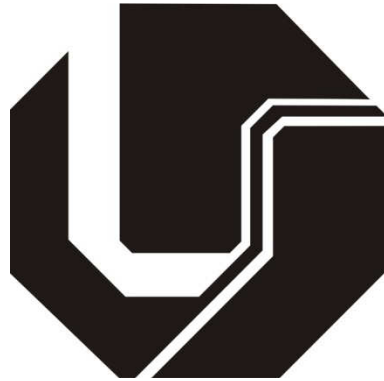


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



TESE DE DOUTORADO

**SUORTABILIDADE MECÂNICA E VIDA ÚTIL DE
TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A CORRENTES DE
ENERGIZAÇÃO E DE CURTO CIRCUITO**

RONALDO GUIMARÃES

OUTUBRO, 2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SUORTABILIDADE MECÂNICA E VIDA ÚTIL DE
TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A CORRENTES DE
ENERGIZAÇÃO E DE CURTO CIRCUITO**

**Tese submetida à Universidade
Federal de Uberlândia por Ronaldo
Guimarães como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título
de Doutor em Ciências.**

Banca Examinadora:

Antônio Carlos Delaiba, Dr. - Orientador - (UFU)

Cícero Couto de Moraes, Dr. - (Escola Politécnica - USP/SP)

Ana Cláudia de Azevedo, Dr. - (IFMT – Cuiabá/MT)

José Carlos de Oliveira, PhD. - (UFU)

Carlos Eduardo Tavares, Dr. - (UFU)

**Antônio Carlos Delaiba
Orientador**

**Edgard Afonso Lamounier Júnior
Coordenador do Curso de Pós-
Graduação**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Osmar (em memória) e Darcy (em memória), ao meu irmão Wainer, à minha cunhada Márcia, aos meus sogros Elcio (em memória) e Guiomar e à minha esposa Marta, pela compreensão e incentivo dedicados a mim para a realização deste trabalho e pela compreensão nos momentos ausentes.

AGRADECIMENTOS

Ao professor **Antônio Carlos Delaiba** meus sinceros agradecimentos pelo apoio, paciência, incentivo e colaboração durante esta intensa convivência profissional. Agradeço também, pela amizade e confiança dispensada, que, com toda certeza, estão além da conclusão do curso de doutorado.

Ao professor **José Carlos de Oliveira** pelos conhecimentos a mim transmitidos, juntamente com toda a paciência e apoio no desenvolvimento e compreensão sobre o assunto aqui estudado.

Ao professor **Domingo Alves Rade** pelo tempo a mim dispensado, em seus ensinamentos sobre elementos finitos e conceitos de engenharia mecânica, além de todo o apoio para a obtenção de referências bibliográficas, indispensáveis para a conclusão do trabalho.

Ao professor **Hercio Cândido de Queiroz** pelo tempo a mim dispensado, nas atividades de laboratório e em seus ensinamentos sobre estruturas de vigas, indispensáveis para a conclusão do trabalho.

Aos amigos e companheiros de projeto, **Elise Saraiva** e **Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior** pelas conversas e discussões sobre os assuntos relacionados ao tema dessa tese, e que foram fundamentais para o desenvolvimento da mesma.

Aos amigos: **Larissa, Lucas, Paulo César e Afonso** pelo companheirismo e importante apoio que me deram durante os trabalhos.

Aos demais amigos, colegas e professores, que apesar de não terem sido citados aqui, também estão presentes nestes agradecimentos.

À **Cinara Fagundes P. Mattos** pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da pós-graduação.

À **Chesf**, que através do Projeto de P&D “Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (“Inrush”) e de Curtos-Circuitos “Passantes”, contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento desta tese.

À **CAPES** pelo apoio financeiro.

De quem e de que, de fato, posso dizer "conheço isso"? Este coração, em mim, posso experimentá-lo e julgo que ele existe. Este mundo, posso tocá-lo e julgo ainda que ele existe. Para aí toda a minha ciência. O resto é construção.

(Albert Camus)

RESUMO

Transformadores de potência são dispositivos essenciais aos sistemas elétricos e constituem-se num dos seus componentes de maior custo. Entretanto, verifica-se ainda, grandes carências e lacunas a serem exploradas quando se trata do estudo dos efeitos danosos ocorridos em seus enrolamentos em função dos elevados esforços eletromecânicos internos. Dentre elas, destaca-se a escassez de trabalhos que abordam temas voltados para a obtenção de curvas de suportabilidade mecânica de enrolamentos de transformadores. Neste sentido, esta tese tem por objetivo propor uma metodologia analítica para estimar os limites de suportabilidade mecânica de enrolamentos de transformadores e produzir curvas que permitem analisar a redução de vida útil do equipamento, quando estes são submetidos a elevados esforços advindos das correntes de energização e de curto circuito externo. Complementando os aspectos citados, os valores obtidos pela metodologia analítica são confrontados com os resultados experimentais e aqueles oriundos de simulações computacionais. Para as análises e os estudos vinculados com os aspectos mecânicos utilizou-se um programa reconhecido internacionalmente baseado no método dos elementos finitos na sua versão tridimensional (COMSOL).

Palavras-Chave: Transformadores de Potência, Estresses Eletromecânicos, Curvas de Suportabilidade Mecânica, Vida Útil de transformadores, Metodologia Analítica, Método dos Elementos Finitos.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais	01
1.2 - Estado da arte	03
1.2.1 - Quanto aos Curtos-Circuitos.....	03
1.2.2 - Quanto à Corrente de Energização.....	07
1.2.3 - Quanto aos Aspectos Mecânicos	08
1.3 - Motivação para a Presente Pesquisa	09
1.4 - Contribuições desta Tese.....	13
1.5 – Estrutura da Tese.....	14

CAPÍTULO 2

ESTRESSE ELETROMECAÂNICO EM TRANSFORMADORES CAUSADOS PELAS CORRENTES DE CURTOS-CIRCUITOS “PASSANTES”

2.1 - Considerações Iniciais	18
2.2 - Correntes de Curto-Circuito	19
2.3 - Falhas Eletromecânicas em Transformadores	21
2.3.1 - Forças Radiais.....	21
2.3.2 - Forças Axiais.....	23
2.4 - Forças Eletromagnéticas e Estresses Eletromecânicos: Abordagem Analítica.....	24
2.4.1 - Cálculo Analítico das Forças Radiais em Enrolamentos Concêntricos.....	24
2.4.2 - Cálculo Analítico das Forças Axiais em Enrolamentos	

Concêntricos.....	26
2.4.3 – Esforço Devido à Carga Axial.....	29
2.5 - Estratégias de Comparação	30
2.5.1 - O Pacote Computacional	31
2.5.2 - Características Construtivas do Transformador.....	32
2.5.3 - Modelagem do Transformador.....	36
2.5.4 - Análise do Transformador Sob Curto-Circuito Trifásico.....	37
2.6 - Considerações Finais	47

CAPÍTULO 3

ESFORÇOS ELETROMECHANICOS EM TRANSFORMADORES CAUSADOS PELA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO (“INRUSH”)

3.1- Considerações Iniciais	49
3.2 - Caracterização da Corrente “Inrush”.....	50
3.2.1 - Estimativa da Amplitude do Primeiro Pico da Corrente de “Inrush”	51
3.2.2 - Estimativa da Atenuação da Amplitude da Corrente de “Inrush”	54
3.3 - Estresse Eletromecânico e Tipos de Falhas em Transformadores.....	56
3.3.1 - Força Radial.....	57
3.3.2 - Força Axial.....	58
3.4 - Esforços Eletromecânicos: Abordagem Analítica	60
3.4.1 - Cálculo Analítico das Forças Radiais.....	60
3.4.2 - Cálculo Analítico das Forças Axiais.....	61
3.5 - Aplicação da Metodologia Analítica	62
3.6 - Resultado Experimental da Energização.....	63
3.7 - Desempenho Computacional Através da Técnica de Modelagem por Elementos Finitos	65
3.7.1 - Modelagem do Transformador no FLUX 3D.....	65
3.7.2 – Simulações Computacionais.....	66
3.8 - Validação da Metodologia Analítica Proposta.....	67

3.9 - Considerações. Finais.....	69
----------------------------------	----

CAPÍTULO 4

CURVA DE SUPORTABILIDADE MECÂNICA E VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES

4.1 - Considerações Iniciais.....	70
4.2 - Tensão Mecânica e Deformação – Conceitos Básicos.....	71
4.2.1 - Tração.....	71
4.2.2 - Flexão em Vigas Bi-engastadas.....	75
4.3 - Esforços Mecânicos em Transformadores.....	77
4.3.1 - Limite da Suportabilidade ($\sigma_{0,2}$).....	80
4.3.2 - Tensão de Compressão nos Espaçadores.....	81
4.3.3 - Tensão de Flexão Axial por Fio.....	81
4.4 - Força de Inclinação (Tilting)	82
4.5 - Esforço Radial	83
4.5.1 - Tensão de Deformação Radial.....	85
4.6 - A Vida Útil do Enrolamento sob Condições de Fadiga	87
4.6.1 - Curvas σ - N_C (estresse x número de ciclos)	88
4.6.2 - Resistência à Fadiga ou Vida em Fadiga.....	90
4.6.3 - Limite de Resistência à Tração e Limite de Resistência à Fadiga.....	90
4.6.4 - Estimativa da Curva σ - N_C	93
4.7 - O Dano Cumulativo	97
4.8 - Cálculos Utilizados para o Transformador de Grande Porte	100
4.8.1 - Os Cálculos de Tração para o Cobre Utilizado no Transformador de Grande Porte	101
4.8.2 - Cálculo da Flecha para uma Força Axial ($\sigma_{0,2}$).....	101
4.8.3 - Cálculo de uma Flecha para Força Radial.....	103
4.8.4 - Curva de Vida Útil para o Transformador de Grande Porte	105
4.9 - Considerações Finais	112

CAPÍTULO 5

ENSAIOS LABORATORIAIS

5.1 - Considerações Iniciais	114
5.2 - Arranjo Laboratorial	115
5.2.1 - Equipamento Utilizado	115
5.2.2 - Corpo de Prova.....	117
5.3 - Realização dos Ensaios.....	118
5.3.1 - Procedimentos.....	118
5.3.2 - Análise dos Resultados.....	120
5.3.3 - Comparação entre os Ensaios Laboratoriais e os Resultados Obtidos pela Metodologia Analítica.....	122
5.4 - Considerações Finais.....	123

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

6.1 - Considerações Iniciais	125
6.2 - Plataforma Computacional	126
6.3 - Caracterização do Transformador Utilizado.....	127
6.4 - Modelagem da Coluna do Transformador no Programa COMSOL	129
6.5 - Modelagem da Espira em Forma de Viga	130
6.5.1 - Definição da Propriedade dos Materiais	130
6.5.2 - Definição das Condições Fronteiras entre Materiais	132
6.5.3 - Criação dos Elementos de Malha	133
6.6 - Simulações Computacionais Associadas com a Suportabilidade Mecânica	134

6.7 - Simulações Computacionais Vinculadas com a Redução de Vida Útil de Transformadores	143
6.7.1 - Suportabilidade Mecânica à Flexão Radial no Enrolamento Interno.....	145
6.7.2 - Suportabilidade Mecânica à Flexão Radial no Enrolamento Externo	150
6.8 - Considerações Finais	154

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Conclusões	156
Sugestões para Trabalhos Futuros	161

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
---	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Origem das falhas em transformadores de subestações e de usina.....	10
Figura 1.2 - Taxa de falha em transformadores – Brasil	11
Figura 1.3 - Percentual da taxa de falha por componente (1996)	11
Figura 2.1 - Situação de máxima assimetria da corrente de curto-circuito trifásico	20
Figura 2.2 - Forma de onda da força eletromagnética imposta nos enrolamentos	20
Figura 2.3 - Efeitos típicos de estresse eletromecânico nos enrolamentos causados por forças radiais	22
Figura 2.4 - Efeitos típicos de estresse eletromecânico nos enrolamentos causados por forças axiais	23
Figura 2.5 - Curvas de compressão axial para enrolamentos concêntricos sem derivação	27
Figura 2.6 - Fotografia do transformador de 15 kVA utilizado	32
Figura 2.7 - Características geométricas e físicas do transformador analisado (vista superior)	33
Figura 2.8 - Características geométricas e físicas do transformador analisado (vista frontal)	34
Figura 2.9 - Características construtivas do transformador analisado (vista lateral)	34
Figura 2.10 - Modelo do transformador implementado no FLUX 3D	36
Figura 2.11 - Circuito implementado para a simulação na condição de curto-circuito trifásico “passante”	37
Figura 2.12 - Formas de onda das correntes nas três fases dos enrolamentos externos e internos	38
Figura 2.13 - Distribuição do fluxo de dispersão no transformador para a condição de curto-circuito trifásico.....	39
Figura 2.14 - Formas de onda das densidades de fluxos de dispersão nas três fases do transformador	40
Figura 2.15 - Forças radiais totais nos enrolamentos internos	41
Figura 2.16 - Forças radiais totais nos enrolamentos externos	42

Figura 2.17 - Forças axiais compressivas totais	43
Figura 2.18 - Forças axiais compressivas totais nos enrolamentos internos	44
Figura 2.19 - Forças axiais compressivas totais nos enrolamentos externos	45
Figura 2.20 - Estresses eletromecânicos nos enrolamentos (a) interno e (b) externo	47
Figura 3.1 - Energização de transformador em vazio	50
Figura 3.2 - Forma de onda típica da corrente transitória de energização de transformadores	51
Figura 3.3 - Corrente transitória de energização em um banco de transformadores conectado em $Y - \Delta$	54
Figura 3.4 - Sentido da força radial no enrolamento de alta tensão em um transformador durante sua energização (“inrush”)	57
Figura 3.5 - Representação da compressão axial em um enrolamento do transformador durante sua energização (“inrush”)	58
Figura 3.6 - Compressão axial dos enrolamentos: (a) durante a energização e (b) durante um curto-circuito	59
Figura 3.7 - Arranjo laboratorial para os testes de energização	63
Figura 3.8 - Correntes de linha durante a energização do transformador – resultado experimental	64
Figura 3.9 - O transformador modelado	65
Figura 3.10 - Formas de onda das correntes “inrush” – simulações	66
Figura 3.11 - Níveis de indução magnética no núcleo durante a energização	67
Figura 4.1 - Alongamento produzido por uma carga de tração com tensão linear positiva	72
Figura 4.2 - Gráfico tensão-deformação de um material metálico	73
Figura 4.3 - Viga bi-engastada	75
Figura 4.4 - Flecha produzida pelo alongamento no material	76
Figura 4.5 - Detalhe de um enrolamento tipo disco típico	78
Figura 4.6 - Distribuição dos enrolamentos e espaçadores em uma coluna de transformador	78
Figura 4.7 - Tipos de fio e cabo utilizados em enrolamentos de transformadores	79
Figura 4.8 - Carga de prova do cobre para vários níveis de dureza	80
Figura 4.9 - Geometria da inclinação da barra devido à força axial de	

compressão	83
Figura 4.10 - Geometria para a determinação da tensão radial dentro de um cilindro	84
Figura 4.11 - Geometria para determinar a tensão de deformação radial	86
Figura 4.12 - Superfície fraturada por fadiga	88
Figura 4.13 - Variação da tensão com o tempo	89
Figura 4.14 - Diagrama σ - N_C típico para metais não ferrosos	90
Figura 4.15 - Diagrama de fadiga mostrando vários critérios de falha	94
Figura 4.16 - Curva $\sigma \times N_C$ em escala log-log	95
Figura 4.17 - Curva log-log de vida em fadiga	96
Figura 4.18 - Uso da regra de Miner para estimar a vida finita de um material	99
Figura 4.19 - Vista superior de uma coluna do transformador	100
Figura 4.20 - Comportamento do enrolamento externo para vários valores de tensão mecânica	102
Figura 4.21 - Curva de suportabilidade do enrolamento interno submetido a uma força axial	103
Figura 4.22 - Curva de suportabilidade do enrolamento externo submetido a uma força radial.....	104
Figura 4.23 - Curva de suportabilidade do enrolamento interno submetido a uma força radial	105
Figura 4.24 - Curva de suportabilidade para o enrolamento interno submetido a uma força radial	106
Figura 4.25 - Curva não linearizada para o enrolamento interno submetido deformação elástica	107
Figura 4.26 - Curva de suportabilidade do enrolamento interno para esforços radiais	108
Figura 4.27 - Curva de suportabilidade do enrolamento interno após a aplicação de esforços radiais da ordem de 54 MPa	109
Figura 4.28 - Retas para as duas condições, em verde a condição original e em vermelho, após o histórico de curtos-circuitos acontecidos	110
Figura 4.29 - Curva de suportabilidade para o enrolamento externo	111
Figura 4.30 - Curva não linearizada para o enrolamento externo submetido	

deformação elástica	111
Figura 4.31 - Curvas de suportabilidade, antes (verde) e depois (vermelho) do histórico de curtos-circuitos - enrolamento externo	112
Figura 5.1 - Máquina de ensaios de tração e compressão Losenhausen	116
Figura 5.2 - Registrador da máquina de tração	116
Figura 5.3 - Registro apontado em papel quadriculado	117
Figura 5.4 - Barra de cobre eletrolítico utilizada no ensaio de tração	117
Figura 5.5 - Paquímetro utilizado nas medições	118
Figura 5.6 - Corpo de prova fixado na máquina de tração	119
Figura 5.7 - Realização dos ensaios de tração nas barras de cobre	119
Figura 5.8 - Barra de cobre após o rompimento no ensaio de tração	120
Figura 5.9 - Ensaio realizado no corpo de prova 1	120
Figura 5.10 - Ensaio realizado no corpo de prova 2	120
Figura 5.11 - Ensaio realizado no corpo de prova 3	121
Figura 5.12 - Estágios do material no ensaio de tração	121
Figura 5.13 - Curva analítica de tração para o material ensaiado no laboratório	123
Figura 6.1 - Vista superior de uma coluna do transformador	128
Figura 6.2 - Vistas frontais de uma mesma coluna do transformador	128
Figura 6.3 - Enrolamento interno do transformador destacando seus espaçadores e estecas	129
Figura 6.4 - Setor da espira utilizada na simulação	130
Figura 6.5 - Representação de uma espira e seus espaçadores radiais	130
Figura 6.6 - Janela de acesso a biblioteca de materiais do COMSOL	131
Figura 6.7 - Janela das propriedades dos materiais, destacando-se o cobre utilizado	131
Figura 6.8 - Detalhes da fixação da espira	132
Figura 6.9 - Par de contato criado entre espaçador e barra de cobre	132
Figura 6.10 - Fronteira definida para a aplicação dos esforços mecânicos axiais	133
Figura 6.11 - Malha criada no COMSOL para a espira	134
Figura 6.12 - Malha criada no COMSOL para os pontos de contato	134
Figura 6.13 - Fronteira escolhida par aplicação do esforço de tração	135

Figura 6.14 - Barra de cobre submetida a um esforço de tração de 60 MPa	136
Figura 6.15 - Detalhes da deformação produzida na barra de cobre pela aplicação do esforço de tração de 60 MPa	136
Figura 6.16 - Aplicação do esforço mecânico, no enrolamento externo, para a simulação de flexão axial	137
Figura 6.17- Flecha produzida, no enrolamento externo, por uma força axial de 60,6 MPa	138
Figura 6.18 - Barra de cores indicando o resultado da simulação para a flexão de 60,6 MPa	138
Figura 6.19- Flecha produzida, no enrolamento externo, por uma força radial de 48,4 MPa	139
Figura 6.20 - Barra de cores indicando o resultado da simulação para flexão de 48,4 MPa	140
Figura 6.21- Flecha produzida no enrolamento axial por uma força de 26,6 MPa	141
Figura 6.22 - Barra de cores indicando o resultado da simulação para flexão de 26,6 MPa	141
Figura 6.23- Flecha obtida, no enrolamento externo, por uma força axial de 25,2 MPa	142
Figura 6.24 - Barra de cores indicando o resultado da simulação de 25,2 MPa	143
Figura 6.25 - Janela onde são inseridas as grandezas referentes à fadiga	145
Figura 6.26 - Esforço flutuante de 5 MPa aplicado no enrolamento interno	146
Figura 6.27 - Limite em ciclos de suportabilidade a fadiga para o esforço de 5 MPa	146
Figura 6.28 - Limite em ciclos de suportabilidade a fadiga para o esforço de 2,75 MPa	147
Figura 6.29 - Limite em ciclos de suportabilidade a fadiga para o esforço de 6,4 MPa	148
Figura 6.30 - Comparação entre as metodologias analítica e computacional para o enrolamento interno	149
Figura 6.31 - Esforço flutuante aplicado no enrolamento externo	150
Figura 6.32 - Número de ciclos correspondente a um esforço	

de 14,185 MPa	151
Figura 6.33 - Número de ciclos para um esforço de 9,6 MPa	152
Figura 6.34 - Número de ciclos para um esforço de 8,76 MPa	153
Figura 6.35 - Comparação entre as metodologias analítica e computacional para o enrolamento externo	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores para a constante k_3	30
Tabela 2.2 - Características do transformador	35
Tabela 2.3 - Valores simulados e calculados da corrente de curto-circuito assimétrica	39
Tabela 2.4 - Densidades de fluxos de dispersão do transformador	40
Tabela 2.5 - Valores das forças e estresses para a condição de curto-circuito	46
Tabela 3.1 - Estimativa das grandezas elétrica e mecânica	62
Tabela 3.2 - Ângulos de fase das tensões no momento da energização	64
Tabela 3.3 - Amplitude do primeiro pico das correntes de energização	64
Tabela 3.4 - Valores simulados das Grandezas Elétrica e Mecânica	67
Tabela 3.5 - Valor do primeiro pico, em módulo, da corrente de energização da fase C	68
Tabela 3.6 - Comparação entre as forças radiais e axiais no enrolamento interno	68
Tabela 3.7 - Comparação entre as forças radiais e axiais no enrolamento externo	66
Tabela 4.1 - $f_1(\alpha)$, $f_2(\alpha)$ e o seu produto com o seno	87
Tabela 4.2 - Valores de A e b para diferentes tipos de acabamento	92
Tabela 4.3 - Fator de correção devido a confiabilidade	93
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do cobre	97
Tabela 5.1- Resultados dos ensaios laboratoriais	122
Tabela 5.2 - Comparação de resultados	123
Tabela 6.1 - Descrição dos casos simulados	135
Tabela 6.2 - Comparação dos resultados para as grandezas mecânicas	137
Tabela 6.3 - Comparação de resultados para flexão axial no enrolamento externo	139
Tabela 6.4 - Comparação de resultados para flexão radial no enrolamento externo	140
Tabela 6.5 - Comparação de resultados para flexão axial no enrolamento	

interno	142
Tabela 6.6 - Comparação entre os resultados analítico e simulados	143
Tabela 6.7 - Resultados analíticos e simulados para um esforço radial de 5 MPa	147
Tabela 6.8 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 2,75 MPa	148
Tabela 6.9 - Grandezas analíticas e simuladas para o esforço radial de 6,4 MPa	149
Tabela 6.10 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 14,185 MPa	151
Tabela 6.11 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 9,6 MPa	152
Tabela 6.12 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 8,76 MPa	153

LISTA DE SÍMBOLOS

- F : Densidade volumétrica da força magnética $[\text{N}/\text{m}^3]$.
- J : Densidade superficial de corrente $[\text{A}/\text{m}^2]$.
- B : Densidade de fluxo magnético de dispersão $[\text{T}]$.
- F_r : Força radial $[\text{N}]$
- n : Número de espiras do enrolamento
- h : Altura do enrolamento $[\text{m}]$
- D_m : Diâmetro do enrolamento $[\text{m}]$
- $I_{\max}$: Corrente assimétrica de curto-circuito $[\text{A}]$
- F_{med} : Força radial média $[\text{N}]$
- $F_{\text{rad-dist}}$: Força radial distribuída $[\text{N}/\text{m}]$
- $\sigma_{r\text{-medio}}$: Estresse radial médio $[\text{N}/\text{m}^2]$
- a_c : Área de seção transversal do condutor $[\text{m}^2]$.
- $\sigma_{\text{crit-free-buckling}}$: Estresse crítico para deformação radial livre $[\text{N}/\text{m}^2]$
- E : Módulo de elasticidade do material $[\text{N}/\text{m}^2]$
- e : Dimensão radial do condutor $[\text{m}]$
- $\sigma_{\text{crit-forced-buckling}}$: Estresse crítico para deformação radial forçada $[\text{N}/\text{m}^2]$
- $E(\delta)$: Módulo de elasticidade incremental ao valor crítico $[\text{N}/\text{m}^2]$
- a : Constante do fabricante para espessura equivalente do condutor
- Esp_a : Quantidade de suportes axiais
- $\sigma_{\text{medio-buckling}}$: Estresse médio quando se faz uso de suportes $[\text{N}/\text{m}^2]$
- L_{ax} : Distância entre os suportes axiais $[\text{m}]$
- b : Dimensão axial do condutor $[\text{m}]$
- F_{cTotal} : Força compressiva total $[\text{N}]$
- D_{mt} : Diâmetro médio dos enrolamentos do transformador $[\text{m}]$
- d_0 : Ducto do transformador $[\text{m}]$
- d_i : Espessura radial do enrolamento interno $[\text{m}]$
- d_e : Espessura radial do enrolamento externo $[\text{m}]$
- F_a : Força axial na extremidade do enrolamento $[\text{N}]$
- q : Fração do ampère-espira total em um enrolamento.
- w : Dimensão axial do condutor com sua isolação $[\text{m}]$.
- d_1 : Largura equivalente do ducto do transformador $[\text{m}]$.

F : Força aplicada nos enrolamentos [N]
 $\sigma_{ax-bending}$: Estresse causado pela força axial [N/m²]
 L_{rad} : Distância entre os suportes radiais [m].
 $F_{ax-dist}$: Força axial distribuída [N]
 $F_{ax-crit}$: Força axial crítica [N]
 $\sigma_{ax-crit}$: Estresse axial crítico [N/m²]
 s : Largura dos espaçadores radiais [m]
 Esp_r : Quantidade de espaçadores radiais
 B_{DISP} : Densidade de fluxo de dispersão [T]
 F_R : Força radial total [N]
 F_{R_EX} : Força radial no enrolamento externo [N]
 F_{ACT} : Forças axiais compressivas totais [N]
 t : Instante de tempo
 F_{ACTEX} : Força axial compressiva total no enrolamento externo [N]
 F_{R_IN} : Força radial no enrolamento interno [N]
 F_{RMIN} : Força radial média no enrolamento interno [N]
 E_{RMIN} : Estresse radial médio no enrolamento interno [N/m²]
 F_{RMEX} : Força radial no enrolamento externo [N]
 E_{RMEX} : Estresse radial médio no enrolamento externo [N/m²]
 F_{ACTIN} : Força axial compressiva total no enrolamento interno [N]
 V_p : Valor de pico da tensão aplicada [V]
 θ : Ângulo no qual a tensão é chaveada
 i_0 : Valor instantâneo da corrente de magnetização
 $\phi_m(t)$: Valor instantâneo do fluxo magnético
 R_1 : Resistência do enrolamento primário
 N_1 : Número de espiras do enrolamento primário
 ϕ_r : Fluxo magnético residual
 ϕ_{mp} : Fluxo magnético máximo no núcleo ferromagnético
 B_{mp} : Indução magnética máxima no núcleo ferromagnético
 $\phi_{saturado}$: Fluxo magnético de saturação
 A_{nucleo} : Área do núcleo ferromagnético [m²]
 H : Intensidade de campo magnético [A/m]
 A_m : Área média enlaçada por uma espira do enrolamento [m²]
 i_{0max} : Valor assimétrico da corrente monofásica de “inrush” [A]

μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo (ar)
 X_s : Reatância do ar
 f : Frequência
 K_1 : Fator de correção do ângulo de saturação
 B_s : Densidade de fluxo de saturação [T]
 B_r : Densidade de fluxo residual [T]
 B_{mp} : Indução magnética máxima no núcleo ferromagnético [T]
 K_2 : Fator de correção do valor de pico da corrente de *inrush*
 R : Resistência ôhmica [Ω]
 K_3 : Fator de correção para atenuação do *inrush*
 J : Densidade superficial de corrente [A/m^2]
 I_{inr} : Valor de pico da corrente de *inrush* aplicada a transformadores trifásicos [A]
 σ_m : Estresse médio [N/m^2]
 σ : Estresse aplicado [N/m^2]
 A_0 : Área inicial de seção de uma barra metálica [m^2]
 A : Área de seção transversal [m^2]
 l_0 : Comprimento inicial de uma barra metálica [m]
 Δl : Variação incremental de l_0 [m]
 ε : Deformação em uma barra metálica
 σ_0 : Estresse limite de escoamento [N/m^2]
 F_e : Força limite de escoamento [N]
 σ_n : Estresse para limite para n% de escoamento [N/m^2]
 F_n : Força para limite para n% de escoamento [N]
 $\sigma_{0,2}$: Estresse mecânico para produzir 0,2% de deformação [N/m^2]
 σ_u : Estresse limite de ruptura do material [N/m^2]
 F_u : Força limite de ruptura do material [N]
 ε_t : Deformação total [m]
 g : Parâmetro de Ramberg-Osgood (expoente de encruamento)
 ε_{max} : Deformação de ruptura do material [m]
 q_0 : Força distribuída [N/m_2]
 M_{in} : Momento de inércia [N.m]
 v : Flecha máxima [m]
 δ : Rotação provocada pela deformação
 M : Momento de uma força qualquer [N.m]

n_{ks} : Número de espaçadores em torno de uma seção de 360 graus

s : Largura de um espaçador

F_{ks} : Força de compressão no espaçador

σ_{ks} : Estresse de compressão no espaçador

n_s : Número de espiras da bobina

σ_c : Estresse axial de compressão uniforme [N/m^2]

τ_c : Torque axial [$N.m$]

r : Raio

τ : Torque qualquer [$N.m$]

δ : Ângulo de inclinação em relação a vertical

r_m : Raio médio do cilindro

ϕ : Ângulo de aplicação do estresse

α : Ângulo de separação de suportes radiais internos

σ_{MAX} : Estresse mecânico máximo [N/n^2]

$A_{islador}$: Área de seção do isolador [m^2]

E_{eq} : Módulo de elasticidade equivalente

N_C : Número de ciclos

$\Delta\sigma$: Variação de estresse

σ_{max} : Estresse máximo

σ_{min} : Estresse mínimo

σ_a : Amplitude do estresse

σ_m : Estresse médio

I_F : Corrente nominal de fase do transformador

σ'_f : Limite de resistência a fadiga atualizado

k_a : Fator de acabamento superficial

k_b : Fator de tamanho da peça

k_c : Fator de carregamento

k_d : Fator de temperatura

k_e : Fator de confiabilidade

k_f : Outros fatores que alteram os esforços de fadiga

S_m : Limite de resistência à fadiga

S_y : Limite de resistência de escoamento

S_u : Limite de resistência de ruptura

ε_p : Deformação plástica

$\Delta\varepsilon_p$: Variação da deformação plástica

ε_e : Deformação elástica

$\Delta\varepsilon_e$: Variação da deformação elástica

ε'_f : Coeficiente de ductilidade à fadiga

c : Expoente de ductilidade à fadiga

R_a : Redução percentual da área de seção do material

d_i : Dano cumulativo

n_{Ci} : Número de ciclos aplicado para um σ qualquer

N_{Ci} : Número de ciclos necessários para que este mesmo σ danifique o componente

N_{Cf} : Número de ciclos remanescente

D : Acúmulo de danos

$R\%$: Redução percentual de vida útil do transformador

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS



ransformadores de potência são dispositivos essenciais aos sistemas elétricos de potência e constituem-se num dos seus componentes de maior custo. Quando um destes equipamentos é danificado ou apresenta algum tipo de falha, faz-se necessário seu reparo ou até mesmo sua substituição. Isto demanda altíssimos custos financeiros, primeiro pelo alto valor comercial destes dispositivos, segundo pela perda temporária da capacidade de transmissão de energia elétrica, já que a desativação de linhas de transmissão provocada pela troca/reparo de transformadores terá reflexo direto no atendimento às cargas do setor produtivo, que por sua vez, influenciarão no desempenho econômico do país como um todo. Por um lado, a concessionária ficará com seus indicadores de qualidade de fornecimento de energia elétrica afetados, com possibilidades de sofrer penalidades, também com implicações financeiras, por parte dos órgãos reguladores do setor elétrico. Cita-se aqui também que a imagem da distribuidora/transmissora fica afetada pela indisponibilidade da energia elétrica. Desta forma, ocorrerá uma parada de produção acarretando prejuízos financeiros. Há que se destacar, também, a elevada logística envolvida no processo de transporte de transformadores de força, devido ao seu peso e às suas dimensões elevadas e, à fragilidade de alguns componentes

(ROSENTINO, 2010). Destaca-se também que comercialmente, as unidades deste porte não estão disponíveis em curto prazo.

Estes aspectos abordados determinam a complexidade do problema, para disponibilizar um transformador de grande porte para operação, quer seja pelo elevado custo envolvido, ou pela logística envolvida. Em consequência dessa grande importância no sistema elétrico, os transformadores de potência são altamente protegidos contra vários fenômenos elétricos causadores das falhas.

Resumidamente, em relação às falhas, sabe-se que os transformadores de força, geralmente são projetados e construídos de modo a suportar vários tipos de estresse, como por exemplo: estresse térmico associado principalmente com as sobrecargas; estresse dielétrico vinculado com as sobretensões originadas nos sistemas elétricos de potência; entre outros. Além de fatores ambientais, tais como: umidade, contaminação, acidez, ambientes corrosivos, etc., que interferem e podem reduzir a vida útil do transformador.

Complementarmente aos fatores anteriormente citados, estudos realizados por concessionárias de diversos países deixam evidentes os enormes prejuízos das empresas do setor elétrico, devido às “falhas mecânicas” em transformadores. Defeitos provocados pelos esforços mecânicos decorrentes de curtos-circuitos passantes e de corrente *inrush* se constituem como importantes causadores de falhas em transformadores (AZEVEDO, 2007). Focando especificamente a questão dos problemas de ordem mecânica, para o caso de transformadores, estes ocorrem, normalmente, na parte ativa do equipamento. Os mesmos se manifestam na forma de deformações e/ou deslocamentos dos enrolamentos, em decorrência das forças eletromagnéticas associadas com os altos níveis de correntes e suas assimetrias que provocam, dentre outros fenômenos, a degradação da isolação, fadiga mecânica nos condutores e danos estruturais na sustentação dos enrolamentos, e a possibilidade de redução da sua vida útil ou até mesmo sua destruição. Quanto às origens para as mencionadas correntes em proporções extremamente superiores às atreladas com a operação normal do equipamento, além das associadas com curtos-circuitos, há ainda que se considerar os fenômenos advindos dos processos de energização dos transformadores.

Dentro deste contexto, espera-se que um transformador experimente e suporte um determinado número de curtos-circuitos durante seu tempo de vida útil. Porém, mais cedo ou mais tarde, um novo evento causará algum leve movimento no

enrolamento, e a capacidade do transformador de suportar novos esforços eletromecânicos será então reduzida. Há que se salientar que, torna-se importante a verificação periódica das suas condições mecânicas, principalmente nas unidades com muito tempo de operação, de forma a se obter subsídios para impedir falhas catastróficas.

Assim, a investigação dos efeitos danosos causados pelos fenômenos mencionados, portanto, torna-se imperativa, como ressaltado na sequência deste trabalho.

1.2 ESTADO DA ARTE

Apresenta-se, na sequência uma síntese das publicações encontradas na literatura especializada de maior relevância e que, de alguma forma, serviram para consubstanciar a realização da pesquisa. De maneira a tornar mais didática a apresentação dos conteúdos, dentro do possível, procurou-se agrupar as referências por assunto pesquisado.

1.2.1 QUANTO AOS CURTOS-CIRCUITOS:

A consequência do curto-circuito é sempre um corte no fornecimento de energia, interrupção nos processos de fabricação, com prejuízos na produção, prejuízo dos componentes, como também risco à segurança de operadores. Devido a tal importância foi feita uma extensa pesquisa bibliográfica, indicando resumidamente as principais contribuições das referências a seguir:

a) Normas e Recomendações

A referência CIGRE (2002) aborda o desempenho de transformadores submetidos a curtos-circuitos a partir do contexto de quatro áreas correlatas, a saber: avaliação das condições de serviço dos equipamentos das concessionárias dos vários países que participaram da pesquisa; considerações sobre os métodos utilizados pelas concessionárias para calcular as forças eletromagnéticas e o estresse eletromecânico nos enrolamentos dos transformadores causados pelas correntes de curto-circuito. A terceira área analisada descreve os procedimentos que

devem ser adotados para avaliar a suportabilidade dos grandes transformadores de potência às forças eletromagnéticas, uma vez que tais equipamentos, normalmente não são submetidos aos testes de suportabilidade a curto-circuito. Por último são apresentadas e analisadas as técnicas utilizadas no diagnóstico e monitoramento de transformadores de potência sob curto-circuito. Nesta mesma linha, em IEEE Std (1991) recomendam-se procedimentos para serem utilizados na análise de falhas em transformadores. Neste documento são analisados os mais diversos tipos de falhas causadas pelos esforços mecânicos nos enrolamentos dos transformadores sob condições de curto-circuito, bem como as falhas elétricas causadas por surtos transitórios, com o intuito de oferecer subsídio para uma correta interpretação das causas das falhas. IEEE/ANSI (1985) tem seu foco direcionado à aplicação de dispositivos de proteção contra sobrecorrentes. Por outro lado, CIGRÉ - STENKVIST E TORSEKE (1961) descreve problemas com os transformadores de potência, do tipo núcleo envolvido, quando submetidos ao mesmo fenômeno. Realiza, ainda, uma revisão crítica das metodologias até então aplicadas para cálculo de forças eletromecânicas.

Ainda tendo como a referência os efeitos da corrente de curto-circuito, P-IEC 60076-5, descreve os procedimentos de cálculos usados para demonstrar a suportabilidade térmica de um transformador de potência exposto a sobrecorrentes. Além disto, destacam-se alguns testes especiais, bem como uma metodologia para avaliar teoricamente a capacidade de suportar os efeitos dinâmicos oriundos de solicitações impostas pelas correntes de curto-circuito.

Finalmente, em CIGRE (2003) foi proposto um guia com o objetivo de gerenciar a vida útil do transformador, reduzir seu número de falhas, bem como estender sua vida útil, de forma a produzir um efetivo e confiável suprimento de energia elétrica. O trabalho é dividido principalmente em três partes: apresentação dos conhecimentos gerais e aspectos teóricos (conceitos básicos de falhas, recomendações na identificação de falhas, etc); técnicas de diagnóstico e monitoramento; recomendações para condição de avaliação e operação em transformadores.

b) Livros

Ao abordar temas referentes aos curtos-circuitos e seus efeitos nos enrolamentos dos transformadores Waters (1966) apresenta expressões para cálculo das forças eletromagnéticas axiais e radiais decorrentes das elevadas

correntes em transformadores. Diversos arranjos de *Taps* são considerados nas expressões para se levar em conta a força adicional devido a essas derivações. Os efeitos dinâmicos, bem como, as características mecânicas do material utilizado na construção dos transformadores também são tratados nessa referência. Com o mesmo objetivo, Membros do Departamento de Engenharia Elétrica do Massachusetts Institute of Technology (1965) oferecem um livro dividido em duas partes. A primeira descreve o desenvolvimento dos princípios fundamentais para o cálculo do comportamento de circuitos magnéticos. A segunda parte, envolvendo transformadores, destacam-se os conceitos fundamentais de circuitos elétricos, bem como sistemas dielétricos, magnéticos, térmicos e mecânicos. Neste contexto, Heathcote et al (1998) produziram o livro reconhecido como a “bíblia” de transformadores de potência. Partindo de uma breve revisão da teoria de transformadores, proporciona uma descrição dos princípios de projeto e construção de transformadores, operação e manutenção, bem como especificação e aquisição. Dessa forma, são disponibilizadas informações com uma profundidade suficiente para permitir aos engenheiros de potência uma visão geral do assunto. Enquanto, Kulkarni e Khaparde (2004) ilustram a interação entre a operação de transformadores e os componentes do sistema elétrico. Diversos aspectos relacionados ao projeto de transformadores são abordados, tais como: estimativas de perdas, estimativa do ponto mais quente, cálculo dos esforços causados pelos curtos-circuitos e correntes de energização nos enrolamentos dos transformadores.

c) Teses e Dissertações

O trabalho produzido por Azevedo (2007) teve por objetivo investigar as forças eletromagnéticas e o estresse mecânico resultantes de correntes de curtos-circuitos passantes e correntes de energização que se estabelecem no interior de transformadores. Para alcançar tal propósito, foram empregadas duas modelagens computacionais no domínio do tempo baseadas em forças magnetomotrizes e relutâncias magnéticas. Uma segunda alternativa foi a utilização do método dos elementos finitos na sua versão 2D. Estes modelos permitem realizar simulações envolvendo os fenômenos de regime transitório e permanente, além de possibilitar o acesso às grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas.

Complementando os aspectos anteriores, Rosentino (2010) desenvolveu uma metodologia analítica para estimar os esforços eletromecânicos em transformadores

e apontou os diferentes tipos de estresses eletromecânicos passíveis de ocorrer nos enrolamentos de um transformador, identificando os principais tipos de falhas provocadas por esses esforços. Finalmente, Saraiva (2011) avaliou as alterações que podem ocorrer nos parâmetros de transformador quando algum tipo de deformação acontecer em seus enrolamentos. Para a verificação de tais efeitos, optou-se por analisar possíveis variações em parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos e que podem indicar uma redução na vida útil do equipamento. Todos os estudos, análises e simulações foram desenvolvidos tomando-se como base um pacote computacional baseado no método dos elementos finitos na sua versão 3D.

d) Artigos Técnicos

A referência Salon et al (2000) utilizou o método dos elementos finitos (FEA) para modelar um transformador monofásico do tipo núcleo envolvente. Modelos bidimensionais e tridimensionais foram explorados de forma a permitir o cálculo das forças eletromagnéticas que se manifestam nos enrolamentos do transformador sob estudo. Já Najdenkoski e Manov (1998) calcularam as forças eletromagnéticas que agem em um transformador de potência, quando uma corrente, correspondente ao primeiro pico de um curto-circuito trifásico incide nos seus enrolamentos. Enquanto que, Yun-Qiu et al (1990) apresentaram as fórmulas para cálculos das forças eletromagnéticas axiais e radiais que agem nos enrolamentos dos transformadores.

Métodos de detecção de defeitos podem ser visualizados em Wang et al (2001), já em Patel (2002) é descrito o comportamento dinâmico de transformadores submetidos às forças axiais devidas aos curtos-circuitos. Este estudo foi direcionado aos enfoques analítico, numérico e experimental. Assim, foram investigadas e desenvolvidas teorias para prever o carregamento dinâmico de transformadores e o deslocamento dos enrolamentos e estruturas de fixação (*clampings*) destes equipamentos. O mesmo autor, (PATEL, 1973), já havia apresentado anteriormente, o comportamento dinâmico de transformadores submetidos às forças axiais devidas aos curtos-circuitos, considerando o modelo combinado dos enrolamentos e estruturas de fixação.

Ainda dentro do mesmo tema, Liang et al (2003) apresentam um modelo que permite estudar as vibrações axiais causadas nos transformadores pelos curtos-circuitos. Complementarmente, Murakami et al (2001) analisam a suportabilidade ao

curto-circuito de transformadores do tipo núcleo envolvente, através de investigações das resistências de seus condutores e das vibrações de suas bobinas.

Dentro desse contexto, a suportabilidade mecânica foi tema de análise na referência (AZEVEDO et al., 2007) na qual apresentou os resultados de uma investigação realizada sobre o cálculo das forças eletromecânicas devido aos efeitos de curto-circuito “passante”. Para tanto, foi desenvolvido um modelo de transformador típico de distribuição no domínio do tempo, que permitiu analisar o comportamento do mesmo nos regimes permanente e transitório (curtos-circuitos). Enquanto McNut et al. (1970) discutiram as complexas considerações associadas com o projeto, e a capacidade dos transformadores de potência de suportar curtos-circuitos. Finalmente, Ribeiro et al. (2003) apresentam um resumo de Projeto P&D realizado junto à empresa do setor elétrico COELBA, objetivando avaliar os transformadores de distribuição nos sistemas da concessionária. Foram analisados as taxas de falhas e os diagnósticos/avarias de 1309 transformadores. Para os casos de diagnóstico de curtos-circuitos foram estudados os limites mecânicos e térmicos, bem como, as temperaturas finais nos enrolamentos após a ocorrência das falhas. O diagnóstico de avarias permitiu constatar que, o maior número de ocorrência de falhas, foi devido aos curtos-circuitos externos ao equipamento. Concluiu-se também que, nos transformadores de distribuição, o limite térmico é que governa os projetos das unidades transformadoras. Enquanto que nos transformadores de potência, os efeitos mecânicos são predominantes.

1.2.2 QUANTO À CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO

Sabe-se que, as correntes de alta magnitude que ocorrem durante a energização de transformadores são ocasionadas pela saturação de seu núcleo ferromagnético. Essas elevadas correntes, denominadas de “correntes de *inrush*”, podem provocar uma série de efeitos danosos para o sistema elétrico supridor, como também para o próprio transformador, tais como: afundamentos momentâneos de tensão, sobretensões harmônicas temporárias, estresse eletromecânico nos enrolamentos dos transformadores, deterioração da isolação, operações erráticas de relés diferenciais e de sobrecorrentes, etc. Desta forma, esta situação operacional irá degradar a qualidade da energia elétrica fornecida pelo sistema elétrico e,

consequentemente, reduzir a vida útil do transformador. Entretanto, mesmo com tamanha relevância, a literatura técnica mostrou-se bastante escassa quando se trata da energização de transformadores sob a ótica da suportabilidade mecânica.

Assim, Kulkarni e Kaparde (2004) ilustraram diversos aspectos relacionados ao projeto de transformadores, tais como: estimativas de perdas, estimativa do ponto mais quente, cálculo dos esforços causados pelos curtos-circuitos e correntes de energização nos enrolamentos dos transformadores. Enquanto que Adly (2001) realizou uma estimativa das magnitudes e direções das forças que surgem como resultado dos efeitos das correntes de *inrush* nos enrolamentos dos transformadores. As principais diferenças entre forças resultantes de situações de curtos-circuitos e de *inrush* foram discutidas. Todavia, embora essas duas situações transitórias, pareçam semelhantes, as mesmas variam significativamente do ponto de vista de magnetização do núcleo. Complementarmente, Steurer e Fröhlich (2002) comparam as forças eletromagnéticas geradas nos enrolamentos de um transformador submetido às correntes de *inrush* com aquelas oriundas da circulação de correntes provenientes de um curto-circuito “passante”.

1.2.3 QUANTO AOS ASPECTOS MECÂNICOS

Sabe-se que um metal submetido a tensões mecânicas flutuantes, com o tempo, apresentará danos provocados pela fadiga do material. Os esforços que causam a fadiga são cíclicos, e podem produzir alterações estruturais irreversíveis após um determinado número de ciclos. Assim, estudos, análises, conceitos e equações matemáticas oriundos da engenharia mecânica serão aplicados para estimar a degradação e a deformação dos enrolamentos de transformadores sob carregamentos cíclicos.

Entretanto, não se encontrou na literatura referências com este enfoque, assim, o que é apresentado, neste levantamento do estado da arte, são textos que tratam da fadiga em materiais. A aplicação da metodologia em transformadores é a contribuição desta tese à pesquisa de vida útil de transformadores.

Neste contexto, destaca-se o trabalho apresentado na referência (DEL VECCHIO et al., 2002) no qual discutiu-se vários tipos de transformadores e a sua utilização em sistemas de energia, bem como alguns dos principais métodos de

construção. As principais partes componentes de um transformador são destacadas, com ênfase especial ao núcleo e aos enrolamentos de transformadores de potência. Essa referência, também destaca algumas das considerações básicas que devem ser analisadas por projetistas destes componentes. Enquanto a referência (BUDYNAS E NISBETT, 2006) foca na habilidade necessária ao projetista de máquinas mecânicas, e para isso, a divide em três partes: a primeira parte enfoca noções fundamentais de projetos mecânicos; a segunda avalia as condições de falhas, suas causas e a maneira pela qual podem ser previstas; a terceira parte, é destinada a seleção de materiais e peças a serem utilizadas em máquinas. Trata, ainda de modo detalhado, as causas e consequências da fadiga em metais e máquinas.

1.3 MOTIVAÇÃO PARA A PRESENTE PESQUISA

O projeto de transformadores de potência é realizado prevendo as situações mais críticas a que possa ser submetido no local destinado à sua instalação, ou seja, devem ter a capacidade de suportar as solicitações de naturezas diversas a que possam ser expostos. Um exemplo disto são as forças dinâmicas causadas por correntes transitórias. Para assegurar a sua integridade física, na fase de projeto, os critérios de dimensionamento das partes ativas e das estruturas de sustentação dos transformadores levam em consideração as mais severas correntes de curto-circuito e os maiores picos passíveis de ocorrência. Considera-se que, sob tais condições extremas, estes equipamentos sejam submetidos também às forças máximas. Ainda assim, apesar do extremo cuidado observado na fase de projeto destes dispositivos, a prática tem mostrado um número de ocorrências de falhas significativas, o que se traduz em prejuízos consideráveis (REIS, 1997).

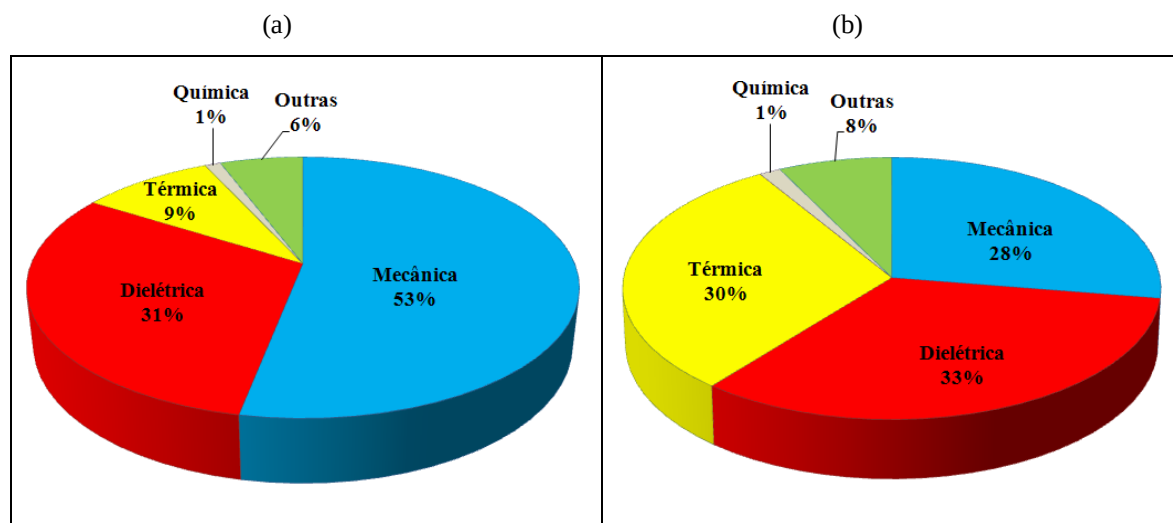
As falhas podem ser atribuídas a fatores diversos, dentre os quais se destacam: pequenos defeitos na fase de montagem, estimativa incorreta/desatualizada das máximas correntes transitórias, qualidade dos materiais empregados, ferramentas e técnicas de cálculo sem a devida precisão, dentre outros.

Outro fator determinante na ocorrência de falhas diz respeito à deterioração das características mecânicas e elétricas, ao longo de sua vida útil, dos materiais

utilizados na fabricação dos transformadores. Com o envelhecimento, as características internas do transformador tendem a se degradar o que aumenta as possibilidades de falhas. Adicionalmente ao desgaste natural, a probabilidade de ocorrência de falhas é potencializada por condições adversas naturais ou de operação, tais como, descargas atmosféricas, transitórios de chaveamento, curtos-circuitos, dentre outros.

De um modo geral, as falhas podem ser classificadas como sendo de origens térmicas, dielétricas, químicas e mecânicas. (CIGRE, 1983; BECHARA, 2010). Assim, de modo a oferecer uma visão sobre as origens dos fenômenos passíveis de ocorrência, a Figura 1.1 apresenta dados relacionados com as percentagens de falhas que ocorrem nos transformadores de subestações convencionais e de usinas. Pode-se observar que as falhas de origem mecânicas são bastante significativas.

Figura 1.1 - Origem das falhas em transformadores de subestações e de usina



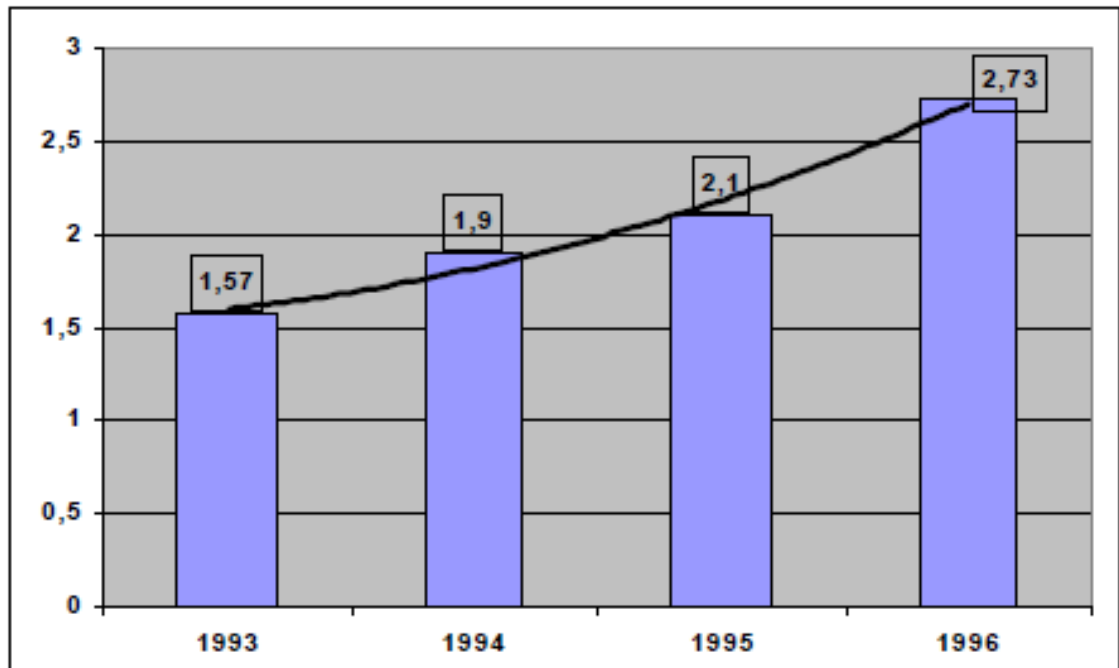
(FONTE: CIGRE, 1983)

(a) Subestações: população 31031 unidades-anos

(b) Usinas: população 2335 unidades-anos

A título de ilustração, a Figura 1.2 (PENA, 2003) mostra a tendência de falhas em transformadores no Brasil. Este trabalho expressa o resultado de levantamentos feitos ao longo dos anos 1993 a 1996 e retrata um crescimento das taxas de falhas em níveis preocupantes.

