorre do fato que o estresse de tração é mantido abaixo do limite do escoamento do material condutor [38]. Os enrolamentos internos, por outro lado, necessitam de estruturas de suporte internas para assegurar a sua resistência

mecânica (como espaçadores axiais, por exemplo) e podem danificar-se também devido à inclinação dos condutores entre as estruturas de suporte. A técnica para estabelecimento de critérios de projeto para determinar a resistência mecânica dos enrolamentos internos sujeitos à compressão é complexa e pode variar de fabricante para fabricante [1].

4.4.2. FALHAS PROVOCADAS POR FORÇAS AXIAIS

Um dos tipos de falhas decorrente da ação de forças axiais compressivas ocorre quando um enrolamento tipo camada não está firmemente enrolado e amarrado, facilitando a transposição do condutor adjacente. Esse efeito pode danificar a isolação do condutor e, eventualmente, levar a um curto-circuito entre espiras. Outro tipo de falha ocorre quando um enrolamento vibra sob a ação de forças axiais. Nessa situação, a isolação do condutor pode danificar-se, em decorrência do movimento relativo entre enrolamento e os espaçadores isolantes localizados axialmente.

Altas forças de compressão axial nas extremidades das bobinas podem causar deformação nas estruturas de fixação (*clamping*) das extremidades dos enrolamentos. Os elementos de fixação têm como função exercer uma pressão efetiva sobre os enrolamentos durante os curtos-circuitos para garantir a resistência às forças axiais.

Existem outros dois importantes tipos de falhas: inclinação entre espaçadores radiais (*bending*) e a inclinação dos condutores (*tilting*), os quais são analisados a seguir.

4.4.2.1. INCLINAÇÃO DE CONDUTORES ENTRE ESPAÇADORES RADIAIS

Sob a ação de forças axiais, o condutor de um enrolamento pode inclinar-se entre os espaçadores isolantes localizados radialmente, como é apresentado na figura 3.12. Essa inclinação do condutor pode, também, resultar em danos à sua isolação. Contrariamente ao que se verifica com os esforços decorrentes das forças radiais, neste caso, a curvatura da deformação se dá num plano vertical e não horizontal, como ocorre naquele caso.

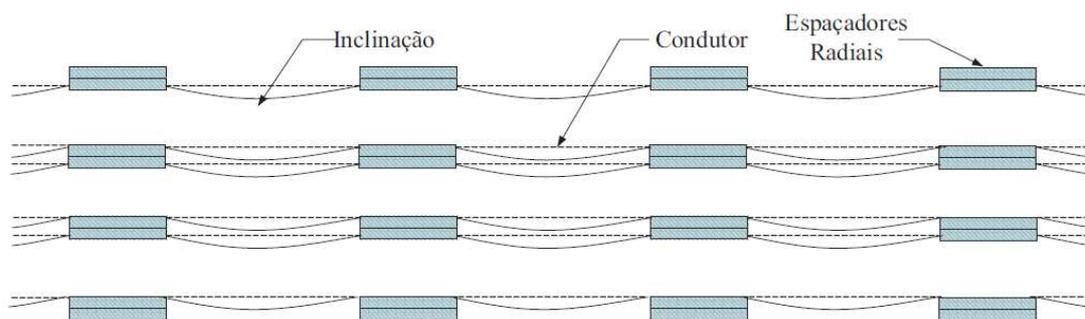


Figura 4.12: Inclinação dos condutores entre espaçadores radiais - vista lateral (*Bending*).

Os estresses relacionados com a inclinação devido às forças axiais podem ser calculados utilizando a equação (4.17) [23].

$$\sigma = \frac{F_a \cdot L^2}{2 \cdot e \cdot h^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.17)$$

F_a : força axial (N/m);

L : distância entre espaçadores axiais (m);

e : dimensão radial do condutor (m);

h : dimensão axial do condutor (m).

O máximo estresse que se verifica no condutor, por causa da inclinação, ocorre nos cantos dos espaçadores radiais. O valor máximo do esforço nessa região deve ser menor que o limite suportável pelo tipo de condutor utilizado (cerca de 1.200 kg/cm² para o cobre) [38].

4.4.2.2. INCLINAÇÃO DE CONDUTORES PRODUZIDA PELA CARGA AXIAL

Este tipo de falha, em função da ação de forças compressivas axiais, *tilting*, é um dos principais tipos de defeitos em grandes transformadores. Quando essas forças são maiores que a carga limite suportável pelos enrolamentos do equipamento, uma falha pode ocorrer, caracterizando-se pela inclinação dos condutores em forma de “zig-zag”. A figura 3.13(a) mostra os condutores na posição normal e a figura 3.13(b) ilustra a inclinação dos mesmos condutores deformados pela ação de forças axiais críticas.

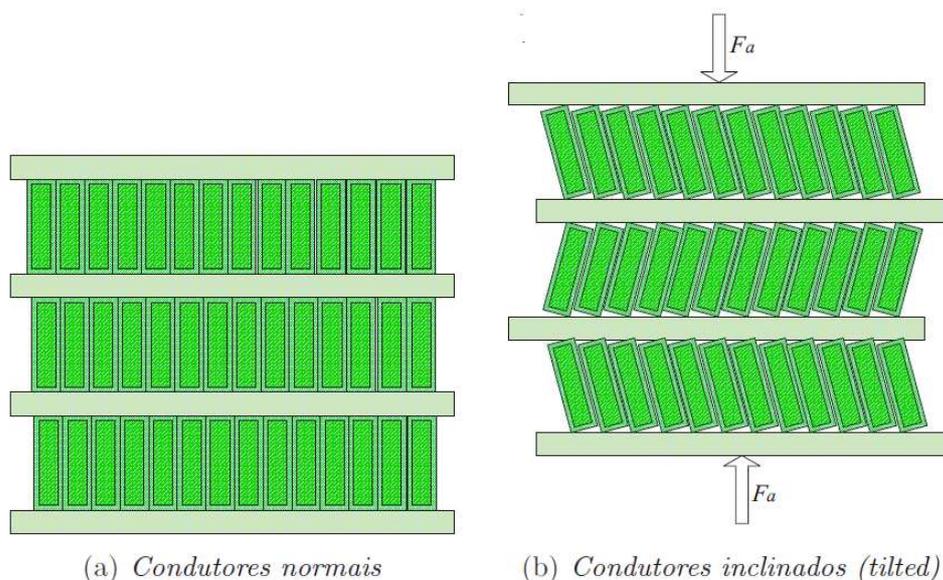


Figura 4.13: Inclinação de condutores pela ação de forças axiais - seção transversal.

Em decorrência da força imposta, ocorre um deslocamento da seção transversal dos condutores em torno do eixo de simetria perpendicular.

Esse tipo de inclinação é causado pela compressão axial cumulativa, aplicada aos condutores e que é transmitida através dos espaçadores e estruturas de fixação. A carga crítica que o enrolamento pode tolerar é, portanto, não somente função dos parâmetros do condutor, mas também, da construção do enrolamento, incluindo a isolamento entre condutores [23]. Esta carga crítica pode ser determinada pela equação 4.18.

$$\sigma_{crit} = \frac{E \cdot h^2}{14 \cdot R^2} + \frac{m \cdot s \cdot c \cdot e^2}{12 \cdot \pi \cdot R \cdot h^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4.18)$$

E : módulo de elasticidade (N/m^2);

h : dimensão axial do condutor (m);

R : raio do enrolamento (m);

m : número de cunhas;

s : comprimento dos espaçadores;

c : módulo equivalente de elasticidade do papel isolante (N/m^2);

e : dimensão radial do condutor.

4.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentadas as bases conceituais referentes às correntes de curto-circuito, forças eletromagnéticas e esforços mecânicos a que os transformadores podem ser submetidos. Além das bases conceituais foram abordados os cálculos relacionados com as correntes de curto-circuito, densidade de fluxo magnético, forças eletromagnéticas e esforços mecânicos atuantes nos enrolamentos dos transformadores. Foi feita também a abordagem analítica das forças, identificando as componentes da densidade de fluxo magnético de dispersão radial e densidade de fluxo magnético de dispersão axial, responsáveis pelas componentes das forças axiais e forças radiais, respectivamente, a apresentação desta metodologia para a realização dos cálculos analíticos destas grandezas serviram como base para o cálculo das forças eletromagnéticas, que serão confrontadas com os valores obtidos por métodos numéricos.

Foi abordada a importância do projeto na vida útil de um transformador, que deverá possuir suportabilidade para os maiores esforços a que possa ser submetido ao longo de sua vida operativa.

Por fim, foi realizada a análise dos principais tipos de falhas que podem ocorrer nas partes estruturais e ativas dos transformadores decorrentes dos esforços mecânicos.