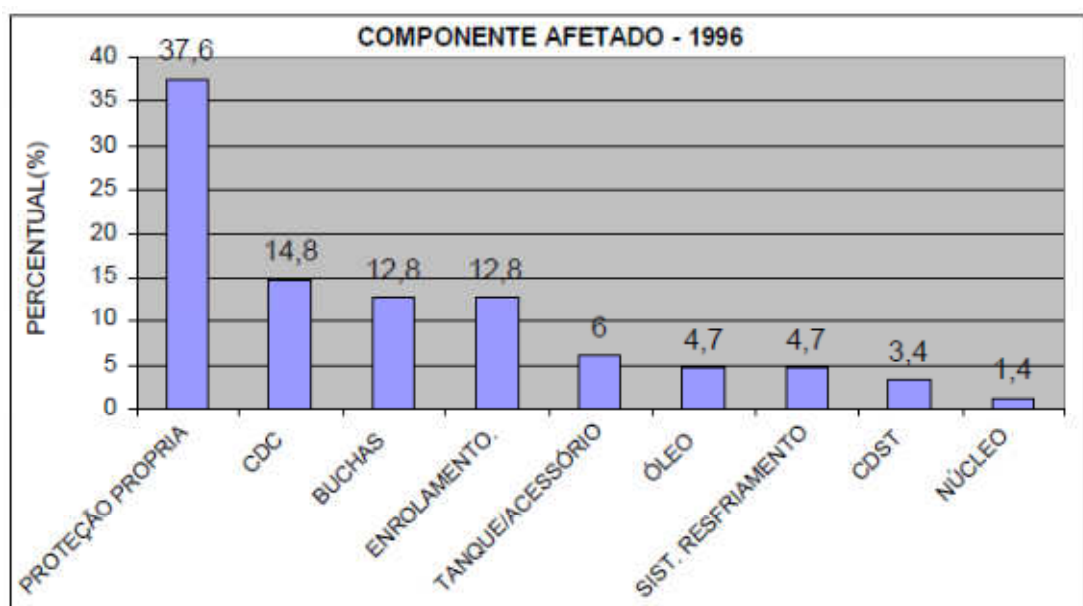
Figura 1.2 - Taxa de falha em transformadores – Brasil



(FONTE: PENA, 2003)

Por outro lado, a Figura 1.3 (PENA, 2003) mostra o percentual de falhas por componente em uma pesquisa envolvendo mais de 12500 unidades-anos, durante o período compreendido entre 1994 e 1996. As informações referem-se a equipamentos com classe de tensão igual ou superior a 69 kV para o ano de 1996.

Figura 1.3 - Percentual da taxa de falha por componente (1996)



(FONTE: PENA, 2003)

Sintetizando, em relação às consequências provocadas pelos esforços eletromecânicos associados à energização do transformador e também, quanto à fadiga do material utilizado, tanto na literatura nacional e internacional, praticamente os assuntos não foram objetos de maiores investigações e, diante deste fato, reconhece-se grandes carências e lacunas a serem exploradas para o domínio e difusão do tema.

Logo, esta tese segue na direção de apresentar uma metodologia para a avaliação dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos às correntes de curtos-circuitos e de energização. Para atingir esses propósitos, este trabalho mostrará inicialmente os diferentes tipos de esforços passíveis de ocorrer nos enrolamentos de um transformador, identificando os principais tipos de falhas provocadas por essas solicitações. Em seguida, desenvolve-se uma metodologia analítica para estimar os estresses eletromecânicos de transformadores submetidos às correntes transitórias. Posteriormente, mostra-se um procedimento para o levantamento da curva de suportabilidade mecânica de transformadores. Complementando os aspectos citados, em função da curva de suportabilidade, estuda-se a vida útil de transformadores a partir dos esforços eletromecânicos adicionais provocados pelas correntes de curto-circuito e de energização. Finalmente, os valores obtidos pela metodologia analítica serão confrontados com os resultados experimentais e aqueles oriundos de simulações computacionais. Para as análises e os estudos vinculados com os aspectos mecânicos foi utilizado um programa reconhecido internacionalmente baseado no método dos elementos finitos na sua versão tridimensional (COMSOL).

As avaliações mecânicas foram realizadas de duas formas. A primeira mostra uma metodologia que contempla os estudos voltados para os esforços eletromecânicos. Estas análises são realizadas com o intuito de verificar se os estresses eletromecânicos calculados não ultrapassam os limites de estresses admissíveis pré-estabelecidos em projetos de transformadores. O procedimento considera o fenômeno como estático, ou seja: utiliza-se o valor máximo assimétrico das correntes transitórias para estimativa das forças e do estresse eletromecânico presentes nos enrolamentos.

A segunda análise considera os efeitos “dinâmicos” das forças aplicadas ao transformador, ou seja, leva em conta que os esforços a que estes equipamentos estarão submetidos são variáveis no tempo. Desta forma, a estrutura de sustentação

e os condutores experimentam o efeito de fadiga do material. Essa condição, quando aplicada a metais não-ferrosos, como o cobre por exemplo, vai produzir um desgaste, levando o equipamento ao colapso, mesmo que em sua utilização ele nunca tenha experimentado esforços acima do que os previstos em projetos.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DESTA TESE

Dentro do contexto apresentado, esta tese irá contribuir nos seguintes aspectos:

a) Desenvolvimento de uma metodologia computacional para estimar os esforços eletromecânicos em transformadores causados pelas correntes de curto-circuito

Neste particular, o trabalho compila e emprega formulações analíticas que permitem obter a determinação de forças e estresses eletromecânicos nos enrolamentos do transformador quando pelo mesmo percorrem as elevadas correntes de curto-circuito “passante”. De um modo especial, a principal contribuição do presente tópico está alicerçada no desenvolvimento de modelagens e simulações computacionais que permitem estimar estes esforços. Estas investigações foram realizadas, utilizando-se a técnica baseada no método dos elementos finitos, na sua versão 3D.

b) Estabelecimento de uma metodologia analítica para estimar os esforços eletromecânicos em transformadores causados pelos transitórios de energização.

Quanto a este ponto focal, o trabalho visa oferecer contribuições através da correlação entre a ocorrência de altos níveis de corrente e seus impactos sobre a estrutura mecânica dos transformadores. A ideia central se apoia na indicação de uma metodologia analítica para determinar as amplitudes das forças eletromagnéticas encontradas em transformadores em decorrência da manifestação do fenômeno transitório causado pela energização de transformadores. Também,

essas formulações analíticas serão confrontadas com as simulações computacionais e com os ensaios laboratoriais.

c) Estabelecimento de uma proposta de estimativa do limite de suportabilidade mecânica ($\sigma_{0,2}$) para transformadores

Tendo em vista que as informações ora mencionadas, via de regra, não são fornecidos pelos fabricantes, neste trabalho é feita uma proposição de estratégia para a estimativa analítica dos estresses máximos admissíveis pelos transformadores. Esta é desenvolvida e validada através da comparação das informações obtidas com grandezas advindas de simulações computacionais, empregando-se, para tanto do programa COMSOL, fundamentado no método dos elementos finitos em sua versão tridimensional (COMSOL).

d) Desenvolvimento de um procedimento analítico para a estimativa da vida útil do transformador submetido a esforços eletromecânicos cíclicos.

Tendo em vista que os distúrbios aqui focados são variáveis no tempo, ou cíclicos, o efeito final manifestado pela “fadiga” do material define limites de suportabilidade mecânica. Neste sentido, esta tese avança na direção do desenvolvimento de meios para a obtenção da curva de fadiga do enrolamento, fato este que conduz a meios para correlacionar as reduções da vida útil do transformador quando submetido às altas correntes de energização e de curtos-circuitos.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A fim de alcançar os objetivos aqui propostos, além do presente capítulo, esta tese é conduzida na seguinte estrutura:

Capítulo II Estresses eletromecânicos em transformadores causados pelas correntes de curto-circuito passantes

Neste segundo capítulo o objetivo é analisar a relação

entre as elevadas correntes de curto-circuito “passantes”, que ocorrem nos enrolamentos do transformador, com os estresses eletromecânicos, que podem reduzir significativamente a vida útil do equipamento, ou até mesmo levá-lo a sua destruição. Esta investigação será realizada tanto pelo método analítico quanto pelo método dos elementos finitos, através de um software (CEDRAT - FLUX) na sua versão 3D. Estes estudos serão realizados a partir do uso de um protótipo de um transformador trifásico de 15 kVA.

Capítulo III

Esforços eletromecânicos em transformadores causados pelos transitórios de energização: Uma abordagem analítica, numérica e experimental

A idéia central deste capítulo, apóia-se na proposição de uma metodologia analítica para determinar as amplitudes das forças eletromagnéticas encontradas em transformadores em decorrência da manifestação do fenômeno transitório causado pela energização de transformadores. Dentre os principais pontos contemplados por este capítulo tem-se: a descrição dos diferentes tipos de estresses eletromecânicos que ocorrem em transformadores; a proposição de uma metodologia analítica para o cálculo dos esforços eletromecânicos axiais e radiais; a apresentação de resultados de simulações computacionais no domínio do tempo, tomando-se como base o método dos elementos finitos na sua versão tridimensional, e por fim, a validação do processo através da comparação entre os métodos analítico, computacional e àqueles obtidos através de experimentos laboratoriais representativos dos fenômenos em pauta.

Capítulo IV Curva de suportabilidade mecânica e vida útil de transformadores

Este capítulo tem por objetivo a proposição de uma metodologia para a estimativa do limite de suportabilidade mecânica do transformador. Complementando os estudos anteriores, mostra-se a proposição de um procedimento para levantamento das curvas de fadiga do enrolamento e, a partir destas, estimar a vida útil do equipamento sujeito aos esforços produzidos pelas correntes “*inrush*” e de curtos-circuitos.

Capítulo V Ensaaios laboratoriais

O objetivo principal deste capítulo está na obtenção de informações sobre os limites de suportabilidade à tração de condutores de cobre utilizados em transformadores. Busca-se com esta estratégia produzir curvas de tensão mecânica em função do alongamento. Somando-se a isso, os ensaios experimentais permitirão determinar alguns parâmetros mecânicos que irão ser confrontados com aqueles oriundos da metodologia analítica e de simulações computacionais.

Capítulo VI Simulações computacionais

A direção dada a este capítulo é a de propor um modelo computacional que permita avaliar a suportabilidade mecânica de transformadores. Para atingir este objetivo, utiliza-se o pacote computacional “COMSOL Multiphysics”, o qual baseia-se no método dos elementos finitos, na sua versão tri-dimensional.

Deve-se salientar que esta ferramenta computacional é reconhecida internacionalmente, e possui um “módulo” exclusivamente para análises associadas com os fenômenos mecânicos.

Capítulo VII

Conclusões

Por fim, este capítulo destina-se em apresentar os principais resultados obtidos através das investigações e análises realizadas ao longo de todo o trabalho. Complementarmente, são citadas algumas sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

ESTRESSE ELETROMECHANICO EM TRANSFORMADORES CAUSADO PELAS CORRENTES DE CURTOS-CIRCUITOS “PASSANTES”

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante as condições de falta, quando as correntes podem aumentar em até 25 vezes os valores normais, os enrolamentos do transformador são submetidos a forças muito elevadas. Desta forma, as amarrações devem ser suficientes para impor uma adequada sustentação mecânica aos componentes que perfazem o equipamento. Além disso, a concepção física e as propriedades dos materiais devem ser tais que, os esforços resultantes, causados pelos curtos-circuitos, não conduzam a uma deformação permanente ou fratura dos materiais (VECCHIO, et al, 2002)

Dentro deste enfoque, este capítulo tem por objetivo apresentar duas metodologias para a avaliação dos estresses eletromecânicos em transformadores causados por curtos-circuitos passantes.

Para atingir esses propósitos, este capítulo segue na seguinte direção:

- Apresentar os diferentes tipos de esforços passíveis de ocorrer nos enrolamentos de um transformador, identificando os principais tipos de falhas provocadas por essas solicitações;
- Desenvolver uma metodologia analítica para estimar os esforços e estresses nos enrolamentos de um transformador trifásico;
- Realizar modelagens e simulações computacionais de um transformador de 15 kVA, utilizando-se um programa reconhecido internacionalmente baseado no método dos elementos finitos na sua versão tridimensional (FLUX3D).
- Estabelecer termos comparativos entre as metodologias utilizadas, a partir de um protótipo trifásico de 15 kVA, do tipo “núcleo envolvido” com núcleo ferromagnético de três colunas e dois enrolamentos concêntricos de dupla camada.

Deve-se ressaltar que, a escolha de uma unidade trifásica de pequeno porte, reside no fato que o equipamento foi construído especialmente para este trabalho e também os pesquisadores detêm informações detalhadas sobre o projeto do equipamento.

2.2 CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Sistemas elétricos estão sujeitos, frequentemente, a distúrbios em seu modo de funcionamento. Algumas das perturbações mais comuns são os curtos-circuitos. Estes ocorrem em decorrência do aparecimento de defeitos no isolamento, permitindo o contato direto entre pontos com diferentes potenciais. A consequência direta deste fenômeno é a drástica redução na impedância do circuito, elevando a corrente, instantaneamente, com ação devastadora sobre os componentes de um sistema.

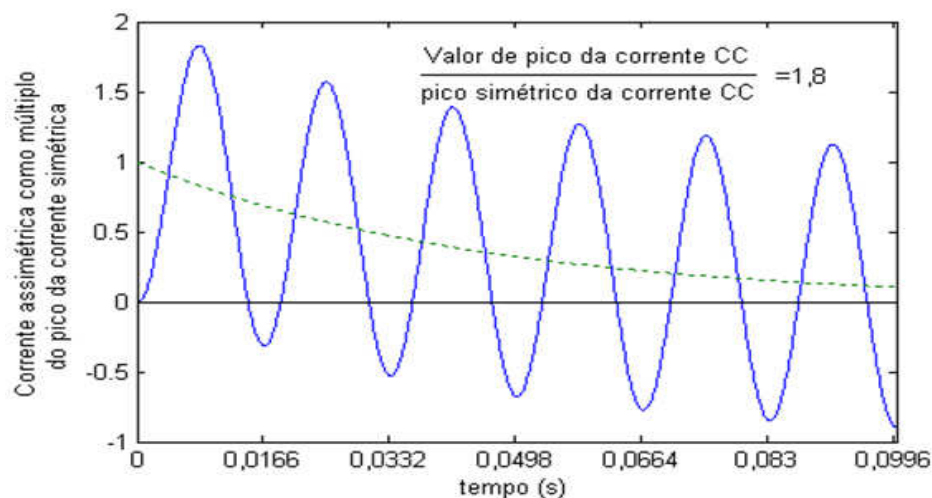
No que tange à sua magnitude, a corrente de curto-circuito é dependente de vários fatores, tais como: topologia da rede, tipo de curto-circuito, capacidade do sistema de geração, tipos de aterramento, entre outros.

Neste contexto, a solicitação térmica, além de ser função do quadrado do valor eficaz da corrente de curto-circuito, depende do tempo de duração desta

corrente. Desta forma, é necessário que a proteção contra curto-circuito atue o mais rapidamente possível e separe o ponto de falta da fonte de tensão. A solicitação dinâmica depende principalmente do quadrado do valor assimétrico da corrente de curto-circuito.

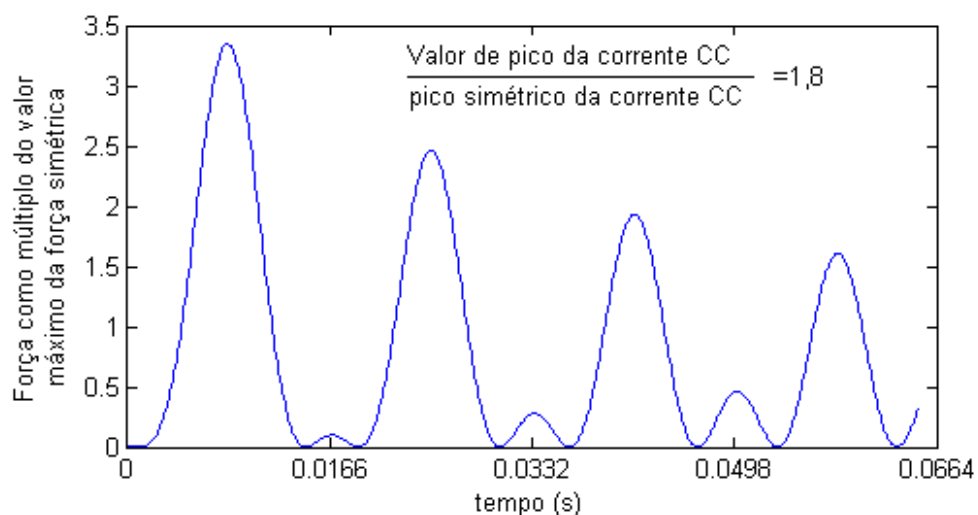
A Figura 2.1 mostra uma situação de máxima assimetria da corrente de curto-circuito trifásico, enquanto que, a Figura 2.2 ilustra a forma de onda da força eletromagnética imposta nos enrolamentos do transformador (WATERS, 1966).

Figura 2.1 - Situação de máxima assimetria da corrente de curto-circuito trifásico



(FONTE: WATERS, 1966)

Figura 2.2 - Forma de onda da força eletromagnética imposta nos enrolamentos



(FONTE: WATERS, 1966)

Assim, as correntes de curto-circuito, além de ser uma das mais frequentes causas de falhas, encontram-se também, entre as faltas que apresentam maior

severidade, em termos de impacto sobre as estruturas de sustentação de transformadores (STEURER, at all, 2002). Entretanto, a formulação teórica para calcular as correntes de curto-circuito são bastante conhecidas e, por isso, não são aqui apresentadas. Entretanto, podem ser consultadas na referência Waters (1966).

2.3 FALHAS ELETROMECÂNICAS EM TRANSFORMADORES

Em condições normais de operação as forças eletromecânicas bem como os campos magnéticos de dispersão no transformador são relativamente pequenos e, por conseguinte, os esforços são perfeitamente suportáveis pelas estruturas mecânicas dos enrolamentos. No entanto, sob condição de curto-circuito, os campos de dispersão associados às elevadas correntes alcançam valores relativamente altos e, conseqüentemente, os esforços decorrentes podem destruir total ou parcialmente o transformador, caso os condutores não estejam adequadamente sustentados pelas estruturas mecânicas (ROSENTINO, at all, 2009), (WATERS, 1966), (ROSENTINO, 2010) e (CIGRE, 2002).

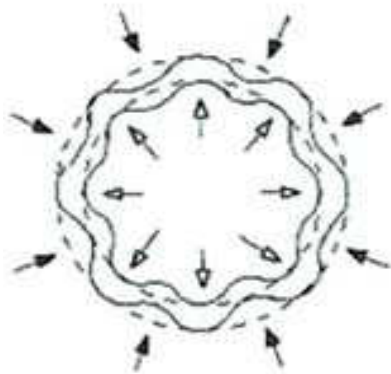
2.3.1 FORÇAS RADIAIS

As forças radiais são oriundas da componente de fluxo (indução magnética) de dispersão axial e produzem efeitos diferenciados nos enrolamentos externo e interno dos transformadores no caso de curto-circuito. Para transformadores do tipo “núcleo envolvido” a tendência dos esforços eletrodinâmicos é comprimir (estresses de compressão) o enrolamento interno enquanto que a expansão (estresses de tração) é exercida no enrolamento externo (ROSENTINO, At all, 2009), (WATERS, 1966), (ROSENTINO, 2010) e (CIGRE, 2002).

No curto-circuito a ocorrência da deformação radial no enrolamento interno é mais comum que no enrolamento externo e é caracterizada por duas maneiras distintas. Uma delas chamada de “curvatura forçada” (*forced buckling*), a qual ocorre quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores localizados na direção axial com os condutores (WATERS, 1966), e (CIGRE, 2002).

Isto acontece quando o valor do estresse mecânico excede o limite elástico do material condutor. A outra forma de deformação é chamada “curvatura livre” (*free buckling*), com o condutor se deformando livremente nos dois sentidos radiais em um ou mais pontos da espira do enrolamento. Esses tipos de falhas estão ilustrados na Figura 2.3 (DOBLE, 2006), (BJERKAN, 2005), (ROSENTINO, 2010) e (CIGRE, 2002).

Figura 2.3 - Efeitos típicos de estresse eletromecânico nos enrolamentos causados por forças radiais

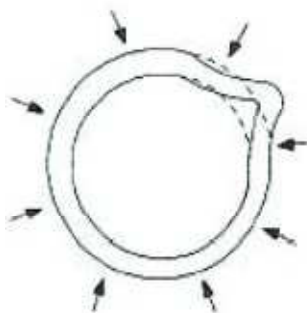


(FONTE: CIGRE, 2002)



(FONTE: BJERKAN, 2005)

a) *Forced Buckling*



(FONTE: CIGRE, 2002)



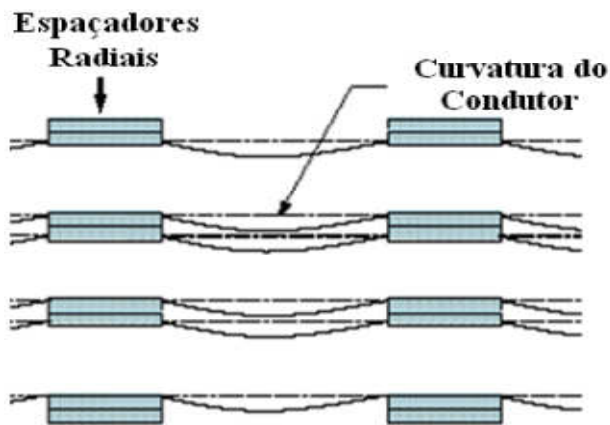
(FONTE: DOBLE, 2006)

b) *Free Buckling*

2.3.2 FORÇAS AXIAIS

As forças axiais para o curto-circuito são oriundas da componente de fluxo (indução magnética) de dispersão radial e produzem o efeito de compressão axial nos enrolamentos. Sob a ação desse tipo de força, os condutores dos enrolamentos podem curvar-se entre os espaçadores isolantes localizados radialmente ou inclinar-se entre si. A ocorrência deste último fenômeno é uma das características dos enrolamentos do tipo disco, geralmente utilizados transformadores de grande porte. Esses tipos de falhas estão ilustrados na Figura 2.4 (ROSENTINO, At all, 2009) e (CIGRE, 2008).

Figura 2.4 - Efeitos típicos de estresse eletromecânico nos enrolamentos causados por forças axiais

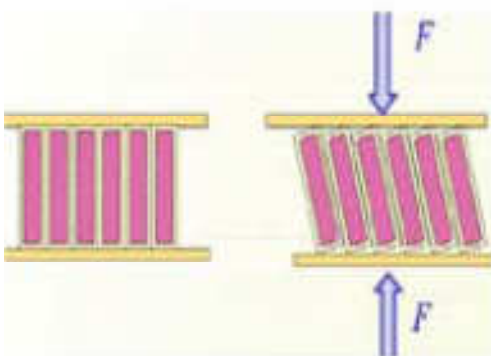


(FONTE: KULKARNI,at all, 2004)



(FONTE: DOBLE, 2006)

(a) *Bending*



(FONTE: PREVOST, 2007)



(FONTE: LAPWORTH, 2006)

b) *Tilting*

2.4 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS E ESTRESSES ELETROMECHANICOS: ABORDAGEM ANALÍTICA

De acordo com a teoria eletrodinâmica, a densidade de força num dado volume de uma bobina de um transformador é igual ao produto vetorial da densidade de corrente na bobina pela densidade de fluxo magnético de dispersão. Esta correlação é dada pela Equação 2.1, que se fundamenta na expressão básica das forças de Lorentz (WATERS, 1966).

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

Onde:

F: Densidade volumétrica da força magnética [N/m³].

J: Densidade superficial de corrente [A/m²].

B: Densidade de fluxo magnético de dispersão [T].

A Equação (2.1) define as forças eletromagnéticas como a interação entre as componentes das densidades de fluxo de dispersão e a corrente que circula nos enrolamentos. O processo de interação entre essas grandezas vetoriais acontece da seguinte forma: a densidade de fluxo magnético de dispersão axial interage com a corrente do enrolamento, dando origem a uma força radial. Por outro lado, a interação entre o campo de dispersão radial com a corrente dá origem a uma força axial.

Como já mencionado, sob condições normais de operação as forças e os campos de dispersão são relativamente pequenos e, por conseguinte, os esforços são perfeitamente suportáveis pelas estruturas mecânicas dos enrolamentos. No entanto, sob ação de fenômenos transitórios, tais como, curtos-circuitos e correntes de energização, os campos de dispersão devidos às elevadas correntes também alcançam valores muito expressivos, implicando em esforços eletromecânicos bastante acentuados. Daí surge a necessidade de se investigá-los.

2.4.1 CÁLCULO ANALÍTICO DAS FORÇAS RADIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS

As componentes radiais das forças num transformador com enrolamentos concêntricos podem ser calculadas através de um método analítico clássico descrito em (WATERS, 1966).

A força radial total atuando sobre um enrolamento de diâmetro D_m e altura h pode ser determinada com auxílio da Equação 2.2.

$$F_r = \frac{2\pi^2 (nI_{\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} \quad [\text{N}] \quad (2.2)$$

Onde:

n : Número de espiras do enrolamento;

h : Altura do enrolamento [m];

D_m : Diâmetro do enrolamento [m];

$I_{\max}$: Corrente assimétrica de curto-circuito [A].

A força radial média $F_{rmed} = F_r / \pi$ é dada pela Equação 2.3:

$$F_{rmed} = \frac{2\pi (nI_{\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} \quad [\text{N}] \quad (2.3)$$

Além disso, a força radial distribuída ($F_{rad-dist}$) ao longo da bobina pode ser obtida pela utilização da Equação 2.4:

$$F_{rad-dist} = \frac{2\pi \cdot (n \cdot I_{\max})^2}{h} 10^{-7} \quad [\text{N/m}] \quad (2.4)$$

Desta forma, o estresse médio de tração no enrolamento externo ($\sigma_{r-medio}$) será dado pela Equação 2.5:

$$\sigma_{r-medio} = \frac{F_{rad-dist} D_m}{2na_c} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.5)$$

Onde:

a_c : Área de seção transversal do condutor [m²].

Existem dois valores críticos de estresse radial, levando-se em consideração o efeito “*buckling*”, os quais dependem da utilização ou não de suportes axiais. Para os casos de enrolamentos desprovidos de estruturas de sustentação axial (*free buckling*), o valor do estresse crítico ($\sigma_{crit-free-buckling}$) pode ser calculado pela Equação 2.6.

$$\sigma_{crit-free-buckling} = \frac{E \cdot e^2}{D_m^2} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.6)$$

Onde:

E : Módulo de elasticidade do material [N/m²];

e : Dimensão radial do condutor [m].

Por outro lado, para os casos de enrolamentos providos de estruturas de sustentação axial, o valor do estresse crítico pode ser estimado pela Equação 2.7.

$$\sigma_{crit-forced-buckling} = \frac{E(\delta) \cdot (a \cdot e^2) \cdot Esp_a^2}{12 \cdot D_m^2} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2.7)$$

Sendo:

$E(\delta)$: Módulo de elasticidade incremental ao valor crítico [N/m²].

a : Constante do fabricante para espessura equivalente do condutor.

Esp_a : Quantidade de suportes axiais.

Quando se faz uso de suportes, o estresse médio ($\sigma_{medio-buckling}$) neste caso é função da distância entre os mesmos e das dimensões do condutor, cujo valor é dado pela Equação 2.8.

$$\sigma_{medio-buckling} = \frac{F_{rad-dist} \cdot L_{ax}^2}{2 \cdot b \cdot e^2} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2.8)$$

Onde:

L_{ax} : Distância entre os suportes axiais [m];

b : Dimensão axial do condutor [m].

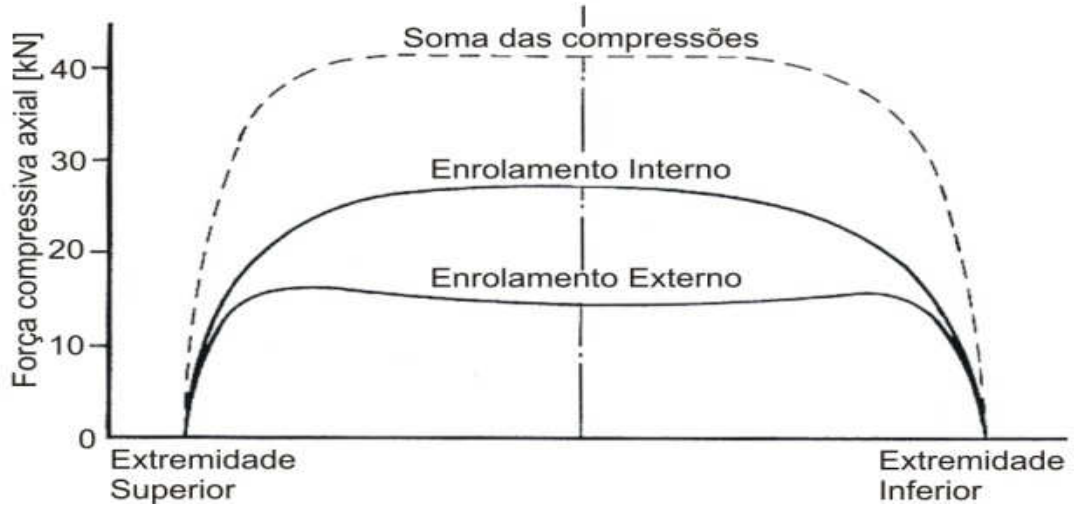
2.4.2 CÁLCULO ANALÍTICO DAS FORÇAS AXIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS

O cálculo analítico das componentes radiais da densidade de fluxo magnético de dispersão (causadoras das forças axiais) 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 axial (WATERS, 1966).

No entanto, transformadores que apresentam condições ideais, ou seja, enrolamentos concêntricos sem derivação, sem deslocamento axial e de igual comprimento, a força resultante entre os enrolamentos é igual a zero. Desta forma, não há necessidade da aplicação de algum método específico para esta situação

dita ideal. Porém neste caso atípico existe uma força de compressão interna em ambos os enrolamentos. A Figura 2.5 ilustra as forças axiais em ambos os enrolamentos para a situação mencionada (HEATHCOTE, 1998).

Figura 2.5 - Curvas de compressão axial para enrolamentos concêntricos sem derivação



(FONTE: HEATHCOTE, 1998)

A curva pontilhada representa a soma das compressões, e tem um valor constante ao longo da maior parte do enrolamento. Este indicador é estimado pela Equação 2.9 (WATERS, 1966) e (HEATHCOTE, 1998).

$$F_{cTotal} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_{max})^2 D_{mt} \cdot 10^{-7}}{h^2} \left[d_0 + \frac{d_i + d_e}{3} \right] \quad [N] \quad (2.9)$$

Onde:

F_{cTotal} : Força compressiva total [N];

D_{mt} : Diâmetro médio dos enrolamentos do transformador [m];

d_0 : Ducto do transformador [m];

d_i : Espessura radial do enrolamento interno [m];

d_e : Espessura radial do enrolamento externo [m].

Deve-se ressaltar que (nI_{max}) representa o ampère-espira em um dos enrolamentos.

De acordo com Waters (1966), na ausência de uma análise mais detalhada,

pode-se considerar que cerca de 2/3 a 3/4 desta força é aplicada no enrolamento interno e os 1/3 a 1/4 restantes estão aplicados no enrolamento externo.

Em enrolamentos sem derivação, os estresses individuais mais altos ocorrem no final dos enrolamentos. Testes têm mostrado que as forças no final das bobinas dos enrolamentos externos e internos são aproximadamente as mesmas. Neste sentido, a força axial total (F_a) no final da bobina ou espira de qualquer enrolamento, em condições ideais, é dada pela Equação 2.10.

$$F_a = 0,366 \cdot q \cdot F \cdot \log\left(\frac{1 + 4 \cdot d_1^2}{w^2}\right) \quad [\text{N}] \quad (2.10)$$

Onde:

q : Fração do ampère-espira total em um enrolamento;

w : Dimensão axial do condutor com sua isolação [m];

d_1 : Largura equivalente do ducto do transformador [m].

A largura equivalente do ducto do transformador, d_1 , e a força F , são fornecidas, respectivamente, pelas Equações 2.11 e 2.12:

$$d_1 = d_0 + \frac{1}{3}(d_i + d_e) \quad [\text{m}] \quad (2.11)$$

$$F = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_{\max})^2 \cdot D_{mt}}{h} 10^{-7} \quad [\text{N}] \quad (2.12)$$

Quanto aos estresses causados pelas forças axiais, têm-se aqueles relacionados com a tendência de curvatura (*bending*), quando são utilizados espaçadores radiais ($\sigma_{ax-bending}$), e podem ser calculados utilizando a Equação 2.13 (CIGRE, 2002).

$$\sigma_{ax-bending} = \frac{F_{ax-dist} \cdot L_{rad}^2}{2 \cdot e \cdot b^2} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.13)$$

Onde:

L_{rad} : Distância entre os suportes radiais [m].

A força axial distribuída, $F_{ax-dist}$, ao longo da espira é dada pela Equação 2.14.

$$F_{ax-dist} = \frac{F_a}{\pi \cdot D_m} \quad (2.14)$$

Lembrando-se que F_a é a força axial na extremidade do enrolamento obtida a partir da Equação 2.10.

2.4.3 ESFORÇO DEVIDO À CARGA AXIAL

Conforme já abordado pode existir uma inclinação dos condutores devido à carga axial (*Tilting*), a qual ocorre em transformadores do tipo disco. Esse tipo de falha é causado pela compressão axial cumulativa, aplicada aos condutores e que é transmitida através dos espaçadores e estruturas de fixação. A carga crítica ($F_{ax-crit}$) que o enrolamento pode suportar é, portanto, não somente função dos parâmetros do condutor, mas também, da construção do enrolamento ($\sigma_{ax-crit}$), incluindo a isolamento entre condutores (PATEL, 2002), (WATERS, 1966) e (CIGRE, 2002). Esta carga crítica pode ser determinada pelas equações 2.15 e 2.16 (IEC, 2006).

$$F_{ax-crit} = \left[k_1 \cdot \frac{n \cdot E \cdot e \cdot b^2}{D_m} + k_2 \cdot \frac{\gamma \cdot X \cdot n \cdot \pi \cdot D_m \cdot e^3}{b} \right] \cdot k_3 \cdot k_4 \quad [N] \quad (2.15)$$

$$\sigma_{ax-crit} = \left[k_1 \cdot \frac{E \cdot b^2}{\pi \cdot D_m} + k_2 \cdot \frac{\gamma \cdot X \cdot e^2}{b} \right] \cdot k_3 \cdot k_4 \quad [N/m^2] \quad (2.16)$$

Onde:

$X = s \cdot Esp_r / \pi \cdot D_m$, definida para enrolamento do tipo disco com espaçador;

$X = 1$, valor utilizado para enrolamento do tipo disco sem espaçador ou enrolamento do tipo camada;

$\gamma = 1,0$; $k_1 = 0,5$; $k_2 = 45$; $k_4 = 1,2$.

s : Largura dos espaçadores radiais [m];

Esp_r : Quantidade de espaçadores radiais.

Os valores para k_3 são fornecidos pela tabela 2.1, os quais dependem do valor do estresse admissível.

Tabela 2.1 - Valores para a constante k_3 .

Estresse Admissível (N/mm²)	K₃
<150	1,0
150	1,1
180	1,2
230	1,3
>230	1,4

(FONTE: IEC, 2006)

Deve-se citar que a metodologia analítica aplicada às forças axiais para situações não ideais, a qual se baseia em um método específico, pode ser encontrada nas referências (WATERS, 1966).

2.5 ESTRATÉGIAS DE COMPARAÇÃO

Com o objetivo de demonstrar, por parâmetros comparativos, a validade da metodologia analítica, foram utilizadas, nesta seção, modelagens e simulações computacionais. Para as análises eletromecânicas foram utilizados respectivamente, um protótipo de transformador de 15 kVA e o pacote computacional CEDRAT - FLUX, em sua versão tridimensional.

A escolha deste software se deu em função da eficiência de alguns de seus módulos para as avaliações supracitadas. Outro motivo está ligado ao fato de que este foi definido como ideal nas realizações do projeto de P&D, também anteriormente citado. Entretanto, com o término do P&D, sua licença de utilização foi repassada à Chesf, motivo pelo qual um transformador de maior porte não foi modelado e avaliado computacionalmente, quanto à sua distribuição de estresses eletromecânicos. Ainda assim, existe a convicção de que a metodologia analítica apresentada se aplica a grandes transformadores.

Quanto à escolha do transformador, trata-se de um equipamento de 15kVA, cuja relação é de 1 para 1, ou seja de 220 v para 220 v. Este protótipo mostrou-se

adequado devido ao fato de que todos os seus parâmetros serem amplamente conhecidos, possibilitando acurada modelagem, para posteriores simulações.

2.5.1 - O PACOTE COMPUTACIONAL

A disponibilidade de ferramentas computacionais de alto desempenho, com capacidade para armazenar grande quantidade de informações, capazes de executar cálculos matemáticos complexos e gerar resultados em diversas formas, tem permitido direcionar as estratégias de pesquisa para a utilização crescente das simulações digitais.

Neste contexto, o FLUX, um pacote computacional que emprega a técnica baseada no método dos elementos finitos (FEM) para a realização de diversas simulações computacionais, vem sendo cada vez mais utilizado por sua precisão. Outro atrativo desta metodologia é retratar fisicamente e geometricamente as estruturas a serem analisadas.

O FLUX é um software para simulações eletromagnéticas e térmicas, possui versões tanto em duas dimensões (2D) quanto em três dimensões (3D). Os módulos básicos incluem o pré-processamento (modelagem, definição das propriedades físicas, e confecção das malhas), processamento (resolução de problemas) e pós-processamento (exibição de resultados). Este programa é adequado para a concepção, otimização e análise de quaisquer dispositivos eletromagnéticos, tais como, motores elétricos, geradores, atuadores lineares, transformadores, sensores, cabos, compatibilidade eletromagnética, avaliação não destrutiva de dispositivos.

Assim, de uma maneira geral, este software possui grande confiabilidade na comunidade de engenharia elétrica, entretanto, seu manuseio é bastante complexo. Essa complexidade se deve ao fato de que é necessário possuir informações detalhadas sobre todas as características físicas e construtivas do equipamento que se deseja modelar.

Neste sentido, este pacote computacional, em sua versão tri-dimensional, se mostrou adequado às simulações eletromagnéticas que permitem estudar os comportamentos, elétrico, mecânico e magnético de um transformador quando submetido às sobrecorrentes.

2.5.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TRANSFORMADOR

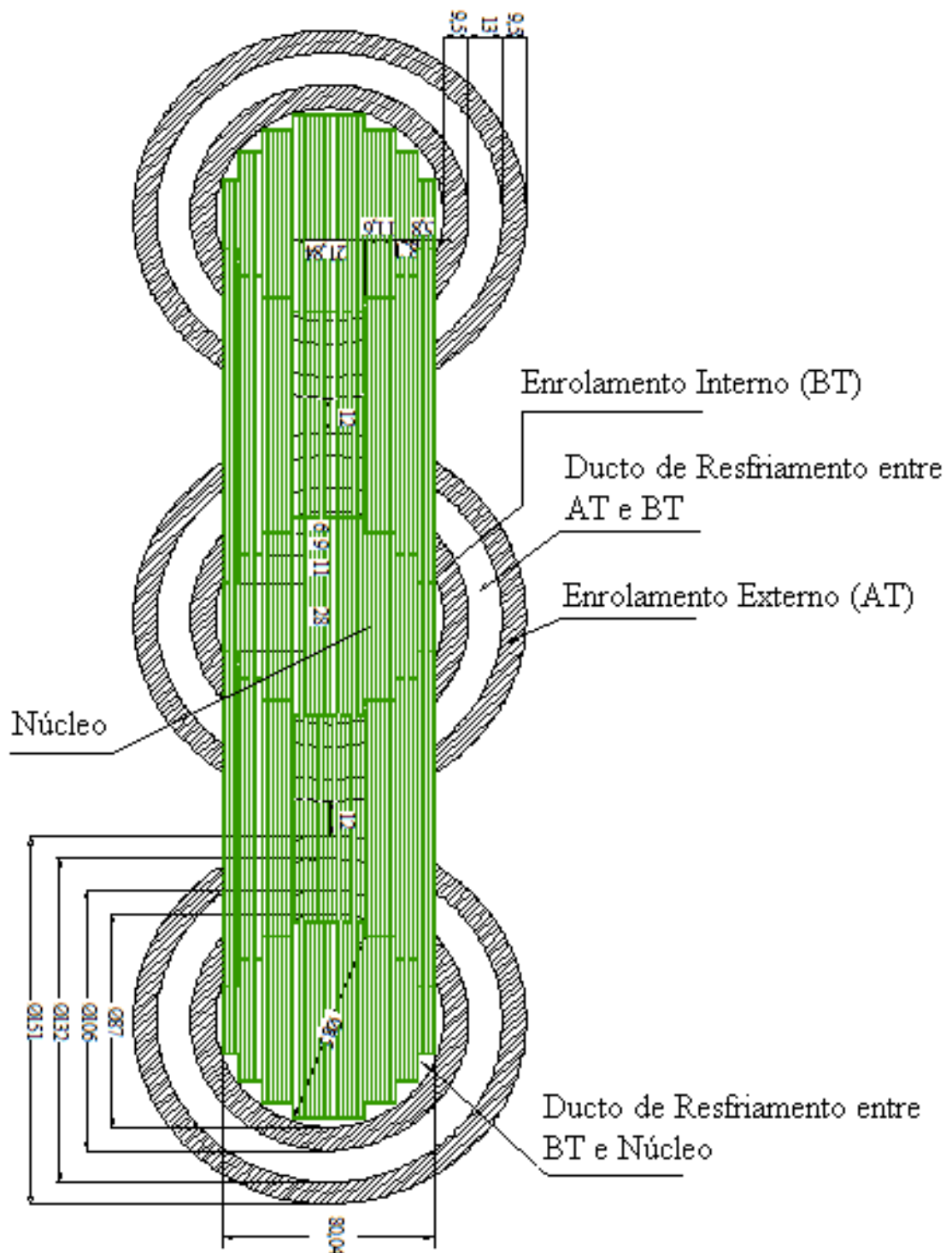
Para os fins aqui almejados, quais sejam, propiciar parâmetros para serem utilizados como afirmação da veracidade da metodologia analítica indicada, a Figura 2.6 mostra o transformador utilizado, enquanto as Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 apresentam algumas características geométricas e físicas para subsidiarem a modelagem computacional. Adicionalmente, a Tabela 2.2 fornece algumas características elétricas, magnéticas e geométricas da unidade trifásica de 15 kVA, com dois enrolamentos de dupla camada por fase, conectados em estrela, com tensão nominal em cada enrolamento de 127 V. Cada enrolamento possui duas camadas com 33 espiras, totalizando 66 espiras por bobina (SARAIVA at all, 2008).

Figura 2.6 - Fotografia do transformador de 15 kVA utilizado



(FONTE: SARAIVA at all, 2008)

Figura 2.7 - Características geométricas e físicas do transformador analisado (vista superior)



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

Tabela 2.2 - Características do transformador

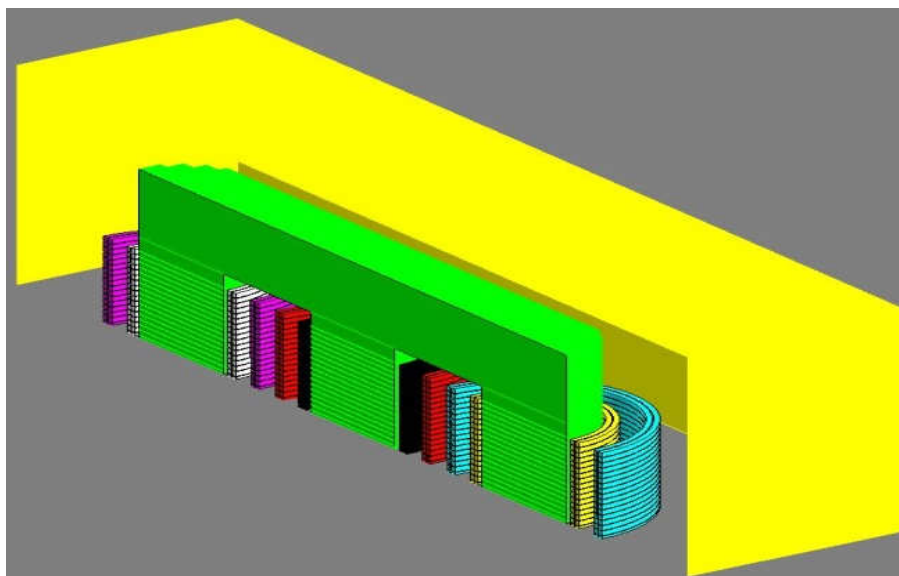
Potência do transformador	15 kVA	
Número de fases	3	
Tensão	Enrolamento externo	220 V
	Enrolamento interno	220 V
Tipo de ligação (enrolamentos com terminais acessíveis)	Enrolamento externo	estrela ou delta
	Enrolamento interno	estrela ou delta
Dimensões do fio de cobre	Enrolamento externo	3,5 x 4,5 mm
	Enrolamento interno	3,5 x 4,5 mm
Densidade de corrente	Enrolamento externo	2,58 A/mm ²
	Enrolamento interno	2,58 A/mm ²
Número de espiras	Enrolamento externo	66
	Enrolamento interno	66
Perdas em curto	Enrolamento externo	190 W
	Enrolamento interno	132 W
Peso do enrolamento	Enrolamento externo	13 kg
	Enrolamento interno	9 kg
Resistência do enrolamento	Enrolamento externo	125 mΩ
	Enrolamento interno	85 mΩ
Bobina interna	Diâmetro externo	106x10 ⁻³ m
	Diâmetro interno	87x10 ⁻³ m
Bobina externa	Diâmetro externo	151x10 ⁻³ m
	Diâmetro interno	132x10 ⁻³ m
Área aparente	coluna	49,996x10 ⁻⁴ m ²
	culatra	52,826x10 ⁻⁴ m ²
Área líquida	coluna	47,496x10 ⁻⁴ m ²
	culatra	50,185x10 ⁻⁴ m ²
Largura	coluna	80x10 ⁻³ m
	culatra	66x10 ⁻³ m
Densidade de fluxo magnético	coluna	1,55 Tesla
	culatra	1,44 Tesla
Comprimento médio do caminho magnético	coluna	0,26 m
	culatra	0,163 m
Impedância percentual	3,47 %	
Perdas totais no ferro	96 W	
Peso total do núcleo	54 kg	
Frequência de operação	60 Hz	

(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

2.5.3 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

A Figura 2.10 apresenta o modelo implementado no software FLUX 3D, onde é possível observar que apenas $\frac{1}{4}$ do transformador foi inserido. Esta técnica é muito utilizada em aplicações baseadas no método de elementos finitos, pois diminui o tempo de processamento da simulação. O software completa automaticamente o objeto, considerando a sua simetria (SARAIVA, at all, 2008).

Figura 2.10 - Modelo do transformador implementado no FLUX 3D



(FONTE: SARAIVA at all, 2008)

Para a modelagem do transformador trifásico utilizando-se o método dos elementos finitos, o núcleo é representado pela sua geometria, pela curva de magnetização da chapa empregada na construção do mesmo, além dos entreferros existentes entre as junções entre as colunas e culatras. Já a representação dos enrolamentos tomou-se o cuidado de considerar a bobinas espira por espira, incluindo também a espessura do isolante entre as mesmas. Esta consideração permite uma visualização mais fiel do enrolamento, bem como um estudo mais detalhado do estresse eletromecânico que ocorre em cada espira. O material utilizado é o cobre. O tanque é representado basicamente através dos dados geométricos, juntamente com uma espessura e material equivalente ao utilizado em transformadores reais. O óleo e o isolante existentes no equipamento são representados como sendo o ar, uma vez que, para o estudo magnético aqui apresentado esses materiais se equivalem ao ar.

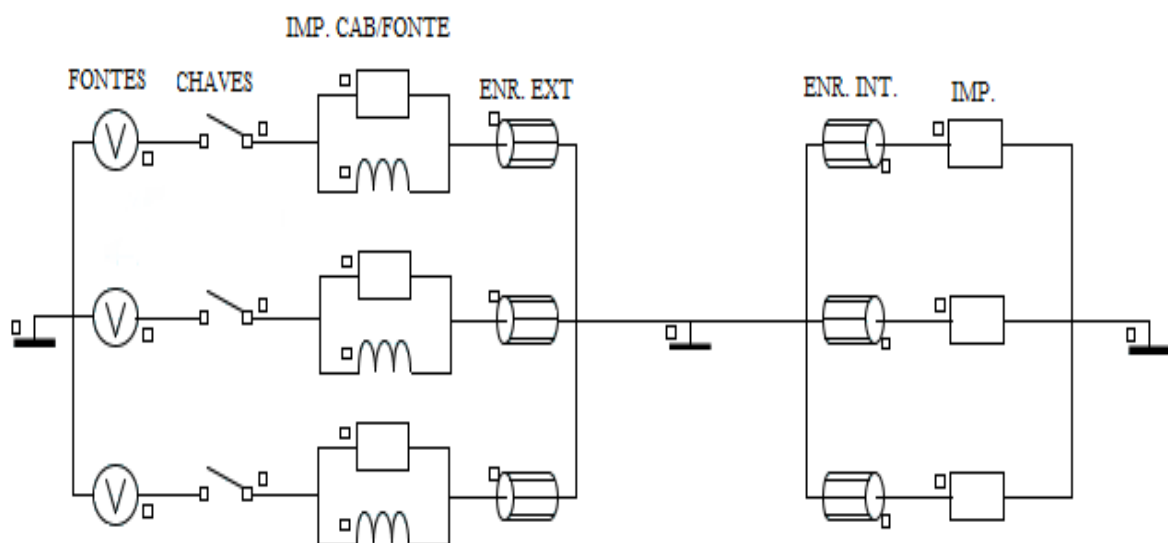
2.5.4 ANÁLISE DO TRANSFORMADOR SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Após a modelagem do equipamento, iniciam-se os estudos computacionais. Para a realização desta simulação o transformador foi energizado pelo enrolamento externo e o enrolamento interno foi curto-circuitado, no instante ($t = 0s$).

Neste sentido, uma vez idealizada a modelagem do enrolamento, deve-se implementar o circuito elétrico no qual os enrolamentos serão conectados. Este passo é importante, pois durante a criação dos enrolamentos é necessário indicar o ponto de conexão ao circuito elétrico correspondente.

O editor de circuitos elétricos do Flux3D dispõe de dispositivos para a implementação do circuito equivalente, este mostra como estão conectados os enrolamentos. Logo, a Figura 2.11, mostra o circuito elétrico criado para representar o transformador submetido a um curto-circuito trifásico.

Figura 2.11 - Circuito implementado para a simulação na condição de curto-circuito trifásico “passante”



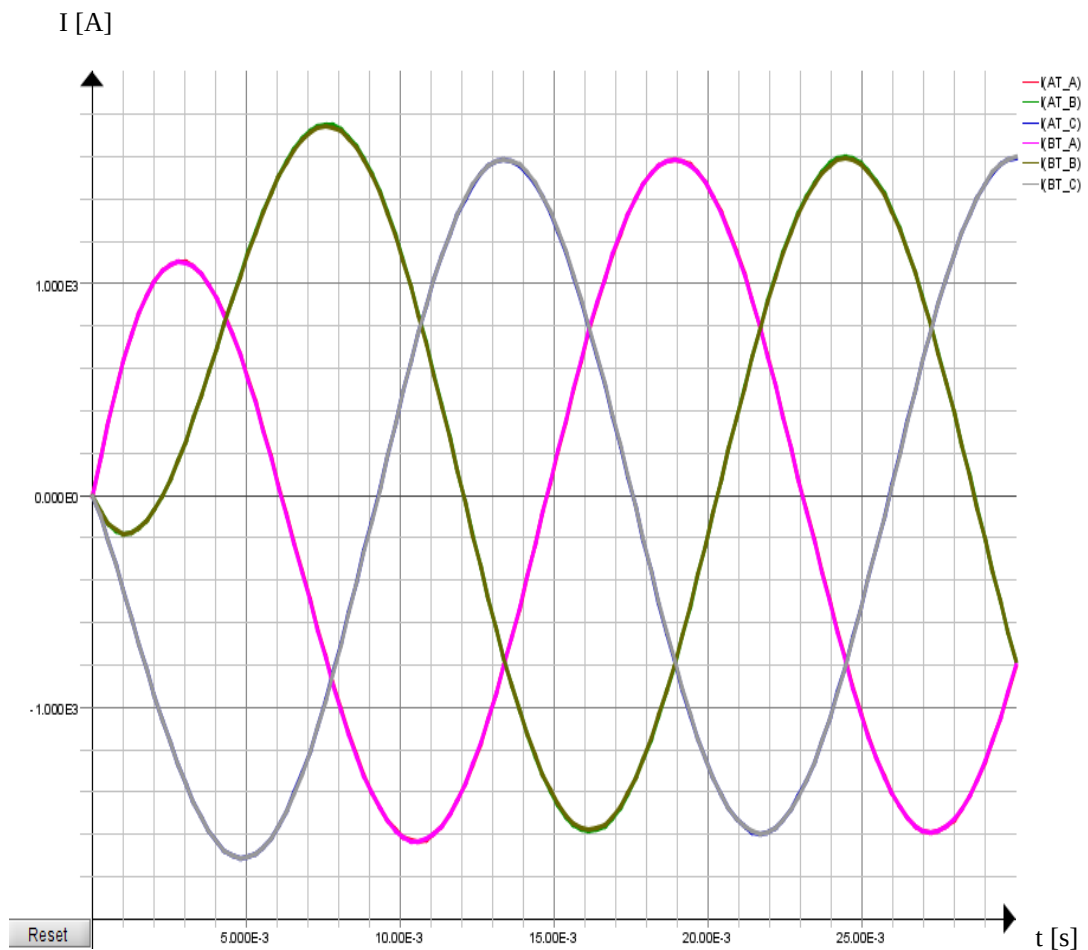
(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

Na Figura 2.11 observa-se a existência de componentes que representam os enrolamentos do transformador. Esses componentes devem ser identificados no FLUX 3D pelas seguintes características: nome, tipo de condutor e a resistência ôhmica da bobina. A partir do circuito equivalente implementado, pode-se realizar os estudos idealizados associados com os estresses mecânicos.

a) Grandezas elétricas

Assim procedendo, a Figura 2.12 apresenta as formas de onda das correntes trifásicas nos enrolamentos externo e interno obtidas através da simulação no FLUX3D.