O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E O *FEMM*

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O método de elementos finitos (MEF) começou a ser desenvolvido na década de 50 com aplicação em engenharia mecânica como uma nova possibilidade para resolver problemas da teoria da elasticidade, superando as dificuldades e problemas inerentes aos métodos de Rayleigh-Ritz, Galerkin, diferenças finitas, resíduos ponderados e outros. Em 1970 P. P. SILVESTER e M. V. K. CHARI publicaram o artigo “*Finite Elements Solution of Saturable Magnetic Fields Problems*” [45], que propôs a utilização deste método em problemas de eletromagnetismo, incluindo, na sua formulação, a resolução de problemas não-lineares.

Baseado no MEF foi desenvolvido um software denominado *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), cuja função é a resolução de problemas eletromagnéticos. Como tal, esse programa atende a todos os procedimentos de cálculo numérico descritos para o MEF. Assim sendo, como o estudo desta dissertação trata de um dispositivo eletromagnético, optou-se pela utilização desse programa para dar prosseguimento aos desenvolvimentos.

Neste capítulo será feita apresentação sucinta do método de elementos finitos aplicado a eletromagnetismo em baixas frequências, assim como da estrutura do funcionamento do software *FEMM*, e das interações entre as grandezas eletromecânicas.

5.2 O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos objetiva a obtenção de uma formulação que permita a análise de sistemas complexos e/ou irregulares, por intermédio de programas computacionais, de forma automática. Para atingir tal objetivo, o método considera o sistema global como sendo equivalente a um agrupamento de elementos finitos, no qual cada um destes é uma estrutura contínua mais simples.

Apesar de o método dos elementos finitos considerar os elementos individuais como contínuos, é, na sua essência, um procedimento de discretização, que visa transformar um problema infinito-dimensional em finito-dimensional, ou seja, em um sistema com um número finito de incógnitas.

A resolução do problema consiste em discretizar ou decompor o domínio sob estudo em pequenos sub-domínios chamados de “elementos finitos” que são conectados entre si por meio de pontos discretos, denominados “nós” [46]. O conjunto de elementos utilizados na discretização é denominado malha. Uma vez que a malha e seus respectivos nós são obtidos, soluções aproximadas podem ser introduzidas para as variáveis de campo dependentes no interior de cada elemento. Essas variáveis são expressas como funções arbitrárias dos valores que as incógnitas assumem nos nós, e são chamadas de funções de interpolação. Também são impostas condições para garantir a continuidade da solução nos nós compartilhados por vários elementos. As incógnitas do problema, que são denominadas graus de liberdade, passam a ser os valores das variáveis de campo nos pontos nodais, sendo que o número de graus de liberdade (agora finito) é dependente da ordem, do número de elementos e também do número de variáveis dependentes. Dependendo da natureza do problema, após a discretização, o modelo matemático regente é representado por um número finito de equações diferenciais ordinárias ou de equações algébricas, cuja resolução numérica conduz aos valores das incógnitas nodais. Uma vez determinadas estas incógnitas, os valores das variáveis de campo no interior dos elementos podem ser avaliados empregando-se funções de interpolação.

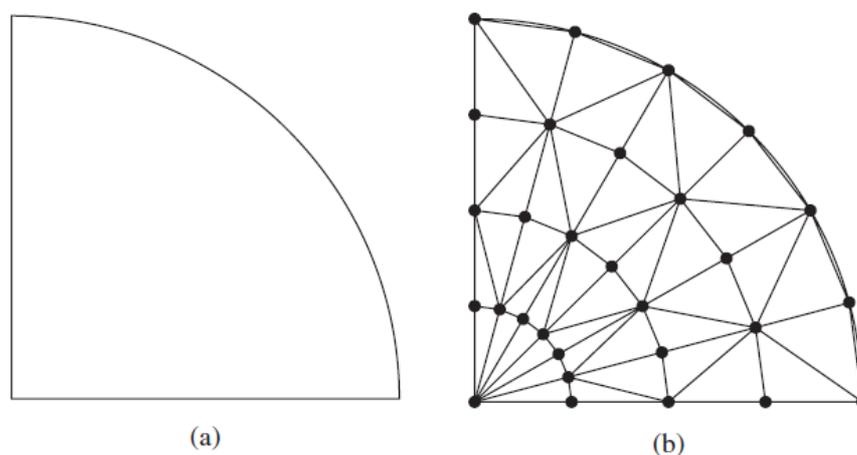


Figura 5.1: Domínio para ser malhado (a) elemento triangular (b)

O método dos elementos finitos não fornece, em princípio, soluções exatas. No entanto, admite-se que à medida que mais e mais elementos são usados na modelagem, a solução obtida para o problema discretizado convirja para uma solução precisa do problema contínuo. A principal exigência para se modelar geometrias mais complexas é manter a dimensão da malha em um nível razoável, de modo que o problema possa ser resolvido. A utilização de uma simetria axial em 2D é dependente unicamente de uma variável (o potencial vetor magnético A), enquanto que soluções em 3D requerem três variáveis dependentes (ou seja, campo magnético em todas as direções H_x , H_y e H_z).

A implementação da técnica de elementos finitos é, em geral, realizada através da utilização do método variacional ou do método de Galerkin (resíduos ponderados). O método variacional fundamenta-se no princípio da minimização da energia associada ao campo elétrico presente no domínio de cálculo. O método de Galerkin é utilizado para a resolução de problemas mais complexos, onde a busca por um funcional energético torna-se mais complexo. Ao contrário do método variacional, a formulação numérica para resolução dos problemas é obtida diretamente da equação que define o fenômeno físico.

As vantagens principais associadas à utilização do MEF em relação a outras técnicas numéricas estão descritas a seguir.

- a) Elementos de diferentes formas e tamanhos podem ser associados para discretizar domínios de geometria complexa, uma vez que a sua formulação depende somente da classe do problema e é independente de geometria [25];
- b) A divisão do domínio em regiões onde as propriedades físicas variam em função das coordenadas espaciais facilita a modelagem de problemas envolvendo domínios não homogêneos. O MEF também pode levar em conta, facilmente, a descontinuidade do material;
- c) O método pode ser todo formulado matricialmente, facilitando sua implementação computacional.

5.3 ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DO FEMM

O *FEMM* ou Método de Elementos Finitos Magnéticos é um programa livre criado pelo Ph.D David Meeker, que proporciona um completo conjunto de ferramentas para resolver problemas estáticos e de baixa frequência ou problemas axissimétricos em eletrodinâmica, no domínio 2D e não tem limitações de nós. É um programa útil porque manipula internamente equações diferenciais que necessitam ser resolvidas quando se trabalha com magnetismo. Como qualquer outro pacote típico de Elementos Finitos, a resolução de problemas físicos utilizando o *FEMM* é dividida nas três etapas descritas a seguir:

Pré-processamento: consiste na definição da estrutura que permite descrever a geometria do problema, as propriedades físicas dos materiais, a densidade das malhas e as condições de contorno. A malha de elementos finitos pode ser criada e visualizada nesta fase.

Processamento: esta etapa consiste na interpretação das informações definidas durante a etapa de pré-processamento e na aplicação das equações de Maxwell pertinentes à resolução do problema, através da montagem de um sistema de equações diferenciais que descrevem o comportamento da estrutura sob análise.

Pós-processamento: trata-se de um programa gráfico que disponibiliza os resultados sob a forma de contornos e densidades. O usuário pode inspecionar a solução pontualmente, plotar resultados de interesse na forma de gráficos e calcular certas integrais.

A etapa de processamento emprega um conjunto de equações desenvolvidas por James Maxwell, as quais proporcionam uma descrição completa e unificada de todos os fenômenos eletromagnéticos. Essa descrição é baseada nos trabalhos de Gauss, Ampère, Faraday e Lenz. A contribuição de Maxwell propriamente dita está no conceito das “correntes de deslocamento” que generaliza a lei de Ampère para incluir os fenômenos que envolvem altas frequências.

A formulação de um modelo usando *FEMM* para o estudo desenvolvido neste trabalho utiliza o potencial vetor magnético \vec{A} para resolver problemas de magnetostática, usando o fato de que a equação diferencial parcial de Poisson,

discutido a seguir pela Equação (5.6), é satisfeita quando a função de energia magnético total é minimizado.

Problemas Magnetostáticos são problemas cujos campos são invariantes no tempo. Neste caso, a intensidade do campo magnético (\vec{H}) e a densidade de fluxo magnético (\vec{B}) são descritas pelas equações de Maxwell [47] (5.1) e (5.2):

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (5.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (5.2)$$

\vec{H} : intensidade de campo magnético (A/m)

\vec{J} : densidade de corrente (A/m²);

\vec{B} : densidade de fluxo magnético (Wb.m⁻²);

A equação que descreve a relação entre \vec{B} e \vec{H} para cada material é a relação de passagem [47] (5.3)

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (5.3)$$

μ : permeabilidade magnética

Se o material não é linear, com a saturação do ferro, a permeabilidade μ torna-se uma função de B:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (5.4)$$

A análise utilizando o FEMM busca um campo que satisfaça as relações (5.1) e (5.3) através da utilização do potencial vetor magnético. A densidade de fluxo é escrita em termos de um potencial vetor \vec{A} , conforme a equação (5.5):

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (5.5)$$

Agora, esta definição de \vec{B} sempre satisfaz (5.2). Portanto, a equação (5.1) pode ser reescrita como:

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (5.6)$$

A análise utilizando o FEMM baseia-se na equação (5.6), de tal forma que os problemas magnetostáticos com uma relação não-linear $B-H$ podem ser resolvidos.

Outra importante consideração que deve ser levada em conta é a respeito da densidade de fluxo dentro de cada elemento resultante da divisão geométrica do estudo, que deve ser assumida constante, de modo que o potencial vetor magnético varia linearmente dentro de cada elemento. Para se obter uma melhor precisão, considera-se que o potencial vetor varia como um polinômio de grau maior que 1 [47].

5.4 INTERAÇÕES ENTRE AS GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS E MECÂNICAS

As interações entre grandezas eletromagnéticas e mecânicas presentes em dispositivos eletromagnéticos é uma operação que exige cuidado e deve ser abordada com prudência. Não existe um tratamento global que possa, de maneira simples, definir de forma única essa interação. Assim sendo, para cada tipo de dispositivo existe uma maneira conveniente de abordar o problema. Dentro do contexto desta proposta de dissertação, qual seja cálculo de forças e estresses mecânicos, o FEMM utiliza dois recursos para efetuar o cálculo das grandezas mecânicas e eletromagnéticas que atuam sobre os enrolamentos de transformadores, a saber: um método designado no programa por “Força de Lorentz” e outro denominado “Tensor de Maxwell”.

A lei de Lorentz afirma que a força por unidade de volume, que um campo eletromagnético exerce sobre uma densidade volumétrica de carga e uma densidade superficial de corrente, é dada pela equação (5.7).

$$\vec{f} = \rho \cdot \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (5.7)$$

\vec{f} : densidade volumétrica de força (N/m^3);

ρ : densidade volumétrica de carga (C/m^3);

\vec{E} : vetor campo elétrico (V/m);

\vec{J} : densidade superficial de corrente (A/m^2);

A primeira parcela do lado direito da equação (5.7) é chamada de densidade volumétrica de força elétrica e a segunda é a densidade volumétrica de força magnética. Assim, a força magnética, que é a grandeza de interesse, é um caso

particular da força de Lorentz e é definida como a força por unidade de volume que o campo eletromagnético exerce sobre uma densidade volumétrica de corrente [47].

Para determinar as forças magnéticas em domínios físicos compostos de materiais que possuem permeabilidade relativa unitária, por exemplo, as bobinas de um transformador, o pacote *FEMM* dispõe de um bloco específico chamado "*Força de Lorentz*".

Conhecendo a densidade do fluxo magnético radial e axial e as correntes introduzidas, pode-se calcular as forças eletromagnéticas produzidas nos enrolamentos do transformador [48].

Usando os resultados do pós-processamento em componentes *FEMM* densidade do fluxo magnético B_x e B_y , assim como a corrente que flui através do enrolamento, pode-se calcular as componentes da força radial e axial através da equação (5.8):

$$\vec{F} = \int_V (\vec{J} \times \vec{B}) \cdot dV \quad (5.8)$$

\vec{F} : força magnética total;

dV : elemento diferencial de volume.

De acordo com o tipo de modelo que se pretende trabalhar, a equação (5.8) pode ser decomposta em duas componentes de formato retangular ou cilíndrico, conforme equação (5.9) e (5.10) e ilustrado pela Figura 5.2.

$$\iiint (\vec{J} \times \vec{B}) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (5.9)$$

$$\iiint (\vec{J} \times \vec{B}) \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \cdot dz \quad (5.10)$$

Na Figura 5.2 são ilustrados os modelos 2D para coordenadas retangulares e cilíndricas.

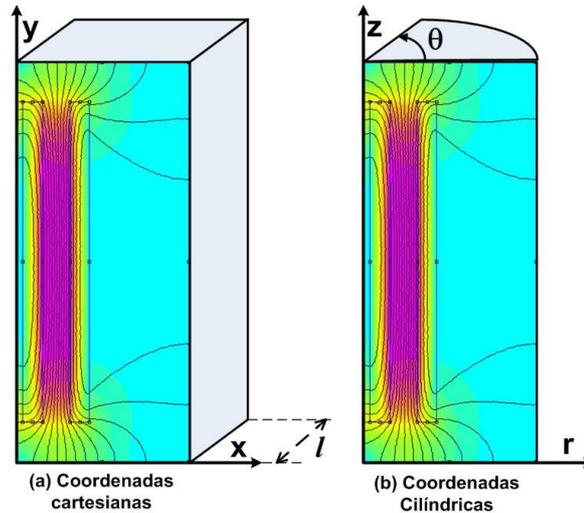


Figura 5.2: Modelos em 2D com expansão em coordenadas retangulares (a) e cilíndricas (b).

Para o modelo em coordenadas retangulares têm-se as equações (5.11) e (5.12) que são integradas sobre a área dos enrolamentos.:

$$F_x = \iint (\vec{J} \times \vec{B}_y) l \cdot dx \cdot dy \quad (5.11)$$

$$F_y = \iint (\vec{J} \times \vec{B}_x) l \cdot dx \cdot dy \quad (5.12)$$

\vec{J} : densidade de corrente na bobina;

l : profundidade do modelo.

Para o modelo em coordenadas cilíndricas têm-se as equações (5.13) e (5.14):

$$F_r = 2\pi \cdot \iint (\vec{J} \times \vec{B}_z) \cdot r \cdot dr \cdot dz \quad (5.13)$$

$$F_z = 2\pi \cdot \iint (\vec{J} \times \vec{B}_r) \cdot r \cdot dr \cdot dz \quad (5.14)$$

O “Tensor de Maxwell” é outra maneira de se determinar a força por unidade de área produzida pelo campo magnético sobre uma superfície. A expressão do “Tensor de Maxwell” é obtida a partir da equação da força de Lorentz mostrada anteriormente, onde manipulações são efetuadas através das equações de Maxwell para eliminar ρ e \vec{J} em favor dos campos. Assim, a parcela do Tensor de Maxwell relativa ao cálculo das forças magnéticas é dada pela equação (5.15).

$$d\vec{F} = \frac{1}{2} \cdot (\vec{H} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{u}) + \vec{B} \cdot (\vec{H} \cdot \vec{u}) - (\vec{H} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{u}) \quad (5.15)$$

$d\vec{F}$: elemento diferencial de força;

\vec{u} : vetor unitário à superfície, no ponto de interesse.

O *FEMM* utiliza a equação (5.15) para calcular a força magnética líquida em um objeto, criando uma superfície que envolve totalmente a área de interesse do objeto e, integrando a força magnética sobre esta superfície. Os cálculos obtidos da integração de contornos que englobam interface entre dois materiais de permissividades diferentes conduzem a resultados errôneos. Contudo, resultados condizentes são alcançados quando os contornos escolhidos envolvem o corpo de interesse e o ar ou regiões com permeabilidade constante.

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo foi dedicado à apresentação do método numérico de elementos finitos e o software *Finite element method magnetics*, O *FEMM*, que serão utilizados no próximo capítulo para a modelagem dos transformadores que utilizam núcleo de liga metálica amorfa, abordando as etapas para resolução de problemas que utilizam método de elementos finitos: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Por fim, foi apresentada a formulação que o software *FEMM* utiliza para resolução de problemas magnéticos e os recursos que o software utiliza para calcular as grandezas mecânicas e eletromagnéticas que atuam nos enrolamentos dos transformadores: “*Forças de Lorentz*” e “*Tensor de Maxwell*”.

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE TRANSFORMADORES AMORFOS

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, em um primeiro momento serão apresentados os principais passos para estruturação e análise dos problemas eletromagnéticos que foram descritos anteriormente e serão descritas de forma mais detalhada algumas etapas para a montagem e resolução do problema de transformadores amorfos utilizando o software *Finite Element Method Magnetics (FEMM)*.

Em um segundo momento, será realizada a modelagem do transformador de núcleo amorfo de 15 kVA apresentando-se os passos para a criação do modelo em condições transitórias de curto-circuito trifásico comparando ao modelo do transformador de FeSi de 15 kVA apresentado na referência [1].

Por fim, será realizada a análise dos dados do pós-processamento através dos gráficos dos resultados e a comparação dos dados obtidos pelo método numérico baseada no método de elementos finitos com o método analítico para o transformador de núcleo amorfo de 15 kVA, relacionado com os dados obtidos na referência [1] para transformador de núcleo de FeSi de 15 kVA.