Figura 2.12 - Formas de onda das correntes nas três fases dos enrolamentos externos e internos



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

A Tabela 2.3 ilustra o valor máximo da corrente obtida computacionalmente, que é igual para todas as fases e, pode ser visualizada na Figura 2.13. A título de comparação, as correntes assimétricas, calculadas analiticamente em ambos os enrolamentos são, também, identificadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores simulados e calculados da corrente de curto-circuito assimétrica

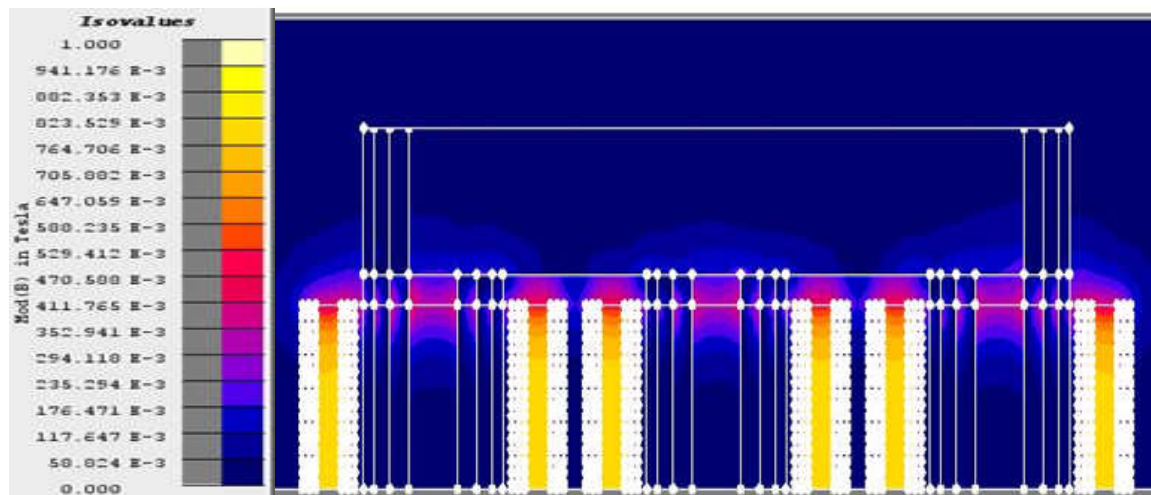
Variável	Método Analítico	Simulação	Erro [%]
Corrente – Enr. Interno	1755 [A]	1742,95 [A]	0,69
Corrente – Enr. Externo	1755 [A]	1752,13 [A]	0,16

(FONTE: AUTOR)

b) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

A Figura 2.13 mostra a distribuição do fluxo (indução magnética) de dispersão no transformador para a condição de curto-circuito trifásico. Observa-se que a maior intensidade de indução magnética se situa entre os enrolamentos (intensidade amarela), indicando que nesta região é onde ocorrem as maiores forças e consequentemente os estresses eletromecânicos mais elevados (SARAIVA at all, 2008).

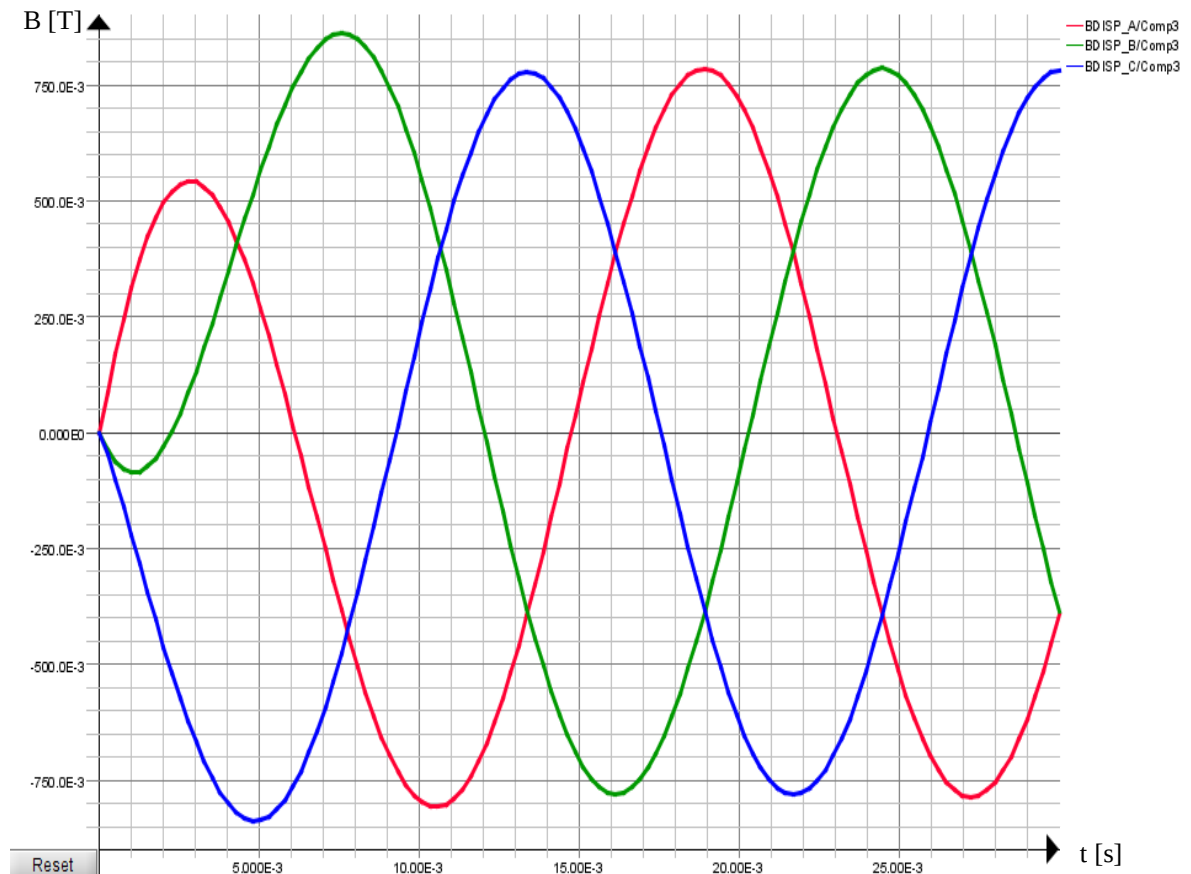
Figura 2.13 - Distribuição do fluxo de dispersão no transformador para a condição de curto - circuito trifásico



(FONTE: SARAIVA at all, 2008)

A título de ilustração a Figura 2.14 apresenta o comportamento da densidade de fluxo de dispersão no tempo para as três fases do modelo implementado.

Figura 2.14 - Formas de onda das densidades de fluxos de dispersão nas três fases do transformador



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

A Tabela 2.4 apresenta o valor máximo obtido em cada uma das fases, para as densidades de fluxos de dispersão ilustradas na Figura 2.14. A título de comparação na mesma tabela, indicam-se as mesmas grandezas magnéticas obtidas através da aplicação da metodologia analítica.

Tabela 2.4 - Densidades de fluxos de dispersão do transformador

Metodologia	Dispersão		
	B_{DISP_A} [T]	B_{DISP_B} [T]	B_{DISP_C} [T]
ANALÍTICO	0,818	0,87552	0,856
FLUX3D	0,807469	0,861673	0,837858

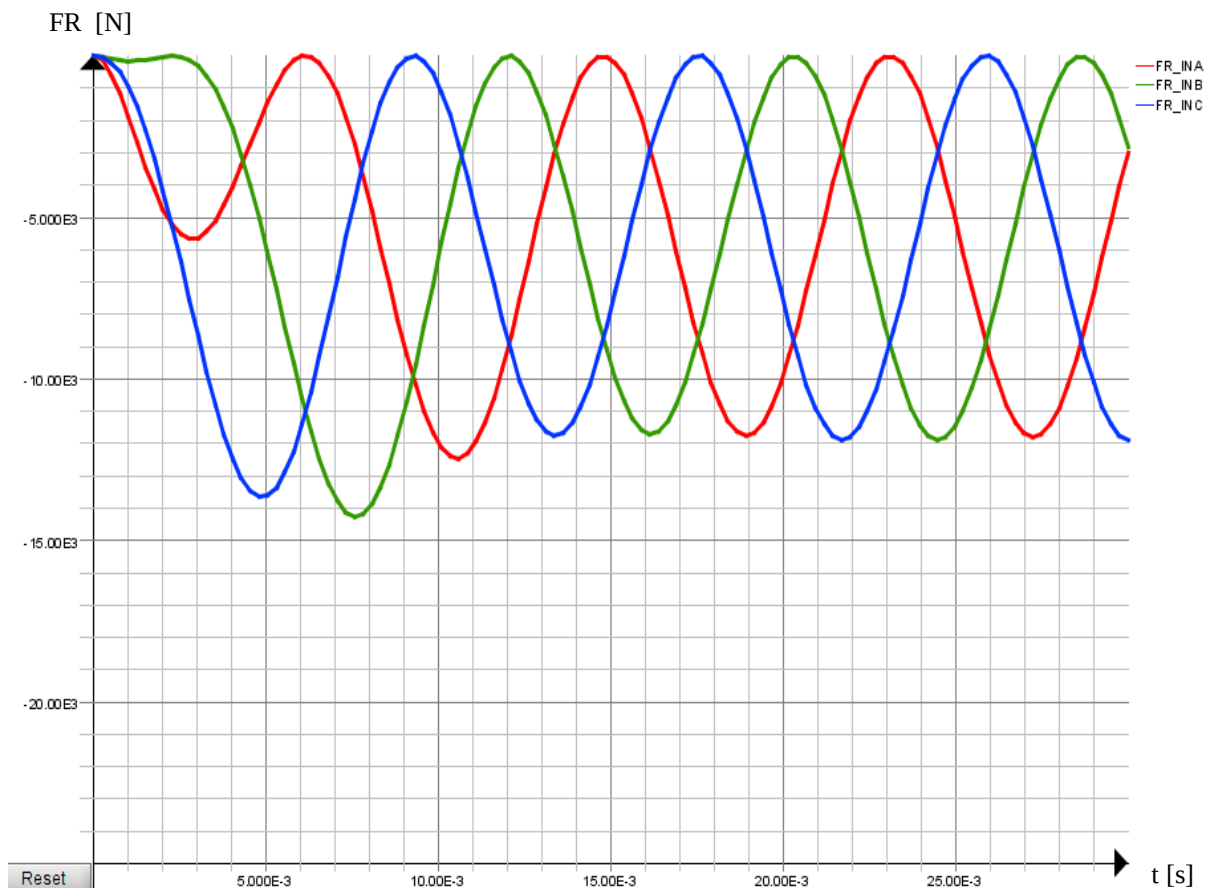
(FONTE: AUTOR)

c) Grandezas Mecânicas

Observa-se nas Figuras 2.12 e 2.14, respectivamente que os valores das correntes que circulam pelos enrolamentos, bem como as densidades de fluxo de dispersão possuem valores bem elevados, quando comparados com os respectivos valores nominais. Esta constatação indica a ocorrência de forças elevadas nos enrolamentos, as quais podem causar deformações nos mesmos, bem como sua destruição.

Desta forma, as próximas variáveis a serem analisadas são as grandezas mecânicas, ou seja: as forças radiais e axiais, bem como o estresse radial para os enrolamentos externos e internos. A Figura 2.15 apresenta a forma de onda das forças radiais totais nos enrolamentos internos do transformador.

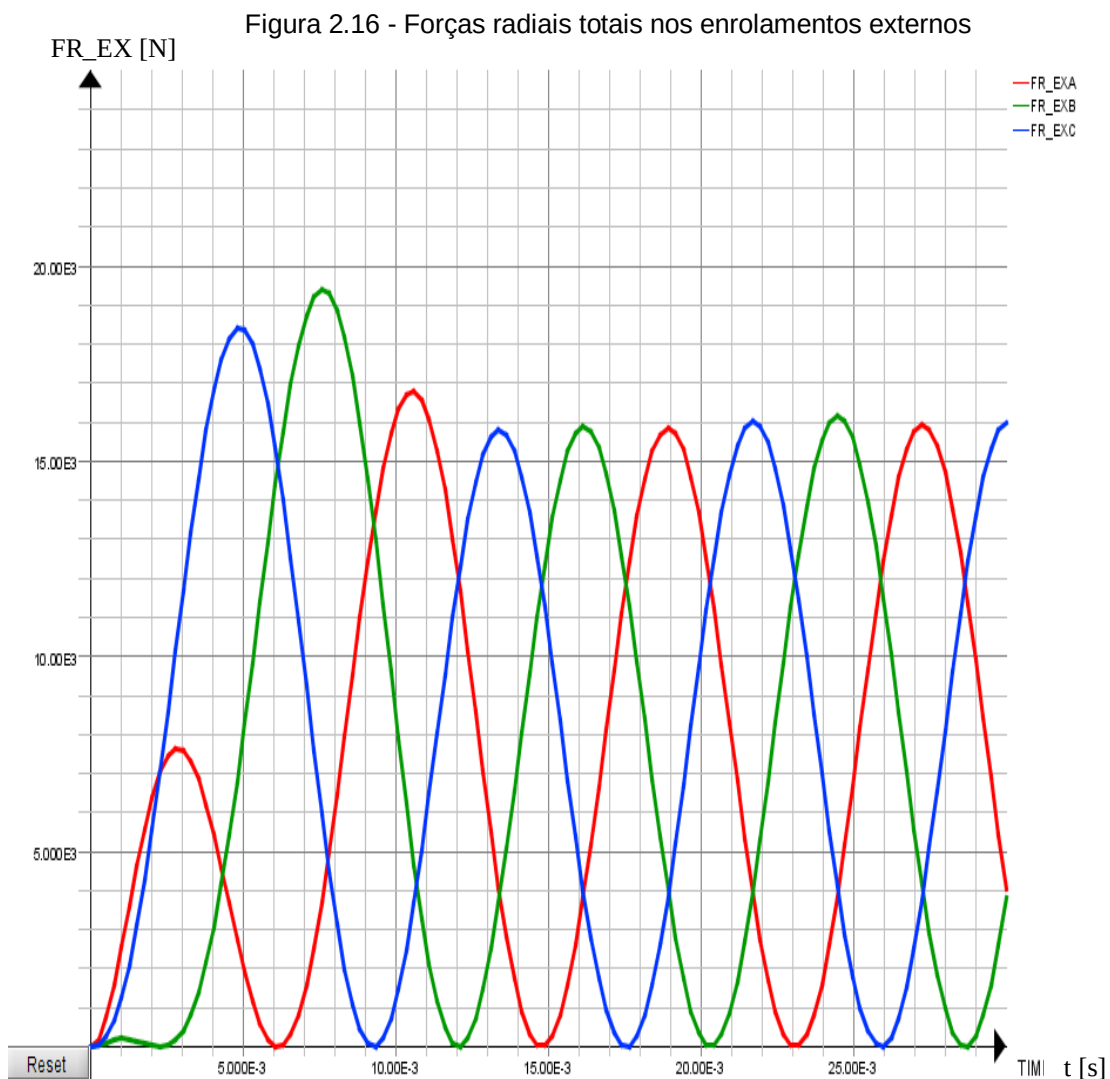
Figura 2.15 - Forças radiais totais nos enrolamentos internos



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

O valor negativo desta força indica o sentido da mesma. Para o enrolamento interno a força radial está no sentido oposto ao eixo “y”, submetendo o referido enrolamento a um estresse de compressão. Esta mesma análise é válida para as forças radiais médias e estresses radiais.

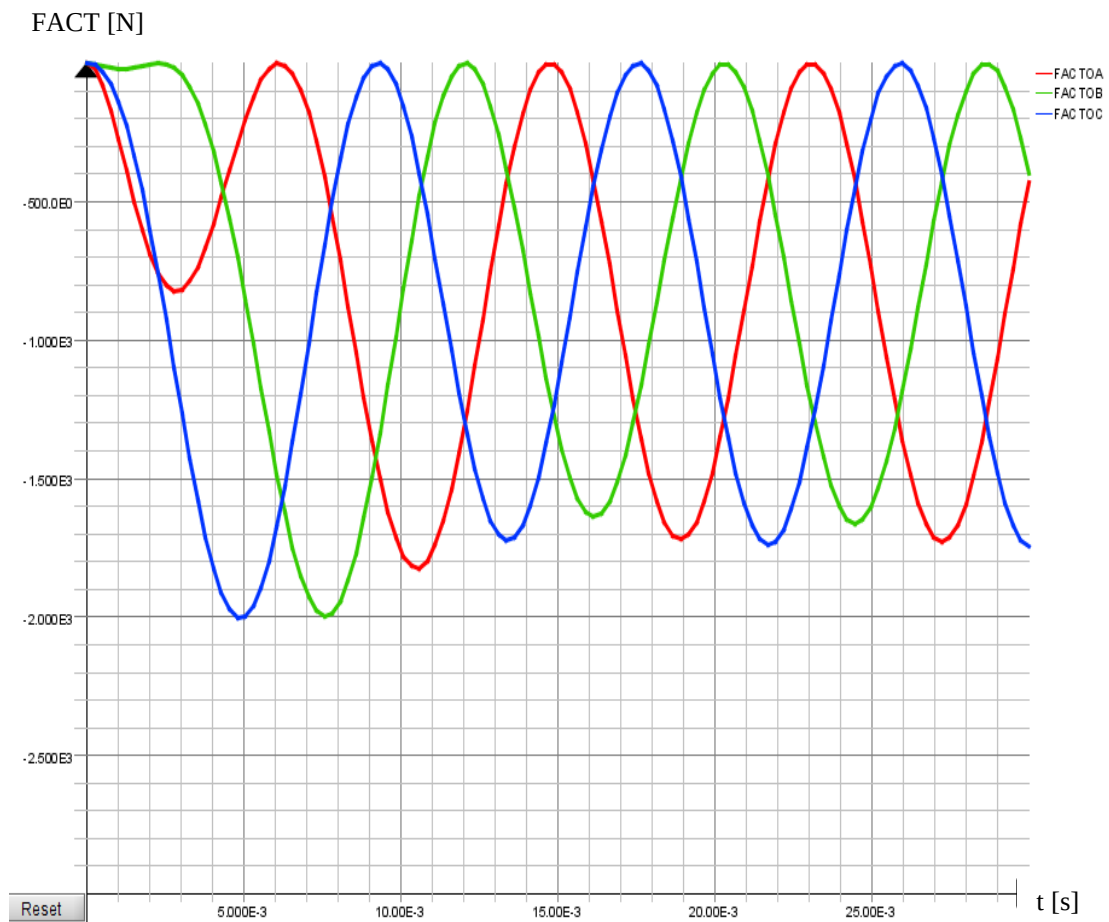
A Figura 2.16 detalha as forças radiais totais impostas aos enrolamentos externos.



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

A Figura 2.17 mostra as forças axiais compressivas totais.

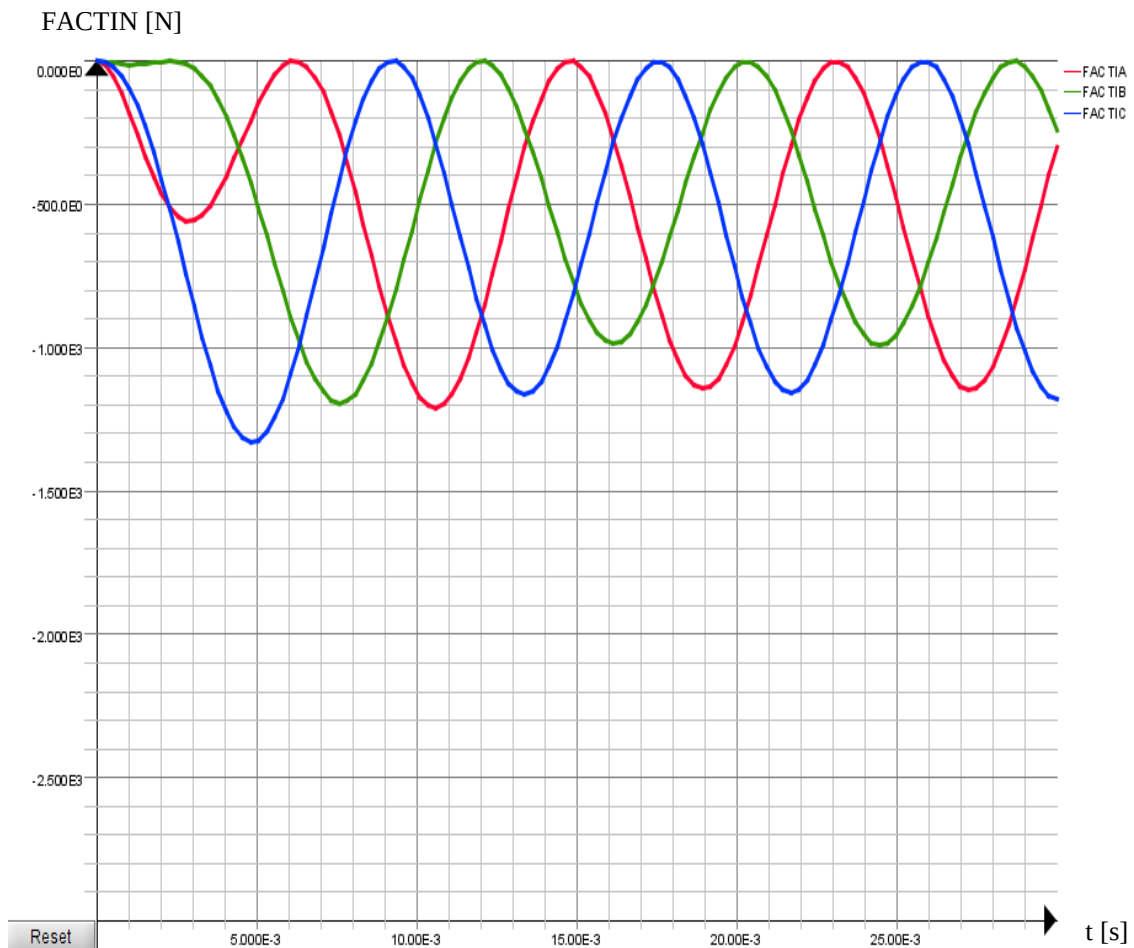
Figura 2.17 - Forças axiais compressivas totais



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

A Figura 2.18 indica os resultados obtidos para a distribuição das forças axiais compressivas totais nos enrolamentos internos.

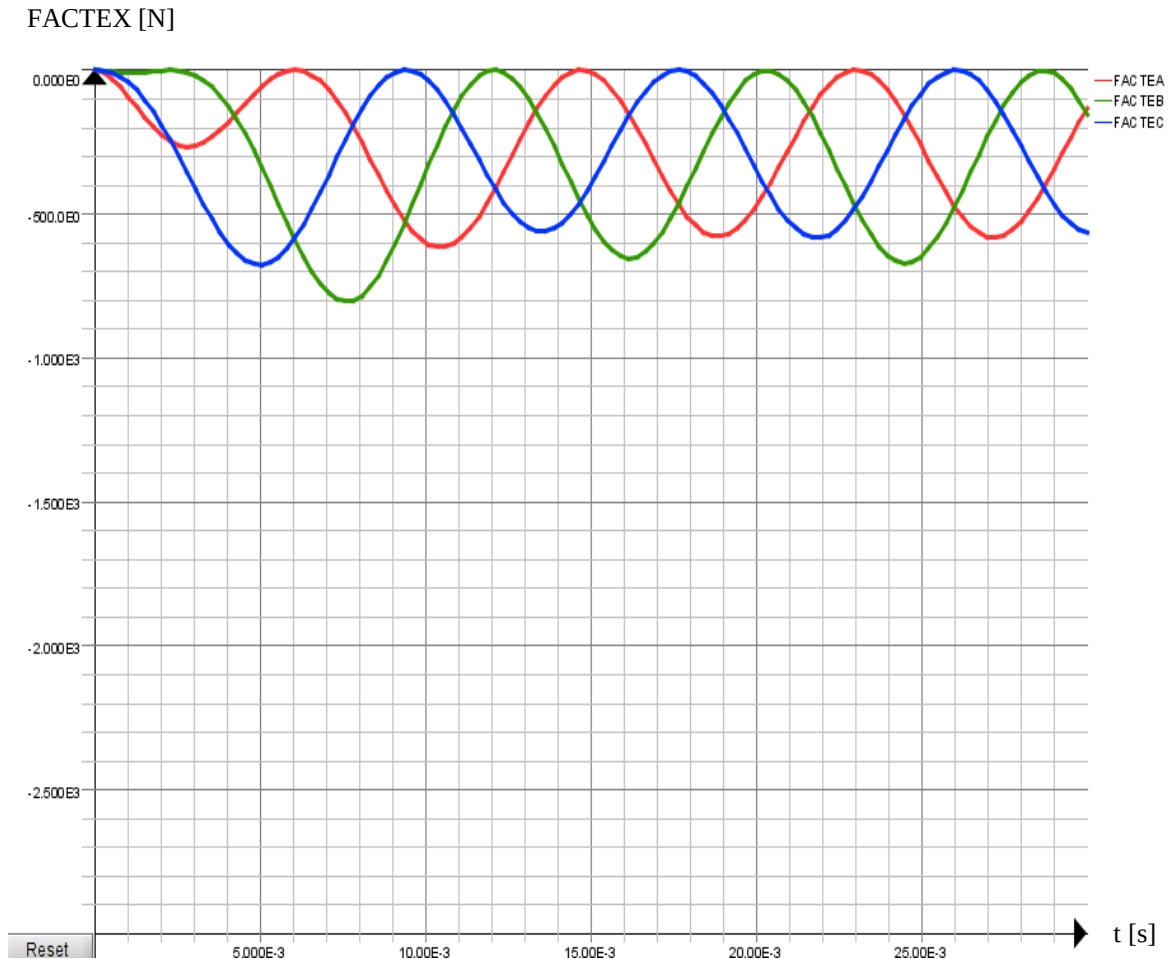
Figura 2.18 - Forças axiais compressivas totais nos enrolamentos internos



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

A Figura 2.19 apresenta os resultados obtidos para a distribuição das forças axiais compressivas totais nos enrolamentos externos.

Figura 2.19 - Forças axiais compressivas totais nos enrolamentos externos



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

A título de ilustração a Tabela 2.5 mostra os módulos dos valores máximos obtidos através desta simulação para as forças radiais totais (FR), forças radiais médias (FRM), estresses radiais médios (ERM) e forças axiais compressivas totais (FACT) e em cada um dos enrolamentos designados por IN (interno) e EX (externo).

Tabela 2.5 - Valores das forças e estresses para a condição de curto-circuito

PARÂMETROS	CALCULADO	FLUX3D			Erro%
	Fase B	Fase A	Fase B	Fase C	
FR_IN [N]	15.651	12.453,7	14.270,7	13.652,5	8,9
FRMIN [N]	4981,8	3.964,13	4.542,5	4.345,74	8,9
ERMIN [N/m ²]	2,4E6	1,9E6	2,18E6	2,09E6	9,2
FR_EX [N]	22.863	16.787,7	19.403,6	18.395,2	15,1
FRMEX [N]	7.277,4	5.343,69	6.176,35	5.855,4	15,1
ERMEX [N/m ²]	3,5E6	2,57E6	2,97E6	2,82E6	15,1
FACT [N]	2.813,1	1.822,96	1.997,32	2.000,99	30,0
FACTIN [N]	1.875,4	1.209,65	1.193,78	1.328,61	36,3
FACTEX[N]	937,71	614,578	803,536	674,989	14,3

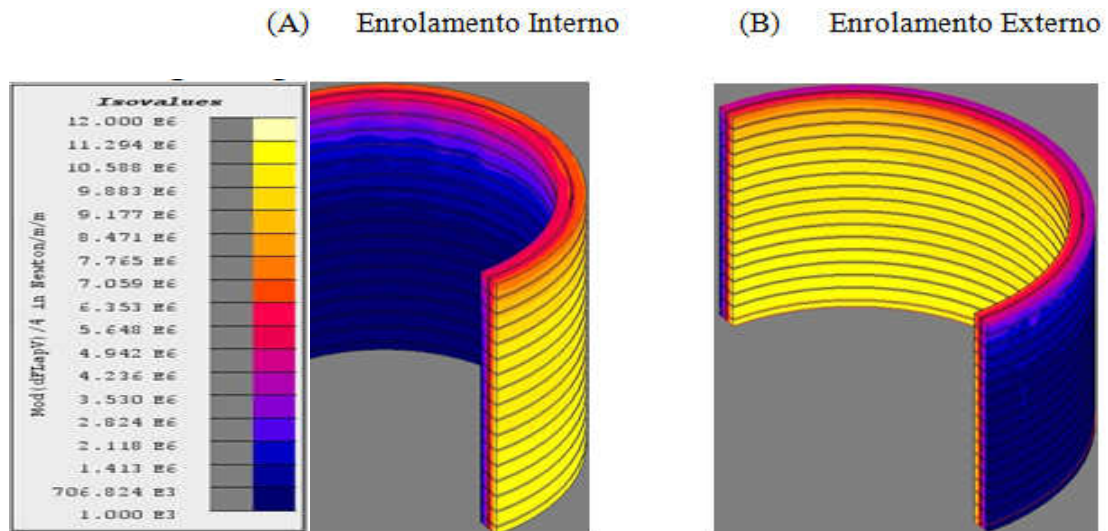
(FONTE: AUTOR)

Tomando-se como base a tabela 2.5, observa-se que:

- Os valores dos esforços eletromecânicos radiais obtidos pelas metodologias referenciadas apresentam um erro percentual aceitável. Isto é justificado, pois, para esta condição, o fluxo magnético no interior do transformador é bem definido;
- Os valores dos esforços eletromecânicos axiais obtidos pelas metodologias referenciadas apresentam um erro percentual de, aproximadamente, 30%. Isto pode ser justificado, pois, no método analítico a estimativa desses cálculos é baseada em várias simplificações, enquanto que, na metodologia computacional, por elementos finitos, a representação do transformador torna-se mais próxima da construção física real do equipamento. Portanto, os valores encontrados por esta metodologia são aqueles que devem ser considerados na fase de projeto ou de avaliação do transformador.

A título de visualização, a Figura 2.20 identifica os valores dos estresses eletromecânicos nos enrolamentos interno e externo do transformador. Pode-se observar que as maiores intensidades, conforme a distribuição de cores na Figura 2.13, tanto no enrolamento interno quanto no externo está localizada nas camadas próximas à região de maior indução magnética (ROSENTINO, at all, 2011).

Figura 2.20 - Estresses eletromecânicos nos enrolamentos (a) interno e (b) externo



(FONTE: SARAIVA et al, 2008)

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à importância de entender melhor o processo de falhas em transformadores de potência, foram apresentadas pesquisas, relatos e fotografias evidenciando que a maioria dos problemas é atribuída, direta ou indiretamente, a falhas na isolação, provocadas pela diminuição da resistência dielétrica dos isolantes. As características dessas falhas foram bem descritas, tanto aquelas causadas por forças radiais, quanto às oriundas de forças axiais. Verificou-se que as forças radiais originadas pela componente de campo agindo axialmente produzem estresse de compressão no enrolamento interno e estresse de tração no externo. As forças axiais originadas pela componente de campo agindo radialmente tende a comprimir ambos os enrolamentos, podendo causar inclinação nos condutores e flexão desses quando estão entre espaçadores. Estas componentes de campo (campo de dispersão) citadas anteriormente foram bem descritas, já que são as causadoras das forças. Adicionalmente, foi feita uma descrição analítica dessas forças agindo no transformador, verificando que as forças radiais podem ser calculadas com uso de metodologias analíticas simples, enquanto que para as forças axiais foi descrito o método do ampère-espira residual, que é utilizado para calcular de forma aproximada as forças axiais. Para completar, foram também

apresentadas as expressões que estimam os estresses eletromecânicos em transformadores.

Finalmente, este capítulo também investigou os esforços eletromecânicos a partir de modelagens e simulações computacionais, utilizando-se de uma plataforma computacional reconhecida internacionalmente, a qual está baseada no método dos elementos finitos, na sua versão tri-dimensional.

A título de comparação as metodologias desenvolvidas foram aplicadas em um protótipo de um transformador trifásico de 15 kVA. Observa-se que:

- Os valores dos esforços eletromecânicos radiais obtidos pelas metodologias referenciadas apresentam um erro percentual aceitável. Isto é justificado, pois, para esta condição, o fluxo magnético no interior do transformador é bem definido;
- Os valores dos esforços eletromecânicos axiais obtidos pelas metodologias referenciadas apresentam um erro percentual de, aproximadamente, 30%. Isto pode ser justificado, pois, no método analítico a estimativa desses cálculos é baseada em várias simplificações, enquanto que, na metodologia computacional, por elementos finitos, a representação do transformador torna-se mais próxima da construção física real do equipamento. Portanto, os valores encontrados por esta metodologia são aqueles que devem ser considerados na fase de projeto ou de avaliação do transformador.

Deve-se salientar que, o desenvolvimento destas metodologias foram possíveis a partir da execução de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) desenvolvido entre a Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia - UFU e a Companhia Hidroelétrica do São Francisco – Chesf, sob o título “Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (*Inrush*) e de Curtos-Circuitos “Passantes”.

CAPÍTULO 3

ESFORÇOS ELETROMECHANICOS EM TRANSFORMADORES CAUSADOS PELA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO (“*INRUSH*”)

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS



Conforme discutido no capítulo anterior, dentro de uma extensa faixa de razões para falhas internas em transformadores, ressaltam-se aquelas causadas pelas forças eletromecânicas axiais e radiais produzidas pelos fenômenos atrelados às correntes de energização. De fato, como é classicamente conhecido, tais transitórios podem resultar em elevados níveis para as correspondentes correntes iniciais, as quais podem perdurar por intervalos de tempo bastante significativos. Em decorrência deste efeito, há uma série de fenômenos passíveis de manifestação no âmbito da rede de suprimento e do equipamento em foco. Um deles consiste na ocorrência de esforços eletromecânicos e seus correspondentes efeitos sobre a estrutura mecânica e vida útil do equipamento.

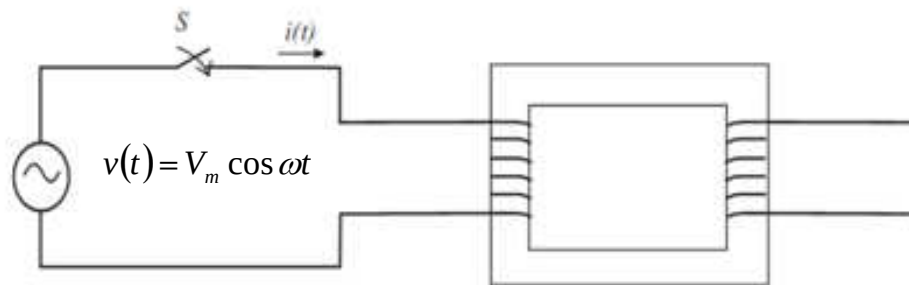
Neste sentido, este capítulo tem por objetivo analisar os esforços eletromecânicos em transformadores, através de uma abordagem analítica, numérica e experimental. Em vista da busca da identificação da natureza qualitativa e quantitativa dos fenômenos, os trabalhos são ainda corroborados com a utilização da técnica de modelagem através do método dos elementos finitos, na sua versão 3D. Por fim são feitas análises comparativas entre os resultados analíticos e computacionais com aqueles oriundos de ensaios experimentais que evidenciam a potencialidade dos estudos apresentados para fins de subsidiar projetos e dimensionamentos das estruturas mecânicas de sustentação dos enrolamentos dos transformadores.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE DE “*INRUSH*”

Empresas que trabalham com transformadores e principalmente concessionárias de energia elétrica geralmente estão interessadas em conhecer o comportamento da corrente de “inrush”, particularmente o seu valor máximo e, por vezes, a sua taxa de decaimento.

Assim, com o intuito de estimar os valores para essas correntes, deve-se inicialmente, supor que o transformador seja energizado em vazio, ou seja, sem uma carga conectada ao secundário, conforme esquema apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Energização de transformador em vazio



(FONTE: KULKARNI, at all, 2004)

Para uma tensão senoidal aplicada, a corrente de magnetização apresenta vários picos em sua forma de onda. Este resultado pode ser obtido resolvendo a Equação 3.1 (KULKARNI, at all, 2004):

$$V_p \sin(\omega t + \theta) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Onde:

V_p : Valor de pico da tensão aplicada;

θ : Ângulo no qual a tensão é chaveada;

i_0 : Valor instantâneo da corrente de magnetização;

$\phi_m(t)$: Valor instantâneo do fluxo em um tempo t ;

R_1 : Resistência do enrolamento primário;

N_1 : Número de espiras do enrolamento primário.

A solução da equação 3.1 é direta quando as características magnéticas são consideradas lineares. A solução é obtida usando as condições iniciais $t = 0$, $\phi_m = \pm \phi_r$. Assim:

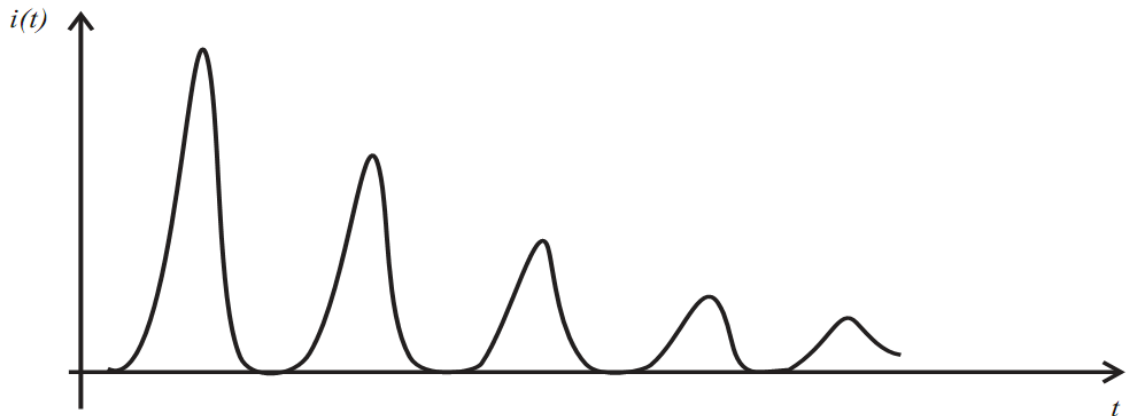
$$\phi_m(t) = (\phi_{mp} \cos \theta \pm \phi_r) e^{\frac{-R_1}{L_1} t} - \phi_{mp} \cos(\omega t + \theta) \quad (3.2)$$

Onde: ϕ_{mp} : Fluxo magnético instantâneo de pico

Para $\theta = 0^\circ$ e fluxo residual de $+\phi_r$, pode ser observado na Equação 3.2 que há uma componente DC, a qual decresce em uma taxa determinada pela relação entre resistência e indutância do enrolamento primário e uma componente de regime permanente AC ($-\phi_{mp} \cos(\omega t + \theta)$).

De forma ilustrativa, na Figura 3.2, é mostrada uma forma de onda típica da corrente transitória de energização de transformadores.

Figura 3.2 - Forma de onda típica da corrente transitória de energização de transformadores



(FONTE: KULKARNI, et al, 2004)

3.2.1 ESTIMATIVA DA AMPLITUDE DO PRIMEIRO PICO DA CORRENTE DE “INRUSH”

Admitindo que os aços magnéticos empregados em transformadores tendam em saturar quando a densidade de fluxo (B) assume 2,0 T, o fluxo magnético de saturação ($\phi_{saturado}$) contido no núcleo pode ser calculado pela Equação 3.3.

$$\phi_{saturado} = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.3)$$

Portanto:

$$\phi_{saturado} = B \cdot A_{nucleo} \quad (3.4)$$

Onde:

A_{nucleo} : Área do núcleo ferromagnético [m²].

O fluxo magnético de dispersão está predominantemente no ar, logo, o ampère-espira necessário para produzi-lo é elevado. Para o pior instante de chaveamento o fluxo magnético de dispersão (ϕ_{ar}) pode ser escrito de acordo com a Equação 3.5 (KULKARNI, at all, 2004).

$$\phi_{ar} = 2\phi_{mp} + \phi_r - 2,0A_{nucleo} \quad (3.5)$$

Sendo:

ϕ_{mp} : Fluxo magnético instantâneo de pico;

ϕ_r : Fluxo residual (ou remanescente).

Assim, pode-se estimar o primeiro pico da corrente de “*inrush*” no enrolamento de um transformador monofásico energizado, com n espiras e altura h, considerando o pior instante de chaveamento através da Equação 3.6, conhecida como Lei Circuitual de Ampère.

$$i_{0max} = \frac{Hh}{n} \quad (3.6)$$

Isto é,

$$i_{0max} = \frac{(2\phi_{mp} + \phi_r - 2,0 A_{nucleo})h}{\mu_0 A_m n} \quad (3.7)$$

Ou ainda,

$$i_{0max} = \frac{(2B_{mp} + B_r - 2,0)A_{nucleo} h}{\mu_0 A_m n} \quad (3.8)$$

Onde:

$i_{0máx}$: Valor assimétrico da corrente monofásica de “*inrush*” [A];

H : Intensidade de campo magnético [A/m];

A_m : Área média enlaçada por uma espira do enrolamento;

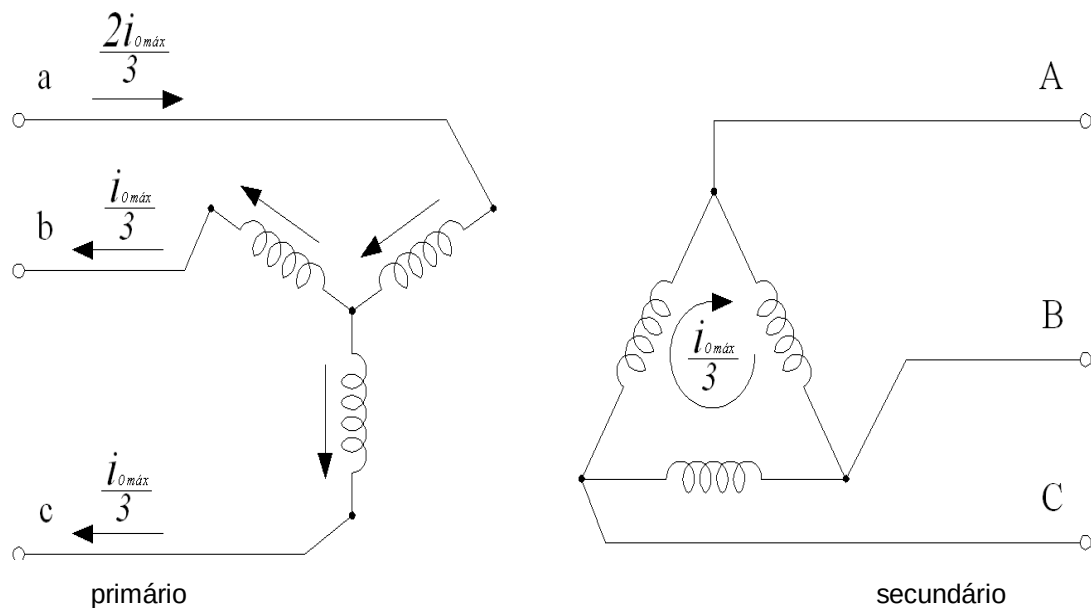
μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo (ar).

Para o cálculo da corrente de “*inrush*” em transformadores trifásicos é necessário avaliar cada caso particularmente (KULKARNI, at all, 2004):

- Se o primário do transformador é ligado em delta, cada bobina está conectada a duas fases e a corrente de “*inrush*” correspondente para cada bobina tem comportamento semelhante à corrente de “*inrush*” de um transformador monofásico. Porém, em termos de corrente de linha o efeito é menor. É válido lembrar que sob condições de operação normal a corrente de linha é $\sqrt{3}$ vezes a corrente de fase. Durante a energização apenas uma fase será submetida a uma elevada corrente de “*inrush*” (a fase em que ocorre o pior instante de chaveamento), assim a corrente de linha é praticamente igual a corrente de fase. Desta forma, a corrente “*inrush*” de linha de um transformador trifásico com primário ligado em delta é $0.577 (1/\sqrt{3})$ vezes a correspondente corrente “*inrush*” de um transformador monofásico (KULKARNI, at all, 2004);

- Para um banco de transformadores, constituído por três unidades monofásicas, deverão ser analisados os três circuitos magnéticos de forma independente. Considerando que o primário do banco esteja conectado em estrela e o secundário em delta, a distribuição da corrente entre os enrolamentos pode ser expressa em termos do máximo pico de corrente de “*inrush*” ($i_{0máx}$) de um transformador monofásico. Na Figura 3.3 é esquematizada a distribuição de corrente de energização do banco de transformadores assumindo que a fase a tem a máxima corrente transitória. Assim, para este caso tem-se que a máxima corrente “*inrush*” será aproximadamente o equivalente a $2/3$ da corrente $i_{0máx}$ correspondente para um transformador monofásico (KULKARNI, at all, 2004);

Figura 3.3 - Corrente transitória de energização em um banco de transformadores conectado em Y – Δ



(FONTE: KULKARNI, et al, 2004)

- Para um transformador trifásico de três colunas, no qual as três fases estão magneticamente interligadas, o fenômeno em decorrência da corrente de “*inrush*” pode ser tratado da mesma forma que banco de transformadores, constituído por três unidades monofásicas. Assim, se o primário estiver conectado em estrela, o fenômeno de “*inrush*” é similar ao segundo caso, independente do secundário estar conectado em estrela ou triângulo. Logo, o máximo pico de corrente de “*inrush*” será aproximadamente o equivalente a $2/3$ da corrente $i_{0máx}$ correspondente para um transformador monofásico (KULKARNI, et al, 2004).

3.2.2 Estimativa da atenuação da amplitude da corrente de “Inrush”

A Equação 3.6 é aproximada e fornece a máxima corrente de “*inrush*” possível. Contudo, projetistas podem estar interessados no conhecimento dos valores de pico para os primeiros ciclos ou tempo depois do qual a corrente “*inrush*” se reduz até seu valor nominal. Os procedimentos para estimar os picos da corrente “*inrush*” para os primeiros ciclos são desenvolvidos em (KULKARNI, et al, 2004). Esses procedimentos são geralmente aplicáveis para os ciclos iniciais. A seguir, é

apresentada uma síntese de tais procedimentos para o cálculo da corrente “*inrush*”, para os primeiros ciclos:

Após a saturação do núcleo, a corrente “*inrush*” é limitada pela reatância do ar, X_s , a qual pode ser calculada pela Equação 3.9:

$$X_s = \frac{\mu_0 \cdot n^2 \cdot A_m}{h} \times 2 \cdot \pi \cdot f \quad [\Omega] \quad (3.9)$$

A seguir, o ângulo θ , no qual a tensão é aplicada, é calculado pela Equação 3.10, o qual corresponde ao instante no qual o núcleo satura:

$$\theta = K_1 \cdot \cos^{-1} \left\{ \frac{B_s - B_{mp} - B_r}{B_{mp}} \right\} \quad [rad] \quad (3.10)$$

Onde,

K_1 : Fator de correção do ângulo de saturação e é igual a 0,9;

$$B_{mp} = \frac{V}{4,44 \cdot f \cdot n \cdot A_{nucleo}} \quad [T];$$

B_s : Densidade de fluxo de saturação em [T] e é igual a 2,03 T, ou $1,25 \times B_{mp}$ (LASZLO, At all, 2003);

B_r : Densidade de fluxo residual em [T] e é igual a $0,8 \times B_{mp}$;

B_{mp} : Indução magnética máxima no núcleo ferromagnético.

Em seguida, é calculada a corrente “*inrush*” pela Equação 3.11 para o primeiro ciclo:

$$i_{0max} = \frac{K_2 \cdot V \cdot \sqrt{2}}{X_s} \cdot (1 - \cos \theta) [A] \quad (3.11)$$

Onde,

V: Tensão eficaz aplicada em [V];

K_2 : Fator de correção do valor de pico e é igual a 1,15.

Após ter calculado o valor de pico da corrente “*inrush*” do primeiro ciclo, a densidade de fluxo residual ao final do primeiro ciclo é então calculada. A componente residual da densidade de fluxo é reduzida devido às perdas no circuito. O novo valor para a densidade de fluxo residual é calculado pela Expressão 3.12:

$$B_{r(novo)} = B_{r(antigo)} - B_{mp} \cdot \frac{K_3 \cdot R}{X_S} [2(\text{sen}\theta - \theta \cdot \cos\theta)] \text{ [T]} \quad (3.12)$$

Onde,

R : Soma da resistência do enrolamento com a resistência do sistema em [ohms];

K_3 : Fator de correção para atenuação do “*inrush*” e, é igual a 2,26.

3.3 ESTRESSE ELETROMECHANICO E TIPOS DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

Segundo Steurer et al (2002), as falhas em transformadores de potência muitas vezes são originadas pelas correntes de “*inrush*”. Nesse contexto, os autores investigaram como forças eletromecânicas, originadas pela energização do transformador, se distribuem no interior dos enrolamentos do mesmo, e em seguida, fizeram uma comparação com as forças originadas pela ocorrência de um curto-circuito.

Resultados mostraram que, embora os picos da corrente de “*inrush*” sejam 70% da corrente de curto-circuito, as forças podem provocar danos semelhantes, uma vez que o tempo de duração das correntes de “*inrush*” é maior que a duração das correntes de curto-circuito. Além disso, a situação de corrente de “*inrush*” é muito mais frequente, podendo ser considerada como uma operação normal de serviço.

A força local que age em um ponto particular no enrolamento do transformador depende da densidade total de campo. Esta densidade total, em uma situação de curto-circuito, representa uma superposição das componentes de campo produzidas pela corrente nos condutores do primário e secundário, além daquelas produzidas como resultado do fluxo de dispersão. Por outro lado, em um evento de alta corrente de “*inrush*”, o núcleo satura-se e sua permeabilidade efetiva reduz bastante. Assim, na investigação das forças devido à corrente de “*inrush*”, apenas a componente de campo produzida pela corrente no condutor do enrolamento primário é considerada (ADDLY, 2001).

A título de exemplo, assumindo que a corrente de “*inrush*” seja tão alta quanto à de curto-circuito, o campo magnético local nas extremidades do “*tap changer*” das bobinas é até 80% mais alto na situação de energização comparado com a condição de curto-circuito (STEURER, at all, 2002).

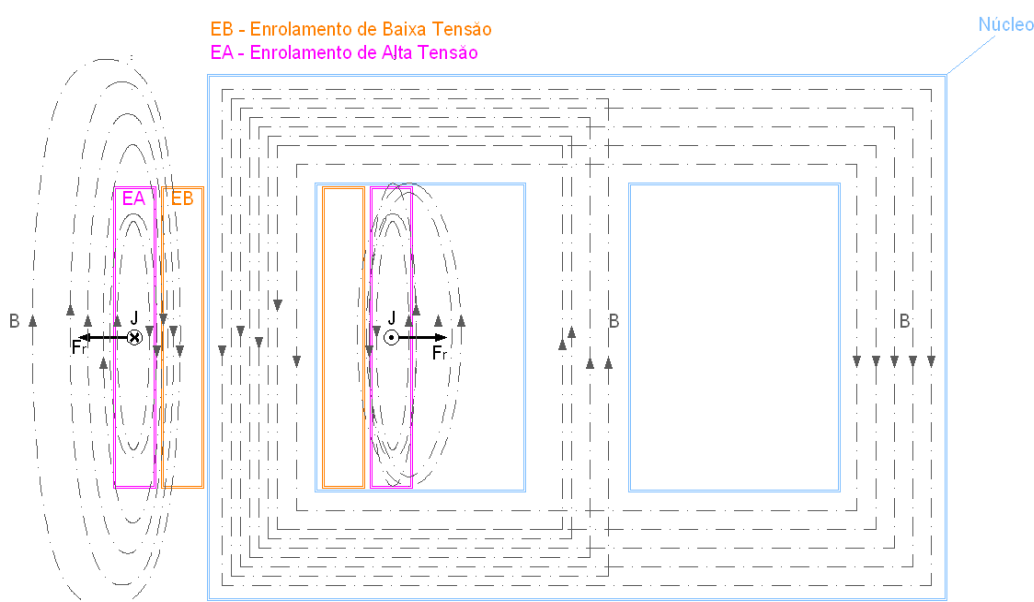
Descreve-se a seguir as características das forças radiais e axiais durante a energização de um transformador, ou seja, as forças causadas pela corrente de “*inrush*”.