6.2 MODELAGEM DE TRANSFORMADORES

A ferramenta utilizada neste trabalho para a modelagem de transformadores é o software *Finite Element Method Magnetics (FEMM)* que consiste em um pacote computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), dedicado à resolução de problemas eletromagnéticos no domínio 2D. Este programa utiliza técnicas numéricas e proporciona a resolução rápida e direta das complexas equações diferenciais que regem o comportamento de dispositivos eletromagnéticos. Esta

técnica constitui-se em uma poderosa ferramenta para analisar estruturas eletromagnéticas complexas e irregulares, pois permite que se faça o mapeamento de campos elétricos e magnéticos para diversos dispositivos, tais como: motores, transdutores, transformadores, etc. Além disso, a possibilidade da análise estrutural, evidenciando, sobretudo, seu comportamento eletromagnético, torna o método uma ferramenta eficiente, proporcionando os mais diversos tipos de análises que envolvam campos eletromagnéticos, tais como cálculos de esforços nos enrolamentos [49].

Basicamente, os procedimentos para o estudo de transformadores consistem nas etapas seguintes:

- a) **Criação da geometria (Pré-processamento);**
- b) **Geração das malhas (Pré-processamento);**
- c) **Propriedades dos materiais (Pré-processamento);**
- d) **Definição das fontes de corrente (Pré-processamento);**
- e) **Condições de contorno (Pré-processamento);**
- f) **Solução (Processamento);**
- g) **Pós-processamento.**

a) Criação da geometria:

Geometrias simples podem ser traçadas utilizando-se as ferramentas de desenho do próprio *FEMM*. Geometrias mais complexas, por outro lado, podem ser importadas de ferramentas apropriadas para desenho, como por exemplo, o *AUTOCAD*. Estruturas bidimensionais podem ser resolvidas em sistemas de coordenadas cartesianas ou axissimétricas. Os transformadores são estruturas eletromagnéticas tridimensionais. Assim sendo, a utilização de sistemas em duas dimensões torna necessária a introdução de aproximações nos modelos, que, contudo, conduzem a resultados suficientemente precisos.

Um aspecto comum a todos os modelos de pré-processamento é a importação e exportação de arquivos *DXF*. O *FEMM* suporta a importação de formatos de arquivos *DXF* do *AUTOCAD*, somente podendo ser importados modelos 2D.

b) Criação de malhas:

Este passo envolve a divisão da geometria em pequenos elementos, como já mencionado. Para que a solução do problema seja mais precisa, existe a necessidade

de um refinamento das malhas em regiões onde exista uma apreciável variação dos valores de densidade de fluxo, do equipamento sob análise. Estas malhas devem ser refinadas até que não mais ocorram variações consideráveis na densidade de fluxo em qualquer ponto.

c) Propriedades dos materiais:

Programa FEMM tem uma caixa de diálogo usada para especificar as propriedades associadas com certos blocos de material definido pelo usuário, tais como curvas de histerese B-H linear ou não linear, condutividade elétrica, densidade de corrente, entre outros.

O núcleo é definido com uma alta permeabilidade relativa (μ_r) por ser constituído de material ferromagnético. Outras partes são definidas com μ_r igual a 1. Para estudos onde as correntes parasitas podem ser desprezadas, a condutividade não precisa ser definida.

d) Definição das fontes de corrente:

Nesta etapa, a densidade de ampère-espiras de cada enrolamento/seção deve ser definida, nas áreas onde existam materiais condutores.

e) Condições de contorno:

O FEMM trabalha com cinco variações de condições de contorno para problemas magnéticos:

- **Dirichlet.** Condição de contorno em que o potencial A é explicitamente definido neste contorno, por exemplo $A = 0$. O uso mais comum desta condição de contorno em problemas magnéticos é a definição de $A = 0$ ao longo do contorno para manter o fluxo magnético nele contido.
- **Neumann.** Esta condição é igual à derivada normal do potencial definida ao longo do contorno. Neste caso, as linhas de fluxo são ortogonais a essas fronteiras, ou é definida como $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ ao longo do contorno.
- **Robin.** A condição de contorno como Robin é definido como uma mescla de *Dirichlet* e *Neumann*, e define uma relação entre A e sua

derivada normal ao contorno. O FEMM usa a seguinte relação para esta

$$\text{condição: } \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \right) \frac{\partial A}{\partial n} + c_0 A + c_1 = 0$$

- **Periódica.** É definido como uma junção de duas fronteiras. Neste tipo de condição os valores das condições de contorno nos pontos correspondentes às duas fronteiras são definidos de forma igual entre eles.
- **Anti-Periódica.** Também é definida como uma junção de duas fronteiras, no entanto, os valores limite têm a mesma magnitude, mas sinais opostos.

Se não houver condições de contorno definidas, a condição de Neumann é automaticamente fixada.

f) Solução:

Esta etapa consiste na representação matricial de cada elemento, formação da matriz de coeficientes global e na imposição das condições de contorno. Contudo, esta fase é realizada internamente, pelo próprio software.

g) Pós-processamento:

Consiste na disponibilização dos resultados gráficos e numéricos para as análises pertinentes, como mencionado anteriormente.

Os enrolamentos são modelados como blocos triangulares. Entretanto, caso exista uma distribuição não uniforme de ampère-espiras, os enrolamentos deverão ser divididos em seções adequadas, de modo que a distribuição da força magnetomotriz seja uniforme em cada seção.

6.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO FEMM

Este item destina-se a apresentar e discutir os principais resultados obtidos das simulações computacionais com o transformador amorfo de 15 kVA utilizando o FEMM. Para avaliar o desempenho dos modelos implementados e verificar a eficácia do FEMM foram efetuadas simulações no modelo sob situações a vazio de operação

para comparar as perdas no núcleo com o modelo do transformador de núcleo FeSi(GO) da referência [1], bem como sob condições de curto-circuito.

6.3.1 CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR AMORFO DE 15 kVA

Um transformador amorfo trifásico de 15 kVA e com relação de tensão de 220/220V foi implementado e simulado no *FEMM* para se analisar o desempenho elétrico, magnético e mecânico do dispositivo. O transformador possuindo cinco colunas é do tipo núcleo envolvente e com dois enrolamentos por fase. Para efetuar a modelagem utilizando o *FEMM*, o equipamento foi dividido em quatro regiões, conforme descrito a seguir, em função de suas características elétricas e magnéticas [9].

- (1) Núcleo ferromagnético ($\mu \neq \text{constante}$ e $J=0$);
- (2) Enrolamentos ($\mu=0$ e $J \neq 0$);
- (3) Janela do transformador ($\mu=1$ e $J=0$) e;
- (4) Tanque do transformador.

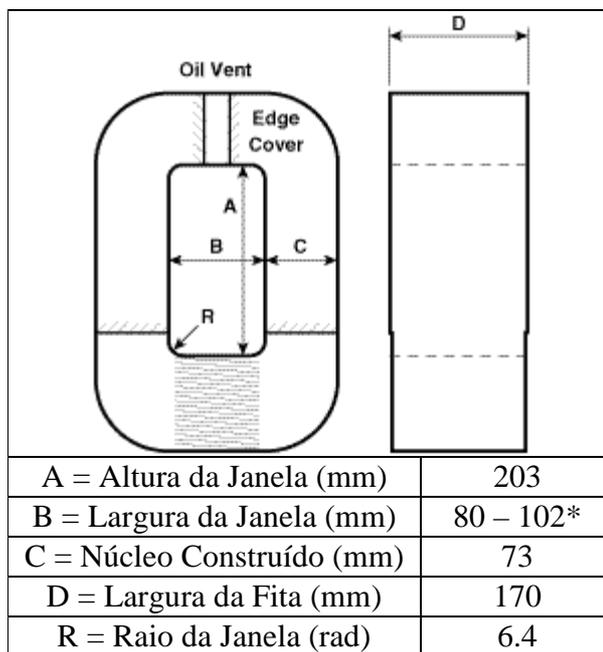
Como dado adicional considerou-se, ainda, que as correntes são igualmente distribuídas ao longo da seção reta dos condutores.

Para implementação computacional utilizando o método dos elementos finitos, exige-se o conhecimento da geometria e das características elétricas e magnéticas do dispositivo, para a completa caracterização do equipamento. Nesse sentido, apresenta-se na tabela 6.1 e na figura 6.1 as principais características geométricas, elétricas e magnéticas do transformador em estudo.

Tabela 6.1: Características dos enrolamentos.

Enrolamento	Externo	Interno
Tensão (V)	220	220
Dimensão cobre (mm ²)	3,5x4,5	3,5x4,5
Densidade de corrente (A/mm ²)	2,58	2,58
Número de espiras	66	66
Perdas nos enrolamentos (W)	190	132
Resistência enrolamentos (Ω)	0,040	0,029
Diâmetro externo (m)	212x10 ³	167x10 ³
Diâmetro interno (m)	193x10 ³	148x10 ³
Altura dos Enrolamentos (m)	155x10 ³	155x10 ³

Para criação do modelo do núcleo foram adotadas cotas obtidas no *site* da *Metglas®*, *Inc.* [50], como apresentado a seguir:



*80 para o menor núcleo / 102 para o maior núcleo

Figura 6.1: Cotas do núcleo amorfo [47]

Na figura 6.2 é apresentada a correspondente curva de magnetização da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa utilizada no núcleo do transformador, sob estudo.

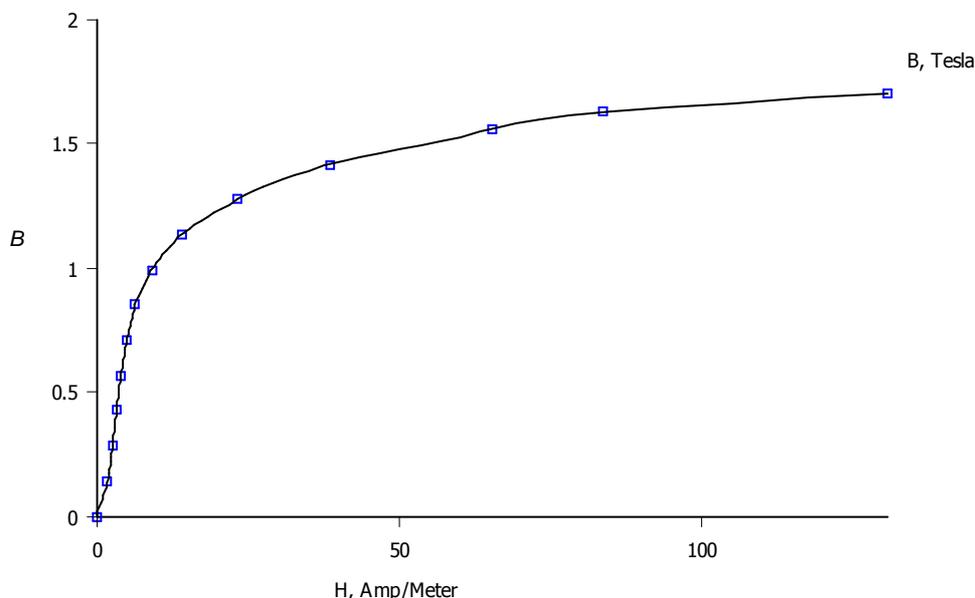


Figura 6.2: Curva de magnetização da $Si_{78}Fe_{13}B_9$ amorfa

Na tabela 6.2 são apresentados alguns pontos representativos da curva de magnetização da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa após tratamento magnetotérmico.

Tabela 6.2: Pontos específicos da curva $B-H$ [39]

Indução magnética $B_{max}(T)$	Intensidade de Fluxo Magnético, H (A.esp/m)
0,1	1,9
0,2	2,7
0,3	3,4
0,4	4,1
0,5	5,1
0,6	6,5
0,7	9,2
0,8	14,2
0,9	23,2
1,0	38,6
1,1	65,6
1,15	83,7
1,2	130,6

Uma vez identificado o transformador de núcleo amorfo, são descritos e discutidos a seguir os resultados obtidos das simulações. Ressalta-se que todos os casos foram simulados em regime quase-estacionário, ou seja, quando a corrente em uma das fases atinge o seu valor máximo.

6.3.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO OPERANDO EM UMA CONDIÇÃO TRANSITÓRIA DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

São realizados estudos computacionais do transformador quando submetido a um curto-circuito trifásico externo, utilizando o modelo já desenvolvido através das características construtivas do transformador amorfo. A malha de elementos finitos gerada para a estrutura do transformador amorfo em estudo está ilustrada na figura 6.3

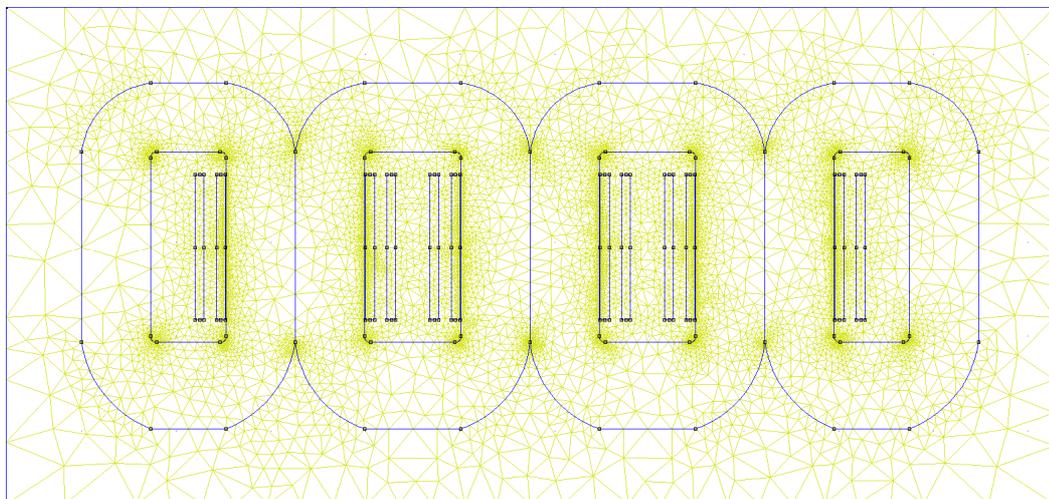


Figura 6.3: Malha de elementos finitos bidimensional do transformador amorfo de 15 kVA.

Para a simulação da condição transitória de curto-circuito utilizou-se a corrente nominal calculada pela equação (4.1), igual 2558 A, utilizando-se um fator de assimetria de 1,6 e tendo o valor da impedância do transformador em percentual de 3,47%, conforme é apresentado na figura 6.4.

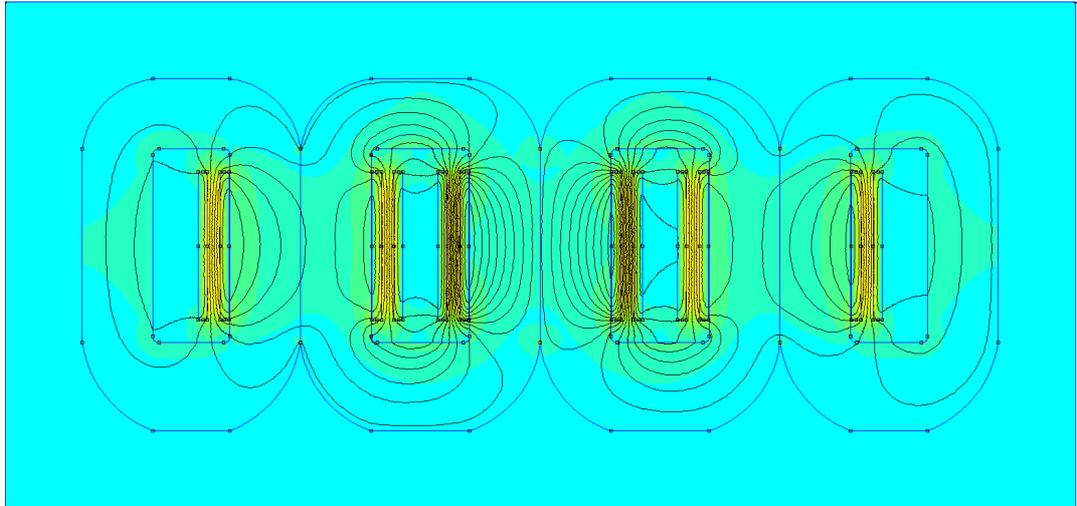


Figura 6.4: Densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador durante o curto-circuito.

Verifica-se que a distribuição de fluxo magnético no interior do transformador sofre alteração do seu caminho preferencial (núcleo magnético), passando a circular parcialmente pela janela. Partindo desta simulação, são extraídos dados pertinentes para a análise do fenômeno físico, como a distribuição do fluxo magnético entre os enrolamentos externos e internos, distribuição do fluxo axial, distribuição de fluxo radial e as Forças de Lorentz.

Na Figura 6.5, a seguir, o gráfico apresenta a variação do fluxo magnético axial em função da distância entre os extremos dos enrolamentos na fase central, onde é máximo na zona de ar entre enrolamentos (vide ilustração da figura 4.3), cujo valor atinge os 1,924 Tesla podendo também ser observado que este valor diminui linearmente do centro para os extremos dos enrolamentos.