3.3.1 FORÇA RADIAL

As forças radiais sob “*inrush*” produzirão efeito apenas em um enrolamento, ou seja, aquele que for energizado. A tendência dos esforços eletrodinâmicos é expandir (estresses de tração) o enrolamento (STEURER, at all, 2002), (ADDLY, 2001) e (APOLÔNIO at all, 2004), podendo prejudicar a isolação do condutor.

Ilustra-se na Figura 3.4 o sentido da força radial no enrolamento de alta tensão do transformador, assim como, o fluxo magnético no núcleo (B) e de dispersão e a densidade de corrente (J) no enrolamento. Pode-se observar na Figura 3.4, com o auxílio da regra da mão direita, o sentido da força radial atuando no enrolamento que tende a tracioná-lo.

Figura 3.4 - Sentido da força radial no enrolamento de alta tensão em um transformador durante sua energização (“*inrush*”)

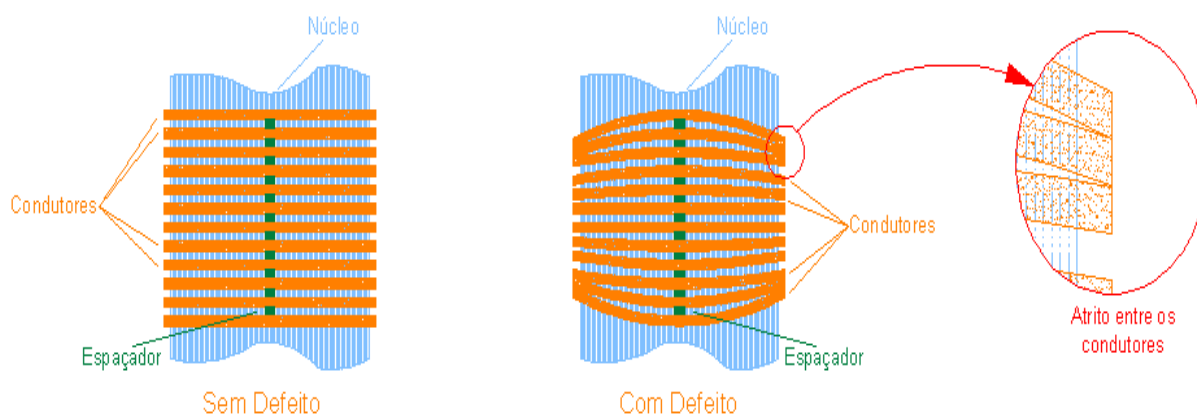


(FONTE: RELATÓRIO - P&D, 2009)

3.3.2 FORÇA AXIAL

Analogamente a situação de curto-circuito, a força axial originada durante a energização se configura conforme mostrado na Figura 3.5, onde se pode observar a deformação ocorrida pelos condutores. Ainda, na mesma figura é ilustrado o possível atrito que se dá no contato entre os condutores, que pode danificar a isolamento destes e a compressão exercida nos espaçadores. Fazendo uma comparação desta força com aquela devida ao curto-circuito (assumindo a mesma corrente para ambos os efeitos), a força axial devido à corrente de “*inrush*” é bem maior. (STEURER, et al, 2002), (ADDLY, 2001) e (L'URE, 2008).

Figura 3.5 - Representação da compressão axial em um enrolamento do transformador durante sua energização (“*inrush*”)



(FONTE: RELATÓRIO-P&D, 2009)

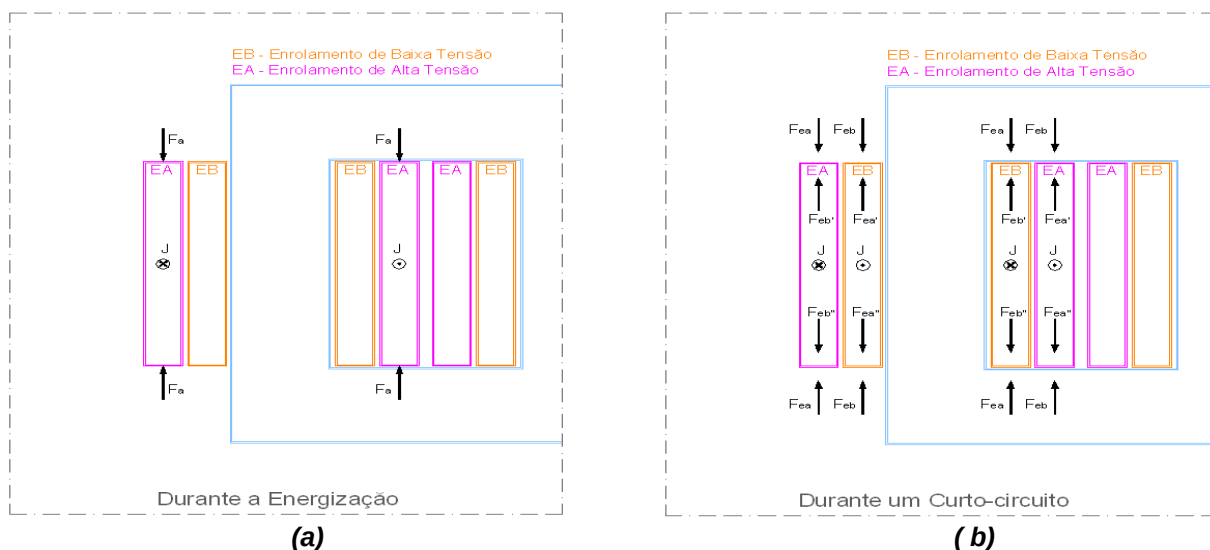
Desta forma, conclui-se que o fluxo magnético de dispersão quando o transformador está em vazio, é maior comparado com a situação em que o transformador opera em curto-circuito. Isto se deve ao fato de que em situações de curto-circuito, as distribuições das densidades de corrente em ambos os enrolamentos são opostas e praticamente iguais, e, nestas condições, considera-se que o núcleo está bem abaixo da saturação, conduzindo a um elevado valor de permeabilidade. Já em eventos envolvendo correntes de “*inrush*”, os núcleos tornam-se saturados e sua permeabilidade efetiva reduz-se drasticamente (LING, At all, 1988).

Outra explicação plausível é que estando o transformador operando em curto-circuito, ambos os enrolamentos estarão sendo percorridos por correntes com sentidos contrários. Isto fará com que a metade superior de cada enrolamento interaja forçando para baixo a metade inferior do outro enrolamento, diminuindo assim, a compressão axial dos enrolamentos.

Por outro lado, no caso da ocorrência do fenômeno de “*inrush*” com o transformador em vazio, apenas um enrolamento estará sendo percorrido por corrente e a atenuação da compressão axial, como no caso do curto-circuito, não existirá. Isto evidencia a afirmação de que para correntes de mesma magnitude, as forças axiais devidas ao fenômeno de “*inrush*” serão mais elevadas que no caso de curto-circuito.

Mostra-se na Figura 3.6 o caso da compressão axial durante a energização e durante um curto-circuito do transformador. No caso do curto-circuito, a interação da metade superior de cada enrolamento com a metade inferior do outro enrolamento é representada pelas forças $F_{ea'}$, $F_{eb'}$, $F_{ea''}$ e $F_{eb''}$.

Figura 3.6 - Compressão axial dos enrolamentos: (a) durante a energização e (b) durante um curto-circuito



(FONTE: RELATÓRIO - P&D, 2009)

Apesar de geralmente a corrente de “*inrush*” possuir magnitude menor que a corrente de curto-circuito, o fenômeno de “*inrush*” ocorre com uma frequência maior que os eventos de curto-circuito. Assim, a constante manobra de conectar o

transformador ao sistema de potência, provoca a atuação de forças axiais causando deformações sucessivas (fenômeno cumulativo) no enrolamento, tendendo a danificá-lo. Além disso, este fenômeno pode provocar ou colaborar para ocorrência das mesmas falhas mecânicas descritas no Capítulo 2 (Colapso axial, efeito “*bending*” e efeito “*tilting*”).

De forma equivalente para as forças radiais, o trabalho de (STEURER. at all, 2002) também apresenta uma metodologia para obter a força axial em uma determinada altura do enrolamento, mediante o seccionamento do enrolamento em níveis discretos. Assim, ao somar os valores das forças calculadas ($F_{z1}(z), F_{z2}(z), \dots, F_{zn}(z)$) nos N pontos equidistantes por elemento diferencial, tem-se então a distribuição total na direção axial, isto é:

$$F_z(z) = F_{z1}(z) + F_{z2}(z) + \dots + F_{zn}(z) \quad (3.13)$$

Tudo o que foi explanado nos parágrafos anteriores, complementa e reafirma o que foi abordado no capítulo 2, que analisou o estresse mecânico de transformadores devido a curtos-circuitos externos.

3.4 ESFORÇOS ELETROMECHANICOS: ABORDAGEM ANALÍTICA

3.4.1 CÁLCULO ANALÍTICO DAS FORÇAS RADIAIS

A força radial resultante pode ser reescrita pela Equação 3.14. Contudo, a força de interesse é aquela denominada de força radial média. Dessa forma, a partir da Equação 3.14, dividida pelo valor de π , obtém-se a expressão que permite determinar o valor da força radial média, conforme Equação 3.15.

$$F_r = \frac{2\pi^2 (n \cdot i_{inr})^2 D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (3.14)$$

$$F_{rmed} = \frac{F_r}{\pi} = \frac{2\pi \cdot (n \cdot i_{inr})^2 D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (3.15)$$

Sendo:

F_{rmed} : Força radial média no enrolamento que será energizado;

i_{inr} : Valor de pico da corrente de *inrush* aplicada a transformadores trifásicos.

Deve-se salientar que estas expressões contemplam a avaliação das forças radiais manifestadas em transformadores quando da ocorrência de curtos-circuitos trifásicos, conforme discutido no Capítulo 2. Para os fins aqui almejados, qual seja, a determinação das forças radiais atreladas com os processos de energização, envolvendo, pois o estabelecimento de correntes em apenas um dos lados do equipamento, a mesma equação se mostrou adequada (SARAIVA, 2011). Essa conclusão foi obtida após a comparação com os valores oriundos de diversas simulações computacionais realizadas em um protótipo de 15 kVA. A plataforma computacional utilizada foi baseada no método dos elementos finitos na sua versão tridimensional. Assim, a título de ilustração, as simulações computacionais são apresentadas na sequência deste capítulo.

O estresse de tração é calculado a partir da força radial média e das dimensões físicas do condutor, de acordo com a Equação 3.16 (ROSENTINO, 2010).

$$\sigma_{medio} = \frac{(i_{inr})^2}{h} \frac{n \cdot \pi \cdot D_m}{a_c} 10^{-7} \quad [\text{N/m}^2] \quad (3.16)$$

3.4.2 CÁLCULO ANALÍTICO DAS FORÇAS AXIAIS

Em condições de energização, a força axial que ocorre devido ao campo radial nas extremidades das bobinas, estará dirigida para o ponto médio do enrolamento a ser energizado.

Segundo Saraiva (2011), a soma das compressões axiais próximas ao ponto médio em ambos os enrolamentos interno e externo é definida pela Equação 3.17. Vale ressaltar que a referida expressão, foi inspirada nas equações apresentadas no capítulo 2, para estudos vinculados ao curto-circuito. Para o fenômeno aqui enfocado, as mesmas expressões foram avaliadas e modificadas de forma a contemplar a manifestação das correntes transitórias devidas ao processo de energização de transformadores, dando origem a equação 3.17. A justificativa para tal alteração se apoia no fato que, sob condições transitórias de energização,

apenas um dos enrolamentos é energizado, enquanto que no curto-circuito, tanto o primário quanto o secundário se apresentam com elevadas correntes.

$$F_{cTotal} = \frac{2\pi^2 (n \cdot i_{inr})^2 D_{mt}}{h^3} \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{d}{3} \right] \quad [\text{N/m}] \quad (3.17)$$

Onde, d é a espessura radial do enrolamento energizado.

Essa conclusão foi obtida após a comparação com os valores oriundos de diversas simulações computacionais realizadas em um protótipo de 15 kVA. Assim, a título de ilustração, as simulações serão apresentadas no decorrer do desenvolvimento deste capítulo.

3.5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ANALÍTICA

Visando aplicar a metodologia analítica desenvolvida, esta seção encontra-se direcionada à aplicação dos conceitos apresentados para um transformador trifásico de 15 kVA, 220/220 V, estrela/estrela com enrolamentos concêntricos de dupla camada e do tipo núcleo envolvido, cujos detalhes construtivos estão descritos no capítulo 2.

Neste contexto, em consonância com os equacionamentos apresentados anteriormente, a Tabela 3.1 sintetiza os valores encontrados para as seguintes grandezas: correntes de energização, forças eletromagnéticas radiais e axiais. Também, vale ressaltar que os cálculos foram realizados considerando que a energização teria sido feita, ora pelo enrolamento interno, ora pelo externo.

Tabela 3.1 - Estimativa das grandezas elétrica e mecânica

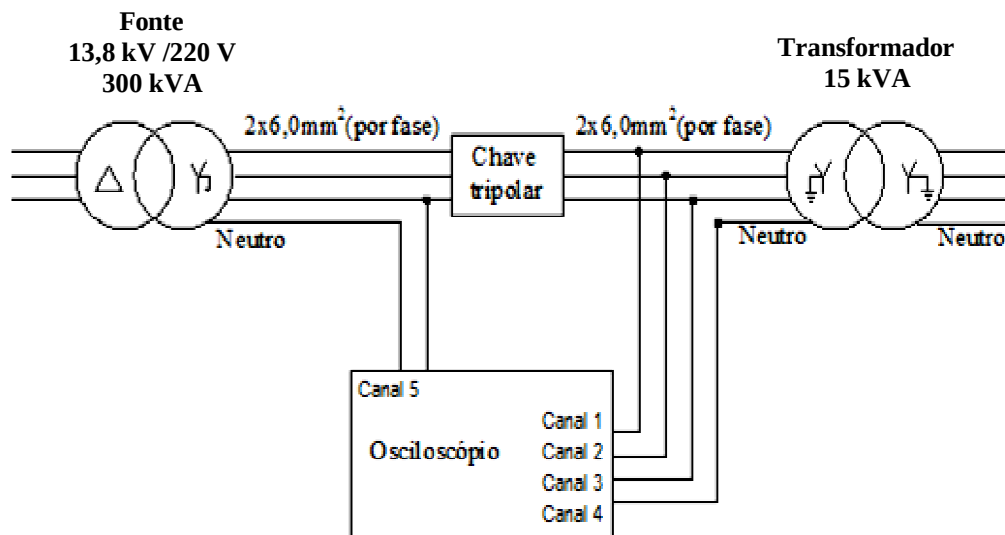
Grandeza	Enrolamento Interno	Enrolamento Externo
Corrente [A]	1018	473,5
Força Radial Total [N]	5150	1633
Força Radial Média [N]	1638,98	519,93
Força Axial [N]	461,56	146,42

(FONTE: AUTOR)

3.6 RESULTADO EXPERIMENTAL DA ENERGIZAÇÃO

A estrutura laboratorial montada, para fins da obtenção dos resultados experimentais associados com o processo da energização, encontra-se ilustrada na Figura 3.7.

Figura 3.7- Arranjo laboratorial para os testes de energização



(FONTE: SARAIVA 2011)

Objetivando o estabelecimento da garantia de que o transformador viesse a ser energizado com um fluxo residual conhecido, utilizou-se, para os experimentos, uma estratégia para assegurar que o mesmo fosse nulo. Para tanto, anteriormente ao ensaio de energização propriamente dito, aplicou-se uma pequena tensão nos terminais do enrolamento interno e, de forma gradual, esta foi sendo eliminada até um ponto tal que houvesse um valor remanescente de fluxo que pudesse ser considerado desprezível.

A partir desta condição procedeu-se então ao processo da energização. O mecanismo utilizado para a conexão do equipamento foi através de uma chave trifásica com os três pólos sendo fechados simultaneamente. A medição da tensão foi realizada à jusante da chave e isto permitiu a determinação dos ângulos iniciais das tensões aplicadas no momento da energização do transformador. Estes valores encontram-se fornecidos na Tabela 3.2.

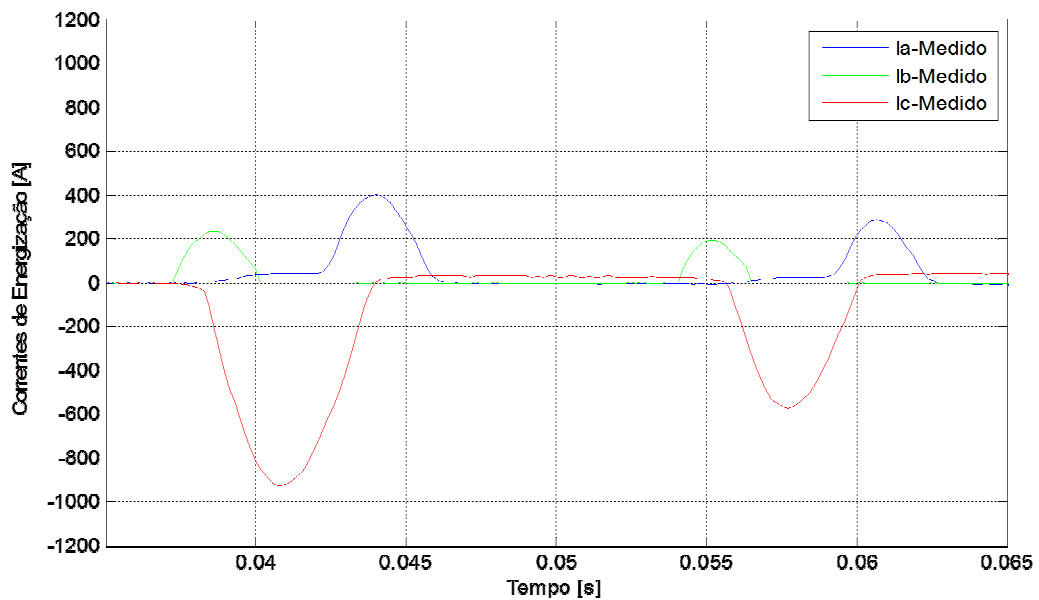
Tabela 3.2 - Ângulos de fase das tensões no momento da energização

Fase	$\theta [^\circ]$
A	-147,4
B	-27,4
C	92,6

(FONTE: AUTOR)

As formas de ondas das correntes são mostradas na Figura 3.8. Os valores do primeiro pico, para cada corrente de linha, são apresentados na Tabela 3.3.

Figura 3.8 - Correntes de linha durante a energização do transformador - resultado experimental



(FONTE: SARAIVA 2011)

Tabela 3.3 - Amplitude do primeiro pico das correntes de energização

$I_A [A]$	$I_B [A]$	$I_C [A]$
411	240	-948

(FONTE: AUTOR)

Comparando-se o valor do primeiro pico obtido via medições (948 A), para a fase C, com o valor calculado anteriormente (1018 A), observa-se uma boa aproximação entre os resultados, fato este que evidencia que a metodologia analítica desenvolvida se mostra apropriada aos objetivos propostos por este trabalho.

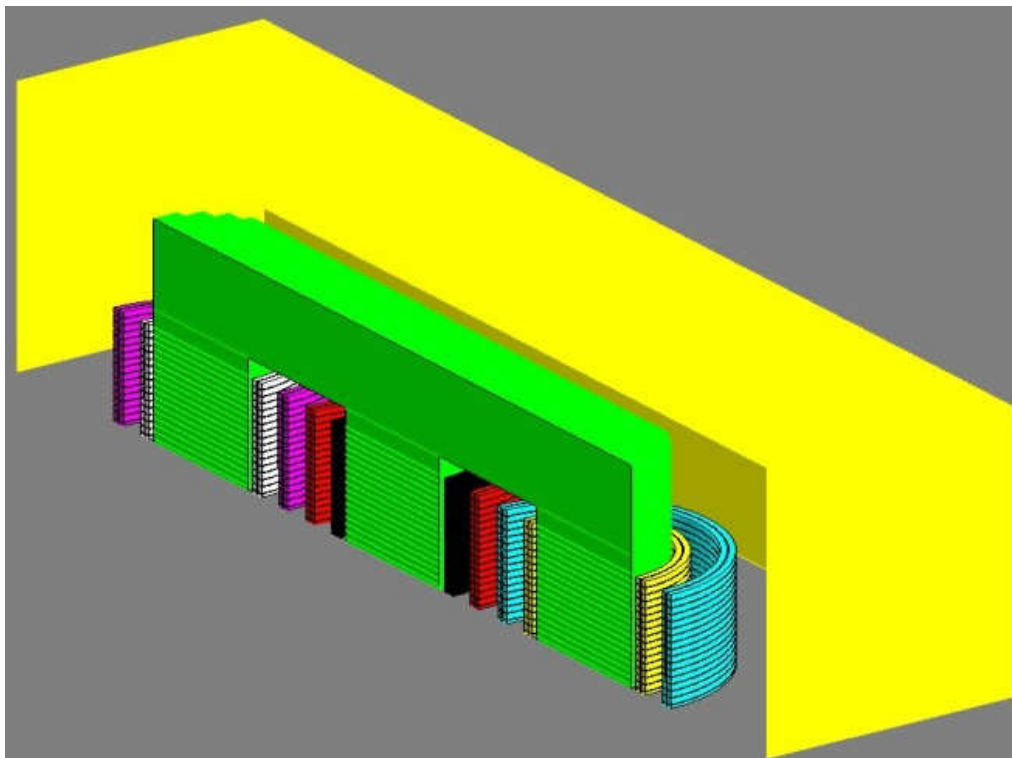
3.7 DESEMPENHO COMPUTACIONAL ATRAVÉS DA TÉCNICA DE MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS

Nessa etapa, associada com os estudos computacionais, mais uma vez foi empregado o *software* baseado no método de elementos finitos (MEF), o qual já foi objeto de considerações no Capítulo II.

3.7.1 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR NO FLUX 3D

Tendo em vista os detalhamentos descritivos já realizados no capítulo anterior, os trabalhos abaixo apresentados não contemplaram uma descrição pormenorizada das etapas compreendidas entre o estabelecimento das grandezas e a implementação final do transformador no aplicativo Flux 3D. Assim, a Figura 3.9 refere-se ao resultado final obtido e evidencia o equipamento já modelado nos termos aqui referidos.

Figura 3.9 - O transformador modelado



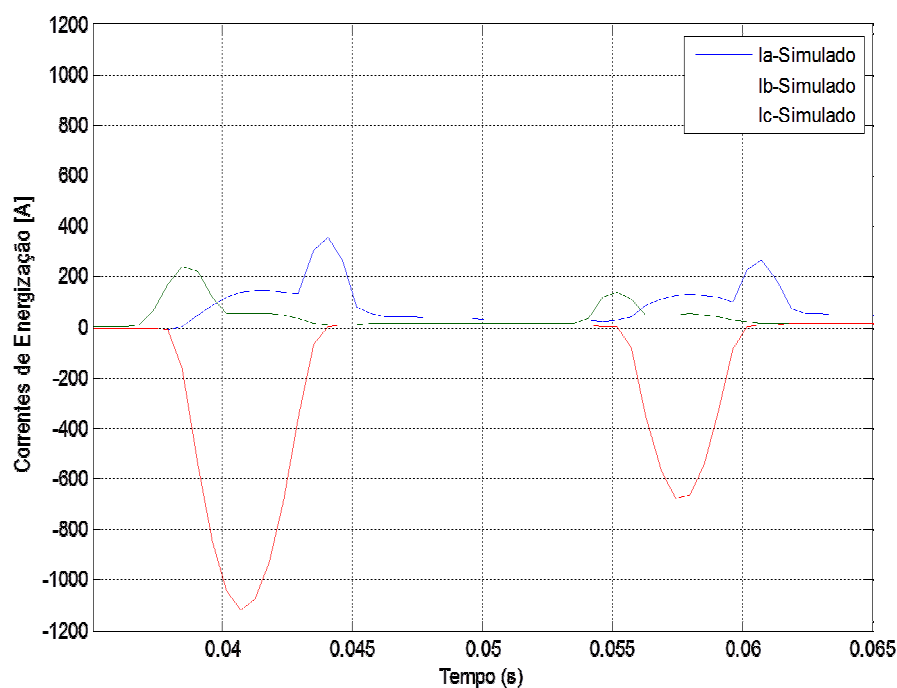
(FONTE: SARAIVA, 2011)

3.7.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Uma vez obtido o modelo do equipamento no simulador procede-se, na sequência, aos estudos de desempenho do transformador. Estes visando estabelecer uma base comparativa para com os resultados anteriormente fornecidos, encontram-se em consonância com as premissas já utilizadas, a exemplo das condições iniciais para as tensões obtidas durante as medições, tanto no que tange às suas amplitudes e aos seus ângulos de fase.

Isto posto, na Figura 3.10, apresentam-se as correntes de energização (*inrush*) obtidas através do recurso computacional em foco.

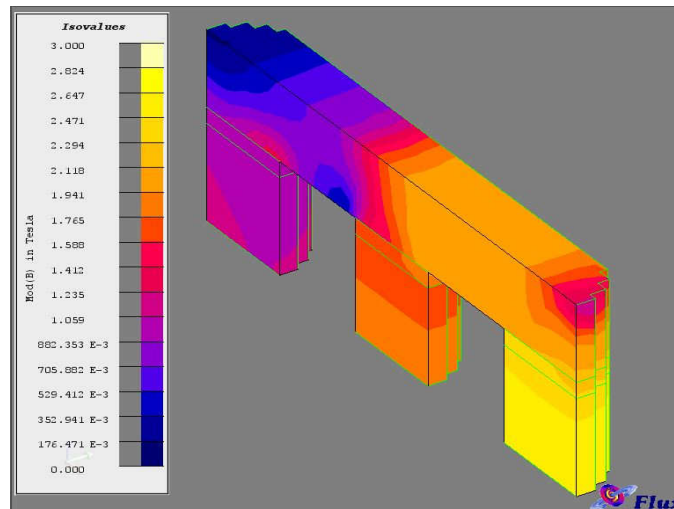
Figura 3.10 - Formas de onda das correntes inrush - simulações



(FONTE: SARAIVA, 2011)

Complementarmente, a Figura 3.11 mostra o núcleo do transformador, com destaque à distribuição dos fluxos magnéticos, quando a corrente de linha, na fase c, passa pelo seu maior valor. Sob tais circunstâncias, a indução magnética atinge níveis de aproximadamente 2,4 T, portanto, indicando fortes saturações, como previsto.

Figura 3.11 - Níveis de indução magnética no núcleo durante a energização



(FONTE: SARAIVA, 2011)

Uma vez determinadas as grandezas elétricas e magnéticas, procede-se, na sequência, a determinação das forças axiais e radiais. Objetivando destacar os valores destas grandezas para o instante no qual ocorre o maior pico de corrente, os cálculos foram processados de forma correspondente e os resultados obtidos encontram-se fornecidos na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Valores simulados das Grandezas Elétrica e Mecânica

Grandeza	Enrolamento Interno	Enrolamento Externo
Corrente [A]	1053,57	514,63
Força Radial Média [N]	1524,45	523,0
Força Axial [N]	409,95	155,56

(FONTE: AUTOR)

3.8 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA ANALÍTICA PROPOSTA

A estratégia para validação dos procedimentos empregados neste capítulo, em sintonia com as investigações anteriormente feitas e seus correspondentes princípios, é iniciada pela comparação do maior pico da corrente transitória de magnetização da fase c. Desta forma, a tabela 3.5 indica os valores atrelados com o mesmo fenômeno e derivados de cálculos analíticos, medição laboratorial e simulação computacional.

Tabela 3.5 - Valor do primeiro pico, em módulo, da corrente de energização da fase C

Parâmetro	I_c [A]
Medição	948,0
Simulação	1.053,57
Cálculo	1018,0

(FONTE: AUTOR)

Dentre os motivos que poderiam justificar as discrepâncias observadas entre as grandezas acima referidas, um deles se apresenta na forma das dificuldades para uma definição e correlação entre os exatos momentos das energizações e, por conseguinte, os fatores que determinam as condições iniciais que tanto influenciam os chaveamentos. Outro aspecto para as eventuais discrepâncias são as imprecisões associadas com os valores dos fluxos residuais para os distintos cálculos, visto que esta grandeza também exerce fundamental influência no fenômeno em análise.

Os resultados obtidos para as forças radiais e axiais, estão determinados e comparados nas Tabelas 3.6 e 3.7, associadas, respectivamente, com os procedimentos definidos pela metodologia analítica e computacional. Mais uma vez, constata-se uma boa correlação entre os valores, fato este determinante para demonstrar que a proposição analítica feita por este trabalho se apresenta, com um bom grau de aderência, em relação aos procedimentos computacionais.

Tabela 3.6 - Comparação entre as forças radiais e axiais no enrolamento interno

Parâmetro	Enrolamento Interno		
	FLUX3D	Calc	Erro%
Corrente [A]	1.053,57	1018	3,3
Força radial média [N]	1.524,45	1638,98	7,0
Força axial total [N]	409,95	461,56	11,2

(FONTE: AUTOR)

Tabela 3.7 - Comparação entre as forças radiais e axiais no enrolamento externo

Parâmetro	Enrolamento Externo		
	FLUX3D	Calc	Erro %
Corrente [A]	514,63	473,5	8,0
Força radial média [N]	523	519,93	0,6
Força axial total [N]	155,56	146,42	6,0

(FONTE: AUTOR)

3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo, como esclarecido, encontra-se focado na questão da determinação das forças internas manifestadas em transformadores quando da ocorrência do fenômeno da energização do equipamento. Esta ação, como se sabe, além de produzir um conjunto de impactos elétricos na rede de conexão, também é responsável pelo surgimento de esforços mecânicos com propriedades capazes de afetar a estrutura construtiva do equipamento e, por consequência, influenciar na vida útil do mesmo.

Dentro deste contexto, foram apresentadas as bases de uma formulação analítica para a estimativa das forças radiais e axiais existentes sob a manifestação dos altos níveis de corrente transitória de magnetização. Esta formulação foi inspirada em trabalhos dedicados a curtos-circuitos, porém, com as adequações pertinentes ao processo em análise. A partir de informações próprias a um protótipo de transformador, foram então realizados cálculos aos esforços eletromecânicos.

Visando o estabelecimento de uma base de dados para o processo avaliativo, foram então realizados ensaios laboratoriais que culminaram por informações relativas aos picos das correntes *Inrush* sob condições controladas de energização.

Por fim, a utilização de recursos computacionais através de um pacote computacional utilizando técnicas de modelagem por elementos finitos, foram obtidos resultados compatíveis com os estudos aqui contemplados e que se apresentaram como uma terceira base para a sustentação do processo.

De um modo geral, constatou-se que os procedimentos analíticos e computacionais se mostraram com uma boa margem de aderência àqueles encontrados laboratorialmente, fato este que corrobora para o processo de validação dos mecanismos de cálculo aqui utilizados.

Por fim, ressalta-se que os procedimentos aqui investigados, constituem-se em fundamentos que deverão ser utilizados para nortear o projeto e a construção de transformadores, principalmente, no que tange a sua estrutura de sustentação mecânica dos enrolamentos.

CAPÍTULO 4

OBTENÇÃO DE CURVAS DE SUPOORTABILIDADE MECÂNICA E ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS



Os estudos anteriores contemplaram, de forma específica, meios para a quantificação das componentes assimétricas das correntes de curto-circuito, energizações e os esforços eletromecânicos presentes nos enrolamentos. A partir destas informações foram feitos cálculos dos estresses eletromecânicos visando constatar se as grandezas obtidas se apresentavam consonantes com os limites de estresses admissíveis pré-estabelecidos em projetos de transformadores.

Não obstante a isto, reconhece-se que, a correlação dos esforços ao longo do tempo, em que pese seus aspectos cíclicos, não se apresenta como informações prontamente disponíveis. Todavia, à luz da realidade, que determina que os esforços que provocam fadiga são cíclicos, e que estes não são necessariamente de mesma amplitude como relatado em Les Pook (2007), isto provocará, indiscutivelmente, alterações estruturais irreversíveis resultando em deformações permanentes, trincas ou fraturas após um determinado número de ciclos.

Focando a mencionada interdependência, o objetivo deste capítulo é oferecer ferramentas teóricas, oriundas da engenharia mecânica, com as quais se

podem avaliar as condições de fadiga dos enrolamentos do transformador, quando são submetidos a estresses mecânicos variáveis no tempo.

Na sequência, são apresentados procedimentos para o levantamento das curvas de suportabilidade mecânica e de vida útil de transformadores e, a partir dos gráficos produzidos, constata-se a factibilidade do estudo da vida útil de transformadores em função dos esforços eletromecânicos provocados pelas correntes de curto-circuito e de energização.

Deve-se salientar que neste capítulo estão as principais contribuições e inovações sobre o tema aqui enfocado.

4.2 TENSÃO MECÂNICA E DEFORMAÇÃO – CONCEITOS BÁSICOS

As propriedades mecânicas dos materiais são obtidas através de experimentos laboratoriais cuidadosamente planejados para que reproduzam, o mais próximo possível, as condições de serviço. Fatores a serem considerados incluem a natureza da carga aplicada e seu tempo de duração, bem como as condições ambientais. É possível que a carga aplicada seja de tração, compressão, de cisalhamento ou torção e sua magnitude pode ser constante com o tempo, ou pode variar de forma contínua. O tempo de aplicação pode ser apenas uma fração de segundo ou pode estender ao longo de um período de muitos anos. Deve-se, ainda, considerar que a temperatura de serviço pode ser um fator determinante (CALLISTER, 2007).

Salientando-se ainda que, por definição, tensão mecânica é a resistência interna de um corpo a uma força externa a ele aplicada por unidade de área e, deformação é a variação de uma dimensão qualquer deste corpo (SOUZA, 1982).

4.2.1 TRAÇÃO

A Figura 4.1 apresenta uma barra metálica cilíndrica de seção transversal uniforme A_0 , e comprimento l_0 . Se uma força de tração F , coincidente com o eixo longitudinal for aplicada, a tensão média de tração (σ) será dada pela Equação 4.1 (CALLISTER, 2007).

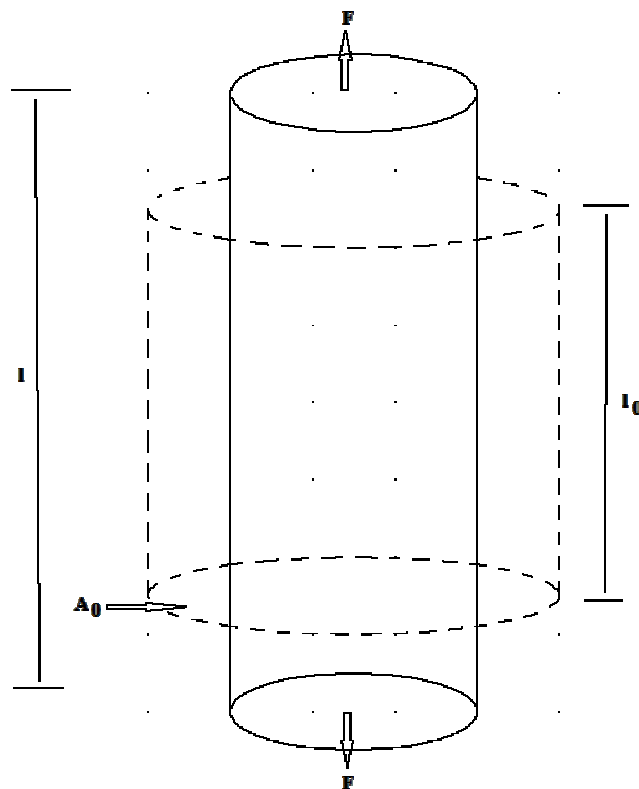
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$

A presença da tensão σ provocará na barra uma deformação ε , e produzirá um aumento de l_0 de um valor de Δl . A deformação linear é dada pela Equação 4.2:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.2)$$

A deformação no corpo sólido pode ser observada na Figura 4.1. As linhas tracejadas representam a forma antes da deformação, as linhas sólidas depois da deformação (CALLISTER, 2007).

Figura 4.1 - Alongamento produzido por uma carga de tração com tensão linear positiva



(FONTE: AUTOR)

O gráfico tensão-deformação pode ser visto na Figura 4.2.

pois o que se permanece de deformação está relacionado com a zona plástica, conservando a inclinação da zona elástica. Esse início de plasticidade é verificado em metais dúcteis pelo fenômeno denominado escoamento (SOUZA, 1982).

O limite de escoamento é dado pela Equação 4.4

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (4.4)$$

Onde: F_e é a força limite de escoamento.

Usualmente, quando não é possível determinar o limite de escoamento, adota-se, por convenção, o limite n de escoamento, ou seja:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A_0} \quad (4.5)$$

Neste caso, F_n é a força na qual se observa uma deformação de $n\%$ do material. Na prática n assume o valor 0,2%, no caso mais geral e 0,5% no caso do cobre e sua ligas. Assim, σ_n recebe a denominação de $\sigma_{0,2}$, o qual está indicado como ponto B na figura 4.2.

Terminado o escoamento, o metal assume a região plástica e um aumento da força aplicada (F_u) irá conduzi-lo ao rompimento. O limite de resistencia (σ_u) do metal é dado pela Equação 4.6:

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \quad (4.6)$$

Portanto, a deformação produzida por tensões mecânicas maiores que o $\sigma_{0,2}$, deve contemplar os comportamentos elástico e plástico do material. Assim, deve-se utilizar a equação (4.7) de Ramberg-Osgood, que representa adequadamente o comportamento não-linear de metais sob efeito de tração.

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^g \quad (4.7)$$

Na Equação (4.7), o primeiro fator representa o comportamento linear e o segundo representa o comportamento não-linear, ou seja, a parte plástica da deformação, sendo:

ε_t : Deformação total;

σ : Estresse aplicado;

$\sigma_{0,2}$: Estresse mecânico para produzir 0,2% de deformação;

g : Parâmetro de Ramberg-Osgood (expoente de encruamento).

Há que se salientar que o expoente de encruamento - ou de Ramberg-Osgood - é uma medida da não linearidade da curva de tração. Valores comumente usados de g são de, aproximadamente 5 ou superior. Esta grandeza pode ser estimada pela expressão (4.8):

$$g = \frac{\ln(\varepsilon_{us} / 0.2)}{\ln(\sigma_u / \sigma_{0.2})} \quad (4.8)$$

Onde:

$$\varepsilon_{us} = 100 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{100} - \frac{\sigma_u}{E} \right)$$

e,

$\varepsilon_{\max}$: deformação de ruptura do material;

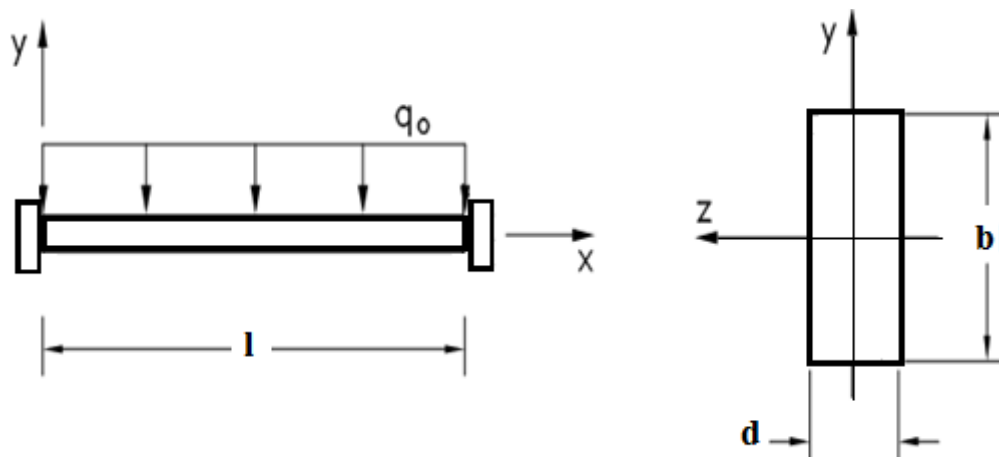
σ_u : estresse de ruptura do material.

Além dessas, mais duas propriedades são definidas pelo ensaio de tração: o alongamento e a estricção. O alongamento caracteriza-se pela distância final do corpo de prova após a ruptura, enquanto a estricção é a alteração da secção final do corpo (SOUZA, 1982).

4.2.2 FLEXÃO EM VIGAS BI-ENGASTADAS

O objetivo deste item é calcular os efeitos de uma força aplicada na direção transversal em uma viga bi-engastada, como representada na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Viga bi-engastada



(FONTE: AUTOR)

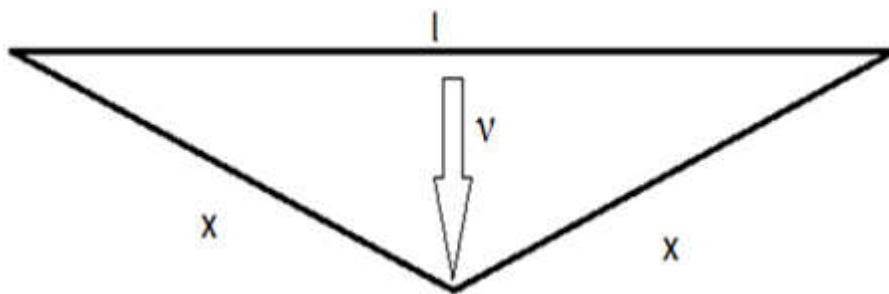
Onde:

q_0 : força distribuída;

l, b, d : dimensões físicas.

Como essa viga é fixa nas extremidades, toda flexão que for produzida provocará um alongamento no material. Assim, o limite da deformação será atingido quando a soma dos lados menores (x) no triângulo indicado na Figura 4.4, corresponderem a $l + 0,005l$.

Figura 4.4 - Flecha produzida pelo alongamento no material



(FONTE: AUTOR)

Portanto, a flecha máxima permitida é obtida pelo Teorema de Pitágoras. Uma deformação de maior amplitude produzirá uma deformação permanente.

Uma vez definida, a viga bi-engastada é descrita pela Equação diferencial (4.9).

$$EM_{in} \frac{d^4 v}{dx^4} = -q_0 \quad (4.9)$$

Onde:

M_{in} : Momento de inércia = $(db^3)/12$ (para vigas retangulares);

v : Flecha máxima;

q_0 : Carga aplicada.

Nas condições de contorno, ou seja, em $x=0$ e $x=l$, não há rotação (δ) e nem v . Assim:

$$\begin{aligned} v(x=0) &= 0 & v(x=l) &= 0 \\ \delta_z(x=0) &= 0 & \delta_z(x=l) &= 0 \end{aligned}$$

Resolvendo a Equação 4.9, tem-se:

- força cortante: $F_y(x) = -q_0x + q_0 \frac{l}{2}$
- momento fletor: $M_z(x) = -q_0 \frac{x^2}{2} + q_0 l \frac{x}{2} - q_0 \frac{l^2}{2}$
- rotação: $\delta_z(x) = -q_0 \frac{x^3}{6} + q_0 l \frac{x^2}{4} - q_0 l^2 \frac{x}{12}$
- deslocamento: $EM_{in} v(x) = -q_0 \frac{x^4}{24} + q_0 l \frac{x^3}{12} - q_0 l^2 \frac{x^2}{24}$

Uma vez aplicada uma força distribuída (q_0), a flecha máxima ocorre em $l/2$. Assim, solucionando a expressão para o deslocamento, em $x=l/2$, encontra-se o valor da flecha máxima, a qual está indicada pela Equação (4.10):

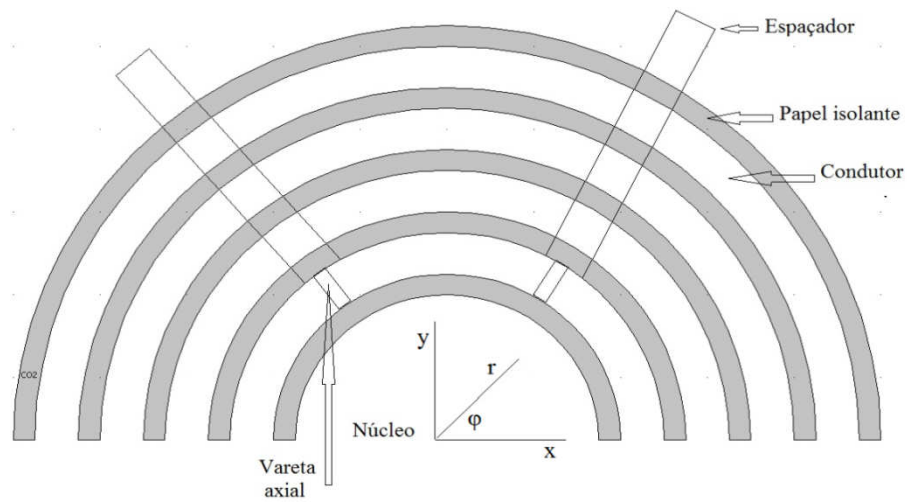
$$EM_{in} v\left(x = \frac{l}{2}\right) = -q_0 \frac{l^4}{384} \quad e,$$

$$v_{max} = -q_0 \frac{l^4}{384EM_{in}} \quad (4.10)$$

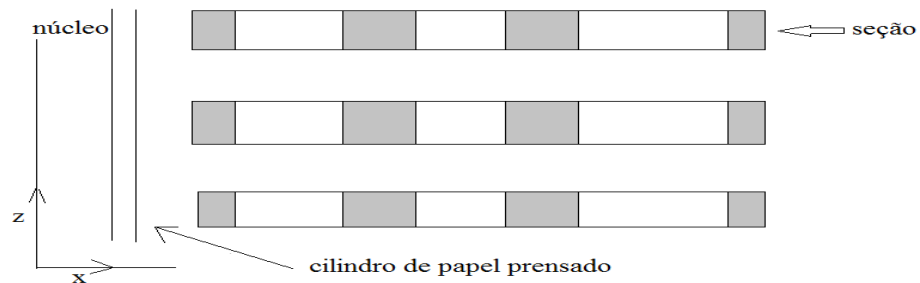
4.3 ESFORÇOS MECÂNICOS EM TRANSFORMADORES

A estrutura física dos enrolamentos de transformadores de grande porte é bastante complexa e, algumas características estão indicadas na Figura 4.5. A representação na figura é de uma bobina tipo disco, entretanto, deve-se salientar que os enrolamentos helicoidais são do tipo disco com apenas uma volta por seção e pode ser visualizada na Figura 4.6. As seções são separadas verticalmente por meio de espaçadores feitos de papel de alta densidade (papel Kraft, papelão Kraft, papel manilha e papelão com fibra de algodão). Os espaçadores são distribuídos em torno do enrolamento, de modo a permitir que o óleo de arrefecimento flua entre eles (VECCHIO, 2002).

Figura 4.5 - Detalhe de um enrolamento tipo disco típico



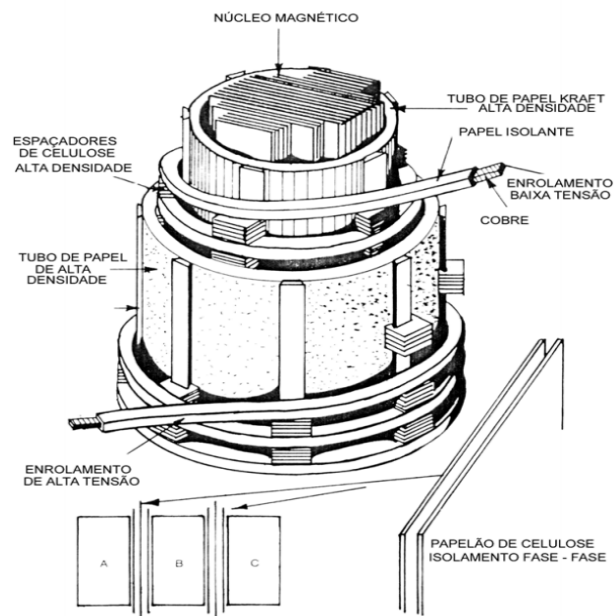
(a) Vista horizontal (x,y)



(b) Vista vertical (y,z)

(FONTE: VECCHIO, 2002)

Figura 4.6 - Distribuição dos enrolamentos e espaçadores em uma coluna de transformador



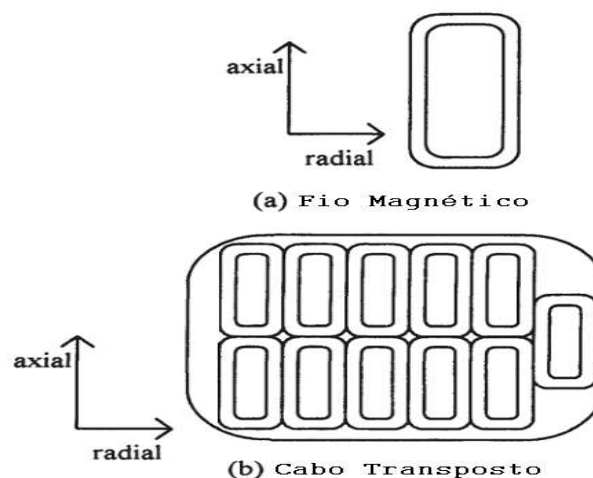
(FONTE:RELATÓRIO - P&D, 2009)

Assim, devido aos diferentes materiais utilizados como, papel de alta densidade para os espaçadores, papel impregnado para isolação dos cabos, cobre para os condutores; e pelas muitas aberturas para o óleo de arrefecimento, a análise de tensão mecânica seria muito complicada caso não fossem feitas aproximações adequadas.

Embora tenham sido mostrados cortes axiais distintos e separados na Figura 4.5, na realidade, os fios devem manter uma continuidade elétrica de seção a seção, de modo que o enrolamento tenha uma estrutura helicoidal. Para a análise de estresse, é geralmente aceito que o passo da hélice é suficientemente pequeno para que a bobina possa ser considerada como tendo seções horizontais distintas, como mostrado na Figura 4.5. Além disso, assume-se que estas seções fecham sobre si mesmas, formando-se anéis (VECCHIO, 2002).

Outra aproximação diz respeito ao cabo que compõe as espiras do enrolamento. A Figura 4.7 mostra os dois tipos que são normalmente utilizados. O primeiro é um fio magnético composto por uma única barra de cobre isolada por uma capa de papel e é tratado quase sem aproximação na análise de tensão. O segundo trata-se de um cabo transposto, composto de múltiplos fios de cobre com revestimento esmaltado, dispostos no padrão quase retangular representado na Figura 4.7 (b). Destaca-se que não é mostrado como a transposição e a rotação dos fios é feita, entretanto, a distribuição dos mesmos ocupa todas as posições mostradas na Figura 4.7 (VECCHIO, 2002).

Figura 4.7 - Tipos de fio e cabo utilizados em enrolamentos de transformadores



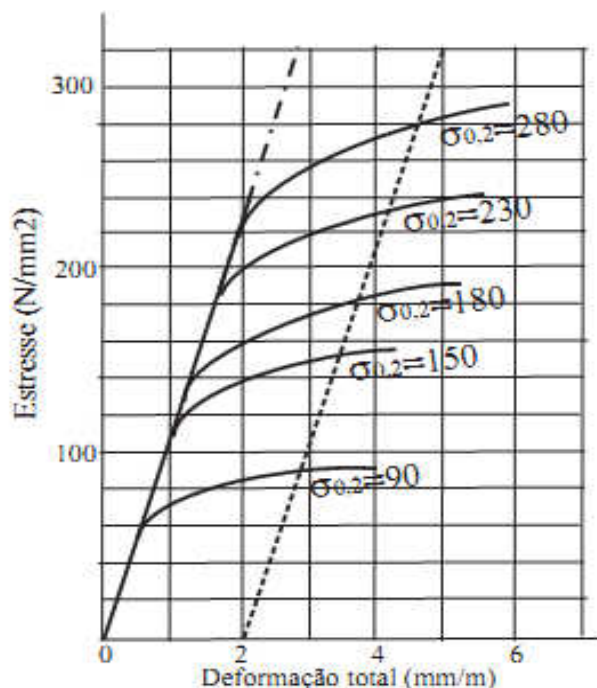
(FONTE: VECCHIO, 2002)

As transposições dão rigidez ao conjunto de fios. Além disso, muitas vezes são empregados na fabricação dos cabos, fios unidos entre si por meio de um revestimento epóxi, tratado termicamente. Neste caso, considera-se o cabo como uma estrutura rígida, embora haja alguma dúvida quanto ao modo de avaliar suas propriedades materiais. Com ou sem união epoxi, é preciso fazer algumas aproximações para modelar o cabo para fins de análise de estresse. Sem a união pela resina, assume-se que para a força radial o cabo tem a espessura equivalente a 2 fios radiais. Com a união, assume-se que a espessura radial equivale a 80% da construção real (VECCHIO, 2002). Ou seja, o valor de tensão mecânica suficiente para danificar um único fio multiplicado por 80% da quantidade radial de fios e, para o caso de fios paralelos o cabo suporta o dobro da força.

4.3.1 LIMITE DE SUPORTABILIDADE ($\sigma_{0,2}$)

O parâmetro $\sigma_{0,2}$, geralmente, não é fornecido pelos fabricantes de transformadores, no entanto, os mesmos podem ser obtidos através de curvas características encontradas na literatura. A título de ilustração a Figura 4.8 mostra os estresses admissíveis em função do grau de dureza do cobre (CIGRE, 2002).

Figura 4.8 - Carga de prova do cobre para vários níveis de dureza



(FONTE: CIGRE, 2002)

Entretanto, conforme descrito nas seções anteriores, e devido à pequena distância entre os espaçadores radiais e axiais de transformadores de grande porte, é possível aproximar o setor circular compreendido entre dois espaçadores por uma reta com suas extremidades fixas, como indicado na Figura 4.3. Desta forma, o cálculo de flexão, pode ser utilizado para estimar os limites de suportabilidade mecânica ($\sigma_{0,2}$) de enrolamentos de transformadores.

4.3.2 TENSÃO DE COMPRESSÃO NOS ESPAÇADORES

A força axial máxima, calculada no capítulo 2, é utilizada para determinar o pior caso da tensão de compressão nos espaçadores. Esta força, F_{ks} , é obtida para cada enrolamento a partir da análise de campo magnético. Uma vez determinada a força, esta é dividida pela área dos espaçadores, abrangendo uma seção do disco de 360 graus para obter a tensão de compressão do espaçador, σ_{ks} , como indicado pela Equação 4.11.

$$\sigma_{ks} = \frac{F_{ks}}{n_{ks} \cdot s \cdot d} \quad (4.11)$$

Onde:

n_{ks} : Número de espaçadores em torno de uma seção de 360 graus;

s : Largura de um espaçador;

d : Espessura radial da bobina.