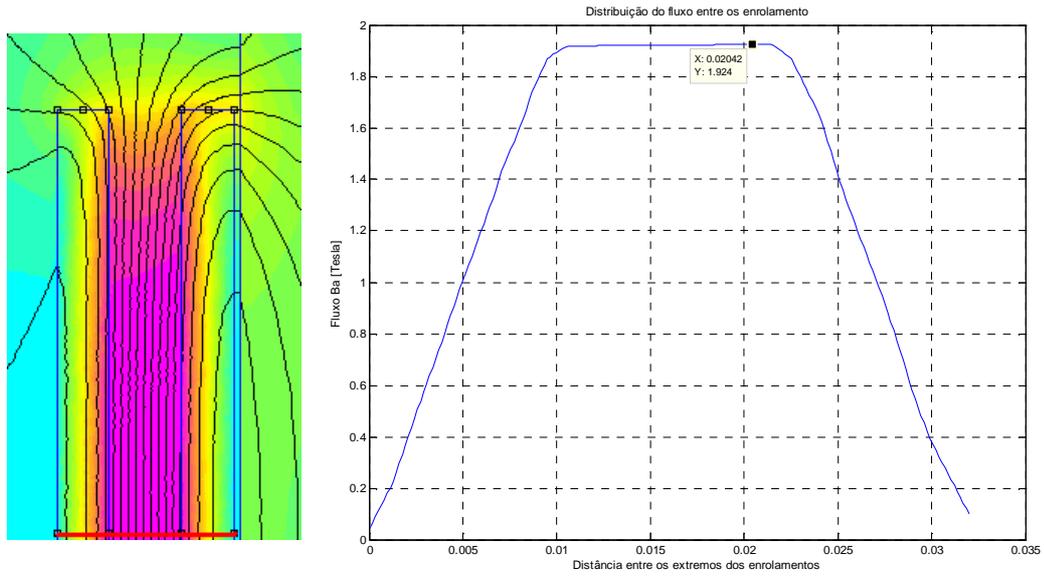


Figura 6.5: Resultado distribuição do fluxo entre os enrolamentos o *FEMM*.

Na figura 6.6 é apresentado gráfico da distribuição do campo magnético axial ao longo (altura) dos enrolamentos externo e interno na fase central onde os valores máximos para os enrolamentos externo e interno são de aproximadamente 0,97 Testa e 0,98 Tesla, respectivamente, dentro de padrões estabelecidos nas referências [41] e [48].

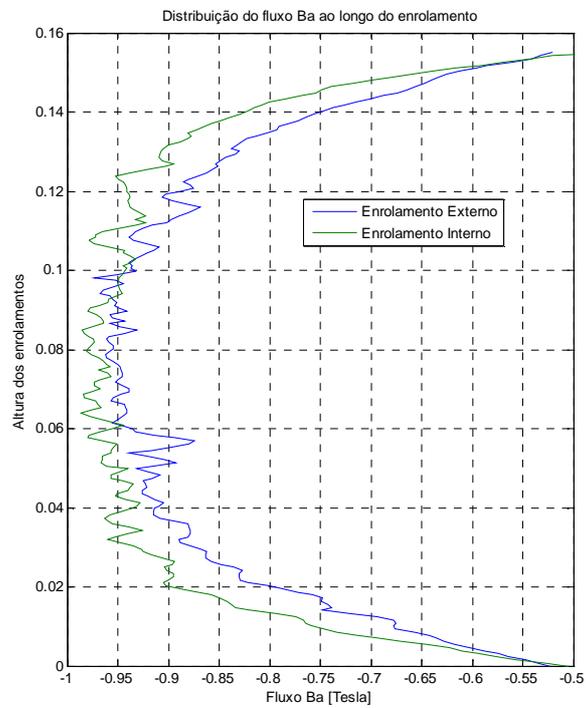


Figura 6.6: Distribuição do fluxo axial

Na Figura 6.7 é apresentado o gráfico da distribuição do fluxo radial ao longo dos enrolamentos, observa-se que a componente radial é praticamente zero, exceto nos extremos (superior e inferior) dos enrolamentos, sendo o contrário observado na componente axial (figura 6.6).

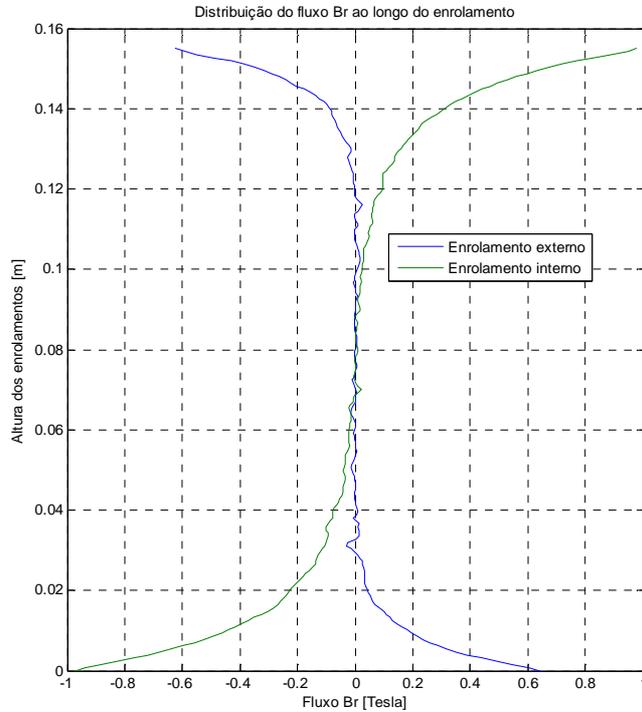


Figura 6.7: Distribuição do fluxo radial

Nas figuras 6.8 e 6.9 são apresentadas as forças eletromagnéticas radiais e axiais, nos enrolamentos externo e interno, nos instantes em que a corrente apresenta valor máximo na fase central, correspondentes às condições anteriormente descritas, calculadas a partir do bloco do *FEMM* Forças de Lorentz.

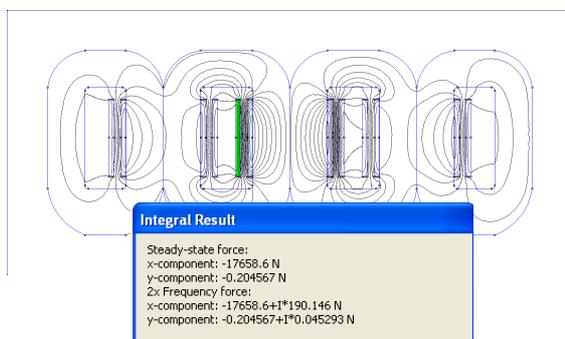


Figura 6.8: Força axial e radial no enrolamento externo: curto-circuito.

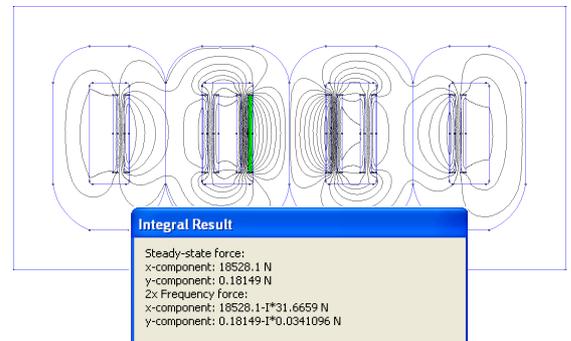


Figura 6.9: Força axial e radial no enrolamento interno: curto-circuito.

Observa-se que os valores obtidos para as forças radiais e axiais no enrolamento externo foram de aproximadamente 17,65 kN e 0,2 N, respectivamente; pode-se observar também que a intensidade da força radial do enrolamento interno é cerca de 18,52 kN e da força axial é 0,18 N.

Na tabela 6.3 é apresentada uma síntese dos resultados comparando os valores do método analítico com o método numérico para o transformador de núcleo amorfo e também são apresentados os dados obtidos na referência [1] para o transformador de FeSi de 15 kVA. É importante enfatizar que somente os resultados das forças eletromagnéticas na direção radial estão mostrados na tabela. Justifica-se este fato pela dificuldade em se obter os dados para os cálculos analíticos das forças axiais necessários para utilização nas formulações apresentadas [40].

Tabela 6.3: Comparação entre simulação e os cálculos analíticos dos Transformadores de núcleo amorfo e de FeSi.

	Método Analítico	Método Numérico
<i>Núcleo Amorfo</i>	<i>Força Radial (kN)</i>	<i>Força Radial (kN)</i>
Enrolamento Externo	19,06	17,65
Enrolamento Interno	18,25	18,52
<i>Núcleo FeSi</i>	<i>Força Radial (kN)</i>	<i>Força Radial (kN)</i>
Enrolamento Externo	16,35	14,83
Enrolamento Interno	11,15	11,69

Os resultados obtidos primeiramente mostraram uma forte correlação existente entre os métodos analíticos e os numéricos, o que de certa forma evidencia a validação de tais resultados baseada no uso do software FEMM, aqui apresentado. Em um segundo momento observa-se o aumento das forças radiais de origem magnética quando os materiais amorfos são utilizados no núcleo dos transformadores, quando estes equipamentos estão sujeitos às condições de stress na rede de energia elétrica. Isto se deve às suas características construtivas, pois os mesmos apresentam uma área de secção maior quando comparados aos transformadores de núcleo de FeSi (GO) .

6.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os passos para a modelagem computacional de um transformador trifásico com núcleo de liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ amorfa, utilizando o método de elementos finitos. Posteriormente foi realizada a análise de perdas no núcleo amorfo em busca de um comparativo com um transformador de características semelhantes a FeSi(GO) , comprovando que os transformadores de metal amorfo economizam energia e isto se deve ao uso do metal amorfo na fabricação do núcleo, um vez que este consegue reduzir as perdas em vazio quando comparado ao grau de perdas apresentado pelo FeSi (GO) convencional.