Em geral, utilizam-se espaçadores feitos de papel prensado, que podem suportar uma tensão de compressão máxima de 310 MPa. Portanto, a tensão calculada pela equação 4.11 não deve exceder este número (VECCHIO, 2002).

4.3.3 TENSÃO DE FLEXÃO AXIAL POR FIO

Para análise da flexão axial por fio, pode-se considerar o enrolamento como sendo uma viga retangular uniformemente carregada com extremidades engastadas, como mostrado na Figura 4.3.

Assim, segundo Vecchio (2002), a tensão axial máxima de flexão é dada pela Equação 4.12:

$$\sigma_{x \text{ Max Axial}} = \frac{100 F_{ks}}{2 n_s \pi D_m b} \left(\frac{l}{h} \right)^2 \quad (4.12)$$

Por outro lado, o comprimento do vão, l , pode ser determinado a partir do número de espaçadores, de sua largura (s), e de seu diâmetro médio (D_m), o qual é fornecido pela expressão (4.13),

$$l = \frac{\pi D_m - n_{kS} s}{n_{kS}} = \frac{\pi D_m}{n_{kS}} - s \quad (4.13)$$

A altura h e a espessura b aplicam-se a um único fio, quer como parte de um cabo com muitos fios ou como um único fio do cabo magnético. Se o cabo é do tipo unido por resina epoxi, a tensão axial máxima de flexão, dada pela Equação 4.12, é dividida por 3. Isto é simplesmente uma correção empírica para levar em conta a maior rigidez deste tipo de cabo (VECCHIO, 2002).

4.4 FORÇA DE INCLINAÇÃO (tilting)

A força axial de compressão aplicada nos espaçadores pode fazer com que os fios individuais dos cabos, que estão prensados entre os espaçadores, se inclinem se a força for suficientemente grande. A Figura 4.9 aponta uma geometria idealizada desta situação. Nela está representada uma barra em um enrolamento sofrendo uma tensão axial de compressão uniforme σ_c . Deve-se salientar que pode haver várias camadas de cabos, na direção axial, separados por papel isolante e, que desempenharão a mesma função dos espaçadores na Figura 4.9 (VECCHIO, 2002).

Analisando uma pequena seção na direção de comprimento Δl , a tensão aplicada exerce um torque, τ_c , dado por

$$\tau_c = \sigma_c (b \Delta l) h \sin \delta \quad (4.14)$$

Onde:

b : Espessura radial do fio;

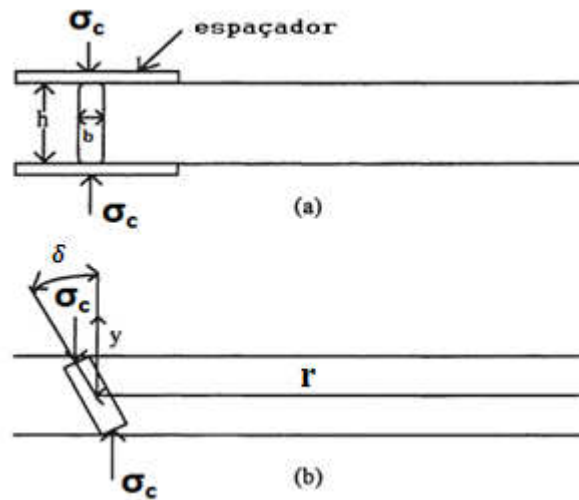
$b \Delta l$: Área sobre a qual atua a pressão σ_c .

A altura axial do fio é h e δ é o ângulo de inclinação em relação a vertical e é assumido como pequeno. A inclinação do condutor produz o efeito de tração na parte superior e compressão na porção inferior da barra. Isto produz tensões na espira, que por sua vez produzem um torque em oposição ao calculado na equação

4.14. Para estimar este torque oposto, pode-se fazer com que y seja a distância acima do centro axial do fio, como mostrado na Figura 4.9. O aumento do raio (r), acima da linha de centro é $y \tan \delta$ (VECCHIO, 2002). Por conseguinte, o torque pode ser estimado pela Equação 4.15:

$$\tau = \frac{E b \Delta l \tan \delta h^3}{24 r^2} \quad (4.15)$$

Figura 4.9 - Geometria da inclinação da barra devido à força axial de compressão



(FONTE: VECCHIO, 2002)

Ressalta-se, que para os desenvolvimentos que culminaram nas equações supra mencionadas assumiu-se que a força de compressão foi aplicada de maneira uniforme em torno da espira, enquanto que, na realidade, é aplicada apenas às partes em contato com os espaçadores. Portanto, a tensão aplicada uniformemente representa uma média sobre toda a espira e é uma aproximação razoável.

4.5 ESFORÇO RADIAL

A tensão mecânica máxima radial atuando sobre o enrolamento, provoca um estresse radial no condutor. Na Figura 4.10, o enrolamento foi idealizado como um cilindro ou anel ideal, submetido a uma tensão direcionada radialmente para dentro, (σ_r). Na Figura 4.10 (b), são mostradas duas forças de reação de compressão (F) no enrolamento, mantendo a força aplicada à metade do cilindro. A força no sentido do

eixo x, produzida pela tensão (σ_r), se anula pela simetria e a força na direção y, atuando para baixo, é dada por (VECCHIO, 2002):

$$F_y = \sigma_r h r_m \int_0^{\pi} \sin \varphi d\varphi = 2\sigma_r h r_m \quad (4.16)$$

Onde:

r_m : Raio médio do cilindro;

h : Altura axial do cilindro;

φ : Ângulo de aplicação do estresse.

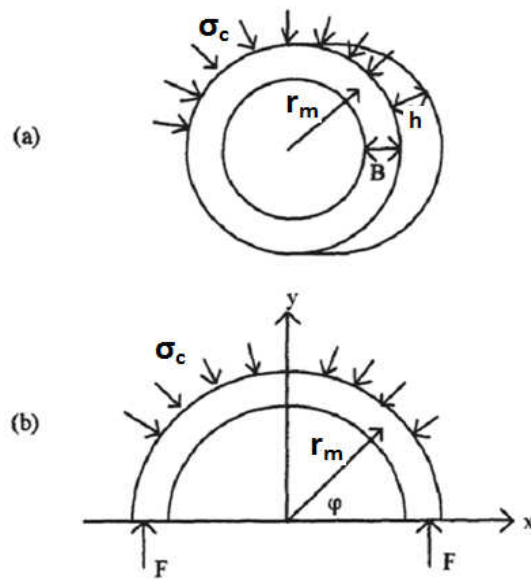
A força aplicada no eixo y é equilibrada por uma força de $2F$ agindo em sentido contrário, então tem-se $F = \sigma_r h r_m$. Dividindo pela área (A) da seção transversal do material que suporta a força, obtém-se a tensão de compressão no material:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{\sigma_r h r_m}{A} \quad (4.17)$$

Para $A = hb$, onde b é a espessura radial do cilindro, tem-se:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_r r_m}{b} \quad (4.18)$$

Figura 4.10 - Geometria para a determinação da tensão radial dentro de um cilindro



(FONTE: VECCHIO, 2002)

Quando a tensão mecânica radial atua para dentro, o enrolamento tende a deformar antes da tensão de prova ser excedida. Esta deformação radial para dentro, é um processo complexo para analisar. Com base em resultados experimentais, a referência (VECCHIO, 2002) sugere que este estresse radial de compressão não exceda algumas frações da tensão de prova, variando de 0,4 à 0,7 dependendo do tipo de cabo utilizado e se o mesmo encontra-se unido por resina ou não.

4.5.1 TENSÃO DE DEFORMAÇÃO RADIAL

Enrolamentos têm suportes radiais internos, que são espaçados uniformemente ao longo da sua circunferência e estendem-se até altura do enrolamento. Quando uma tensão mecânica atua radialmente em direção ao centro, as seções do enrolamento entre os suportes funcionam como uma viga curva submetida a um carregamento uniforme (VECCHIO, 2002).

Fazendo uso do teorema de Castigliano, que postula que, se o material utilizado segue a lei de Hooke, ou seja, permanece dentro do limite elástico, e se os deslocamentos são pequenos, então a derivada parcial da energia de deformação é igual ao deslocamento correspondente à força. Assim, a energia de deformação ($U_{tração}$) associada a forças de tração ou de compressão F em uma viga de comprimento l é dada por:

$$U_{tração} = \int_0^L \frac{F^2}{2EA} dx \quad (4.19)$$

Em que F , A , e E podem ser funções da posição x ao longo da viga (VECCHIO, 2002).

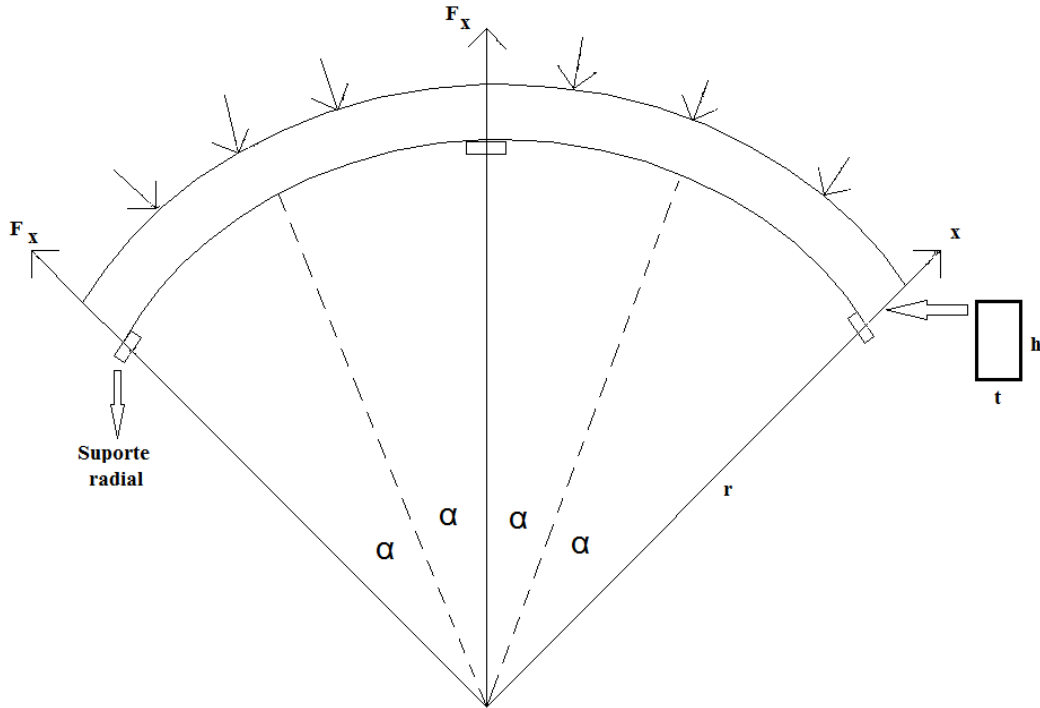
A energia de deformação associada a um momento fletor M , em uma viga de comprimento l é expressa por:

$$U_{fletor} = \int_0^L \frac{M^2}{2EM_{in}} dx \quad (4.20)$$

Onde, M , M_{in} , e E podem ser funções da posição x , enquanto M_{in} é o momento de inércia de superfície (VECCHIO, 2002).

Na Figura 4.11 mostra-se uma parte do enrolamento, com os suportes radiais internos separados por um ângulo 2α . Há uma força normal F_x agindo radialmente para fora nos apoios. Neste caso, F_x foi convertida em uma força por unidade de comprimento q atuando sobre a seção da bobina.

Figura 4.11 - Geometria para determinar a tensão de deformação radial



(FONTE: VECCHIO, 2002)

A magnitude da tensão mecânica máxima, σ_{MAX} , pode ser estimada pela expressão 4.21. O estresse causado pode ser positivo ou negativo dependendo do local de referência, se na superfície radial exterior ou na interior do enrolamento. Logo:

$$\sigma_{MAX} = \sigma_c \left[\frac{\cos \varphi}{2} z - 1 + \frac{3r}{h} \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) z \right] \quad (4.21)$$

Complementarmente, a grandeza z pode ser obtida pela equação 4.22:

$$z = \frac{1}{\sin \alpha \left(f_1(\alpha) + 12 \left(\frac{r}{h} \right)^2 f_2(\alpha) + \frac{EA}{E_{EQ} A_{isolador}} \right)} \quad (4.22)$$

A título de ilustração, foram indicados na tabela 4.1 alguns valores de $f_1(\alpha)$, $f_2(\alpha)$ e o produto do seno com estes valores para uma variação de α .

Tabela 4.1 - $f_1(\alpha)$, $f_2(\alpha)$ e o seu produto com o seno

Número de espaçadores	α [graus]	$f_1(\alpha)$	$f_2(\alpha)$	$\sin(\alpha)f_1(\alpha)$	$\sin(\alpha)f_2(\alpha)$
2	90	0,3927	0,07439	0,3927	0,07439
4	45	0,6427	0,006079	0,4545	0,004299
6	30	0,9566	0,001682	0,4783	0,0008410
8	22,5	1,2739	0,0006931	0,4875	0,0002652
10	18	1,5919	0,0003511	0,4919	0,0001085
12	15	1,9101	0,0002020	0,4944	0,00005228
18	10	2,8648	0,00005942	0,4975	0,00001032
24	7,5	3,8197	0,00002500	0,4986	0,00000326
30	6	4,7747	0,00001279	0,4991	0,00000134

(FONTE: VECCHIO, 2002)

Dentro do exposto, os cabos podem ser de um único fio de condutor ou multifilares. A espessura radial, h , nas equações, deve referir-se a um único cabo. Se for fio magnético, então a sua espessura radial deve ser usada. Se for cabo multifilar transposto, então um valor menor do que a sua espessura radial deve ser usado, uma vez que este não é um material homogêneo.

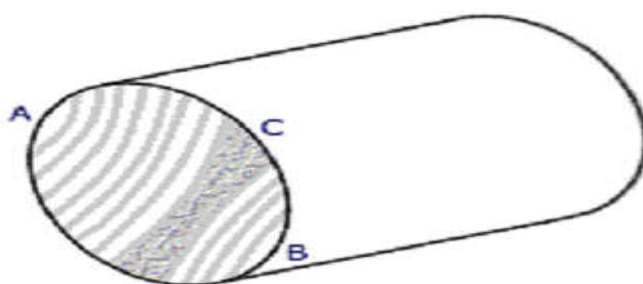
4.6 A VIDA ÚTIL DO ENROLAMENTO SOB CONDIÇÕES DE FADIGA

Denomina-se fadiga ao tipo de falha que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e flutuantes. Sob tais circunstâncias, é possível ocorrer uma falha em um nível de tensão, consideravelmente inferior ao limite aplicado de estresse para uma carga estática. O termo "fadiga" é utilizado porque descreve um

modo de falta que ocorre, normalmente, após um longo período de aplicação de tensão cíclica.

O estudo da fadiga é importante na medida em que a mesma é responsável por cerca de 90% das falhas ocorridas em componentes metálicos. Em geral, uma superfície fraturada por fadiga irá mostrar algumas características macroscópicas facilmente identificáveis, tais como as "marcas de praia" apontadas na Figura 4.12 (BUDYNAS, 2006).

Figura 4.12 - superfície fraturada por fadiga



(FONTE: BUDYNAS, 2006)

A característica de fratura por fadiga apresenta três estágios de desenvolvimento:

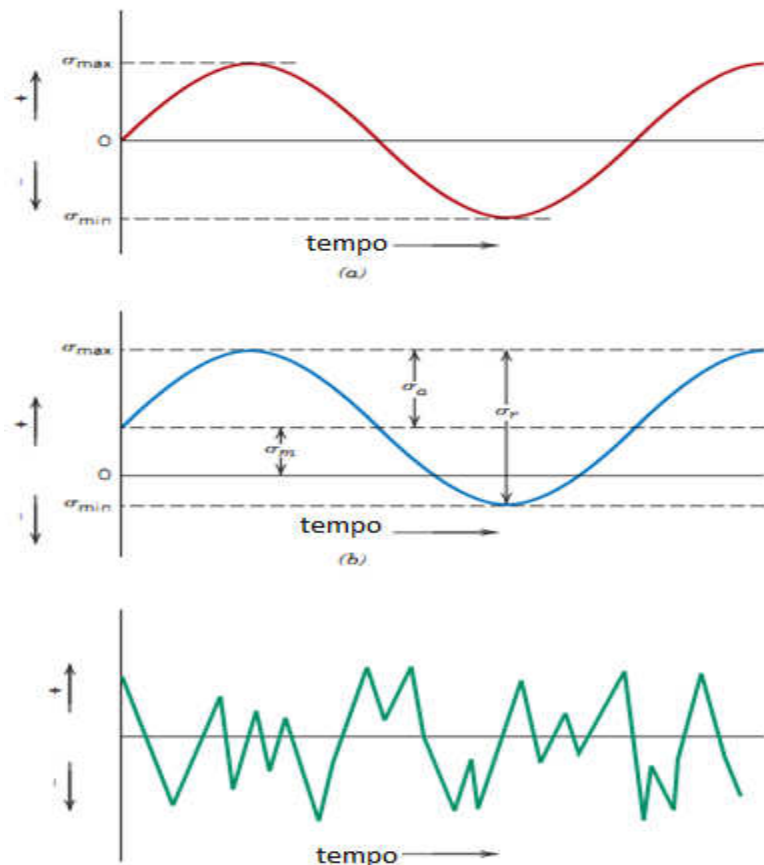
- Fase A é a iniciação de uma ou mais micro-fissuras, devido à deformação plástica cíclica, nesta fase as trincas não são, normalmente, visíveis a olho nu.
- Fase B é a progressão de microfissuras para trincas na direção de tração máxima, formando as marcas de praia que podem ser vistas na Figura 4.12.
- Fase C ocorre durante o ciclo de tensão final, quando o material remanescente não pode suportar as cargas, o que resulta em uma fratura repentina e rápida. Nesta fase a fratura ocorrida pode ser frágil, dúctil ou uma combinação de ambas. Em geral, as "marcas de praia", quando existem, apontam para a origem das rachaduras iniciais (BUDYNAS, 2006).

4.6.1 CURVAS $\sigma - N_c$ (estresse x número de ciclos)

Ilustrativamente, a Figura 4.1 aponta a variação da tensão mecânica com o tempo, que pode levar a estrutura a uma falha por fadiga. Em 4.13 (a) o ciclo de estresse alterna de um valor máximo de tração (+) a um mínimo de compressão (-)

de igual magnitude. Em 4.13 (b) o ciclo de estresse, em tensões máximas e mínimas é assimétrico em relação ao nível de estresse zero. Em 4.13 (c) o ciclo de estresse é randômico (BUDYNAS, 2006).

Figura 4.13 - Variação da tensão com o tempo



(FONTE: BUDYNAS, 2006)

Da Figura 4.13 podem-se inferir os seguintes parâmetros:

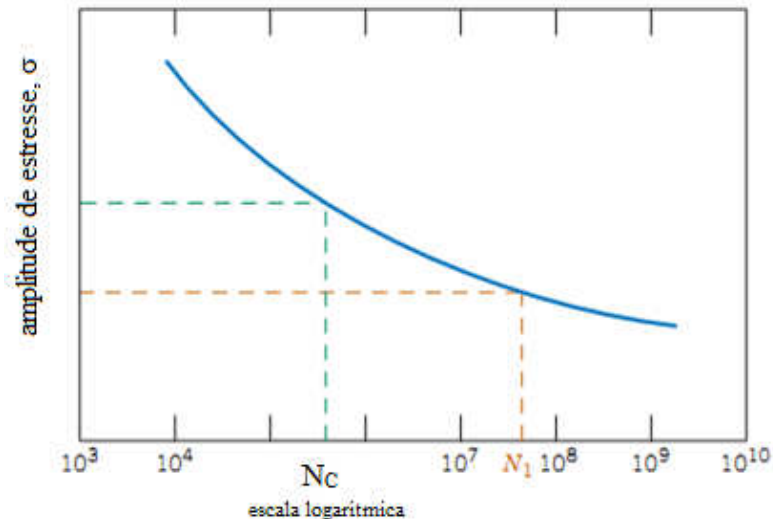
- Intervalo da tensão cíclica: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
- Amplitude da tensão cíclica: $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$
- Tensão média: $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$
- Razão de tensão: $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$,

Onde σ_{max} e σ_{min} são os máximos e mínimos níveis de tensões aplicados.

Neste contexto, a apresentação mais comum de dados referentes à fadiga é feita através das curvas $\sigma-N_C$, também chamadas de *Curvas de Wöhler*. Estes diagramas mostram a dependência da vida de um componente em termos do número de ciclos (N_C) até a falha por fadiga com a tensão mecânica alternada (σ) aplicada. Geralmente, o diagrama $\sigma-N_C$ é feito a partir de ciclos senoidais com

tensão mecânica média nula. A Figura 4.14 ilustra um diagrama σ - N_C típico para metais não ferrosos como o cobre e o alumínio (BUDYNAS, 2006).

Figura 4.14 - Diagrama σ - N_C típico para metais não ferrosos



(FONTE: CALLISTER, 1940)

4.6.2 RESISTÊNCIA À FADIGA OU VIDA EM FADIGA

O termo *resistência à fadiga* refere-se a quanto um material pode resistir a um carregamento cíclico. Entretanto, na presença de deformação plástica, os materiais respondem mais prontamente à deformação cíclica do que à tensão cíclica. Isso permite afirmar que o mecanismo de fadiga é a deformação plástica no material.

Ao longo do tempo, tensões cíclicas irão produzir deformações cíclicas. Inicialmente, estas deformações são elásticas. Após vários ciclos pequenas deformações plásticas surgem, em consequência de defeitos microestruturais ou descontinuidades geométricas do material e, crescem. Logo, é correto afirmar que, para que ocorra uma falha por fadiga, o material tem que sofrer solicitações dinâmicas (cargas cíclicas) e deformação plástica.

4.6.3 LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Como é necessário um grande número de corpos de prova para levantar uma curva σ - N_C , dados de ensaios de tração podem ser utilizados para estimar os valores dos limites de resistência à fadiga (BUDYNAS, 2006).

Uma vez que o cobre e suas ligas não apresentam um limite de resistência a fadiga, e que pode ser observado na Figura 4.14, deve-se considerar como referência a resistência encontrada para um número de ciclos igual 56×10^9 , que corresponde a uma vida útil de 30 anos. Relacionando com os dados construtivos do transformador, o limite de resistência a fadiga é estimado pelas equações 4.23 e 4.24, apresentadas a seguir:

$$F_{rad-dist} = \frac{2\pi \cdot (n \cdot I_F)^2}{h} 10^{-7} \quad [\text{N/m}] \quad (4.23)$$

Desta forma, o estresse médio de tração no enrolamento será dado pela Equação 4.24:

$$\sigma_m = \frac{F_{rad-dist} D_m}{2na_c} \quad [\text{N/m}^2] \quad (4.24)$$

onde:

I_F : Corrente nominal de fase do transformador.

Deve-se salientar, ainda, que existem vários fatores que afetam a resistência à fadiga, quando comparados corpos de prova à peças confeccionadas. A relação utilizada para corrigir a resistência fadiga para o limite de vida finita, é (BUDYNAS, 2006):

$$\sigma'_f = k_a k_b k_c k_d k_e k_f \sigma_f \quad (4.25)$$

Onde:

σ'_f : Limite de resistência a fadiga atualizado

k_a : Fator de acabamento superficial;

k_b : Fator de tamanho da peça;

k_c : Fator de carregamento;

k_d : Fator de temperatura;

k_e : Fator de confiabilidade;

k_f : Outros fatores;

a) Fator de acabamento superficial - k_a

O fator de modificação da superfície k_a depende da qualidade do acabamento da superfície da peça real e do acabamento do corpo de prova utilizado no teste de tração. Este fator pode ser determinado da seguinte forma:

$$k_a = A(\sigma_{ut})^b$$

Se $k_a > 1$, utilizar $k_a = 1$

Onde:

σ_{ut} : limite de resistência a tração.

A Tabela 4.2 apresenta os valores de A e b para diversos tipos de acabamento.

Tabela 4.2 - valores de A e b para diferentes tipos de acabamento

Acabamento superficial	σ_{ut} [MPa]	
	A	b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

(FONTE: BUDYNAS, 2006)

b) Fator de tamanho da peça - k_b

Para esforços axiais, peças de qualquer formato terão $K_b = 1$

c) Fator de carregamento - k_c

Quando os testes de fadiga são realizados com carregamentos de flexão não rotativos, axial ou de torção, os limites de resistência diferem de σ_{ut} . Aqui, serão especificados os valores médios do fator de carga como: (BUDYNAS, 2006)

$k_c = 1$ para flexão não rotativa;

$k_c = 0,85$ para esforço axial;

$k_c = 0,59$ para torção pura;

$k_c = 1$ para esforços multiaxiais.

d) Fator de temperatura - k_d

O fator de temperatura k_d foi obtido partir de dados experimentais, e permite determinar o efeito da temperatura sobre a resistência à tração, Equação 4.26: (BUDYNAS, 2006)

$$k_d = 0.975 + 0.432(10^{-3})T_F - 0.115(10^{-5})T_F^2 + 0.104(10^{-8})T_F^3 - 0.595(10^{-12})T_F^4 \quad (4.26)$$

Com $70 \leq T_F \leq 1000^\circ \text{ F}$.

Assim, k_d representa a razão entre o limite de resistência na temperatura de trabalho (σ_T) e o limite de resistência à temperatura ambiente (σ_{RT}).

$$k_d = \sigma_T / \sigma_{RT} \quad (4.27)$$

e) *Fator de confiabilidade - k_e*

Segundo Budynas (2006), os cálculos estatísticos de resistência, na literatura, referem-se a valores médios das resistência à fadiga e, raramente, seus desvios - padrão excedem 8% dos valores médios. Assim, a Tabela 4.3 oferece o fator de correção devido a confiabilidade, k_e , assumindo um desvio de 8% da média.

Tabela 4.3 - Fator de correção devido a confiabilidade

Confiabilidade em %	k_e
50	1,000
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659
99,9999	0,620

(FONTE: BUDYNAS, 2006)

f) *Outros fatores - k_f*

k_f leva em consideração a redução do limite de fadiga devido a todos os outros efeitos. Entre estes outros fatores, pode-se citar: tensões residuais; características direcionais de operação (em peças feitas de chapas laminadas ou estiradas), peças com tratamentos superficiais, etc.

4.6.4 ESTIMATIVA DA CURVA $\sigma \times N_C$

Em seus estudos, Wöhler usou uma máquina de flexão rotativa para deduzir e propor as curvas $\sigma \times N_C$, portanto seu carregamento era alternado. Entretanto, a presença de tensões médias diferentes de zero, também influem no processo de fadiga. Esta influência é mostrada nas curvas σ_a em função de σ_m , indicadas na Figura 4.15, que representam combinações de estresses que causam o mesmo dano à peça, isto é, qualquer ponto ao longo destas curvas tem a mesma

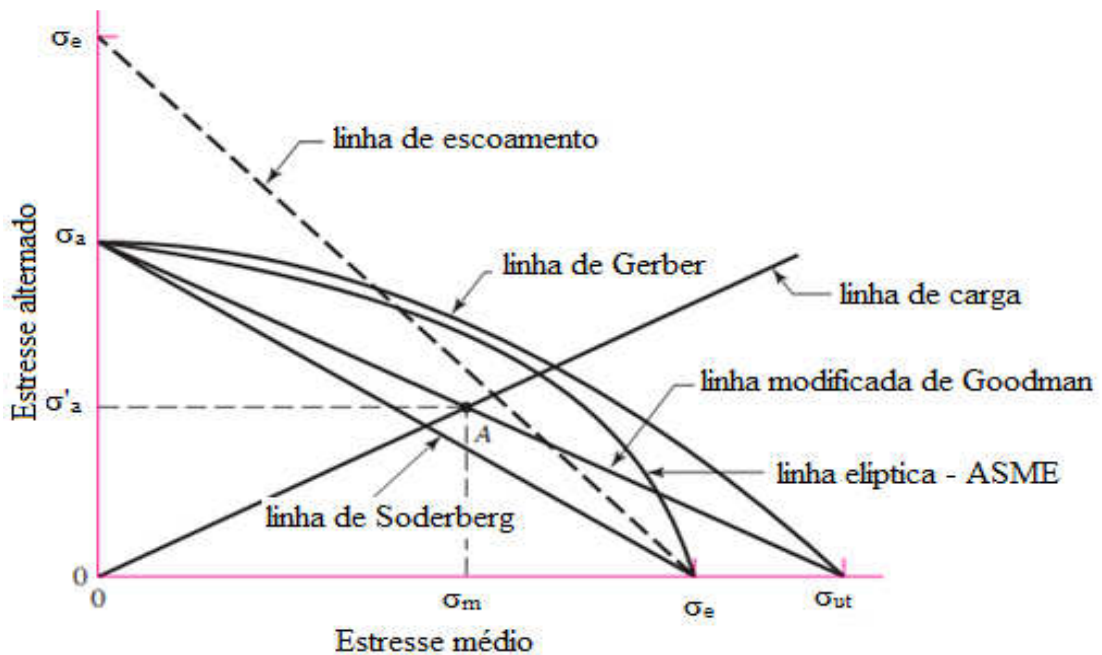
expectativa de vida em fadiga. Portanto, $\sigma_a = \sigma_f(N_C)$ representa a resistência à fadiga para um carregamento totalmente alternado (com $\sigma_m = 0$). Assim, o conjunto $\{r = s = 1, S_m = S_u\}$ corresponde à linha de Goodman, $\{r = 1, s = 2, S_m = S_u\}$ à parábola de Gerber e $\{r = s = 1, S_m = S_y\}$ à linha de Soderberg, como mostrado na Figura 4.16. Adicionalmente, deve-se destacar que dados experimentais indicam que, para o cobre, a parábola de Gerber, definida na Equação 4.28, é a que melhor aproxima os valores calculados daqueles oriundos de medições laboratoriais.

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_e}\right)^r + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{ut}}\right)^s = 1 \quad (4.28)$$

Adicionalmente, pode-se calcular a tensão alternada σ'_a , correspondendo a combinação entre σ_a e σ_m , pela Equação 4.29. Uma vez definido o estresse equivalente σ'_a , este pode ser usado para estimar a expectativa de vida em fadiga em uma curva de Wöhler tradicional (BUDYNAS, 2006).

$$\sigma'_a = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right)^2} \quad (4.29)$$

Figura 4.15 - Diagrama de fadiga mostrando vários critérios de falha



(FONTE: BUDYNAS, 2006)

a) fadiga de alto ciclo

Para fadiga de alto ciclo o diagrama $\sigma \times N_C$ deve ser construído para $N_C \geq 10^3$. Neste caso, o limite de resistência à fadiga não deve ser corrigido pelos os fatores de modificação (k_a a k_f), uma vez que para fins práticos de projeto, este limite

é considerado estático. Assim, a fadiga de alto ciclo pode ser calculada pela equação 4.30 (BUDYNAS, 2006).

$$\sigma_f = aN_c^b \quad (4.30)$$

Onde σ_f é o limite de fadiga para um dado número de ciclos.

Como a curva $\sigma \times N_c$ em escala log-log é uma reta, a equação 4.30 pode ser reescrita como indicado na Equação 4.31:

$$\text{Log}(\sigma_f) = \text{Log}(a) + b \text{Log}(N_c) \quad (4.31)$$

Por substituição de variáveis; $\text{Log}(\sigma_f) = Y$; $\text{Log}(a) = A$ e; $\text{Log}(N_c) = X$

Linearizando:

$$Y = A + bX$$

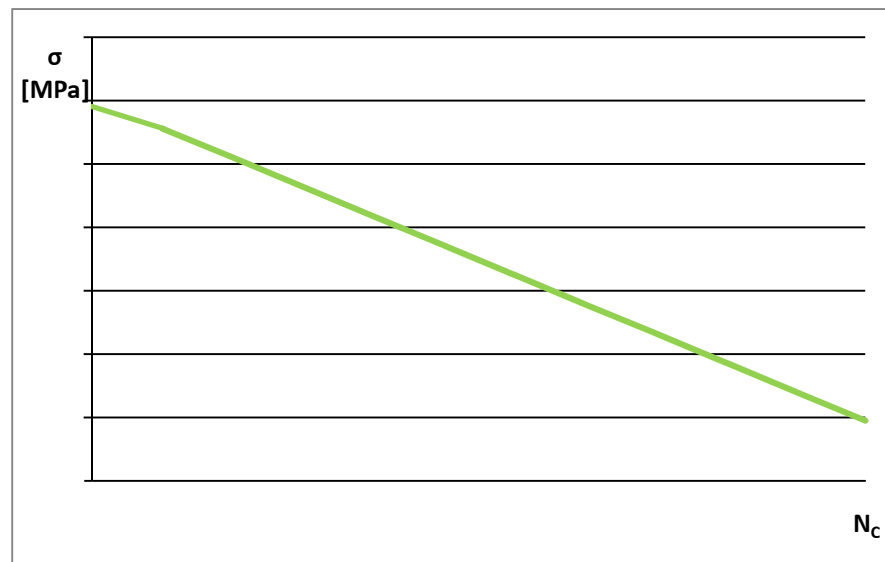
Uma vez que dois pontos desta reta são conhecidos, os valores de a e b podem ser calculados com indicado a seguir:

$$b = \frac{\text{Log}(\sigma_f) - \text{Log}(\sigma_e)}{\text{Log}(N_c) - \text{Log}(N_{c0})} \quad (4.32)$$

$$a = 10^{(\text{Log}(\sigma_e) - b \cdot \text{Log}(N_c))} \quad (4.33)$$

A título de ilustração, a Figura 4.16 mostra a curva $\sigma \times N_c$ em escala log-log.

Figura 4.16 - Curva $\sigma \times N_c$ em escala log-log



(FONTE: AUTOR)

b) fadiga de baixo ciclo

Os ensaios referentes a fadiga de baixo ciclo resultam em uma quantidade maior de informações do que os ensaios referentes a fadiga de alto ciclo ($\sigma \times N_c$). Seus resultados são apresentados em curvas de amplitude de deformação, $\Delta\epsilon/2$, em

função do número de reversões até a falha, $2N_c$, que é definido como sendo o dobro do número de ciclo. Na Figura 4.17, observam-se as curvas de amplitudes de deformação plástica, $\Delta\epsilon_p/2$, e elástica, $\Delta\epsilon_e/2$, que somadas resultam na deformação total, $\Delta\epsilon_t/2$. Os dados de deformação plástica, linearizados em escala bi-logarítmica, assim como foi feito para a deformação elástica, estão representados na Equação 4.34.

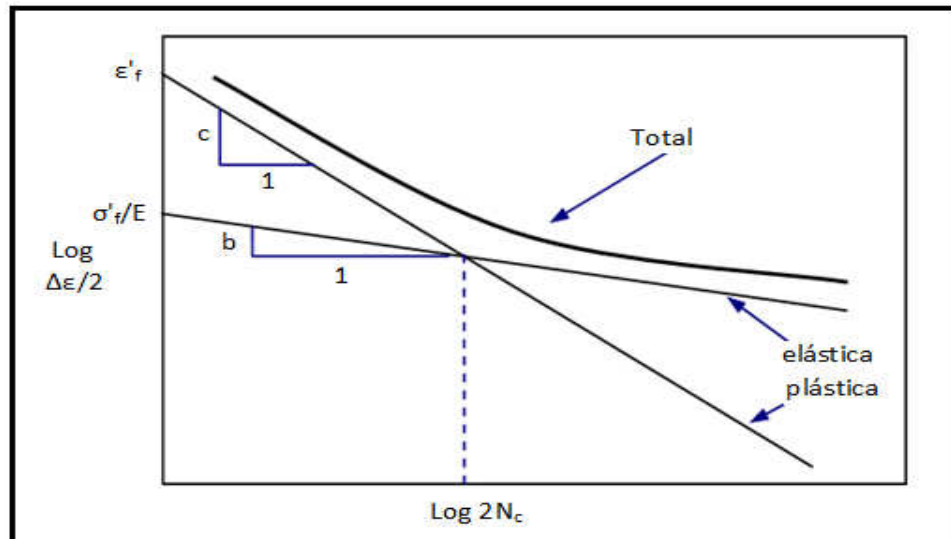
$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_c)^c \quad (4.34)$$

Onde ϵ'_f e c são, respectivamente, o coeficiente de utilidade e o expoente de utilidade à fadiga. Estes valores são propriedades do material, e c varia entre -0,5 e -0,7 para muitos metais (BUDYNAS, 2006).

Complementarmente, a Equação 4.35 apresenta a deformação total. A primeira parcela da soma representa a componente elástica da deformação, e a segunda, a componente plástica. O ponto de interseção entre as duas componentes marca a transição entre a fadiga de baixo ciclo e a fadiga de alto ciclo. Geralmente, esta transição ocorre entre 10^4 e 10^5 ciclos. (BUDYNAS, 2006)

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_c)^b + \epsilon'_f (2N_c)^c \quad (4.35)$$

Figura 4.17 - Curva log-log de vida em fadiga



(FONTE:AUTOR)

O ponto correspondente a ϵ'_f pode ser estimado através da seguinte relação (WEISHMANN, 2008).

$$\epsilon'_f = \left(\ln \frac{100}{100-Ra} \right) E \quad (4.36)$$

Onde R_a é a redução percentual da área de seção do material e, pode ser aproximado igualando-se os volumes antes e depois da deformação. Como informação a ser utilizada, o alongamento percentual do cobre é de 45%, o que pode ser verificado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do cobre

Material	σ_e [MPa]	Resistência a tração [MPa]	Módulo de elasticidade [MPa]	Alongamento %	Coefficiente de Poisson
Cobre (99,95)	69	220	90000 - 130000	45	0,35

(FONTE: AUTOR)

4.7 O DANO CUMULATIVO

Para se trabalhar com carregamentos complexos, onde a amplitude do carregamento varia no tempo, o método aqui proposto, é baseado no conceito de dano introduzido por Palmgren e Miner, Equação 4.37 (BUDYNAS, 2006):

$$d_i = n_{Ci} / N_{Ci} \quad (4.37)$$

Onde:

n_{Ci} : número de ciclos aplicado para um σ qualquer;

N_{Ci} ; número de ciclos necessários para que este mesmo σ danifique o componente.

Qualquer carregamento complexo pode ser dividido em componentes alternadas e médias, σ_{ai} e σ_{mi} , respectivamente, e, que podem ser transformadas em tensões totalmente alternadas equivalentes e que correspondem às expectativas de vida útil para o número de ciclos N_{Ci} , indicada na Equação 4.38:

$$N_{Ci} = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{ai}} \right)^{-\frac{1}{b}} \quad (4.38)$$

Onde a e b são o expoente e o coeficiente da curva de Wöhler.

Para a definição da quantidade de ciclos de vida remanescente de um material, após a aplicação de uma força qualquer, deve-se utilizar a Equação 4.39:

$$n_{Cf} = \left(1 - \frac{n_{Ci}}{N_{Ci}} \right) N_C \quad (4.39)$$

Onde:

N_{Cf} = número de ciclos remanescente.

Usando a formulação determinística do dano linear, tem-se:

$$D = \sum \frac{n_{Ci}}{N_{Ci}} \quad (4.40)$$

Quando D for igual a 1, o dano acontece.

A título de ilustração, apresenta-se a seguir, através de um exemplo numérico a metodologia utilizada.

O método do dano cumulativo, ou método de Palmgren-Miner, foi aplicado em uma estrutura de aço com as seguintes propriedades (BUDYNAS, 2006):

$$\sigma_{ut} = 72 \text{ kpsi}$$

$$\sigma'_{e,0} = 40 \text{ kpsi}$$

A utilização da designação $\sigma'_{e,0}$, em vez da mais habitual σ'_e , é para indicar o limite de resistência do material virgem, ou sem danos. O diagrama $\log \sigma \times \log N_c$ para este material é mostrado na Figura 4.18, pela linha sólida. Neste material foi aplicado um estresse $\sigma_1 = 60 \text{ kpsi}$ para $n_{c1} = 3000$ ciclos. Se $\sigma_1 > \sigma'_{e,0}$, o limite de resistência será alterado. O objetivo é encontrar o novo limite de resistência σ'_e , do material danificado. A equação da curva de vida útil do material virgem é mostrada na Figura 4.18, na região compreendida entre 10^3 e 10^6 ciclos. Para a obtenção e apresentação dos resultados são necessários os seguintes procedimentos:

Passo 1 - Obtenção dos parâmetros a e b

Para a obtenção do parâmetro *a* deve-se utilizar a Equação 4.33, enquanto para encontrar *b* utiliza-se a Equação 4.32.

$$a = 129,6$$

$$b = -0,085091$$

Passo 2 - Montagem da equação que dará origem a curva de suportabilidade

A equação da curva de suportabilidade tem a forma indicada na Equação 4.30:

$$\sigma_f = a N_c^b = 129,6 N_c^{-0,085091}$$

Passo 3 - definição do número de ciclos necessários para a falha para um dado valor de estresse

O número de ciclos até a falha, estimado pela equação 4.33, para o nível de estresse $\sigma_1 = 60 \text{ kpsi}$ é:

$$N_1 = \left(\frac{60}{129,6}\right)^{\frac{-1}{0,085091}} = 8520$$

Passo 4 - Definição da redução de vida útil do material

Uma nova reta deve ser construída paralela a anterior, situada nos pontos com as seguintes coordenadas:

$$N_{C1} - n_{C1} = 8520 - 3000 = 5520 \text{ ciclos}$$

$$\sigma = 60 \text{ kpsi}$$

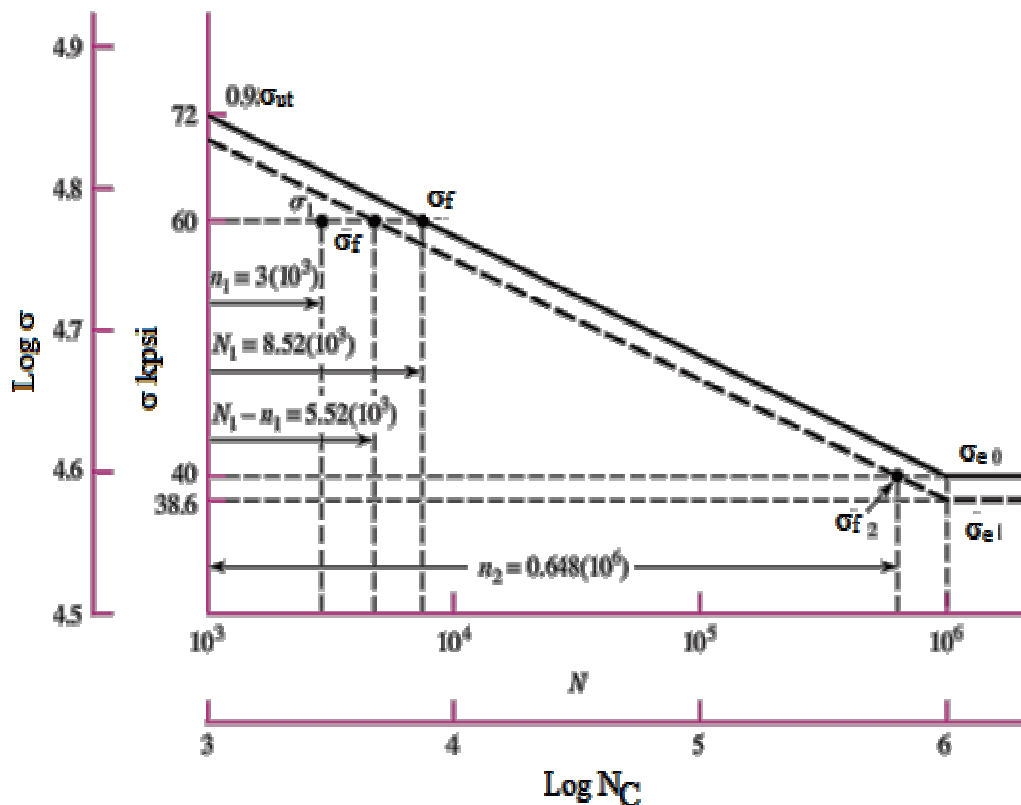
Para a definição do número de ciclos que restam ao material, depois do esforço de 60 kpsi, aplicado em 3000 ciclos, é utilizada a Equação 4.34:

$$n_2 = \left(1 - \frac{3000}{8520}\right) 10^6 = 0,648 \times 10^6$$

A redução percentual (R%) é definida pela vida útil total antes da aplicação do esforço e a vida remanescente depois do esforço, ou seja:

$$R\% = 1 - (0,648 \times 10^6 / 1 \times 10^6) = 32,15\%$$

Figura 4.18 - Uso da regra de Miner para estimar a vida finita de um material



(FONTE: BUDYNAS, 2006)

4.8 CÁLCULOS UTILIZADOS PARA O TRANSFORMADOR DE GRANDE PORTE

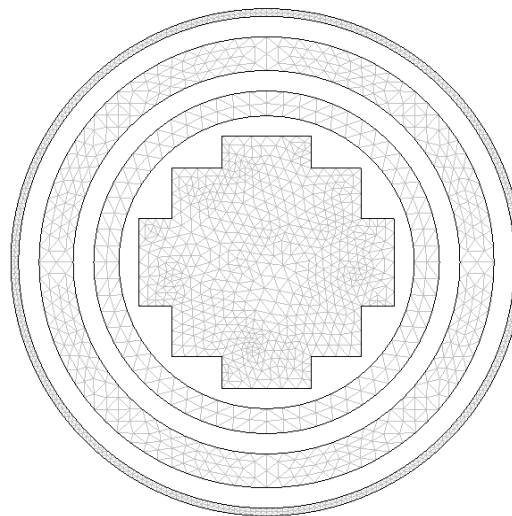
Inicialmente, deve-se destacar que as características mecânicas e geométricas de transformadores de grande porte são difíceis de serem obtidas. Neste sentido, as informações citadas serão utilizadas neste capítulo, tomando-se como base as referências Vecchio (2002) e CIGRE (2002) e também dados típicos de construtivos desses equipamentos.

Tomando-se como base a teoria apresentada nos itens anteriores, este tópico em particular, segue no sentido de mostrar a aplicação da metodologia proposta para levantamento da curva de suportabilidade, e posteriormente, análises envolvendo a sua vida útil. Para estes estudos foi utilizado o transformador, cuja representação da seção transversal da coluna, em corte superior, está indicada na Figura 4.19. Trata-se de um transformador de grande porte, onde sua construção apresenta dois enrolamentos concêntricos e, um enrolamento adicional externo para regulação de tensão.

O enrolamento interno é do tipo transposto, como indicado na Figura 4.7 (b) e, enquanto o enrolamento externo é do tipo geminado com dois fios paralelos (VECCHIO, 2002).

A disposição destes enrolamentos, em corte superior, pode ser observada na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Corte superior de uma coluna do transformador



(FONTE: AUTOR)

4.8.1 CÁLCULOS DE TRAÇÃO PARA O COBRE UTILIZADO NO TRANSFORMADOR DE GRANDE PORTE

Para o cálculo do limite de tração do cobre dos enrolamentos, usou-se uma barra do metal com as dimensões utilizadas no enrolamento externo do transformador. O corpo de prova tem seção transversal retangular. O comprimento (l) escolhido é de 0,144 cm, a mesma distância entre os espaçadores do enrolamento. Este material foi tratado e encruado e, teve seu módulo de elasticidade elevado para 130 GPa. As propriedades mecânicas para o cobre padrão estão descritas na Tabela 4.4.

Considerando um corpo de prova de 0,144 cm, deve-se buscar a tensão necessária para provocar uma deformação de 0,5% do tamanho original, portanto, Δl deve ser igual a 0,7203 mm.

Fazendo uso da lei de Hooke, definida pela Equação 4.1, chega-se a uma boa aproximação para o estresse de tração que é suficiente para que o cobre alcance a deformação de escoamento, assim, tem-se:

$$\sigma = 65000 \text{ kN /m}^2 \text{ ou } 65 \text{ MPa}$$

O valor encontrado, de 65 MPa, é coerente com aquele fornecido por fabricantes e que foi apresentado na Tabela 4.4.

4.8.2 CÁLCULO DA FLECHA PELA APLICAÇÃO DE UM ESTRESSE AXIAL ($\sigma_{0,2}$)

a) enrolamento externo

Devido à pequena distância entre os espaçadores radiais de grandes transformadores, é possível aproximar por uma viga reta a parte do condutor metálico, entre dois destes espaçadores. No transformador em estudo essa distância (l) corresponde a 0,144 cm.

A partir deste pressuposto, uma viga bi-engastada será a representação da bobina para o cálculo da deformação sob força axial. Assim, o limite será quando a soma dos dois lados menores no triângulo, como indicado na Figura 4.4, corresponderem ao lado maior mais 0,5%. Assim, pelo Teorema de Pitágoras, tem-se:

$$v = 7,20 \text{ mm}$$

Portanto, a flecha máxima permitida é de 7,20 mm. Uma deformação de maior amplitude produzirá uma deformação permanente.

Fazendo uso da Equação 4.10 para o enrolamento do transformador, encontra-se a força distribuída necessária para produzir uma flexão de 7,20 mm:

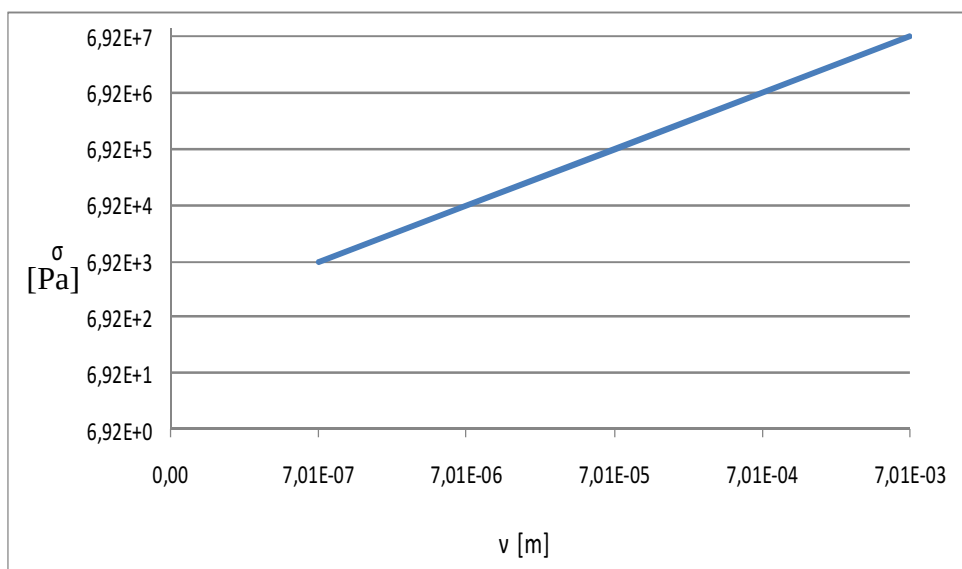
$$q_0 = 163,3 \times 10^3 \text{ N/m}$$

Dividindo-se q_0 pela dimensão do condutor, na qual a força foi aplicada, tem-se:

$$\sigma_{0,2} = 69,2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

De forma gráfica, a Figura 4.20, apresenta o comportamento do enrolamento externo para vários valores de tensão mecânica, mostrando o seu comportamento linear, o qual também é previsto pela Lei de Hooke.

Figura 4.20 - Comportamento do enrolamento externo para vários valores de tensão mecânica



(FONTE: AUTOR)

b) enrolamento interno

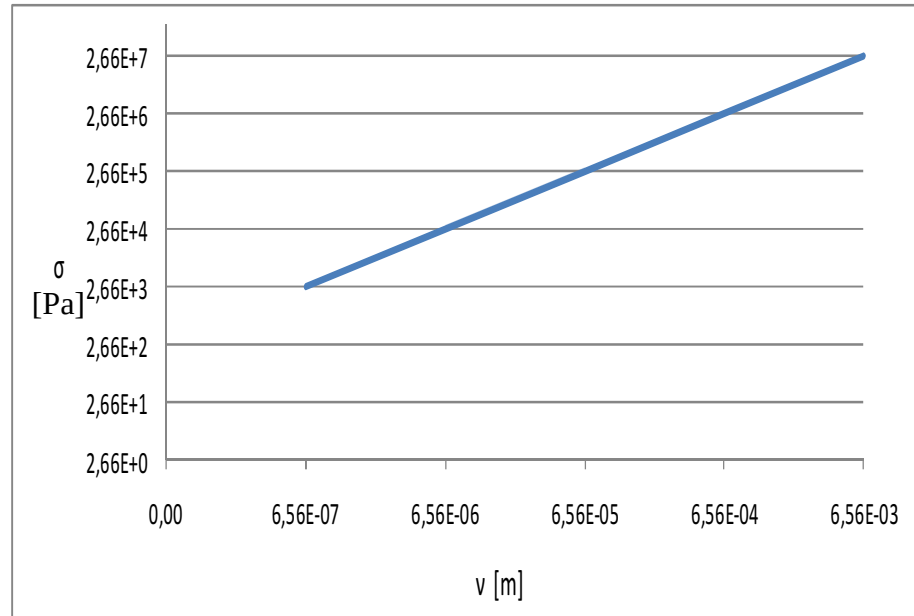
Para o enrolamento interno, a distância entre os espaçadores radiais (l) corresponde a 0,130 cm. Analogamente, ao caso anterior, obtém os parâmetros necessários, para a construção da curva indicada na Figura 4.21. Assim:

$$v = 6,5 \text{ mm}$$

$$q_0 = 39,9 \times 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma_{0,2} = 26,6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Figura 4.21 - Curva de suportabilidade do enrolamento interno submetido a uma força axial



(FONTE: AUTOR)

4.8.3 CÁLCULO DA FLECHA PARA UMA FORÇA RADIAL

a) enrolamento externo

Como definido no Capítulo 2, a força radial no enrolamento externo produz estresse de tração. Portanto, a sustentação mecânica vem das estecas, ou espaçadores axiais, que estão localizados entre os enrolamentos externo e de regulação de tensão.

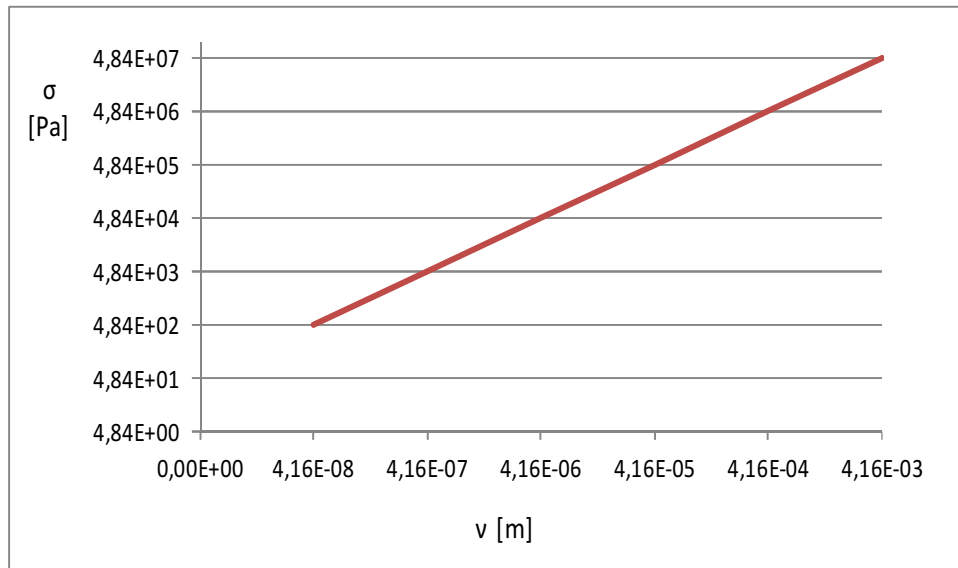
Similarmente ao caso anterior, para um diâmetro médio deste enrolamento, a flecha máxima permitida é de 4,15 mm, a força distribuída, q_0 , é de $470,0 \times 10^3$ N/m, enquanto que o estresse eletromecânico é de $48,4 \times 10^6$ N/m².

Deve-se salientar, como justificado no item 4.3, que o cabo suporta o dobro da força uma vez que sua construção radial é feita por duas barras geminadas. Portanto, o $\sigma_{0,2}$ do cabo é dado por:

$$\sigma_{0,2} = 2 \times 48,4 \times 10^6 = 96,9 \text{ MPa}$$

Mais uma vez, a figura 4.22 mostra a curva de suportabilidade mecânica para uma das barras que compõe o cabo geminado.

Figura 4.22 - Curva de suportabilidade do enrolamento externo submetido a uma força radial



(FONTE: AUTOR)

b) enrolamento interno

Para o cálculo da suportabilidade ao estresse radial no enrolamento interno, deve-se utilizar os espaçadores axiais como referência para a coluna. Isto se justifica, pois, no enrolamento interno a força é de compressão e, portanto, deverá se apoiar nas estecas utilizadas axialmente, entre o enrolamento interno e o núcleo.

No transformador considerado, para o enrolamento interno, a distância entre os espaçadores axiais corresponde a, aproximadamente, 0,66 cm. Analogamente, tem-se que:

$$v = 3,28 \text{ mm}$$

$$q_0 = 166,35 \times 10^3 \text{ N/m}$$

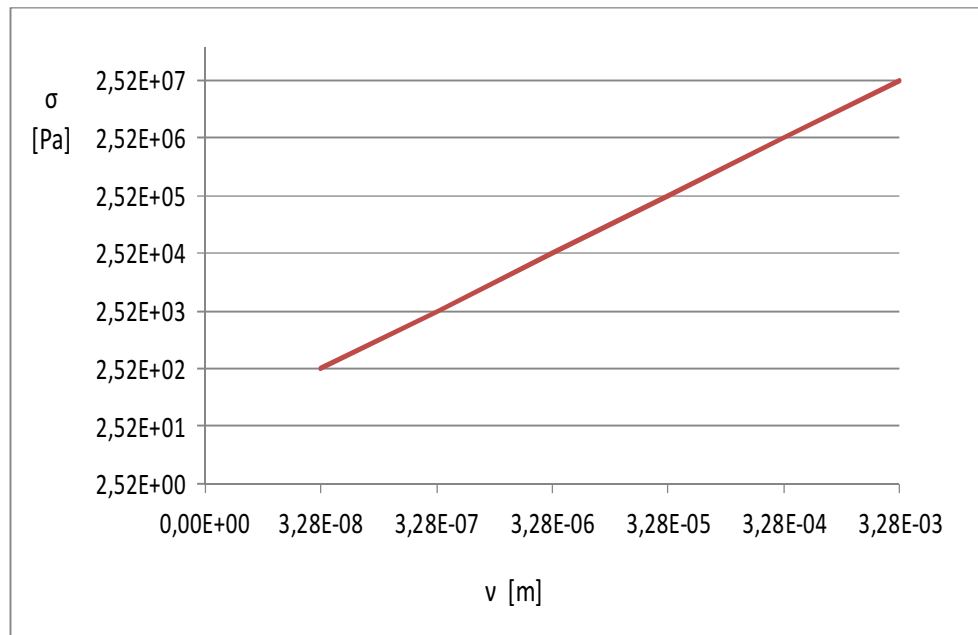
$$\sigma = 25,2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Como o cabo é transposto e foi utilizada a resina epóxi em sua construção, reportando novamente ao item 4.3, obtém-se:

$$\sigma_{0,2} = 0,8 \times 7 \times 25,2 \times 10^6 = 141,12 \text{ MPa}$$

Neste caso, a figura 4.23 mostra a curva de suportabilidade mecânica para uma das barras que compõe o cabo transposto. Observa-se, uma vez mais, que a figura obedece a lei de Hooke.

Figura 4.23 - Curva de suportabilidade do enrolamento interno submetido a uma força radial



(FONTE: AUTOR)

4.8.4 CURVA DE VIDA ÚTIL PARA O TRANSFORMADOR DE GRANDE PORTE

Na sequência, o método do dano cumulativo, ou de Palmgren-Miner, foi aplicado aos enrolamentos do transformador, cujas características estão definidas na Figura 4.19. O objetivo é definir o quanto um curto-circuito pode reduzir a vida útil do transformador. Como referência de duração do fenômeno, foi definido o limite de três ciclos de aplicação da força, o que equivale ao tempo médio de 50 ms, que correspondem ao tempo em que as proteções devem atuar e eliminar o curto-circuito do sistema elétrico.

a) Curva de vida útil do enrolamento interno submetido a uma força radial

A partir das características do enrolamento interno do transformador e da metodologia analítica apresentada, pode-se determinar o limite de fadiga do enrolamento (σ_f), utilizando-se o estresse nominal do transformador, e este pode ser estimado pelas Equações (4.23) e (4.24). Nestas condições tem-se que:

$$\sigma_f = 294,64 \text{ kPa}$$

Salientando-se que o σ nominal do enrolamento, é aquele que pode ser aplicado durante todo o tempo esperado de duração do transformador, que neste estudo, considerou-se que seja 30 anos, ou seja, $56,0 \cdot 10^9$ ciclos.

Para a obtenção do limite elástico para a elaboração da curva de vida útil (σ_{ut}), deve-se utilizar o valor do $\sigma_{0,2}$, que pode ser fornecido pelo fabricante ou estimado, como demonstrado no item 4.8.3. Portanto:

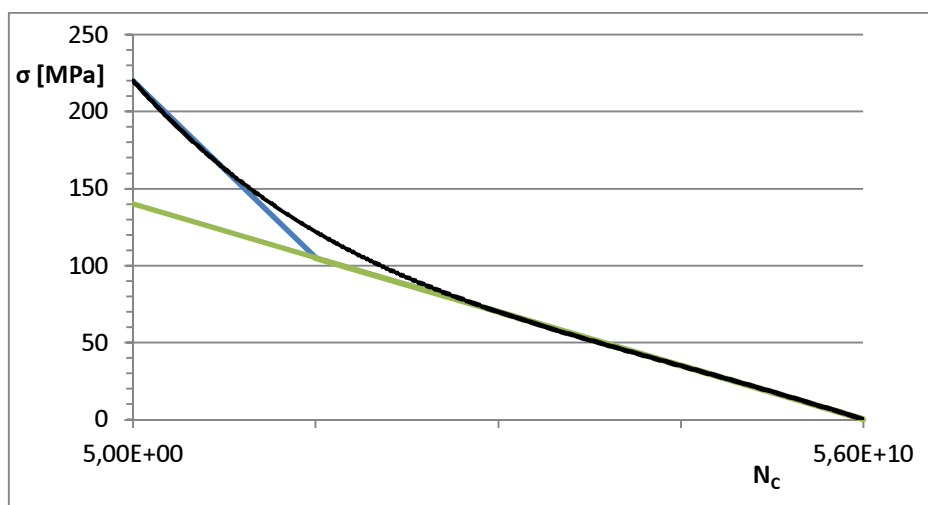
$$\sigma_{ut} = \sigma_{0,2} = 140 \text{ MPa}$$

O limite de resistência a tração σ_R , fornecido pelo ensaio estático, é uma boa referência para a determinação da extremidade plástica da curva. O valor recomendado, 220 MPa, está contido na Tabela 4.4, ou seja:

$$\sigma_R = 220 \text{ MPa}$$

Uma vez definidos estes pontos é possível traçar a curva de suportabilidade mecânica que representa o enrolamento interno, e pode ser visualizado na Figura 4.24. O ponto de interseção entre as retas azul e verde equivale 1×10^4 ciclos, a imposição deste valor foi justificada no item 4.7 (b) para fadiga de baixo ciclo. A parte do gráfico abaixo da linha verde indica o local onde a deformação produzida é elástica, entre as linhas verde e azul as deformações são plásticas. A curva de cor preta é a soma das anteriores e representa a condição real do enrolamento para análise de fadiga.

Figura 4.24 - Curva de suportabilidade para o enrolamento interno submetido a uma força radial



(FONTE: AUTOR)

Reafirmando que para este trabalho, apenas a parte elástica da deformação é de interesse, haja vista, que o enrolamento do transformador é considerado em perfeitas condições enquanto não apresenta deformações permanentes. Assim, é necessário montar a equação que descreve essa curva. Para tanto, deve-se calcular os parâmetros adequados para a construção da curva $\sigma \times N_c$ do enrolamento.

Para a obtenção do parâmetro “a” deve-se utilizar a Equação 4.33, enquanto para encontrar “b” utiliza-se a Equação 4.32. Assim, tem-se que:

$$a = 1,4 \times 10^8$$

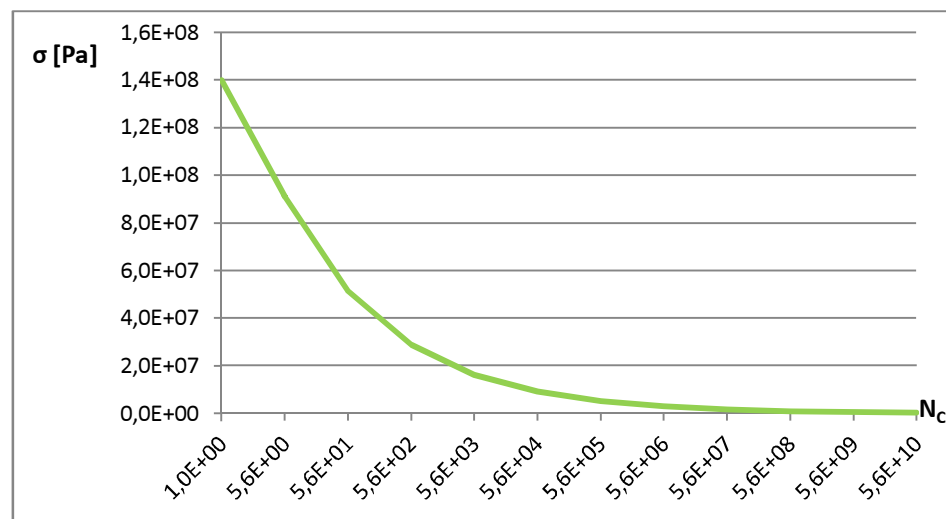
$$b = -0,249$$

Portanto a equação que representa a porção elástica da curva de suportabilidade do enrolamento interno é dada por:

$$\sigma_f = a N_c^b = 1,4 \cdot 10^8 N_c^{-0,249}$$

Dentro do exposto, na Figura 4.25 está representada a curva não linearizada oriunda da equação citada.

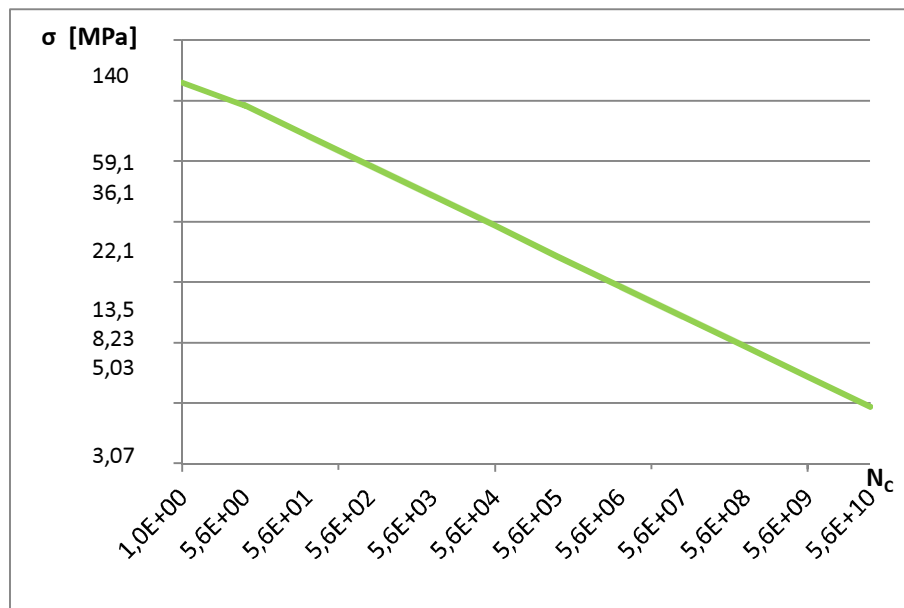
Figura 4.25 - Curva não linearizada para o enrolamento interno submetido deformação elástica



(FONTE: AUTOR)

Posteriormente, a equação foi linearizada na forma $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(N_c)$ e está representada em verde na Figura 4.26.

Figura 4.26 - Curva de suportabilidade do enrolamento interno para esforços radiais



(FONTE: AUTOR)

Objetivando analisar a redução de vida útil do enrolamento, foi imposto um estresse de 54 MPa (σ_a).

Inicialmente, deve-se lembrar que os esforços eletromecânicos produzidos pela corrente de curto-circuito têm seu valor médio diferente de zero. Assim, é necessário o ajuste indicado na Equação 4.29, ou seja:

$$\sigma_a = (54 - 0) / 2 = 27 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = (54 + 0) / 2 = 27 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_a = \frac{27}{1 - (27/140)^2} = 28,04 \text{ MPa}$$

Deve-se salientar ainda, que para efeito didático será permitida a duração da aplicação da força durante 2 segundos ($N_{c1} = 120$ ciclos), correspondendo à soma de 40 eventos de curto-circuito independentes, agrupados em um único evento.

Inicialmente, deve-se identificar o número de ciclos que a estrutura do enrolamento suporta até a falha catastrófica. Tomando-se como base a equação 4.33, tem-se:

$$N_{c1} = \left(\frac{28,04}{140} \right)^{\frac{-1}{0,249}} = 637,7 \text{ ciclos}$$

A definição do número de ciclos restantes (N_{c2}), nos quais o enrolamento suporta seu estresse nominal, pode ser estimado pela Equação 4.34, ou seja:

$$N_{C2} = \left(1 - \frac{120}{637,7}\right) 56 \cdot 10^9 = 45,5 \cdot 10^9 \text{ ciclos}$$

Uma vez definido que o tempo de vida útil do enrolamento corresponde a 56×10^9 ciclos, tem-se que a redução percentual de vida útil é de 18,85%.

Supondo um transformador projetado para 30 anos de vida útil, o mesmo teria uma redução de vida de 68 meses.

No entanto, faz-se necessário definir novos parâmetros e a equação que define essa nova condição. Assim, o valor de b permanece o mesmo, haja vista, que a inclinação da reta permanece a mesma. Para o cálculo de a' deve-se voltar a equação original e substituir os valores conhecidos σ_f e n_{C2} . Assim, tem-se que:

$$28,04 \cdot 10^6 = a(45,5 \cdot 10^9)^{-0,249}$$

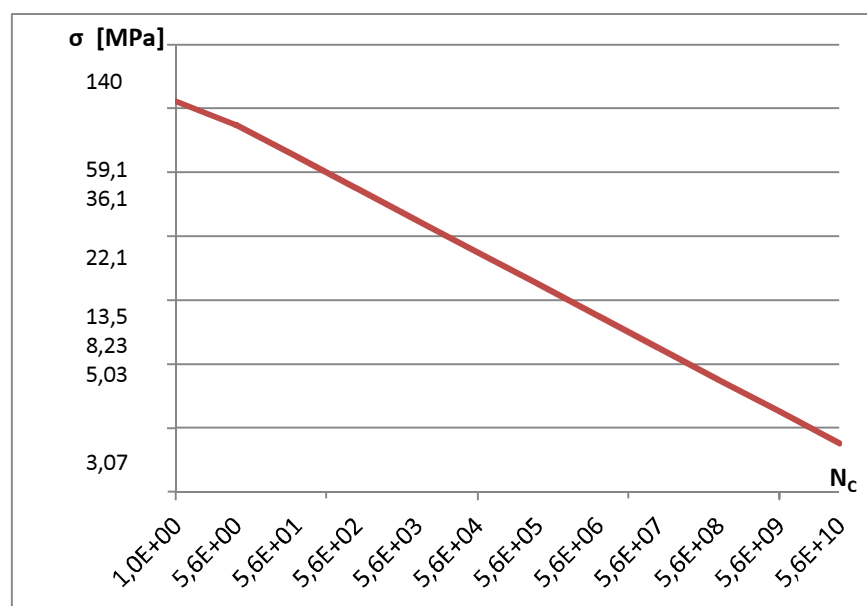
$$a = 132,78 \cdot 10^6$$

Portanto, a equação que define esta nova condição é dada por:

$$\sigma = 1,33 \times 10^8 N_c^{-0,249} \text{ (para } N_c = 45,5 \cdot 10^9 \text{ ciclos)}.$$

Dentro desta perspectiva, a nova curva de suportabilidade mecânica do transformador, após os efeitos do curto-circuito, pode ser visualizada na Figura 4.27 na cor vermelha.

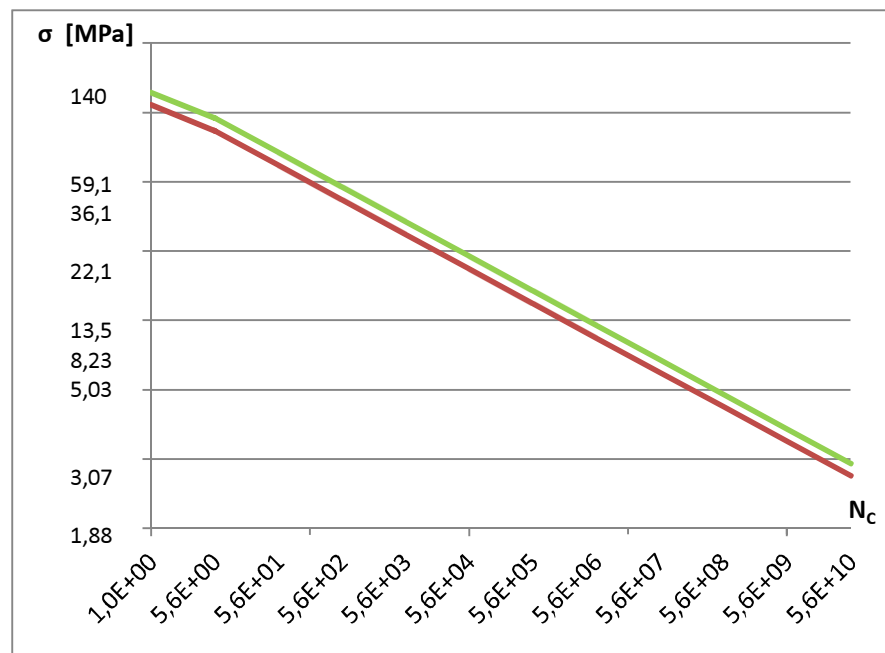
Figura 4.27 - Curva de suportabilidade do enrolamento interno após a aplicação de esforços radiais da ordem de 54 MPa



(FONTE: AUTOR)

Finalmente, como possibilidade de comparação, a Figura 4.28 apresenta as retas para as duas condições, em um mesmo gráfico. Em verde a condição original do enrolamento e, em vermelho, a curva de vida útil após o histórico de curtos-circuitos acontecidos.

Figura 4.28 - Retas para as duas condições, em verde a condição original e em vermelho, após o histórico de curtos-circuitos acontecidos



(FONTE: AUTOR)

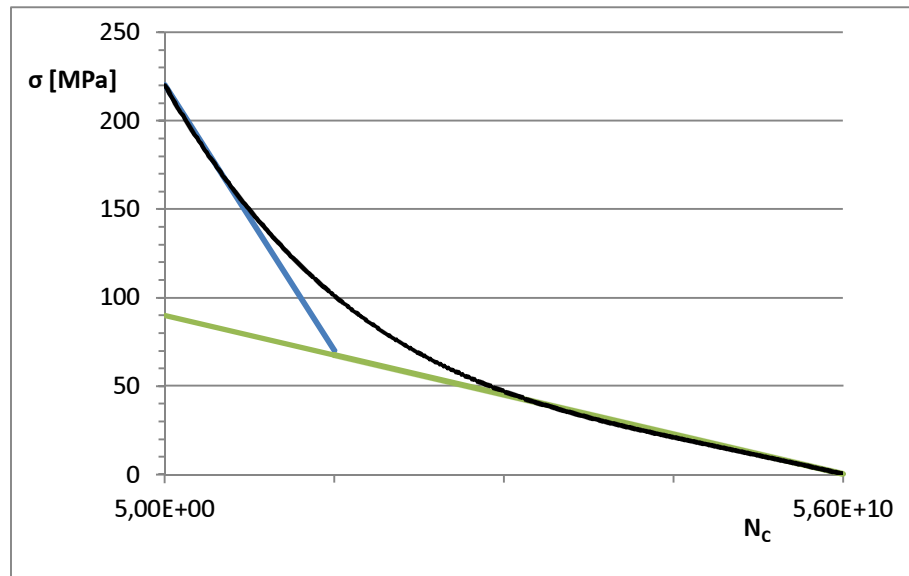
b) Curva de vida útil do enrolamento externo submetido a uma força radial

Aplicando-se a metodologia apresentada anteriormente, obtém a equação que representa a curva de suportabilidade do enrolamento externo, a qual é mostrada a seguir:

$$\sigma = 96,9 \times 10^6 N_c^{-0,23382}$$

Isto posto, a Figura 4.29, mostra graficamente, a curva de vida útil em função do número de ciclos.

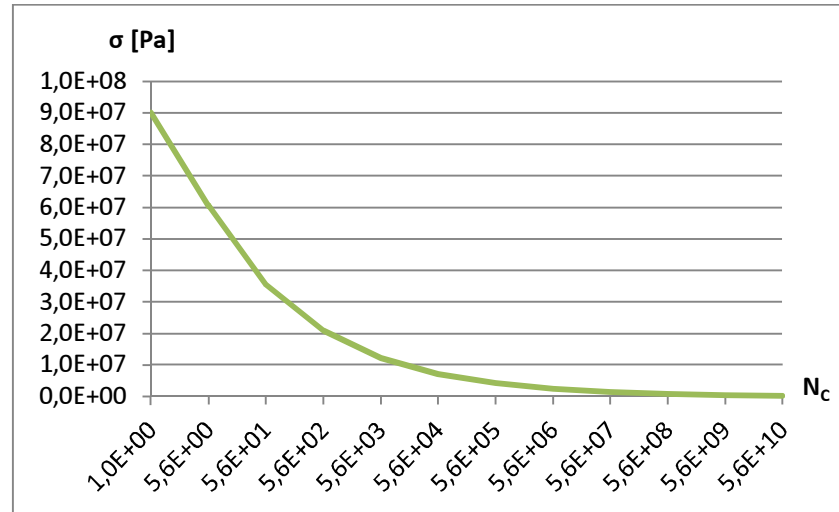
Figura 4.29 - Curva de suportabilidade para o enrolamento externo



(FONTE: AUTOR)

A curva não linearizada que representa o enrolamento externo do transformador está registrada na Figura 4.30.

Figura 4.30 - Curva não linearizada para o enrolamento externo submetido deformação elástica



(FONTE: AUTOR)

Posteriormente, a equação foi linearizada na forma $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(N_c)$ e está representada em verde na Figura 4.31.

Para avaliar a redução de vida útil deste enrolamento sob carregamento radial, foi imposto um estresse de 52 MPa. Primeiramente, destaca-se, que o limite máximo correspondente ao final de vida útil do equipamento é de 191 ciclos.

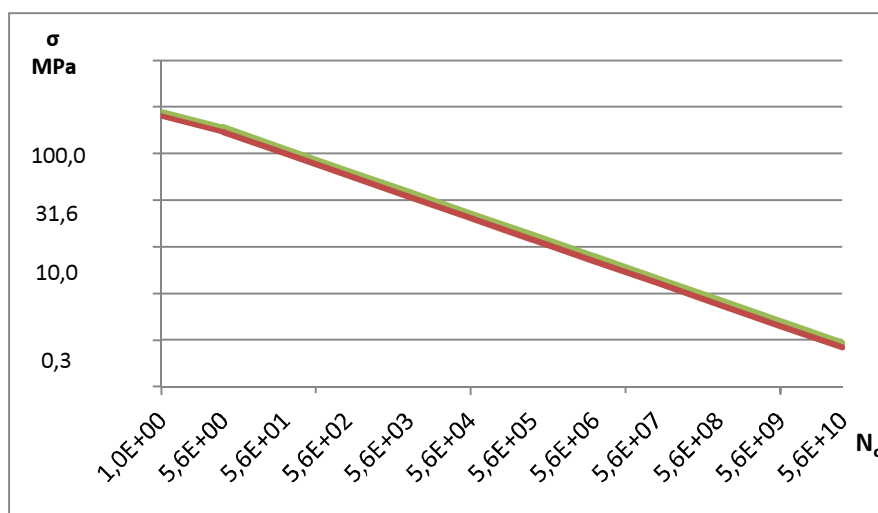
Posteriormente, analisou-se uma situação, hipotética, em que a duração equivalente foi de 60 ciclos. A título de ilustração, a curva que representa a redução de vida útil do enrolamento externo, pode ser visualizada em vermelho na Figura 4.31.

Assim sendo, a redução percentual de vida útil deste enrolamento, para este patamar de estresse foi de 31%.

Finalmente, deve-se definir a equação que representa essa nova condição. Portanto, a equação que define a nova curva é indicada a seguir:

$$\sigma = 84,76 \times 10^6 N_c^{-0,23382}$$

Figura 4.31 - Curvas de suportabilidade, antes (verde) e depois (vermelho) do histórico de curtos-circuitos - enrolamento externo



(FONTE: AUTOR)

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Primeiramente, foram descritos fisicamente e matematicamente, os conceitos mecânicos necessários ao perfeito entendimento deste capítulo.

Dentro deste contexto, foram apresentadas as bases de uma formulação analítica que permite representar os enrolamentos do transformador, pela similaridade destes com vigas metálicas bi-engastadas. A aplicação desta metodologia de cálculos permitiu estimar o limite de estresse ($\sigma_{0,2}$) que estes mesmos enrolamentos suportam, radial e axialmente.

Na sequência do trabalho, desenvolveu-se uma metodologia analítica para elaboração da curva de suportabilidade mecânica para transformadores. A partir

desta, pode-se estudar e analisar as reduções de vida útil do equipamento, quando o mesmo é submetido a esforços mecânicos estáticos e flutuantes.

Finalmente, as metodologias desenvolvidas foram aplicadas em um transformador trifásico de grande porte que, como se sabe, possui uma construção bastante complexa.

Inicialmente, para esse transformador, foram estimados valores de suportabilidade mecânica para esforços estáticos para ambos os enrolamentos. O conhecimento das posições onde estão alojados os espaçadores radiais e axiais permitiram, por intermédio, da lei de Hooke, definir as curvas de suportabilidade mecânica para a estrutura.

Posteriormente, com a aplicação dos conceitos de fadiga de material, associados aos detalhes construtivos do enrolamento, foi possível obter curvas de vida útil, para o transformador quando este é exposto a esforços variáveis no tempo. A aplicação de forças cíclicas pode deteriorar uma determinada estrutura e, neste capítulo, foi demonstrado que, também, é possível quantificar esse fenômeno.

Deve-se salientar que as grandezas mecânicas obtidas pelas metodologias analíticas serão comparadas, posteriormente, com os valores oriundos das simulações computacionais e de alguns ensaios experimentais.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS LABORATORIAIS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Complementando os aspectos anteriores, este capítulo tem por objetivo obter informações sobre os limites de suportabilidade à tração de condutores de cobre utilizados em transformadores através de meios experimentais. De fato, esta etapa dos trabalhos encontra ressonância na busca de um melhor entendimento sobre as principais propriedades mecânicas dos metais, de modo a poder definir sua melhor utilização. Neste particular, os desenvolvimentos em pauta deverão primar por experimentos laboratoriais visando o conhecimento da: resistência mecânica, módulo de elasticidade, plasticidade, resiliência e tenacidade, dentre outras propriedades.

No contexto em foco, os ensaios mecânicos subdivide-se em destrutivos e não-destrutivos. Assim, como o próprio nome define, os ensaios destrutivos promovem a inutilização do material enquanto que os não-destrutivos consistem em testar uma dada peça metálica, buscando determinar seus limites operacionais máximos em um dado período de tempo, sem, todavia, promover danos nas peças testadas.

Na categoria dos experimentos destrutivos estão os ensaios de: tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. O de dureza, muito embora possa, em certos casos, não inutilizar a peça ensaiada, também está incluído nessa categoria. Dentre os não-destrutivos, estão os ensaios com raios X, ultra-som, Magnaflux, elétricos e outros.

Objetivando contemplar a obtenção das curvas de tensão mecânica em função do alongamento, fica pois definida que a estratégia de testes em questão, caracterizada por ensaios de tração, se configura como sendo de natureza destrutiva, e, assim procedendo, é possível a determinação de parâmetros mecânicos, tais como: o módulo de elasticidade, tensão de escoamento, limite de resistência, etc. Somado a tais informações, o mencionado teste ainda conduz a outros desempenhos mecânicos que podem ser correlacionados com os processos teóricos explorados anteriormente, permitindo, assim, uma etapa de comparação com as formulações apresentadas.

Inserido nestes objetivos, este capítulo encontra-se centrado na descrição da estrutura laboratorial utilizada para os fins aqui postos, e ainda, a apresentação e discussão de resultados que servirão como base para os estudos de validação considerados na unidade subsequente a esta.

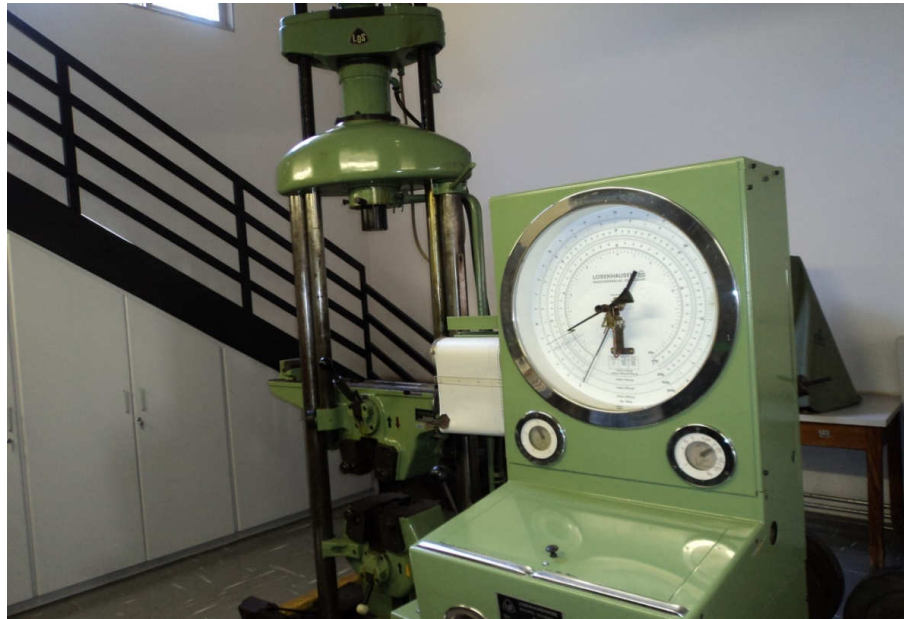
5.2 ARRANJO LABORATORIAL

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Projetos Mecânicos "Dr Henner A. Gomide" – LPM – alocado no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Este laboratório iniciou suas atividades em 1979 atuando nas áreas de Comportamento Mecânico dos Materiais e Análise Experimental de Tensões. Em seu acervo, este laboratório, possui uma máquina de ensaios universal para testes de tração e compressão, a qual foi utilizada nos testes experimentais.

5.2.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento disponível consiste numa máquina de ensaios universal alemã da marca Losenhausen, com capacidade máxima de 40 toneladas. Esta é equipada com garras para fixação e realização de ensaios de tração em corpos de prova de seção reta ou circular, entre outros, e possui ainda acessórios para o acompanhamento da deformação do corpo de prova. O equipamento utilizado pode ser visualizado na Figura 5.1.

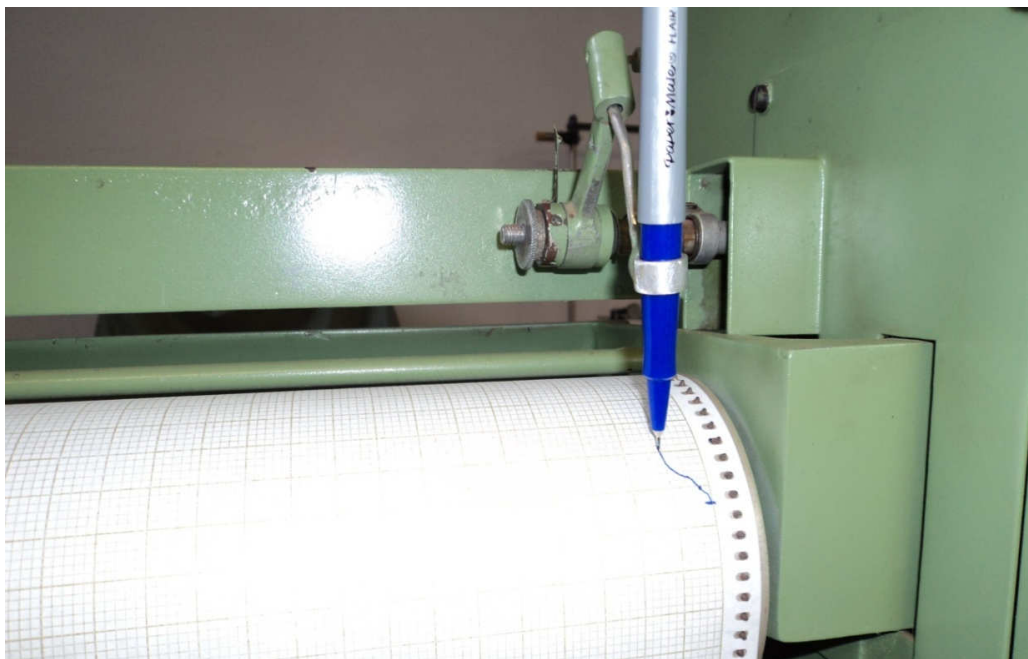
Figura 5.1 - Máquina de ensaios de tração e compressão Losenhausen



(FONTE: AUTOR)

Assim, uma vez fixado o corpo de prova, aplica-se uma força de tração, variável no tempo e, simultaneamente, registra-se de forma gráfica, a deformação do metal causada pela aplicação da tensão mecânica. A título de ilustração, apresenta-se o registrador do equipamento, o qual está indicado na Figura 5.2.

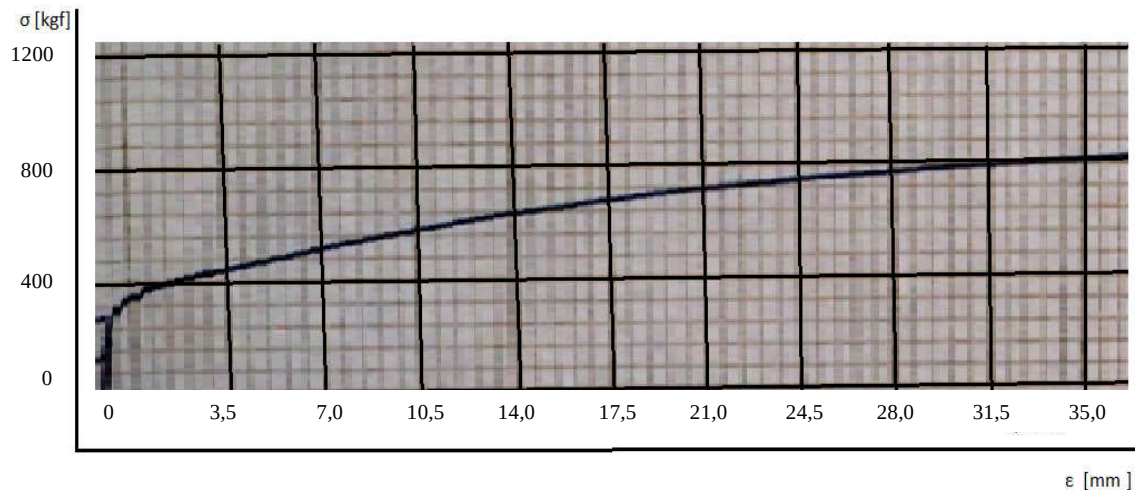
Figura 5.2 - Registrador da máquina de tração



(FONTE: AUTOR)

Os resultados são registrados em papel quadriculado, cujo lado vertical do quadrado maior destacado na Figura 5.3, corresponde a 400 kgf, enquanto, horizontalmente, corresponde a uma deformação de 3,5 mm.

Figura 5.3 – Registro apontado em papel quadriculado



(FONTE: AUTOR)

5.2.2 O CORPO DE PROVA

O corpo de prova utilizado nos ensaios foi uma barra de cobre eletrolítica de 9mm por 5mm com 300mm de comprimento. Adicionalmente, nesta barra, foi delimitada uma distância útil de 200mm, onde foram contabilizados os efeitos da tração. A barra utilizada é apresentada na Figura 5.4.

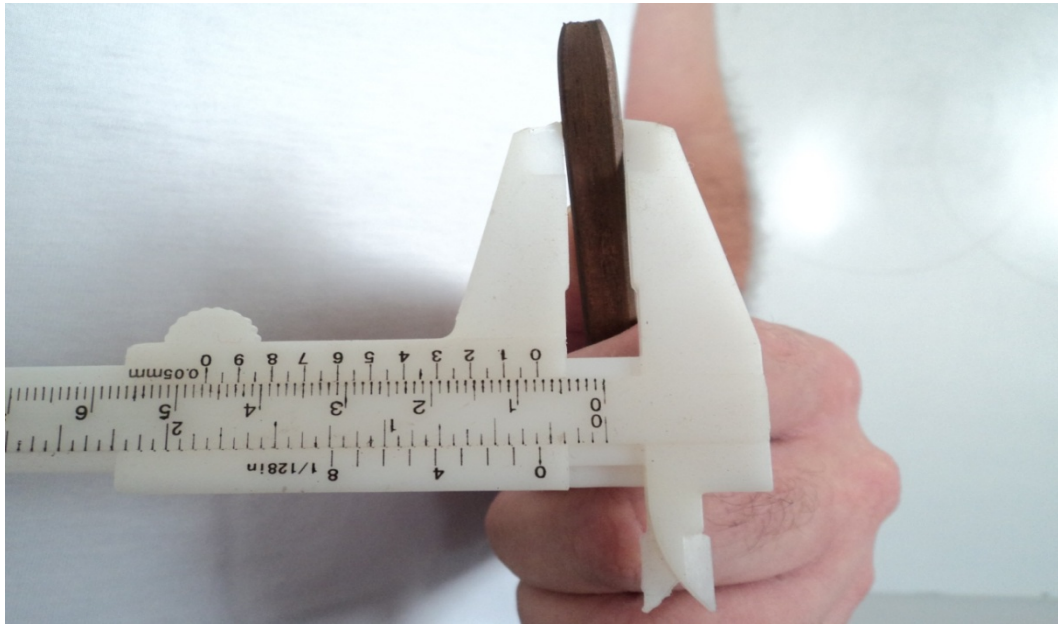
Figura 5.4 - Barra de cobre eletrolítico utilizada no ensaio de tração



(FONTE: AUTOR)

Corroborando os aspectos anteriores, as medições nas grandezas das barras de cobre foram executadas antes e depois dos ensaios de tração com os mesmos equipamentos, de modo a reduzir a presença dos erros inerentes à medição. O paquímetro utilizado pode ser visto na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Paquímetro utilizado nas medições



(FONTE: AUTOR)

5.3 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

O ensaio de tração consiste em alongar um corpo de prova até o seu rompimento. Nesse tipo de ensaio, é correto afirmar que as deformações provocadas no material são praticamente uniformes em todo o corpo de prova, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próximo do final do ensaio.

5.3.1 PROCEDIMENTOS

Inicialmente, definiu-se pela realização do ensaio em três corpos de prova idênticos, tanto em suas dimensões quanto em suas marcações. Assim, o corpo de prova fixado na máquina de ensaios pode ser visualizado na Figura 5.6.

Figura 5.6 - Corpo de prova fixado na máquina de tração



(FONTE: AUTOR)

Complementarmente, a Figura 5.7 registra o momento em que os testes estavam sendo realizados.

Figura 5.7 - Realização dos ensaios de tração nas barras de cobre



(FONTE: AUTOR)

Foram realizados ensaios nas três amostras do mesmo condutor, e como afirmado anteriormente, buscou-se o rompimento do material em todas as vezes em que o teste foi aplicado, como pode-se observar na Figura 5.8.

Figura 5.8 - Barra de cobre após o rompimento no ensaio de tração

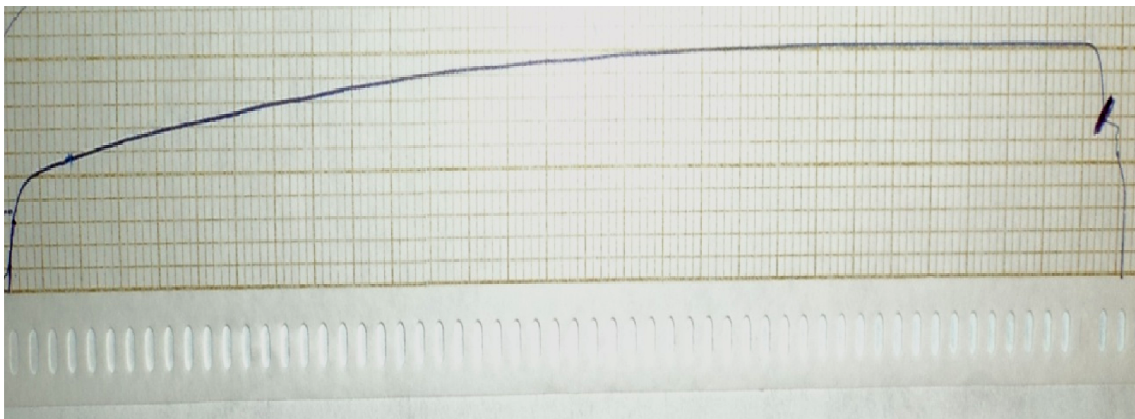


(FONTE: AUTOR)

5.3.2 ANÁLISES DOS RESULTADOS

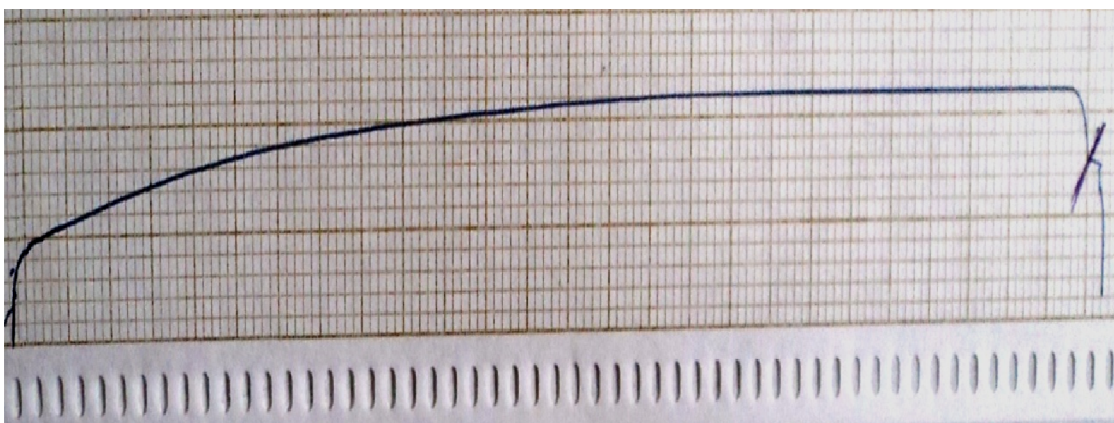
Após a realização dos ensaios, pode-se visualizar as curvas de tração obtidas, as quais estão registradas nos gráficos das Figuras 5.9, 5.10 e 5.11:

Figura 5.9 – Ensaio realizado no corpo de prova 1



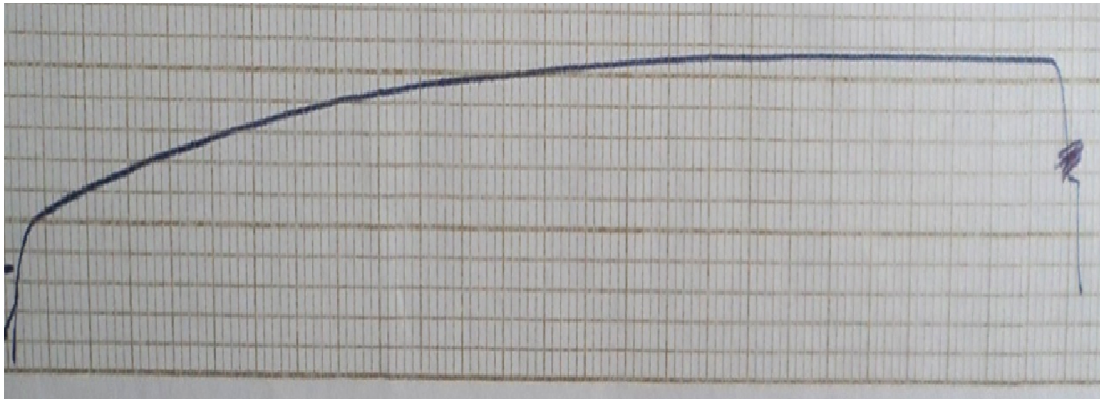
(FONTE: AUTOR)

Figura 5.10 – Ensaio realizado no corpo de prova 2



(FONTE: AUTOR)

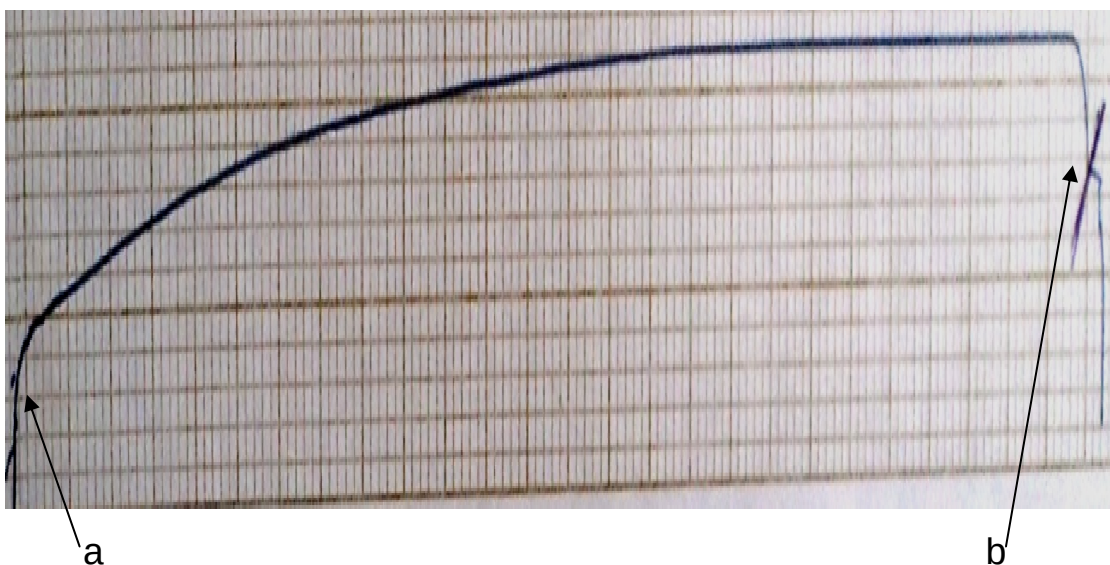
Figura 5.11 - Ensaio realizado no corpo de prova 3



(FONTE: AUTOR)

A título de informação, as delimitações dos estágios envolvidos na aplicação de estresse de tração estão indicadas na Figura 5.12. Assim, do ponto inicial seguindo até o ponto “a” encontra-se a região elástica do cobre utilizado nos ensaios, nesta região as deformações não são permanentes e obedecem a Lei de Hooke. A partir do ponto “a” seguindo até o ponto “b”, as deformações produzidas são permanentes, pois, o material encontra-se na região plástica. O ponto indicado por “a” corresponde ao limite de escoamento ($\sigma_{0,2}$), enquanto, o ponto “b” é o limite de ruptura do metal.

Figura 5.12 – Estágios do material no ensaio de tração



(FONTE: AUTOR)

Tomando-se como base as figuras anteriores e a metodologia analítica desenvolvida, são extraídos os resultados pertinentes dos ensaios realizados. Para o módulo de elasticidade, foi observada, a carga de escoamento, que pela análise dos gráficos, é de aproximadamente, 280kgf (ponto a), enquanto que a deformação encontrada foi de 1mm. Assim, a Tabela 5.1 apresenta as grandezas mecânicas extraídas dos ensaios realizados.

Tabela 5.1- Resultados dos ensaios laboratoriais

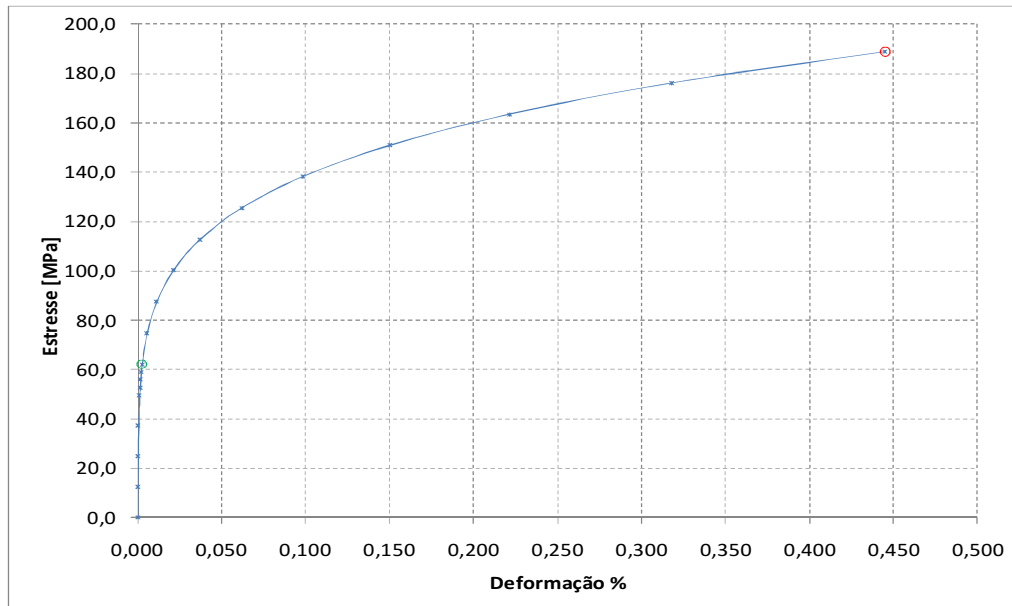
Grandezas Mecânicas	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Valor médio
Elongação [%]	46,5	44,5	42,5	44,5
Redução de área [%]	32,6	32,6	30,8	32
Deformação elástica [mm]	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1
Limite de escoamento [MPa]	62,2	62,2	62,2	62,2
Limite de resistência à tração [MPa]	177,7	195,5	191,1	188,1
Módulo de elasticidade [GPa]	112	112	110	111,3

(FONTE: AUTOR)

5.3.3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS LABORATORIAIS E OS RESULTADOS OBTIDOS PELA METODOLOGIA ANALÍTICA

A título de comparação, a Figura 5.13 apresenta a curva de tração para a barra de cobre utilizada, obtida através da metodologia analítica proposta no capítulo 4. As curvas 5.12 e 5.13 e a Tabela 5.2, mostram uma boa similaridade entre os resultados. Assim, o método de cálculo empregado permite estimar, com boa precisão, as curvas de tração do material a partir do conhecimento de algumas informações disponibilizadas pelos fabricantes, tais como: o limite de resistência a tração e o limite de escoamento.

Figura 5.13 – Curva analítica de tração para o material ensaiado no laboratório



(FONTE: AUTOR)

Tabela 5.2 - Comparação entre os resultados

Grandezas Mecânicas	Medições	Valores Tabelados	Cálculos analíticos
Elongação [%]	44,5	45	-
Redução de área [%]	32	-	31
Deformação elástica [mm]	≈ 1	-	1
Limite de escoamento [MPa]	62,2	69	65
Limite de resistência à tração [MPa]	188,1	195 a 220	-
Módulo de elasticidade [GPa]	111,3	110 a 130	-

(FONTE: AUTOR)

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira geral, os desenvolvimentos feitos permitem afirmar que os resultados encontrados para os ensaios experimentais atingiram os objetivos delineados. De fato, as análises visuais dos corpos de prova empregados nos ensaios de tração permitiram observar todas as etapas da deformação, desde a região elástica até o rompimento no final da região plástica, destacando-se a forma característica da curva de escoamento.