Após análise de perdas, partiu-se para a análise de esforços eletromecânicos quando submetidos a correntes transitórias de curto-circuito trifásico. Foi constatado uma grande aproximação dos resultados obtidos pelo *FEMM* e os resultado analíticos provando um bom desempenho do programa nas simulações, sendo apresentados não tão somente dados de esforços eletromecânicos do transformador de núcleo amorfo proposto neste trabalho como dados de um transformador de FeSi obtidos da referência [1], onde observa-se que nos transformadores amorfos estes esforços eletromecânicos apresentam-se com maior intensidade devido à maior dimensão que seu núcleo tem em comparação ao núcleo de FeSi .

Observa-se também que os gráficos de densidade de campo magnético mostraram que quando correntes elevadas circulam nos enrolamentos concêntricos durante os curtos-circuitos, alteram o caminho do fluxo, provocando um acréscimo significativo do campo de dispersão e conseqüentemente das forças radiais.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1 CONCLUSÕES

Na presente dissertação foram analisado o desempenho de transformadores que possuem núcleo de liga amorfa sobre o enfoque do método de elementos finitos. Também foram apresentadas as principais falhas que acometem os transformadores, onde foi observado que um quantitativo significativo destas falhas está relacionado com curtos-circuitos, apresentando também as principais características dos transformadores de núcleo amorfo, buscando elucidar as características físico-químicas e o processo de fabricação com o objetivo de comparar seu desempenho em relação aos transformadores convencionais de ferro-silício.

O primeiro passo foi a modelagem matemática, logo após, partiu-se para implementação do modelo computacional. Para tal análise utilizou-se o software *FEMM*, desenvolvido por David Meeker, que utiliza o método de elementos finitos para análise dos fenômenos eletromagnéticos em 2D, tornando-se necessária a inserção de todos os dados inerentes ao transformador de núcleo amorfo funcionando com regime transitório de curto-circuito trifásico, o pré-processamento. Após o pré-processamento, o software realizou internamente a representação matricial de cada elemento e formação da matriz de coeficientes global para a solução do problema diferencial, esta etapa consistiu-se no processamento.

Concluído o processamento, passou-se para os dados do pós-processamento, os quais, os transformadores, operando em regime transitório de curto-circuito, com os enrolamentos em condições ideais, o enfoque dado foi para a comparação da precisão do método analítico e o método numérico, o MEF, através do bloco *Força de Lorentz* do *FEMM*. Observou-se então que os dados obtidos com o *FEMM* apresentam grande

aproximação com os do método analítico, tanto para o transformador amorfo, quanto para o transformador de FeSi, proposto na referência [1].

É importante notar que embora a adoção da tecnologia das ligas amorfas em núcleos de transformadores tenha se consolidado em diversos países, estudos sistemáticos sobre a redução das perdas continuam sendo realizados e publicados em periódicos e eventos técnicos e científicos.

7.2 SUGESTÕES S PARA FUTUROS TRABALHOS

Futuros trabalhos que podem ser desenvolvidos, como subprodutos do atual, envolvem principalmente as diretrizes a seguir:

- Ampliação das fronteiras de investigação do comportamento de transformadores em regimes transitórios de curto-circuito bifásico sem contato com a terra, curto-circuito bifásico com contato a terra, curto-circuito monofásico utilizando o MEF.
- Estudo do comportamento dos transformadores amorfos em regimes transitórios quando os enrolamentos não estão em condições ideais através do MEF, utilizando dados precisos de fabricantes, quanto a números de voltas e altura da variação dos Tap's.
- Utilização do MEF para modelar motores, geradores e antenas que utilizem material amorfo comparando com os equipamentos convencionais buscando dados comparativos de vantagens e desvantagens.
- Estudo da implantação de transformadores amorfos nos sistemas de distribuição no Estado do Pará, tanto nas redes urbanas como nas redes rurais.
- Modelagem de equipamentos em 3D para análise utilizando o Método de Elementos Finitos, método de arestas ou outro adequado à análise 3D.

REFERÊNCIAS

- [1] AZEVEDO, A. C. **Estresse Eletromecânico em Transformadores causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Correntes de Energização**, (Tese de Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [2] DUWEZ, P. (1981). **Metallic glasses – historical background**. Topics in Applied Physics, Vol. 46, p. 19- 23.
- [3] CHEN, H. S. e POLK (1974), D. E. U. S **Patent No.3856513**.
- [4] CAMPOS, M.L. **Estudo de Aplicação Experimental e Viabilidade de Utilização de Transformadores de Distribuição com Núcleo Amorfo**, (Dissertação de Mestrado), Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2006.
- [5] FISH, G. E. **Soft magnet materials**. Proceedings of the IEEE, Vol. 78, nº6, pp. 974-972, 1990.
- [6] **Release Hitachi de 20 de Outubro de 2005** (<http://www.hitachimetals.co.jp/e/press/news/2005/n1020.htm>).
- [7] MCNUTT, W. J.; JONSON, W. M.; NELSON, R. A.; AYERS, R. E. Power transformer short-circuit strength: Requirements, design and demonstration. IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, PAS89, 1970.
- [8] YUN-QIU, T.; JING-QIU, Q.; ZI-HONG, X. **Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformers winding**. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, n. 2, p. 1039-1041, March 1990.
- [9] NAJDENSKOSKI, K.; MANOV, D. **Electromagnetic forces calculation on power transformer windings under short circuits**. *The International Journal Computation Mathematics in Electrical and Electronics Engineering*, v. 17, n. 1/2/3, p. 374-377, May/June 1998.
- [10] SALON, S.; LAMATTINA, B.; SIVASUBRAMANIAM, K. **Comparison of assumptions in computation of short circuit forces in transformers**. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 36, n. 5, p. 3523, September 2000.
- [11] RENYUAN, T.; DAKE, L.; LIJIAN, T. Numerical calculation of 3D transient eddy current field and short circuit electromagnetic force in large transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 28, n.2, p. 1418-1421, March 1992.
- [12] MURAKAMI, H.; HOSOKAWA, N.; NAKATSUKA, S.; BANJOYA, N.; HISHI, A.; TAKANO, M. **Short circuit strength of shell-form transformer**. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, v. 3, 2001.

- [13] CHRISTOFEEL, M.; KUSTER, A. **Calculation of short-circuit stress in transformers windings with the aid of digital computers.** *The Brown Boveri Review*, v. 47, n. 5/6, p. 3521-3523, May/June 1960.
- [14] PATEL, M. R. **Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces: Part 1 - winding and clamp as individual components.** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 92, 1973.
- [15] PATEL, M. R. **Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces: Part 2 - winding and clamp as combined system.** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 92, 1973.
- [16] LIANG, Z.; LI, J.; TANG, R. **Axial vibrations of windings under short circuit conditions.** *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems*, v. 1, 2003.
- [17] WANG, Z. Q.; WANG, M.; GE, Y. Q. **The axial vibrations of transformer winding under short circuit condition.** *International Conference on Power System Technology*, v. 3, 2002.
- [18] WANG, H.; BUTLER, K. Finite element analysis of internal winding faults in distribution transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 3, p. 422-428, July 2001.
- [19] WANG, H.; BUTLER, K. **Modeling transformers with internal incipient faults.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 2, o. 500-509, April 2002.
- [20] WANG, M.; VANDERMAAR, A.; SRIVASTAVA, K. **Review of condition assessment of power transformers in service.** *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 12-25, December 2002.
- [21] BARTLEY, W. H. **Analysis of transformer failures.** 36th Annual Conference of IMIA - The International Association of Engineering Insurers, v. 1, n. 1, p. 1 - 12, September 2003.
- [22] BJERKAN, E. **High frequency modeling of power transformers.** Tese (Doutorado), Norwegian university of Science and Technology, Maio 2005.
- [23] BROCHURE CIGRE WG 12.19. **The Short Circuit Performance of Power Transformers.** [S.l.], 2002.
- [24] DELAIBA, A. C. **Comportamento de transformadores com cargas não lineares: uma abordagem analítica, experimental e numérica pelo método dos elementos finitos.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Junho 1997.
- [25] RIBEIRO, C. F.; ÁLVARES, M. V. A.; ORTEGA, B. G. P. **Contribuição ao estudo e aplicação de transformadores de distribuição no sistema elétrico da COELBA.** II Congresso de inovação tecnológica em energia elétrica, 2003.

- [26] RIBEIRO, R. M. **Estudo da Cinética de Cristalização de Ligas Metálicas Amorfas a Base de Fe-B-Si**, (Dissertação de Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, 2005.
- [27] BENJAMIN, J. S.; VOLIN, T. E. “**The Mechanism of Mechanical Alloying**”, Metallurgical Transactions, v. 5, pp. 1929-1934, 1974.
- [28] PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia – Microestrutura e propriedades**. Hemus editora, São Paulo, 1997.
- [29] NARASHIMHAN, M. C. : U.S. **Patent nº 41425771**, 1979.
- [30] LUCIANO, B. A. e KIMINAMI, C. S. **Transformador com núcleo de material amorfo: efeito do tratamento magnetotérmico**. São Pedro: Anais do 50º Congresso Anual da ABM, p. 25-39, 1995.
- [31] LUCIANO, B. A.; FREIRE, R.C.S.; INÁCIO, R.C.; Batista, T.C.; CAMACHO, M.A.G.; **Eficiência Energética Associada aos Transformadores com Núcleo de Liga Amorfa**. III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2009.
- [32] LUCIANO, B. A.; **Estudo de aplicações da liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa em núcleos de transformadores de baixa potência**. Campina Grande, 115 p. Tese (Doutorado) – Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, 1995.
- [33] LUCIANO, B.A.; FREIRE, R.C.S.; BEZERRA, R.B.; INÁCIO, R.C.; **Transformadores com Núcleo de Liga Amorfa em Sistemas de Distribuição**, Revista Eletricidade Moderna, p.88-99, Janeiro 2010.
- [34] FRAU, J. Eficiencia en transformadores. II Jornadas Internacionales de Innovación Energética. (http://catedraendesared.citcea.upc.edu/jornades/jiie2006/ponencias/eficiencia_trafos.pdf). Julio 2006.
- [35] NG, H. W., HASEGAWA, R., LEE, A. C., LOWDERMILK, L. A. Amorphous alloy core distribution transformer. Proceedings of the IEEE, Vol. 79, No.11, p. 1608-1623, 1991.
- [36] Hasegawa, R. e Pruess, D. C. (2001). Impact of amorphous metal based transformers on efficiency and quality of electric power distribution. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Vol. 3, p. 1820-1823.
- [37] Hasegawa, R. (2004) Advances in amorphous end nanostructured materials. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol.6, No. 2, p. 503-510.
- [38] KULKARNI, S. V., KHAPARDE, S. A., “**Transformer Engineering - Design and Practice**”, Marcel Dekker, Inc, New York, 2004.

- [39] HEATHCOTE, J. M., “**J&P Transformer Book**”, 12th ed., Oxford, Elsevier Science Ltd, 1998.
- [40] WATERS, M., “**The Short-Circuit Strength of Power Transformers**”, McDonald & Co. Ltd, London, 1966.
- [41] **IEC 60076-5:2006** Ability to withstand short circuit.
- [42] BERTAGNOLLI, G. **Short – Circuit Duty of Power Transformers** 2nd Edition, ABB Trasformatori, Milano, Italy, 1998.
- [43] GIBBS, J. B. **Transformer: Principles and Practice**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1950.
- [44] PATEL, M. R. **Instability of the continuously transposed cable under axial short-circuit forces in transformers**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n. 1, p. 149 – 154, January 2002.
- [45] SILVESTER, P.P.; CHARI, M. V. K.; “**Finite elements Solution for Saturable Magnetic Fields Problems**”, 1970, IEEE Trans. Power, USA.
- [46] BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**. 2. ed. [S.l.]: UFSC, 1992.
- [47] MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics - User’s Manual Version 4.2** (Página da Web). Fevereiro 2009. <http://www.femm.info/wiki/Documentation>.
- [48] JAMALI, S.; ARDEBILI, M.; ABBASZADEH, K. (2005). “**Calculation of Short Circuit Reactance and Electromagnetic Forces in Three Phase Transformer by Finite Element Method**”. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Vol. 3, 27-29 Sept. 2005 Page(s):1725 – 1730.
- [49] ARTURI, C. **Force calculation in transformers windings under unbalanced mmf’s by a non-linear finite element code**. IEEE Transactions on Magnetics, v. 28, n. 2, p. 1363–1366, March 1992.
- [50] http://www.metglas.com/products/page5_1_5_1.htm.

APÊNDICE A

CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DO NÚCLEO AMORFO

METAIS AMORFOS Material Magnético

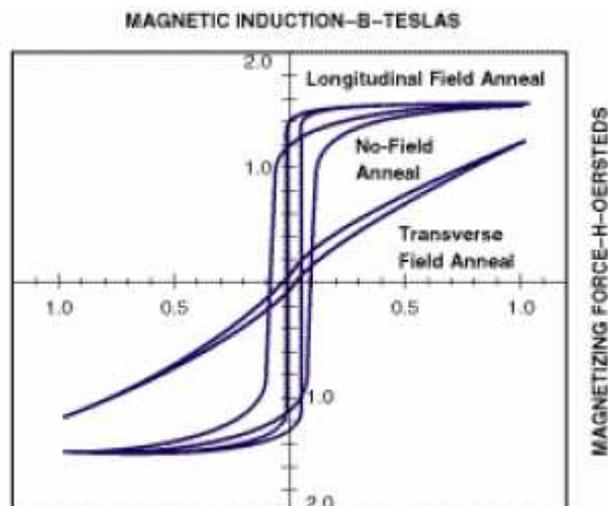
ALLIED SIGNAL METGLAS® Magnetic Alloy 2605SA1 (Iron-based)

Aplicações:

- Transformadores de distribuição e potência
- Motores
- Indutores de alta frequência
- Transformadores corrente
- Dispositivos que requer alta permeabilidade e baixas perdas em baixas frequências

Benefícios:

- Perdas no núcleo extremamente baixas – abaixo de 0,29 w/kg a 60 Hz, 1,35 Tesla, ou 40% de perdas no núcleo da categoria M3 de aço elétrico (perda do núcleo em 50 Hz é aproximadamente 80% de valores de 60 Hz) para núcleo acabado.
- Alta permeabilidade

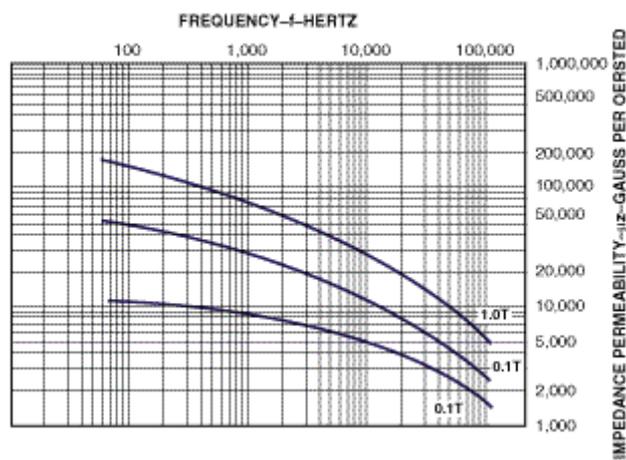


Propriedades Magnéticas:

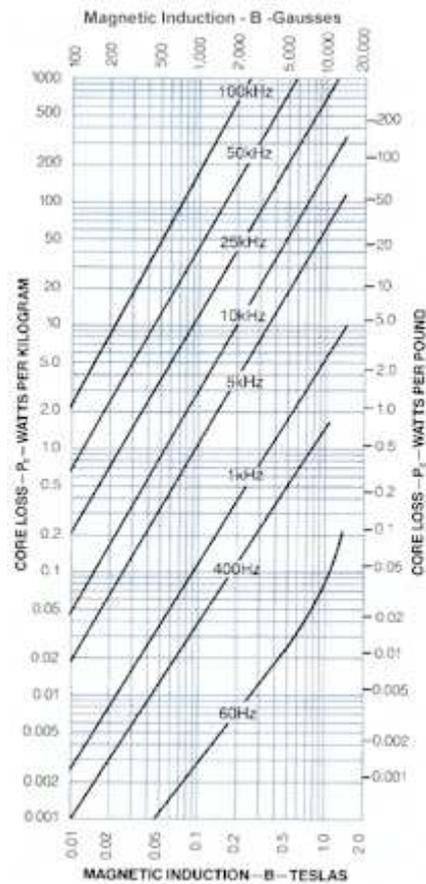
- Indução magnética (T) - Moldado..... **1,56**
- Permeabilidade máxima C.C (μ)
 - Recozido..... **600.000**
 - Moldado..... **45.000**
- Magnetostricção (ppm)..... **27**
- Resistividade (μΩ.cm)..... **130**
- Temperatura de Curie (°C)..... **399**

Propriedades Físicas:

- Densidade (g/cm³) - Moldado..... **7,18**
- Dureza de Vicker (50g de carga)..... **900**
- Resistência à tensão (GPa)..... **1-2**
- Modulo elástico (GPa)..... **100-110**
- Fator de laminação (%)..... **>82**
- Expansão térmica (ppm/°C)..... **7,6**
- Temperatura de cristalização (°C)..... **508**
- Temperatura de serviço contínuo (°C)..... **150**



Curvas Típicas de Permeabilidade, Campo Longitudinal de Recozimento
Liga METGLASS 2605SA1



Curvas Típicas de Perdas no Núcleo, Campo Longitudinal de Recozimento
Liga METGLASS 2605SA1