Também, através dos resultados contidos na tabela 5.2 é possível comparar os resultados obtidos para as grandezas mecânicas focadas nos objetivos principais deste capítulo, com destaque ao módulo de elasticidade. Esta grandeza, como

indicado, apresentou um valor médio de 111,3 GPa, o qual se mostra consistente com informações fornecidas pela literatura sobre o tema.

No que tange aos demais parâmetros, a saber: limites de escoamento e tração, alongação e redução de área, também estes evidenciaram uma boa aderência aos valores encontrados nos catálogos de fabricantes, e também, previstos teoricamente no capítulo 4.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS



ando sequência aos trabalhos, o presente capítulo encontra-se dedicado a descrição da modelagem e simulações digitais, através de recursos computacionais baseados em técnicas de análise por elementos finitos, visando, sobretudo, correlacionar os esforços com os efeitos mecânicos manifestados na forma de flexão nos condutores que perfazem os enrolamentos dos transformadores.

Para tanto, o transformador é representado fisicamente por modelos precisos, baseados em suas características construtivas, sem qualquer deformação inicial em sua estrutura. Na sequência, através da estratégia computacional empregada, são

impostos os esforços e estes, por sua vez, devem reproduzir os fenômenos físicos manifestados em deformações mecânicas, nos termos aqui considerados.

Para tanto, a presente pesquisa empregou o pacote computacional COMSOL, em sua versão tridimensional, cujas principais propriedades são indicadas ao longo do texto.

Vale ressaltar que, para a presente fase dos trabalhos, houve uma mudança do aplicativo computacional FLUX3D para o COMSOL, visto que o primeiro se apresenta como o software empregado para fins da elaboração dos capítulos 2 e 3. Não obstante os fortes atrativos do FLUX3D para fins da determinação da distribuição dos fluxos magnéticos e dos estresses nos enrolamentos, o COMSOL é mais indicado para simulações envolvendo deformações mecânicas.

6.2 – PLATAFORMA COMPUTACIONAL

A necessidade cada vez maior de objetividade impõe o uso de ferramentas computacionais de alto desempenho, com capacidade para armazenar grande quantidade de informações, capazes de executar cálculos matemáticos complexos e gerar resultados em diversas formas. Uma dessas ferramentas que tem permitido direcionar as estratégias de pesquisas é a utilização crescente das simulações digitais.

Dentro desse enfoque, o COMSOL é um *software* baseado no método de elementos finitos (FEM) utilizado para simulações multifísicas e contém um módulo específico para simulações mecânicas. Sendo possível realizar análises tanto em duas (2D) quanto em três (3D) dimensões. O módulo "*Structural Mechanics Module*" é adequado para a concepção, otimização e análise de quaisquer estruturas para as quais se desejam realizar avaliações não-destrutivas.

Baseado em 15 anos de experiência, o COMSOL se tornou um *software* confiável e com resultados bem precisos. O módulo para análise estrutural se dedica à análise de componentes e sub-sistemas em que é necessário avaliar deformações sob cargas, resolve, ainda, uma gama ampla de tipos de análises, incluindo: estacionária, modal, paramétrica, quasi-estática, resposta em frequência e análises com pré-tensão. As interfaces de usuário para 3D sólido, 2D axisimétrico, estados

planos de tensão e de deformação, que permitem análises de grandes deformações com não-linearidade geométrica, contato mecânico, materiais piezoeléticos, deformações térmicas e interação fluido-estrutura (FSI). Este módulo, também trabalha em conjunto com outros módulos para acoplar a análise estrutural a qualquer fenômeno multifísico.

Os módulos básicos do COMSOL incluem o pré-processamento (modelagem, definição das propriedades físicas, e confecção das malhas), processamento (resolução de problemas) e pós-processamento (exibição de resultados).

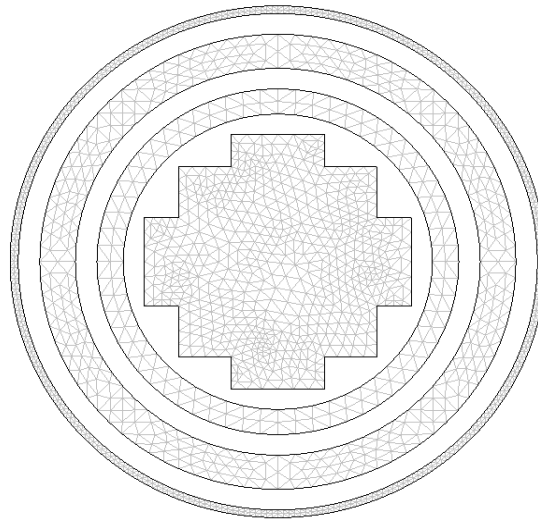
Adicionalmente, o pacote computacional, conta com uma interface para simulações numéricas, COMSOL Script. Esta, nada mais é, que um ambiente no qual é possível incluir rotinas e sub-rotinas que permitem ampliar o número de possibilidades de análises a partir de resultados extraídos da modelagem por elementos finitos.

Desta forma, o programa computacional escolhido, pode proporcionar análises refinadas para os efeitos dos estresses eletromecânicos em enrolamento de transformadores. Assim, é correto dizer que a utilização deste *software* possibilitará que se faça uma análise crítica sobre as formulações analíticas empregadas para a determinação das deformações mecânicas, que, mesmo sendo consagradas, utilizam simplificações, que por vezes podem levar a conclusões errôneas.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO

O transformador modelado é trifásico e de grande porte, conforme indicado no Capítulo 4, cuja coluna apresenta dois enrolamentos concêntricos e, um enrolamento adicional externo para regulação de tensão. A Figura 6.1 mostra a vista superior da coluna do transformador, detalhando a posição dos enrolamentos interno, externo e de regulação e, do núcleo ferromagnético, necessárias para a sua representação no COMSOL.

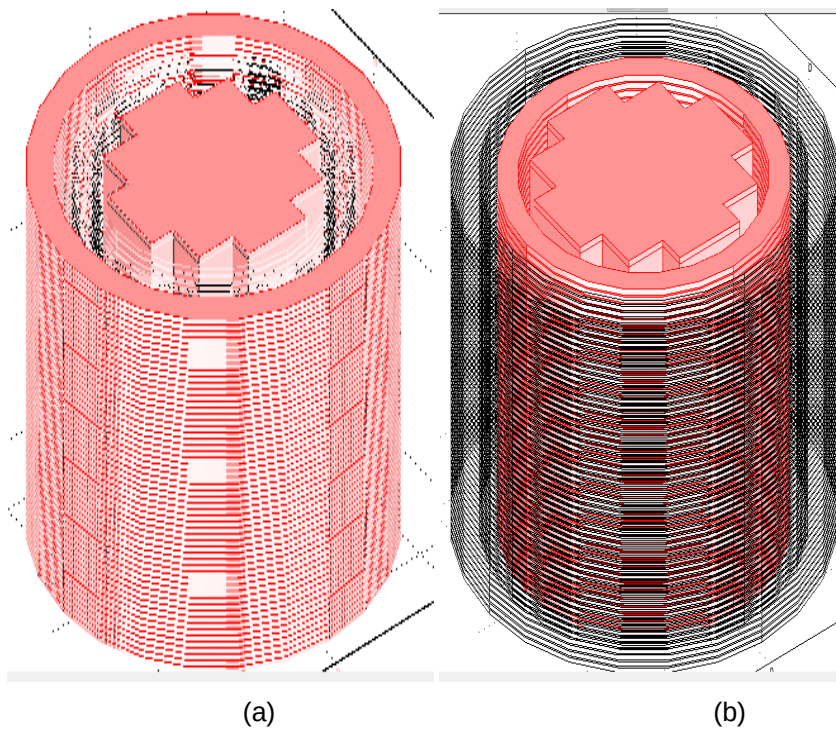
Figura 6.1 - Corte superior de uma coluna do transformador



(FONTE: AUTOR)

Complementarmente, a figura 6.2 são apresentadas visões frontais de uma das colunas, com destaque em 6.2 (a) para o núcleo e o enrolamento externo e em 6.2 (b), para o núcleo e o enrolamento interno. O enrolamento de regulação não foi incluído no modelo, pois não será objeto de estudo nesta tese.

Figura 6.2 - Vistas frontais de uma mesma coluna do transformador



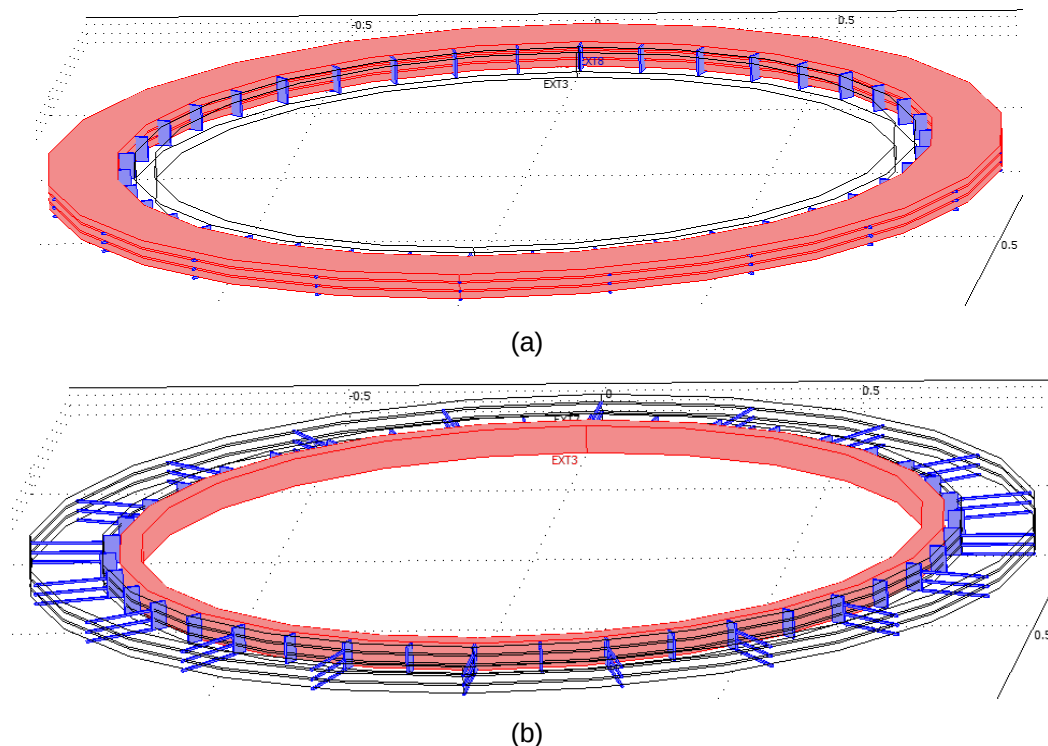
(FONTE: AUTOR)

6.4 MODELAGEM DA COLUNA DO TRANSFORMADOR NO PROGRAMA COMSOL

A representação da coluna do transformador tem como base os dados fornecidos na seção 6.3 deste capítulo. Entretanto, a partir do entendimento de que o enrolamento pode ser descrito por uma viga bi-engastada considerando uma espira e seus espaçadores e estecas. Esta estratégia visa otimizar o tempo de processamento computacional. Isto se justifica, pois, para as simulações envolvendo todo o enrolamento, necessita-se a inclusão de um número excessivo de pares de contato, o qual impõe uma quantidade grande de não-linearidades no modelo.

Dentro desse contexto, para simplificar o modelo, na figura 6.3 (a) são apresentadas três espiras do enrolamento interno, bem como a distribuição dos espaçadores e estecas ao longo da coluna. Em 6.3(b) pode-se visualizar o cilindro central de *presspan*, que isola o núcleo do enrolamento interno, e a disposição dos espaçadores.

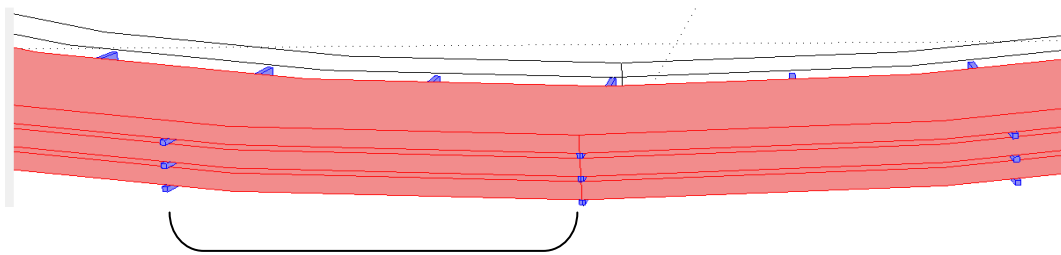
Figura 6.3 - Enrolamento interno do transformador destacando seus espaçadores e estecas



(FONTE: AUTOR)

Finalmente, há que se levar em conta que somadas as quantidades de espaçadores e estecas chega-se ao número de sessenta, por espira, para o enrolamento interno, o que implicaria em criar 60 pares de contato. Assim, neste capítulo, conforme citado, para estas simulações será utilizado apenas um campo, ou seja, a parte da espira contida entre dois espaçadores, como indicado na Figura 6.4.

Figura 6.4 - Setor da espira utilizada na simulação

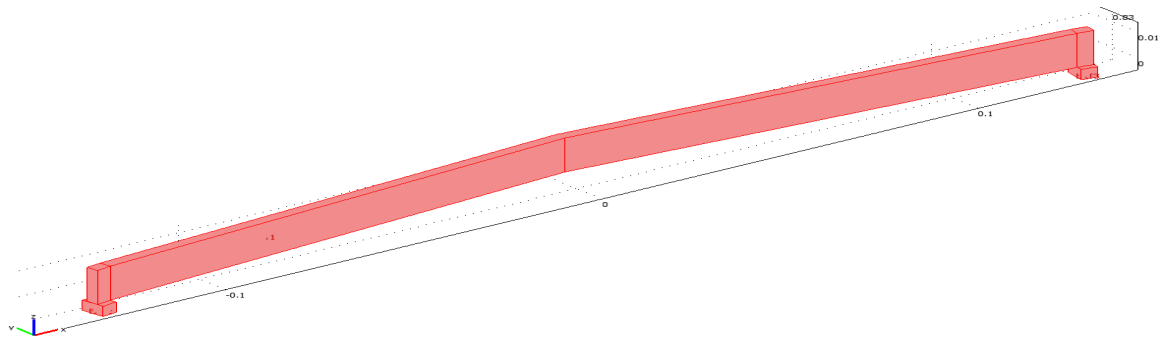


(FONTE: AUTOR)

6.5 - MODELAGEM DA ESPIRA EM FORMA DE VIGA

Tomando-se como base os itens anteriores, a parcela da espira e os espaçadores que serão modelados podem ser visualizados através da Figura 6.5.

Figura 6.5 - Representação de uma espira e seus espaçadores radiais

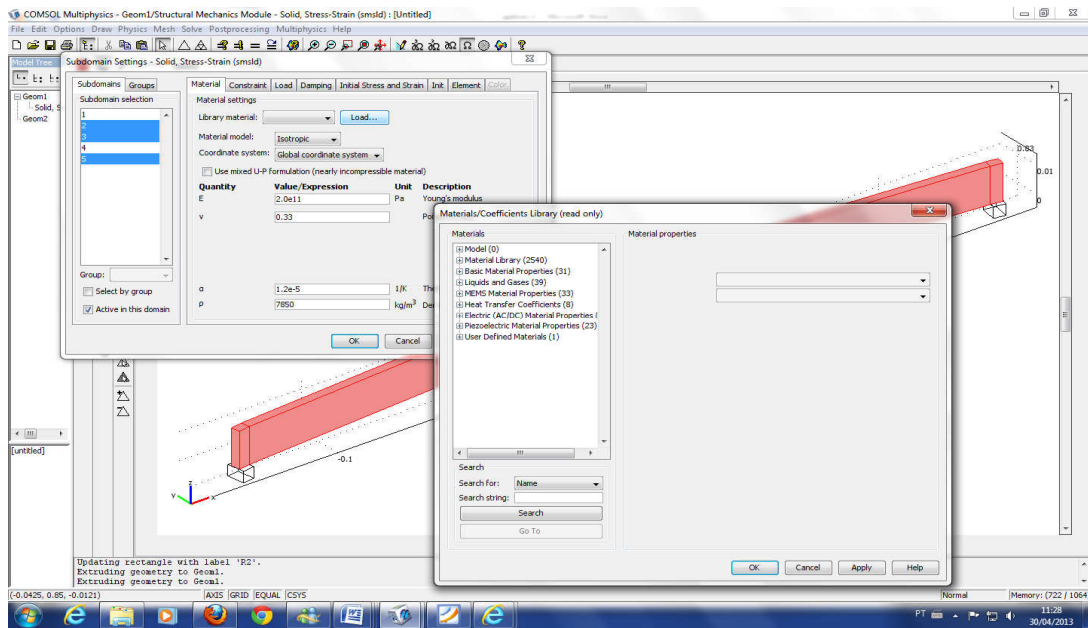


(FONTE: AUTOR)

6.5.1 - DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Inicialmente, deve-se determinar as propriedades dos materiais. Para isso o COMSOL, tem uma biblioteca interna que pode ser acessada através do menu <physics>, posteriormente em <subdomain settings>, como indicado na Figura 6.6.

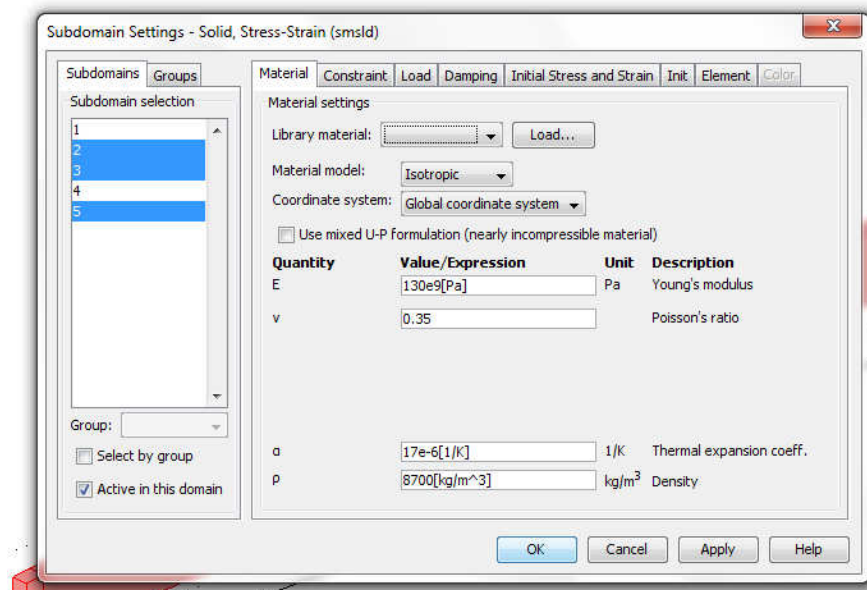
Figura 6.6 - Janela de acesso à biblioteca de materiais do COMSOL



(FONTE: AUTOR)

Assim, foram escolhidos os materiais utilizados, ou seja, o cobre e o papel de alta densidade do espaçador. A barra de cobre foi definida com módulo de elasticidade de 130 GPa, módulo de Poisson de 0,35 e densidade de 8700 kg/m^3 . Os espaçadores considerados como fabricados de papel presspan, cuja densidade é de 1320 kg/m^3 . A título de ilustração, a Figura 6.7 mostra a janela de propriedades do metal utilizado no enrolamento.

Figura 6.7 - Janela das propriedades dos materiais, destacando-se o cobre utilizado

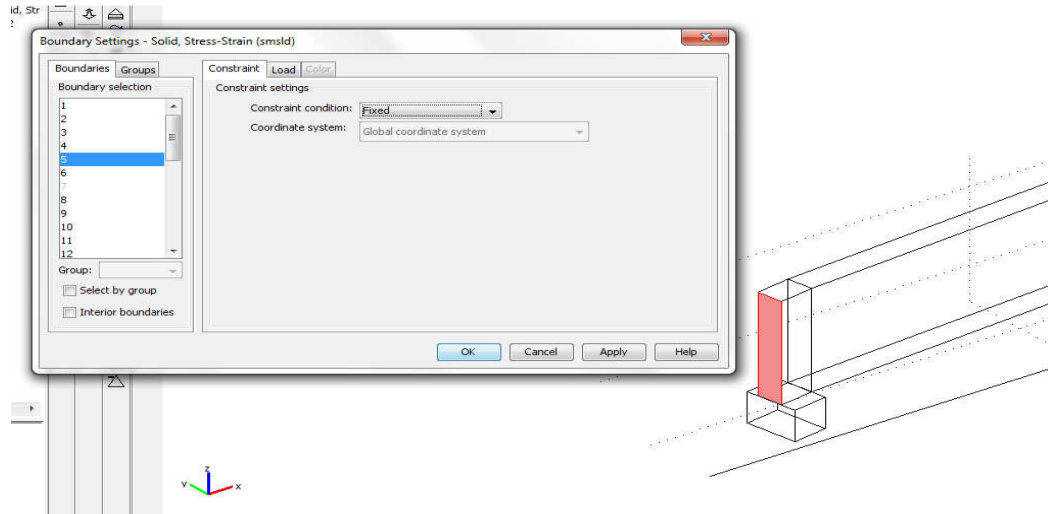


(FONTE: AUTOR)

6.5.2 - DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRAS ENTRE MATERIAIS

Para a determinação das condições de contorno ou de fronteira, deve-se observar os pontos de fixação do modelo. Assim, nestas condições, a figura 6.8 mostra uma das extremidades cuja fronteira foi fixada.

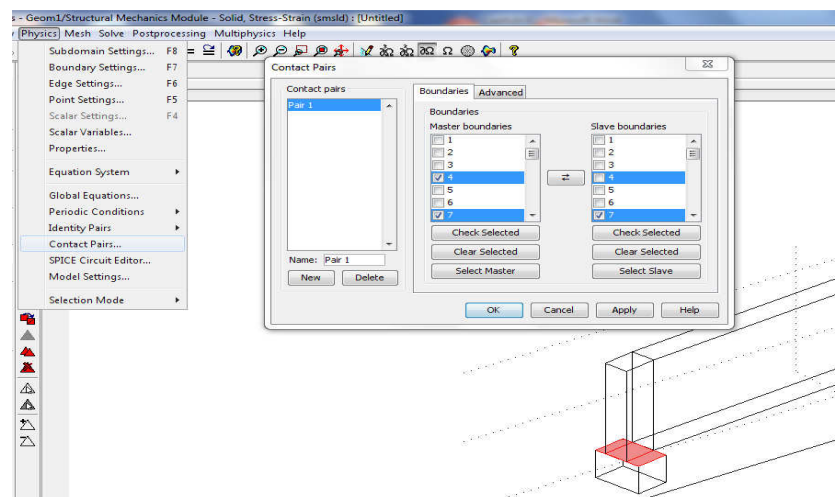
Figura 6.8 – Detalhe da fixação da espira



(FONTE: AUTOR)

Posteriormente, foram definidas as faces nas quais há contato entre as superfícies, criando pares de contato entre elas. Como indicado na Figura 6.9, neste modelo são necessários dois pares de contato, ligando as superfícies da barra de cobre e do espaçador.

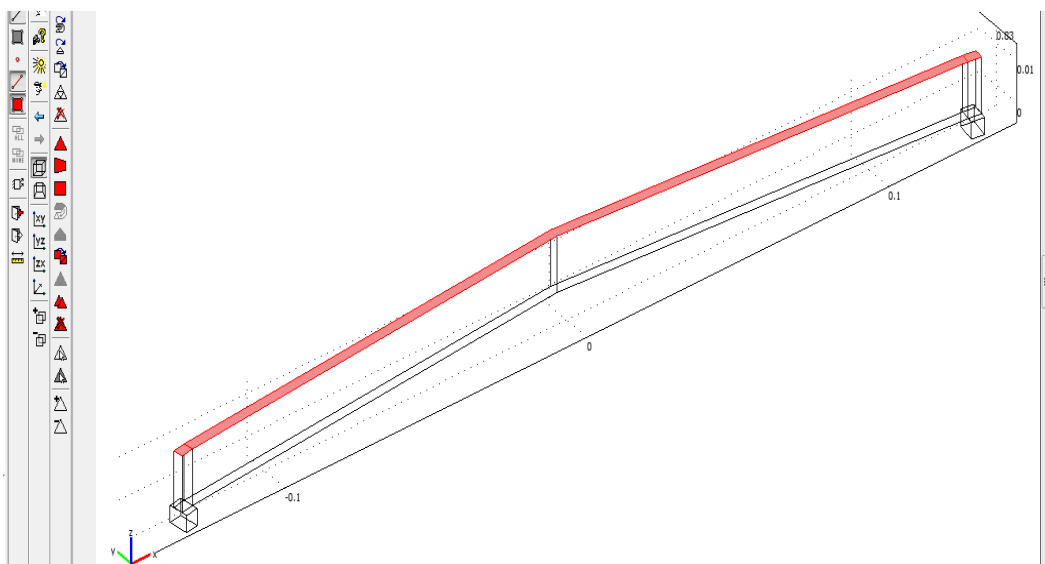
Figura 6.9 - Par de contato criado entre o espaçador e a barra de cobre



(FONTE: AUTOR)

Finalmente, deve-se definir a fronteira na qual a tensão mecânica deverá ser aplicada. Na figura 6.10, está indicada a fronteira adequada para a aplicação de esforços mecânicos necessários para a realização das simulações computacionais associadas com as forças axiais.

Figura 6.10 - Fronteira definida para a aplicação dos esforços mecânicos axiais



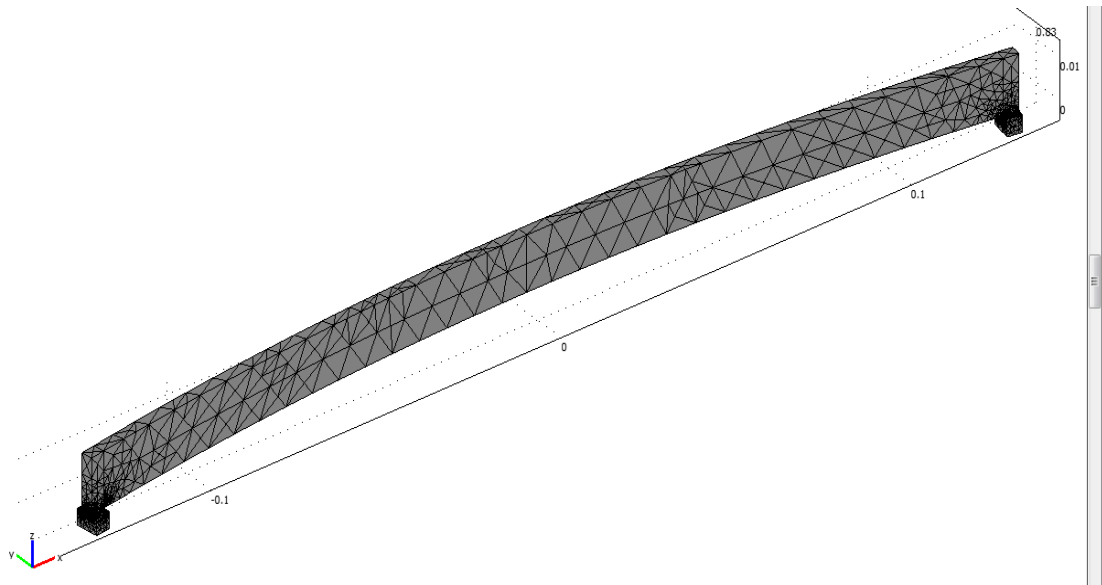
(FONTE: AUTOR)

6.5.3 - CRIAÇÃO DOS ELEMENTOS DE MALHA

Após a inclusão do modelo no COMSOL, foram criados os elementos de malha que devem ser utilizados pela plataforma computacional para a realização dos cálculos. É interessante mencionar que o programa computacional produz a malha de forma automática. No entanto, quando necessário, pode-se obter um refinamento desta malha, com o intuito de aumentar a precisão dos resultados. Deve-se salientar que tais elementos não devem ser muito pequenos, pois isso, aumenta muito o tempo de processamento.

Após essas considerações, o programa gera a malha. O *software* apresenta todos os elementos criados, além disso, faz uma avaliação sobre a qualidade do mesmo. A título de ilustração, é mostrada, na Figura 6.11, a barra contendo os elementos de malha.

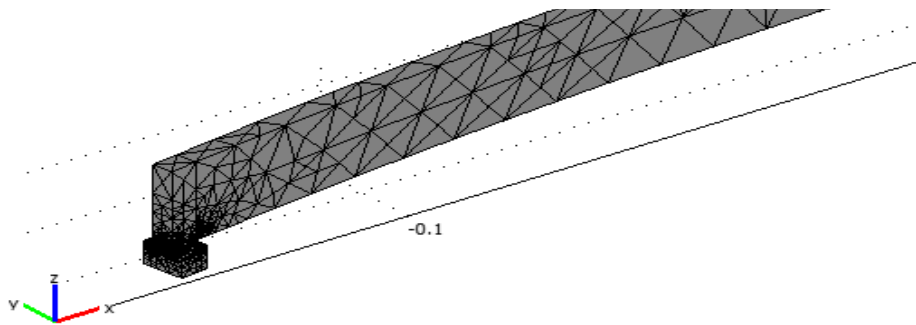
Figura 6.11 - Malha criada no COMSOL para a espira



(FONTE: AUTOR)

A título de ilustração, a figura 6.12 apresenta a ampliação da figura 6.11, mostrando em detalhes a malha nos pontos de contato entre superfícies.

Figura 6.12 - Malha criada no COMSOL para os pontos de contato



(FONTE: AUTOR)

6.6 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS ASSOCIADAS COM A SUPORTABILIDADE MECÂNICA

Este item tem por objetivo realizar diversas simulações computacionais associadas à suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador. Neste sentido, a tabela 6.1 descreve os casos simulados.

Tabela 6.1 – Descrição dos casos simulados.

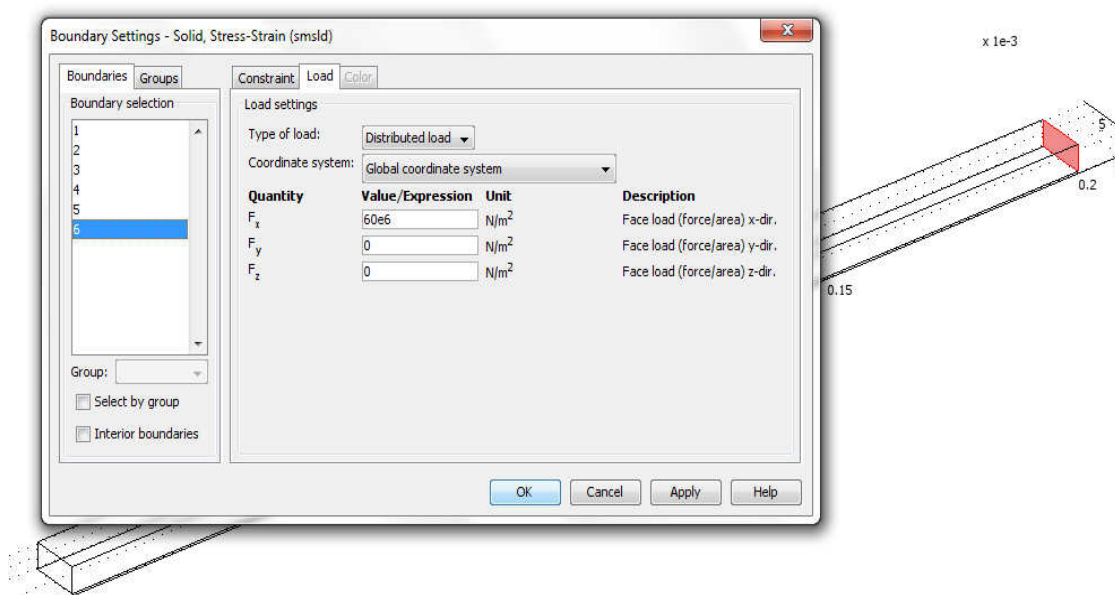
Casos estudados	Descrição dos casos
Caso 1	Simulação de uma barra de cobre submetida a um esforço de tração
Caso 2	Simulação da flexão no enrolamento externo submetido a um esforço axial
Caso 3	Simulação da flexão no enrolamento externo submetido a um esforço radial
Caso 4	Simulação da flexão no enrolamento interno submetido a um esforço axial
Caso 5	Simulação da flexão no enrolamento interno submetido a um esforço radial

(FONTE: AUTOR)

CASO 1 - SIMULAÇÃO DE UMA BARRA DE COBRE SUBMETIDA A UM ESFORÇO DE TRAÇÃO

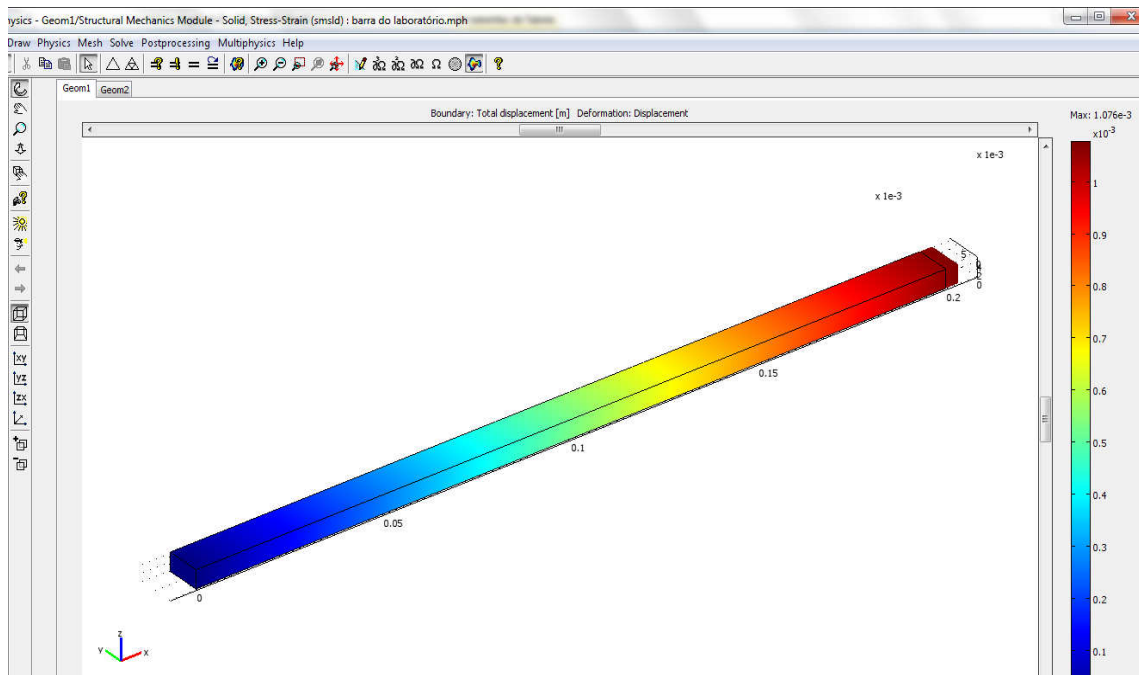
Apresenta-se a seguir a simulação de uma barra de cobre submetida a um estresse mecânico de tração. A Figura 6.13 indica a fronteira na qual a tensão mecânica foi aplicada. Deve-se observar que na modelagem, uma das extremidades foi fixada, enquanto na outra foi aplicado o esforço estressante igual a 60 MPa. Isto posto, nota-se, pelas Figuras 6.14 e 6.15 que a maior deformação produzida foi 1,076 mm.

Figura 6.13 - Fronteira escolhida para aplicação do esforço de tração



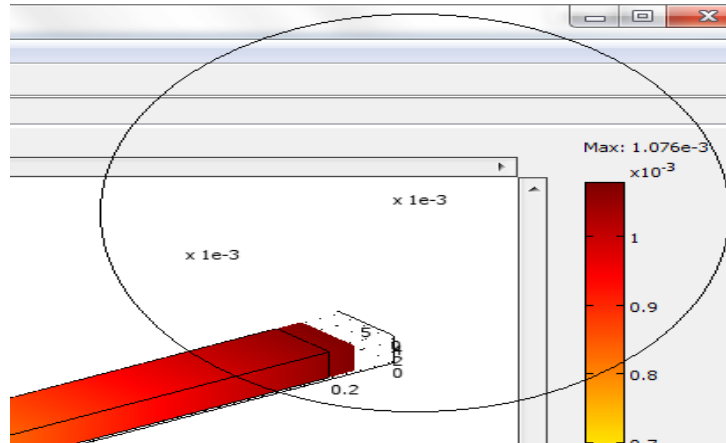
(FONTE: AUTOR)

Figura 6.14 - Barra de cobre submetida a um esforço de tração de 60 MPa



(FONTE: AUTOR)

Figura 6.15 – Detalhes da deformação produzida na barra de cobre pela aplicação do esforço de tração de 60 MPa



(FONTE: AUTOR)

A título de comparação, a Tabela 6.2 apresenta as grandezas mecânicas obtidas, tomando-se como base as metodologias analítica, laboratorial e computacional. Os resultados apresentados são coerentes para a deformação elástica e para limite de escoamento. Para o módulo de elasticidade, a igualdade se justifica devido ao fato de que o resultado do módulo obtido em laboratório foi utilizado como parâmetro para a simulação.

Tabela 6.2 - Comparação dos resultados para as grandezas mecânicas

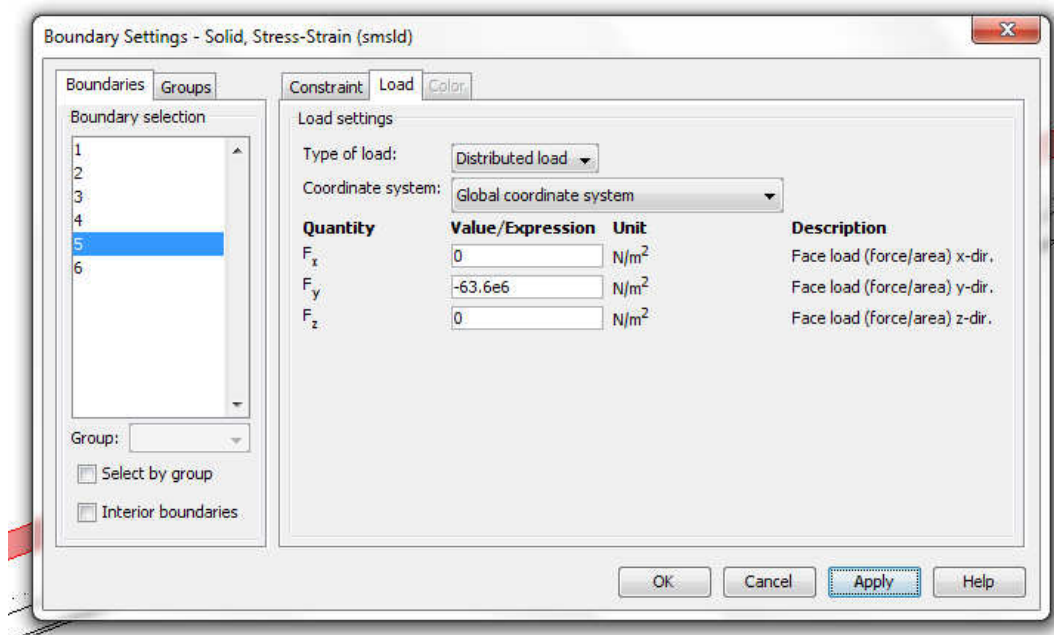
Grandezas mecânicas	Simulações	Medições laboratoriais	Cálculos analíticos
Deformação elástica [mm]	1,076	≈ 1	1
Limite de escoamento [MPa]	60	62,2	65
Módulo de elasticidade [GPa]	111,3	111,3	-

(FONTE: AUTOR)

CASO 2- SIMULAÇÃO DA FLEXÃO NO ENROLAMENTO EXTERNO SUBMETIDO A UM ESFORÇO AXIAL

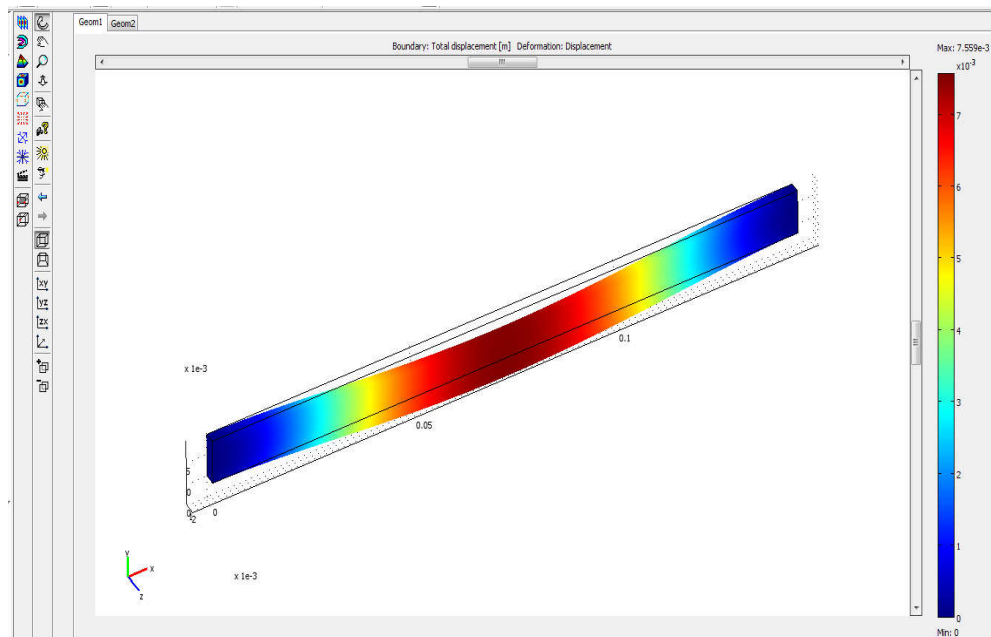
Nesta simulação, as duas extremidades da barra, na direção do eixo x, foram fixadas. Isto posto, aplicou-se uma tensão mecânica de $63,6 \text{ MN/m}^2$, na direção y, ou seja, na superfície cuja área é de 340 mm^2 . Deve-se salientar que, na Figura 6.16, a força imposta tem um sinal negativo, unicamente, em função da direção escolhida. Desta forma, a flecha produzida está indicada na Figura 6.17, enquanto que, a Figura 6.18, mostra que a maior deformação produzida foi de 7,6 mm.

Figura 6.16 - Aplicação do esforço mecânico, no enrolamento externo, para a simulação de flexão axial



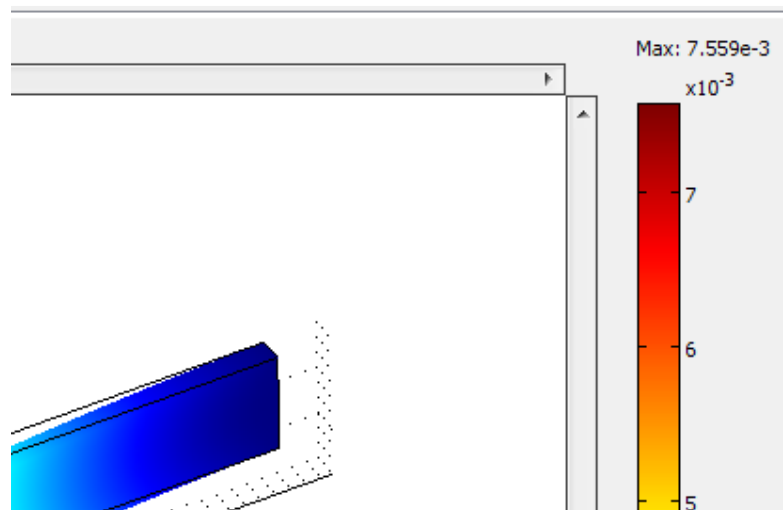
(FONTE: AUTOR)

Figura 6.17- Flecha produzida, no enrolamento externo, por uma força axial de 63,6 MPa



(FONTE: AUTOR)

Figura 6.18 - Barra de cores indicando o resultado da simulação para flexão em 63,6 MPa



(FONTE: AUTOR)

Mais uma vez, a título de ilustração, na Tabela 6.3 estão registrados os resultados obtidos para as metodologias utilizadas. A tabela mostra que a aproximação encontrada é compatível com o valor esperado.

Tabela 6.3 - Comparação de resultados para flexão axial no enrolamento externo

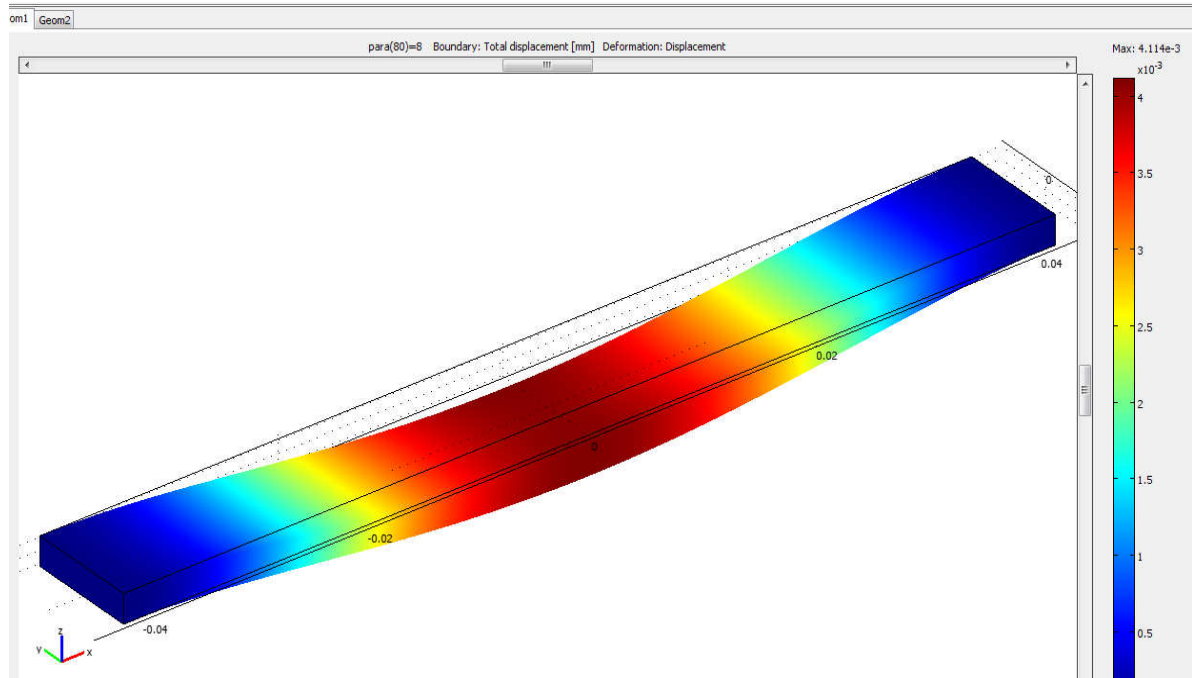
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos
Estresse aplicado [MPa]	63,6	63,6
Flecha [mm]	7,6	7,2

(FONTE: AUTOR)

CASO 3 - SIMULAÇÃO DA FLEXÃO NO ENROLAMENTO EXTERNO SUBMETIDO A UM ESFORÇO RADIAL

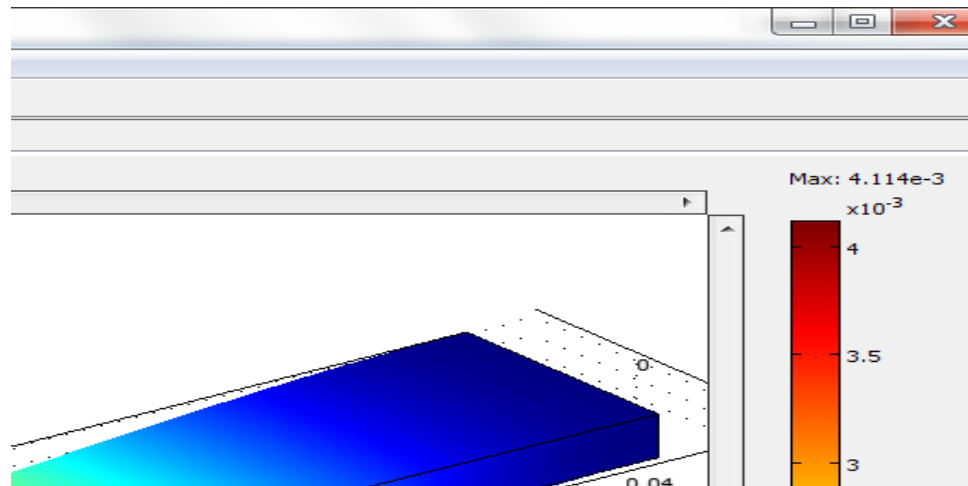
Nesta simulação, as duas extremidades da barra, na direção do eixo x, foram fixadas. Isto posto, aplicou-se uma tensão mecânica de $48,8 \text{ MN/m}^2$, na direção z, ou seja, na superfície cuja área é de 804 mm^2 . Desta forma, a flecha produzida está indicada na Figura 6.19, enquanto que, a Figura 6.20, mostra que a maior deformação produzida foi de 4,11 mm.

Figura 6.19- Flecha produzida, no enrolamento externo, por uma força radial de 48,8 MPa



(FONTE: AUTOR)

Figura 6.20 - Barra de cores indicando o resultado da simulação para flexão em 48,8 MPa



(FONTE: AUTOR)

Mais uma vez, a título de ilustração, na Tabela 6.4 estão registrados os resultados obtidos para as metodologias utilizadas. A tabela mostra que a aproximação encontrada é compatível com o valor esperado.

Tabela 6.4 - Comparação de resultados para flexão radial no enrolamento externo

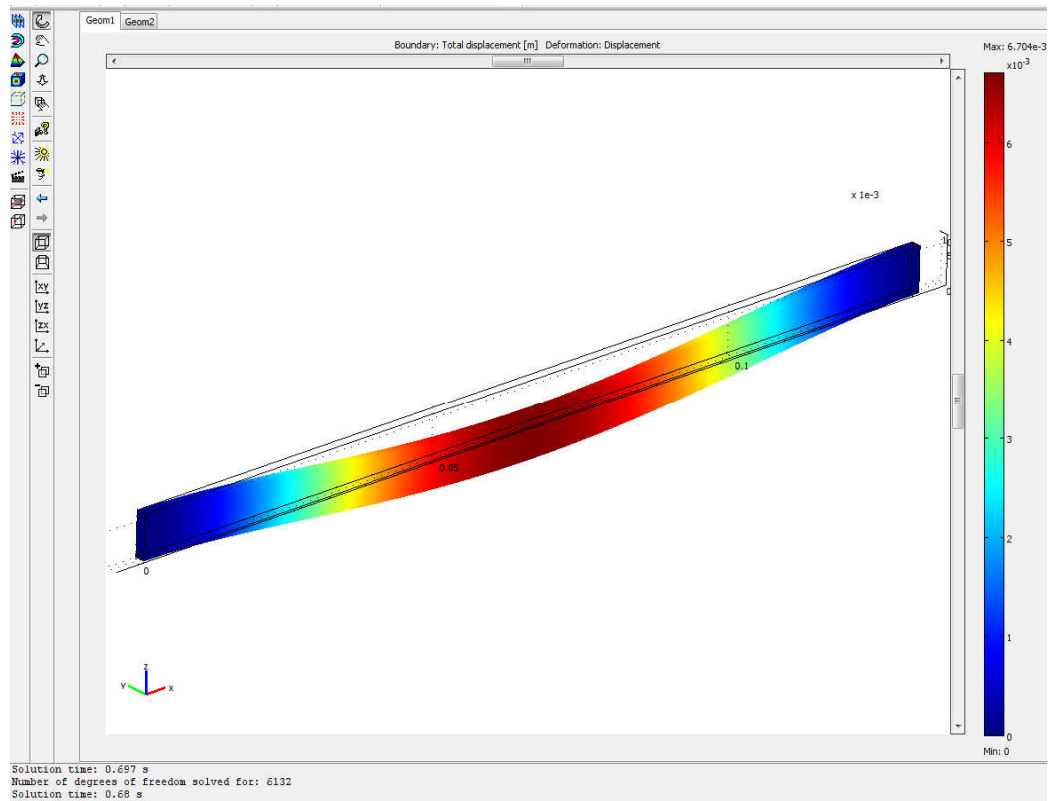
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos
Estresse aplicado [MPa]	48,8	48,8
Flecha [mm]	4,11	4,15

(FONTE: AUTOR)

CASO 4 - SIMULAÇÃO DA FLEXÃO NO ENROLAMENTO INTERNO SUBMETIDO A UM ESFORÇO AXIAL

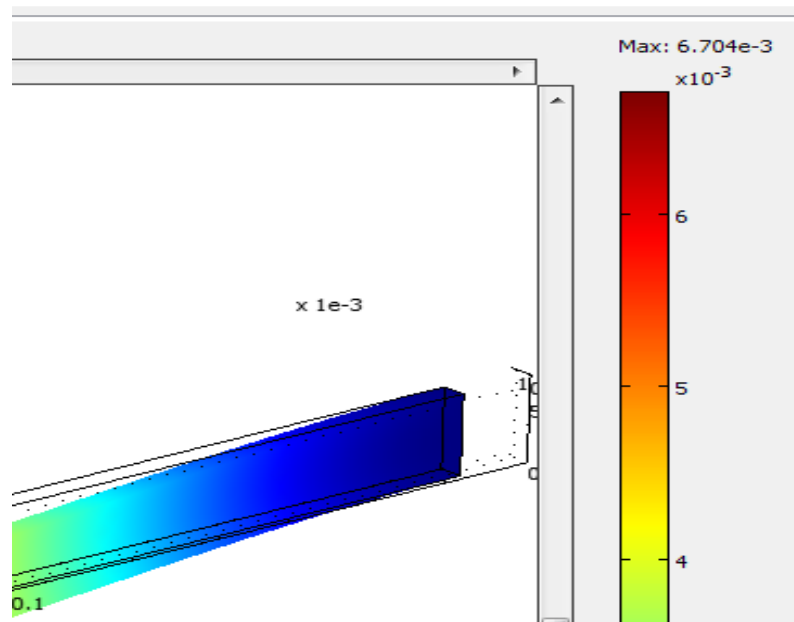
Nesta simulação, as duas extremidades da barra, na direção do eixo x, foram fixadas. Isto posto, aplicou-se uma tensão mecânica de $26,6 \text{ MN/m}^2$, na direção z, ou seja, na superfície cuja área é de $196,5 \text{ mm}^2$. Desta forma, a flecha produzida está indicada na Figura 6.21, enquanto que, a Figura 6.22, mostra que a maior deformação produzida foi de 6,7 mm.

Figura 6.21- Flecha produzida, no enrolamento interno, por uma força axial de 26,6 MPa



(FONTE: AUTOR)

Figura 6.22 - Barra de cores indicando o resultado da simulação para flexão em 26,6 MPa



(FONTE: AUTOR)

Mais uma vez, a título de ilustração, na Tabela 6.5 estão registrados os resultados obtidos para as metodologias utilizadas. A tabela mostra que a aproximação encontrada é compatível com o valor esperado.

Tabela 6.5 - Comparação de resultados para flexão axial no enrolamento interno

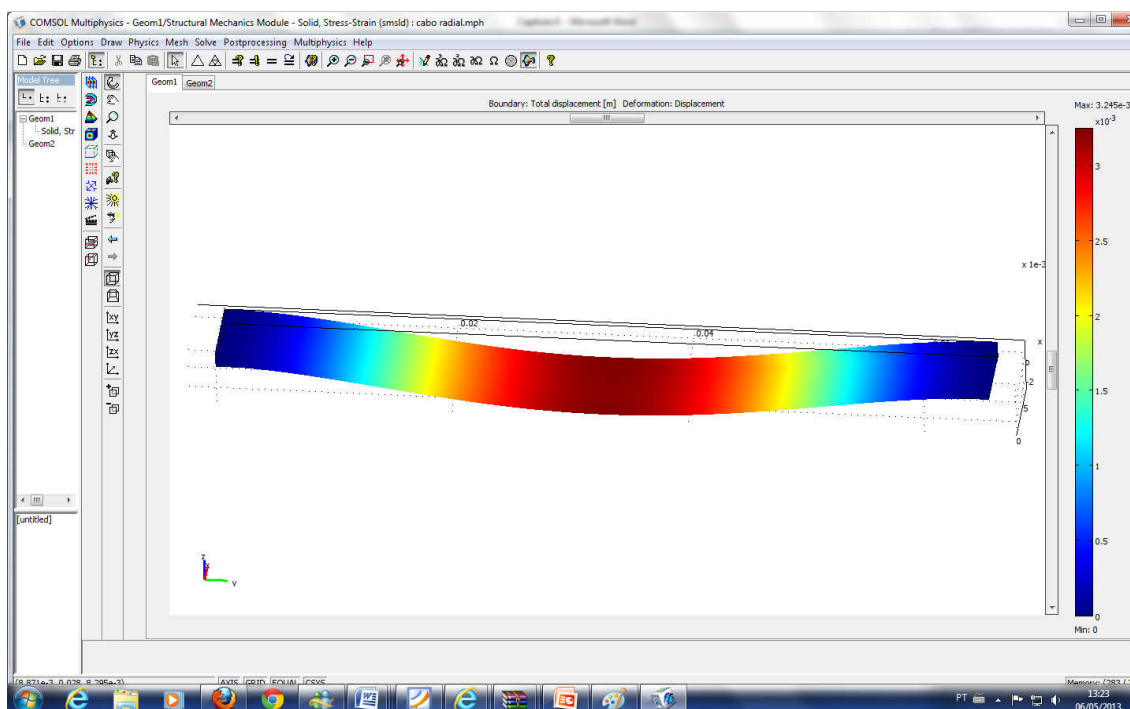
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos
Estresse aplicado [MPa]	26,6	26,6
Flecha [mm]	6,7	6,5

(FONTE: AUTOR)

CASO 5 - SIMULAÇÃO DA FLEXÃO NO ENROLAMENTO INTERNO SUBMETIDO A UM ESFORÇO RADIAL

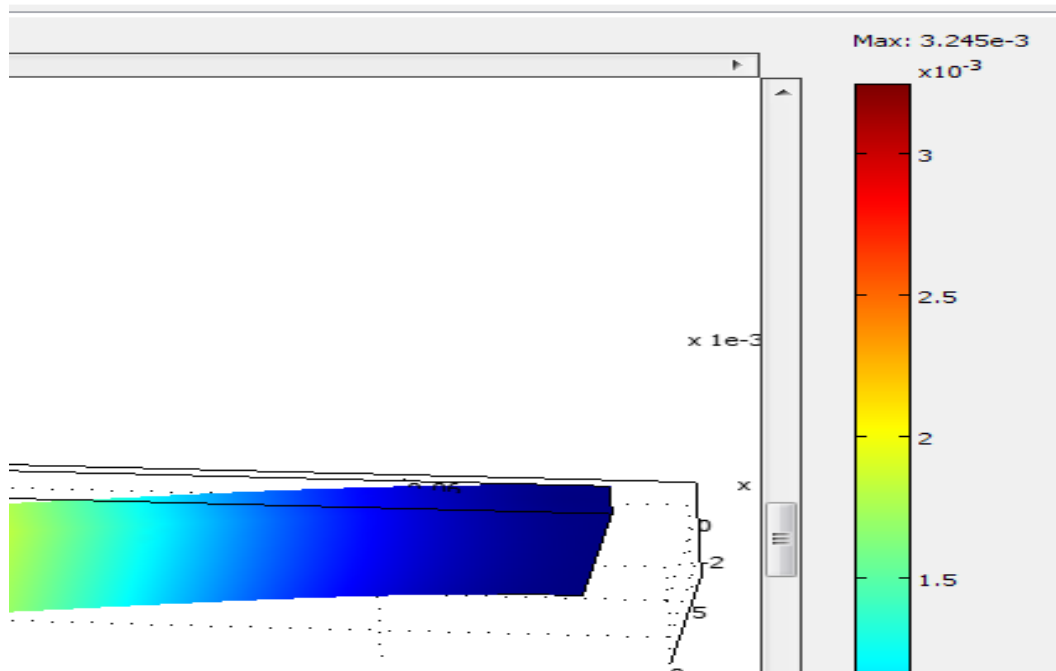
Nesta simulação, as duas extremidades da barra, na direção do eixo x, foram fixadas. Isto posto, aplicou-se uma tensão mecânica de $25,2 \text{ MN/m}^2$, na direção z, ou seja, na superfície cuja área é de $432,3 \text{ mm}^2$. Desta forma, a flecha produzida está indicada na Figura 6.23, enquanto que, a Figura 6.24, mostra que a maior deformação produzida foi de 3,25 mm.

Figura 6.23- Flecha obtida, no enrolamento externo, por uma força axial de 25,2 MPa



(FONTE: AUTOR)

Figura 6.24 - Barra de cores indicando o resultado da simulação em 25,2 MPa



(FONTE: AUTOR)

Mais uma vez, a título de ilustração, na Tabela 6.6 estão registrados os resultados obtidos para as metodologias utilizadas. A tabela mostra que a aproximação encontrada é compatível com o valor esperado.

Tabela 6.6 - Comparação entre os resultados analíticos e simulados

Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos
Estresse aplicado [MPa]	25,2	25,2
Flecha [mm]	3,25	3,28

(FONTE: AUTOR)

6.7 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS VINCULADAS COM A REDUÇÃO DE VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES

Complementando os casos estudados anteriormente, este item segue na direção de analisar diversas simulações associadas com a redução de vida útil de transformadores. Neste sentido, os estudos tem que estar atrelados a condição de

fadiga do cobre utilizado. Dentro desse contexto, o COMSOL - Multiphysics faz uso do ambiente de simulações numéricas COMSOL - Script. Neste módulo, é possível produzir rotinas e sub-rotinas de modo a ampliar as capacidades de simulação do pacote computacional. Portanto, os recursos de análise de fadiga de material, no módulo de *mecânica estrutural*, consistem em uma série de funções inseridas em um código-fonte no COMSOL-Script.

Assim, a partir de um modelo de entrada, em elementos finitos, consistindo das informações geométricas, mecânicas e de fadiga do material e, da aplicação de uma tensão mecânica flutuante é produzido o conjunto de dados que permitem a análise de vida útil. Finalmente, uma função típica do COMSOL-Script, registra os estresses mecânicos em todos os componentes do tensor, na forma de uma matriz e como resposta informa o histórico de danos acumulados.

A título de informação, uma análise de fadiga típica consiste das seguintes etapas:

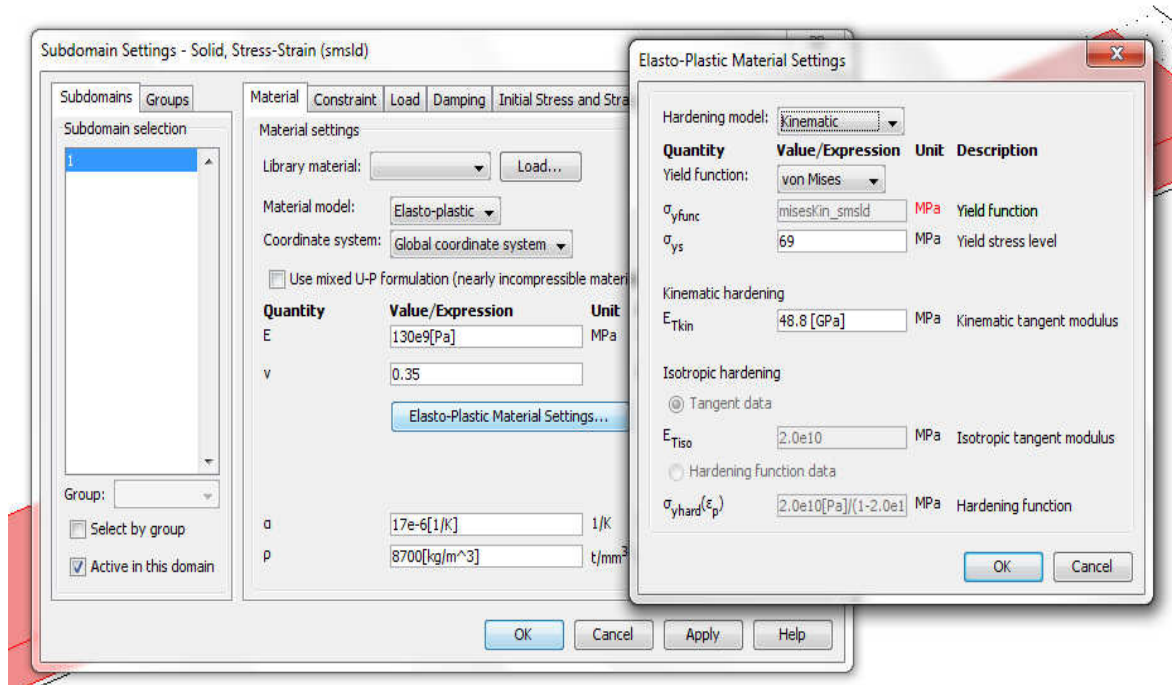
- 1 - Realização uma análise elasto-plástica em elementos finitos na estrutura, usando COMSOL Multiphysics no módulo de mecânica estrutural;
- 2 - Cálculo do campo de tensões mecânicas em um formato de matriz, disponível em COMSOL Script;
- 3 - Cálculo do dano de fadiga;
- 4 - Plotagem de resultados.

Neste contexto, para este tipo de estudo, como definido nos capítulos anteriores, é necessário ajustar o valor do estresse aplicado ao enrolamento, de modo a que o valor médio se torne zero. Uma vez executados os procedimentos de simulação, os gráficos oriundos do processo devem apontar o limite máximo em ciclos que o enrolamento pode suportar para um determinado esforço e indicar os locais onde o dano produzido foi mais intenso.

Deve-se ressaltar que, nestas simulações, são necessárias as definições dos parâmetros para a simulação elasto-plástica, quais sejam: limite de escoamento do material e o módulo de elasticidade tangencial, que neste caso, é o limite de suportabilidade mecânica do enrolamento na direção escolhida. Na Figura 6.25,

mostra-se os locais onde se devem inserir as grandezas referentes à fadiga do material.

Figura 6.25 - Janela onde são inseridas as grandezas referentes à fadiga



(FONTE: AUTOR)

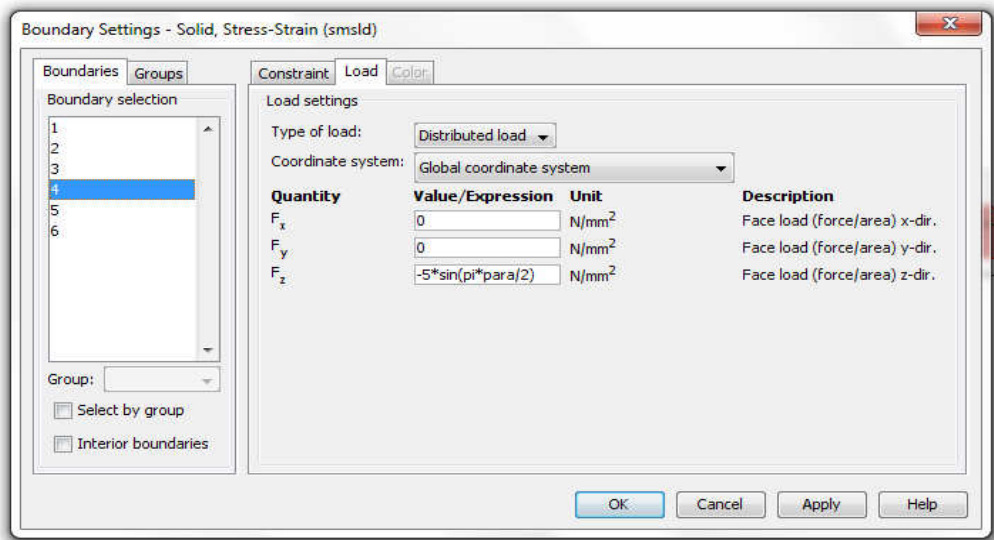
A seguir são descritas algumas simulações envolvendo o fenômeno da fadiga. Deve-se comentar que os esforços mecânicos impostos na simulação são os mesmos desenvolvidos e apresentados no Capítulo 4.

6.7.1 SUPORTABILIDADE MECÂNICA À FLEXÃO RADIAL NO ENROLAMENTO INTERNO

a) Simulação para 5,0 MPa

Apenas para uma constatação o valor utilizado na simulação pode ser verificado na Figura 6.26. A inclusão de um termo senoidal se justifica pelo fato de que é necessário que a força seja variável no tempo, para produzir a fadiga no material.

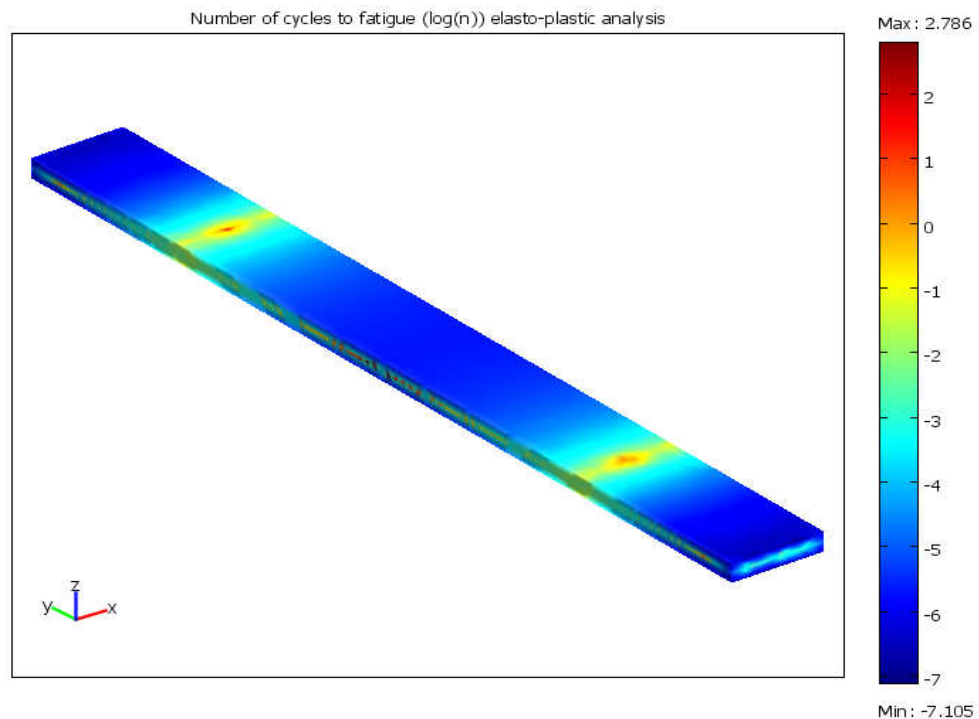
Figura 6.26 - Esforço flutuante de 5 MPa aplicado no enrolamento interno



(FONTE: AUTOR)

A Figura 6.27 indica o limite, em ciclos, para o esforço aplicado. Deve-se salientar que nesta figura, o número de ciclos está registrado em forma logarítmica na base 10. Dessa forma, corresponde a 611 ciclos.

Figura 6.27 - Limite em ciclos de suportabilidade a fadiga para o esforço de 5 MPa



(FONTE: AUTOR)

A Tabela 6.7 mostra a comparação entre o número de ciclos e o estresse aplicado oriundos das duas metodologias, ou seja, analítica e computacional. A proximidade encontrada indica a coerência entre os resultados.

Tabela 6.7 – Resultados analíticos e simulados para um esforço radial de 5 MPa

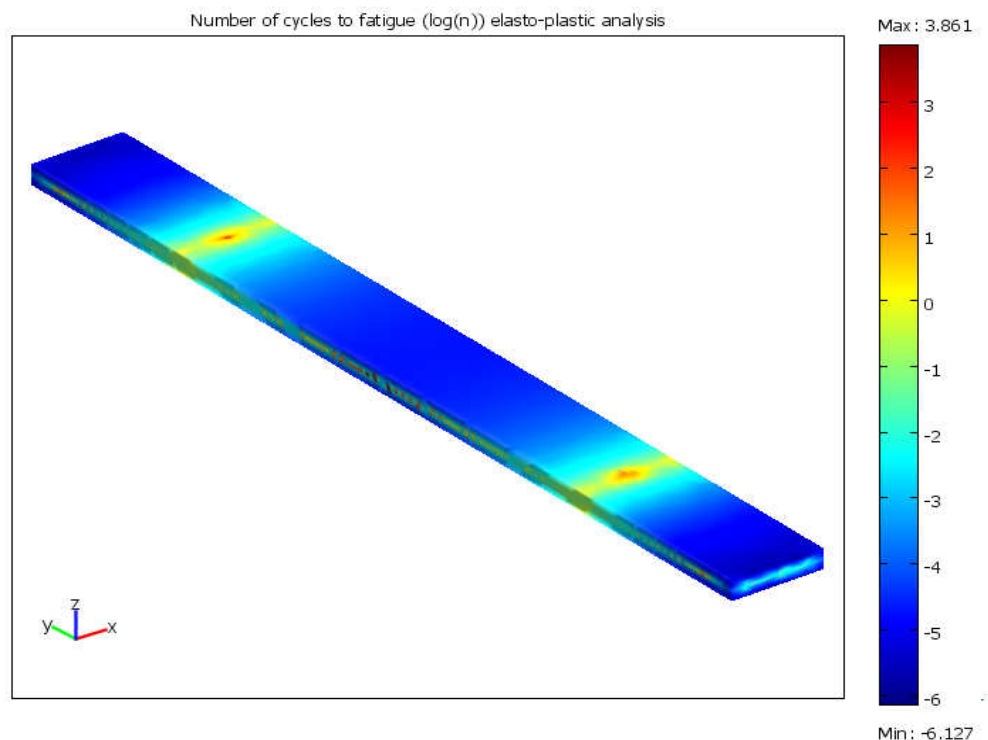
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos	Erro %
Estresse aplicado [MPa]	5,0	5,0	0
Número de ciclos	611	638	4,2

(FONTE: AUTOR)

b) Simulação para 2,75 MPa

Para este caso, utilizou-se o mesmo código-fonte utilizado anteriormente. Similarmente, ao caso anterior, a simulação foi realizada com um estresse mecânico igual a 2,75 MPa. Isto posto, o número de ciclos necessário para alcançar a fadiga do condutor utilizado foi de 7261, o qual pode ser visto na Figura 6.28.

Figura 6.28 - Limite em ciclos de suportabilidade a fadiga para o esforço de 2,75 MPa



(FONTE: AUTOR)

A Tabela 6.8 mostra a comparação entre o número de ciclos e o estresse aplicado oriundos das duas metodologias, ou seja, analítica e computacional. A proximidade encontrada indica a coerência entre os resultados.

Tabela 6.8 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 2,75 MPa

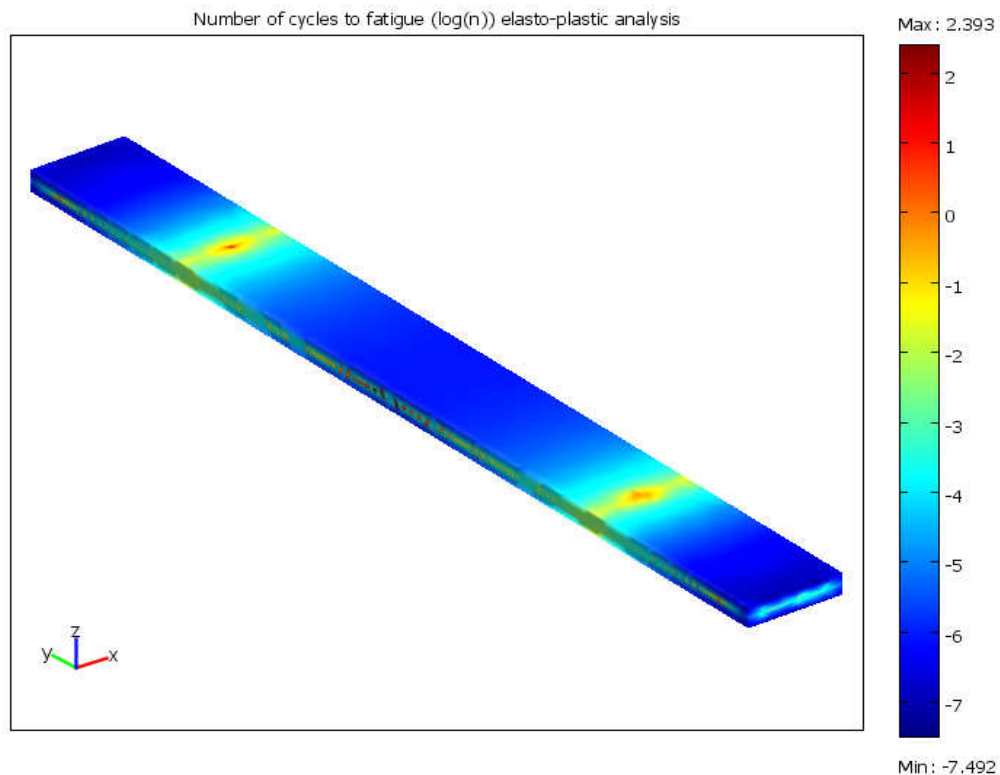
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos	Erro %
Estresse aplicado [MPa]	2,75	2,75	0
Número de ciclos	7261	7076	6

(FONTE: AUTOR)

c) Simulação para 6,4 MPa

Similarmente aos casos anteriores, a Figura 6.29 mostra o local de maiores danos no material. O número de ciclos necessários para causar dano permanente na estrutura corresponde a 247.

Figura 6.29 - Limite em ciclos de suportabilidade a fadiga para o esforço de 6,4 MPa



(FONTE: AUTOR)

A Tabela 6.9 mostra a comparação entre o número de ciclos e o estresse aplicado oriundos das duas metodologias. A proximidade encontrada indica a coerência entre os resultados.

Tabela 6.9 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 6,4 MPa

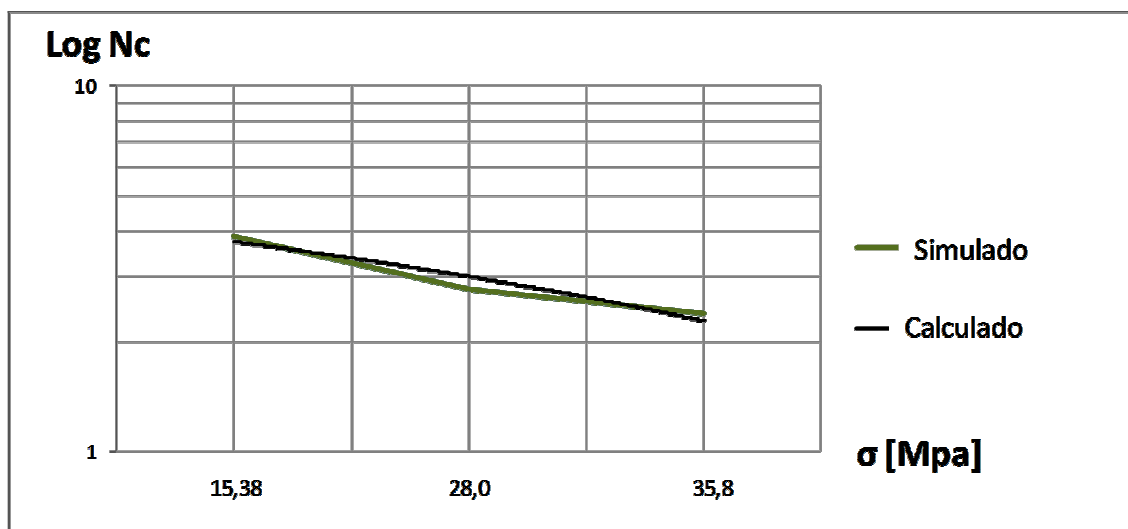
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos	Erro %
Estresse aplicado [MPa]	6,4	6,4	0
Número de ciclos	247	240	2,9

(FONTE: AUTOR)

d) Comparação de resultados para o enrolamento interno

Ilustrativamente a Figura 6.30 apresenta, em forma gráfica, a comparação entre as metodologias analítica e computacional para o enrolamento interno, sob estresse radial. Percebe-se pelas curvas que os métodos utilizados apresentam boa aderência, indicando que o procedimento utilizado representa uma boa alternativa para as análises aqui propostas.

Figura 6.30 - Comparação entre as metodologias analítica e computacional para o enrolamento interno



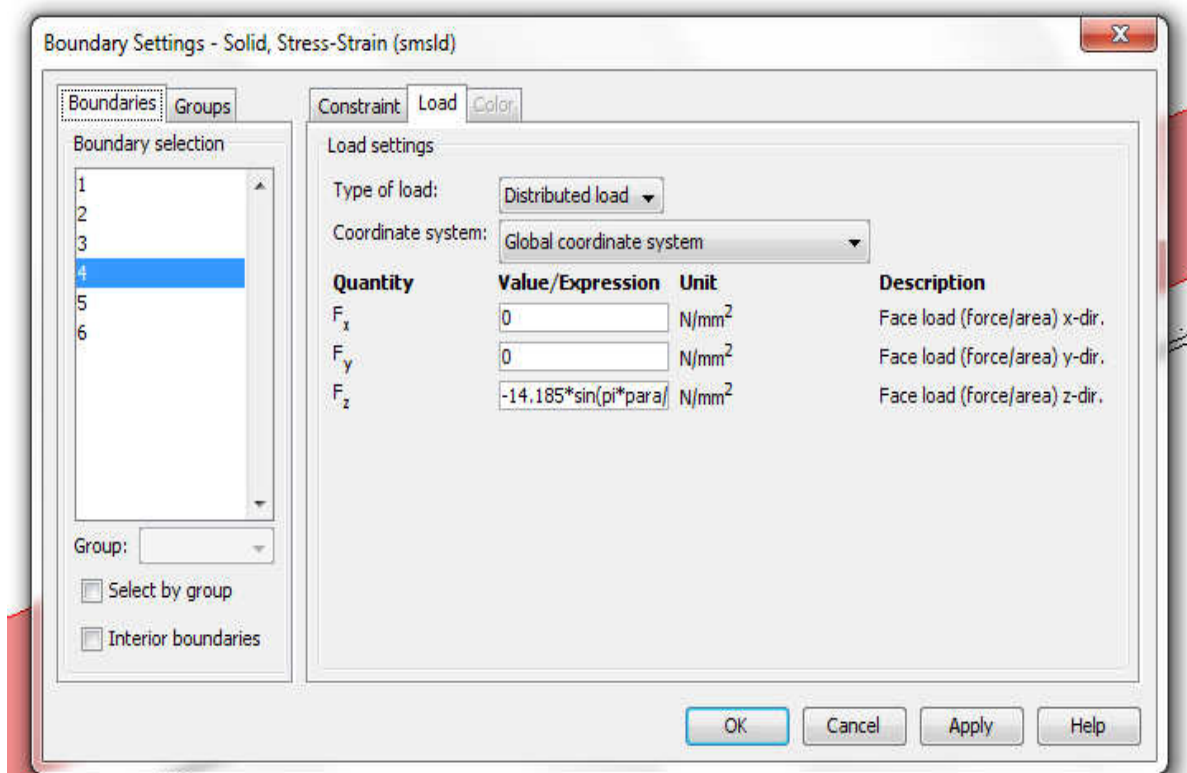
(FONTE: AUTOR)

6.7.2 SUPORTABILIDADE MECÂNICA À FLEXÃO RADIAL NO ENROLAMENTO EXTERNO

a) Simulação para 14,185 MPa

O valor para o estresse utilizado na simulação pode ser observado na Figura 6.31. Similarmente aos casos anteriores, procede-se a inclusão de um termo senoidal fazendo com que a força seja variável no tempo, para produzir a fadiga no material.

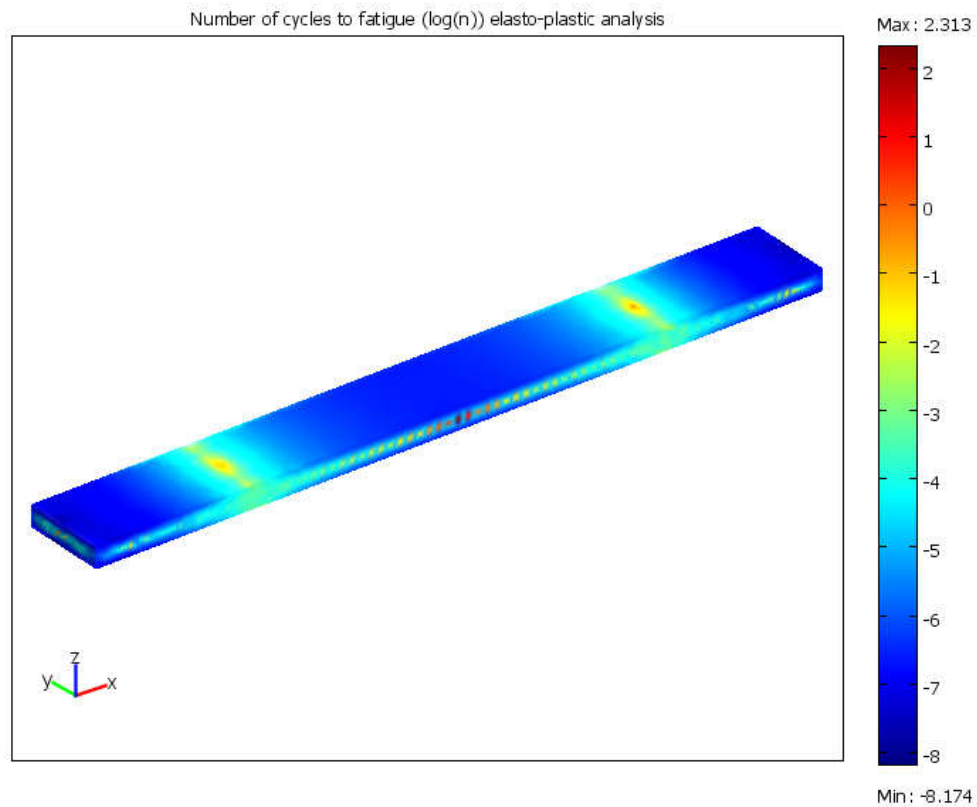
Figura 6.31 - Esforço flutuante aplicado no enrolamento externo



(FONTE: AUTOR)

Como nos casos anteriores, a Figura 6.32 mostra que o número de ciclos necessários para causar deformações permanentes corresponde a 205. Adicionalmente, identifica-se, também, os locais passíveis de danos no material.

Figura 6.32 – Número de ciclos correspondente a um esforço de 14,185 MPa



(FONTE: AUTOR)

A Tabela 6.10 mostra a comparação entre o número de ciclos e o estresse aplicado oriundos das duas metodologias. A proximidade encontrada indica a coerência entre os resultados.

Tabela 6.10 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 14,185 MPa

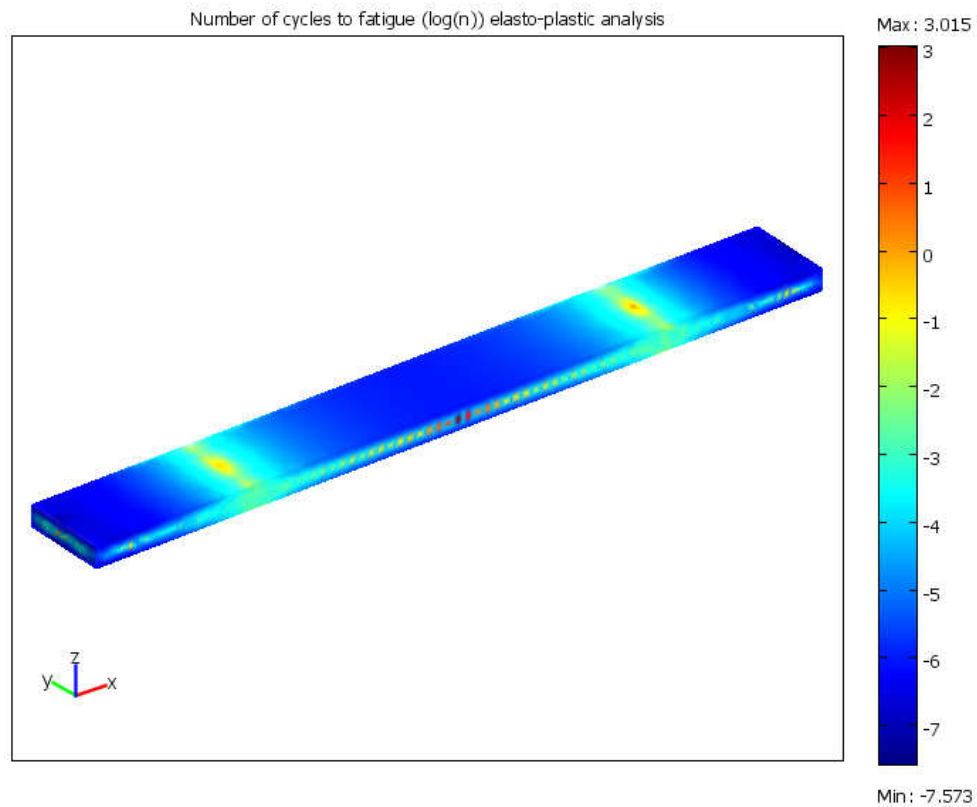
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos	Erro %
Estresse aplicado [MPa]	14,185	14,185	0
Número de ciclos	205	191	7,3

(FONTE: AUTOR)

b) Simulação para 9,6 MPa

A Figura 6.33 mostra o número de ciclos necessários para causar deformações permanentes, bem como os locais de maiores danos no material.

Figura 6.33 – Número de ciclos para um esforço de 9,6 MPa



(FONTE: AUTOR)

A Tabela 6.11 mostra a comparação entre o número de ciclos e o estresse aplicado oriundos das duas metodologias. A proximidade encontrada indica a coerência entre os resultados.

Tabela 6.11 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 9,6 MPa

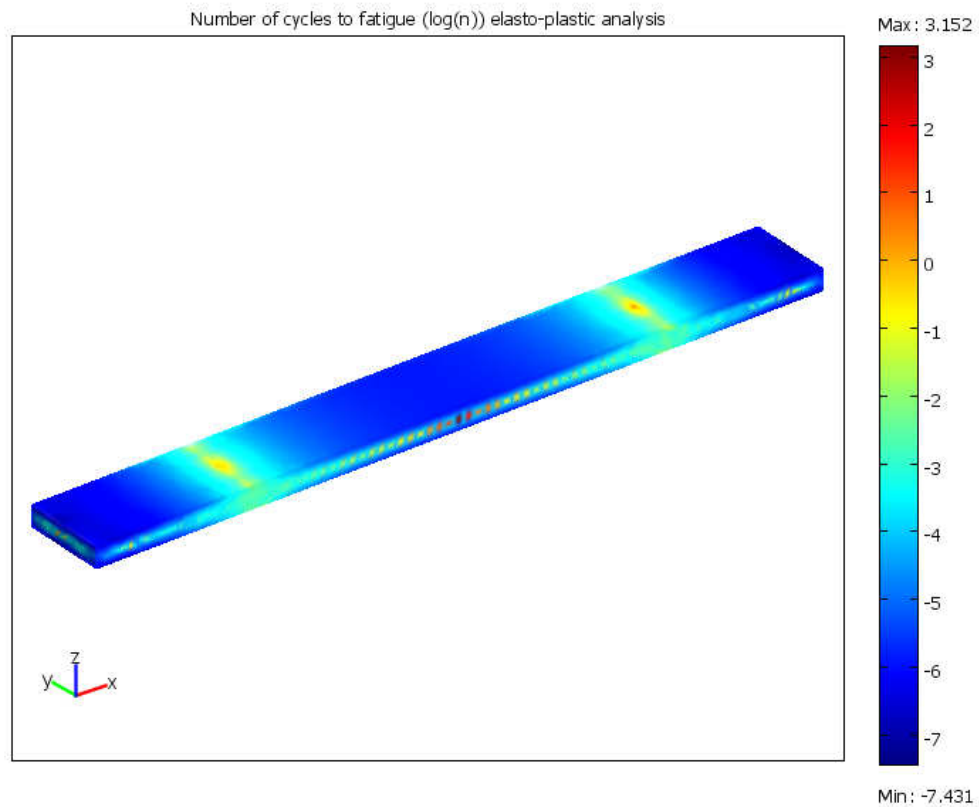
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos	Erro %
Estresse aplicado [MPa]	9,6	9,6	0
Número de ciclos	1035	1016	1,8

(FONTE: AUTOR)

c) Simulação para 8,76 MPa

Finalmente, a Figura 6.34 mostra o número de ciclos necessários para causar deformações permanentes, bem como os locais de maiores danos no material.

Figura 6.34 – Número de ciclos para um esforço de 8,76 MPa



(FONTE: AUTOR)

A Tabela 6.12 mostra a comparação entre o número de ciclos e o estresse aplicado oriundos das duas metodologias. A proximidade encontrada indica a coerência entre os resultados.

Tabela 6.12 - Grandezas analíticas e simuladas para esforço radial de 8,76 MPa

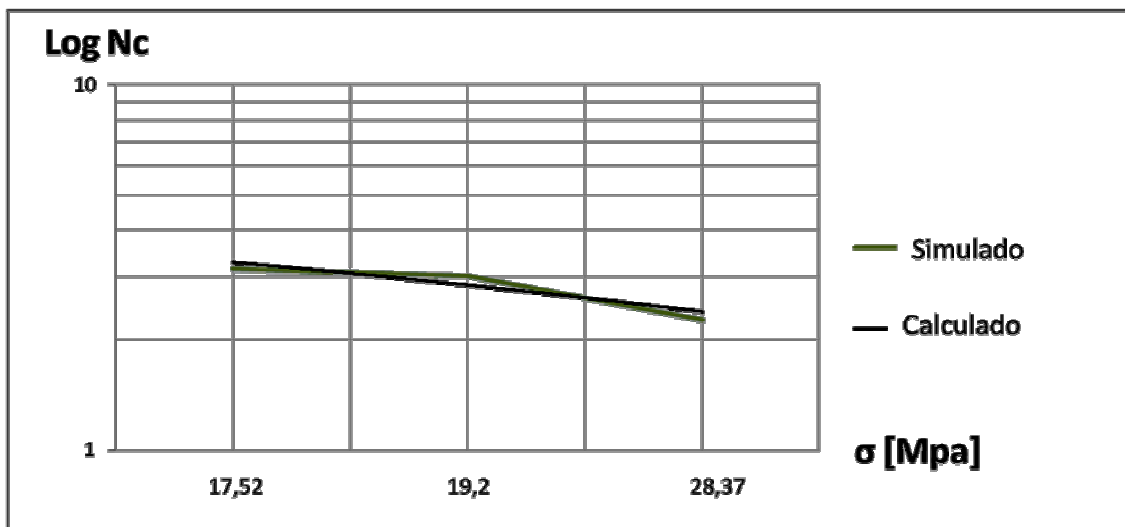
Grandezas mecânicas	Simulações	Cálculos analíticos	Erro %
Estresse aplicado [MPa]	8,76	8,76	0
Número de ciclos	1419	1500	5,4

(FONTE: AUTOR)

d) Comparação de resultados para o enrolamento externo

A Figura 6.35 apresenta, novamente em forma gráfica, a comparação entre as metodologias analítica e computacional, desta vez, para o enrolamento externo. As curvas evidenciam que os métodos utilizados apresentam boa aderência.

Figura 6.35 - Comparação entre as metodologias analítica e computacional para o enrolamento externo



(FONTE: AUTOR)

6.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta etapa foi propor uma modelagem computacional em elementos finitos que permitisse avaliar os efeitos dos estresses eletromecânicos, tanto estáticos quanto variáveis no tempo, nos enrolamentos de transformadores. As simulações forneceram informações para serem utilizadas como parâmetros de comparação com a metodologia analítica proposta anteriormente.

Para alcançar tal objetivo, neste capítulo foram apresentadas algumas características do pacote computacional COMSOL - Multiphysics que emprega o método de elementos finitos em seus cálculos, juntamente com algumas vantagens e desvantagem, sendo esta última destacada pelo tempo de simulação despendido para análises no domínio do tempo.

Neste contexto, na sequência foi demonstrado o processo envolvido na modelagem de um enrolamento de transformador de grande porte, obedecendo as justificativas apresentadas nos capítulos anteriores, para as aproximações que se fizeram necessárias. Uma vez definido o modelo pode-se iniciar as simulações, estas deveriam compreender a tração no cabo, a flexão sob esforços radiais e axiais, bem como o efeito de fadiga causado por esforços flutuantes.

Posteriormente, cinco casos específicos foram simulados, o primeiro deles avaliou as condições de tração em uma barra de cobre do tipo utilizada em enrolamento de transformadores. Em seguida os estudos foram dirigidos para a situação de flexão da barra, ou seja o tipo de deformação ocasionada por correntes transitórias de curto-circuito.

Finalmente, o transformador foi avaliado computacionalmente, para o desgaste provocado pela fadiga em seus enrolamentos. Nesta etapa, foram estudados vários casos onde se buscou o número de ciclos necessários para que o efeito de fadiga fosse visível no enrolamento.

Pelos resultados encontrados nesta etapa, pode-se inferir que a metodologia analítica apresentada no capítulo 4, pode ser utilizada para estimar e entender os efeitos, em longo prazo, dos esforços a que enrolamentos de transformadores estão sujeitos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Nas considerações finais, integrantes de cada capítulo, foram sintetizadas as contribuições e as análises pertinentes ao tema ali, avaliado. Entretanto, esta etapa final do trabalho, requer que sejam realizadas avaliações nas quais se possa apresentar os principais resultados obtidos e caracterizadas as contribuições alcançadas.

Assim, o capítulo I concentrou-se na contextualização do tema em foco nesta tese. Esta propiciou uma visualização da importância do transformador, como agente fundamental no sistema elétrico. A partir desse ponto, foi apresentada uma revisão bibliográfica, abrangente, sobre as alternativas atuais que permitem identificar e quantificar os efeitos de esforços eletromecânicos em enrolamentos de transformadores.

Concluiu-se inicialmente, que defeitos provocados pelos esforços mecânicos decorrentes de curtos-circuitos passantes e de corrente *inrush* se constituem como importantes causadores de falhas em transformadores. Isso é o que afirmam estudos realizados por concessionárias de diversos países. Assim, a investigação dos efeitos danosos causados pelos estresses eletromecânicos torna-se imperativa. Desse mote, seguiu-se, nos capítulos seguintes, a busca por metodologias de análise para avaliar o transformador, ao longo do tempo. Considerou-se, aqui, os efeitos cumulativos dos estresses advindos das forças oriundas das altas correntes de curtos-circuitos e energização e, a fadiga produzida nos materiais.

Em sequência, no capítulo 2, as falhas mecânicas, originadas das correntes de curto-circuito, foram bem descritas, tanto aquelas causadas por forças radiais, quanto às oriundas de forças axiais. Verificou-se que as forças radiais, originadas pela componente de campo axial, produzem estresse de compressão no enrolamento interno e estresse de tração no enrolamento externo. As forças axiais, originadas do fluxo radial, agindo radialmente, tende a comprimir ambos os enrolamentos, podendo causar inclinação nos condutores e a flexão dos mesmos, quando estão entre espaçadores.

Adicionalmente, estes mesmos esforços eletromecânicos foram investigados em um transformador trifásico de 15 kVA, a partir de modelagens e simulações computacionais. Para tanto, utilizou-se a plataforma computacional CEDRAT-FLUX, reconhecida internacionalmente, que está baseada no método dos elementos finitos, na sua versão tridimensional.

Alguns dos mais importantes resultados encontrados podem ser visualizados na Tabela 2.5. Nesta, é possível notar que a força e o estresse radial, por partirem de fluxos magnéticos mais uniformes apresenta menores erros, quando confrontadas as duas técnicas. Quanto aos esforços axiais, a metodologia permite estimar a ordem de grandeza das magnitudes, mas com erros maiores. Isso pode ser explicado, pois nas cabeças de bobina, os fluxos magnéticos são menos uniformes.

Quanto aos efeitos das correntes de energização, no capítulo 3, a mesma metodologia analítica foi testada. Para os esforços radiais, esta mostrou-se eficiente, como indicado nas tabelas 3.6 e 3.7. Quanto aos esforços axiais, foi necessária uma modificação nas equações, de modo a contemplar apenas o enrolamento energizado. Neste ponto, ao se comparar, nas mesmas tabelas, nota-se um acentuado ganho de precisão neste quesito.

Deve-se salientar que, as modificações propostas na equação vinculada com os esforços axiais durante a energização, tornou-se a principal contribuição, desenvolvida no capítulo 3.

De modo geral, constatou-se que os procedimentos analíticos e computacionais, apresentados nos capítulos iniciais deste trabalho, demonstraram uma boa margem de aderência, fato este que corrobora para o processo de validação dos mecanismos de cálculo aqui utilizados.

Por outro lado, é conhecido que um metal quando submetido a tensões mecânicas flutuantes, como ocorre com enrolamentos de transformadores apresenta danos por fadiga depois de determinado tempo. Logo, o Capítulo 4 pretendeu oferecer ferramentas teóricas, com as quais se pudessem avaliar as condições de fadiga dos enrolamentos do transformador, quando são submetidos a estresses mecânicos variáveis no tempo. Assim, os estudos, análises, conceitos e equações matemáticas utilizados neste capítulo foram oriundos da engenharia mecânica.

Neste caso, a preocupação foi a determinação dos efeitos dos estresses eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores. Dessa forma, pode-se ter um indicativo da capacidade do transformador de suportar elevadas correntes sem que seus enrolamentos sofram algum tipo de deformação, conseqüentemente, a preservação da sua vida útil. Entretanto, o histórico de ocorrências de curtos-circuitos e energizações fornece um bom indicativo da possibilidade de o enrolamento estar deformado. Esta análise pode ser realizada por meios da metodologia analítica apresentada ao longo desta tese.

Na sequência, foram apresentadas formulações analíticas que possibilitaram analisar o efeito dos estresses de tração e de flexão em metais. O objetivo destas análises foi buscar resultados que tornassem possível determinar os limites de suportabilidade do cobre quando submetido a esforços unidirecionais.

Neste ponto do trabalho, mostrou-se que é possível, a partir do conhecimento das posições dos espaçadores, determinar a curva de suportabilidade mecânica de enrolamentos. No caso específico do transformador de grande porte utilizado, os valores estimados de 96,9 MPa e 141,12 MPa, são os esforços radiais limites para os enrolamentos externo e interno, respectivamente.

Posteriormente, foram apresentadas descrições físicas de transformadores de grande porte. Este item tornou possível a avaliação dos vários tipos de enrolamentos, bem como, apontou as diversas aproximações necessárias para que fosse possível modelar matematica e computacionalmente uma coluna do transformador para análise de vida útil.

Com o mesmo enfoque, foram apresentados os conceitos mecânicos gerais para análise de fadiga de material. A metodologia analítica oriunda destes conceitos foi a base para análise de suportabilidade mecânica de enrolamento de transformadores.

Finalmente, atendendo ao que se entende como sendo a maior contribuição da pesquisa, foram propostas e analisadas curvas de suportabilidade mecânica. Essas permitem analisar as condições do transformador e sua vida útil remanescente após eventos de energização ou curtos-circuitos, que, inevitavelmente, produzem nos enrolamentos, níveis elevados de esforços eletromecânicos. Nesta etapa, foram apresentados resultados oriundos da formulação analítica, para a estimativa de vida útil do transformador, a partir de seus dados construtivos.

Neste contexto, estimou-se que o enrolamento interno, quando submetido a um estresse radial cíclico, de 54 MPa, suporta 638 ciclos. Enquanto, o externo, exposto a 52 MPa, tem sua vida útil estimada em 191 ciclos.

Em outra direção, no capítulo 5, foram realizados ensaios experimentais em uma barra de cobre do tipo utilizada na fabricação de enrolamentos. Este ensaio permitiu a obtenção de algumas propriedades do material de prova, como por exemplo, o módulo de elasticidade, tensão de escoamento, limite de resistência, etc. De maneira geral, é possível afirmar que os resultados encontrados para os ensaios foram satisfatórios. Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade, limites de escoamento e tração, alongação e redução de área são bem próximos dos fornecidos em catálogos de fabricantes.

Dando sequência, no capítulo 6, visando a modelagem e as simulações computacionais, foram apresentadas algumas características do *software* COMSOL que emprega o método de elementos finitos em seus cálculos. A seguir, foi demonstrado o processo envolvido na modelagem de um enrolamento do transformador. Uma vez definido o modelo pôde-se iniciar as simulações, estas compreenderam a tração no cabo e flexão sob esforços radiais e axiais.

Posteriormente, cinco casos específicos foram simulados. O primeiro deles avaliou as condições de tração em uma barra de cobre do tipo utilizada em enrolamento de transformadores. Em seguida, os estudos foram dirigidos para a situação de flexão da barra, ou seja, o tipo de deformação ocasionada por correntes transitórias de curto-circuito e *inrush*.

Finalmente, o transformador foi avaliado computacionalmente quanto ao desgaste provocado por fadiga em seus enrolamentos. Nesta etapa, foram estudados vários casos onde se buscou o número de ciclos necessários para que o efeito de fadiga fosse visível no enrolamento.

Pelos resultados encontrados nesta etapa, pode-se inferir que a metodologia analítica apresentada nesta tese, pode ser utilizada para compreender os efeitos a longo prazo dos esforços a que enrolamentos de transformadores estão sujeitos.

De uma maneira geral, este trabalho contribuiu com alguns estudos e análises que, acredita-se, servirão como base de análise e subsídios a projetistas de transformadores e, mesmo, para a realização de trabalhos futuros que darão continuidade à exploração do tema.

Ao se considerar os objetivos iniciais, é correto dizer que esta tese obteve êxito. Destaca-se, num primeiro plano, a metodologia analítica proposta no Capítulo 4 para a estimativa das deformações em enrolamentos de transformadores. Outro item que merece destaque é a utilização de um *software* que emprega o método de elementos finitos, para a determinação da deformação e da fadiga das barras de cobre dos enrolamentos, os quais foram extremamente úteis ao fornecer parâmetros de comparação para justificar o método analítico proposto.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão desta tese, e com base na relevância do assunto aqui abordado, apresentam-se, como temas indicativos para um maior aprofundamento, os seguintes desafios:

- Metodologia analítica e computacional para avaliação do estresse eletromecânico em transformadores de três enrolamentos;
- Estudos experimentais para avaliação do estresse eletromecânico em transformadores;
- Metodologia analítica e computacional para avaliação dos estresses eletromecânicos em transformadores de grande porte constituídos por três unidades monofásicas;
- Realização de estudos atrelados com um transformador real, tendo como base um histórico do mesmo ao longo dos anos, desde sua instalação no sistema até sua interdição pela falta de condição operacional;
- Efetuar estudos analíticos e computacionais para análise da deformação identificada como *tilting*, que consiste na inclinação do condutor, quando sobre este incide uma elevada força de compressão axial.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Normas ABNT Sobre Transformadores*.
- ADDLY, A. A. "Computation of Inrush Current Forces on Transformer Windings", IEEE Transactions on Magnetics, v. 37, n. 4, p. 2855 – 2857, July 2001.
- AGUIAR, R., *Ensaio de Resposta em Frequência: Aplicação no Campo e Proposta para Normatização*. COPEL – Companhia Paranaense de Energia.
- AGUIAR, R., *Análise de Varredura de Resposta em Frequência em Transformadores: Aplicação no Campo*. XX SNPTEE – Recife-PE, Novembro de 2009.
- APOLÔNIO, R.; CHAVES, M. L. R.; OLIVEIRA, J. C.; BRONZEADO, H. S. "Projeto Chesf de P&D (CHESF/FAU/UFU). *Chaveamento Controlado de Transformadores*. Relatório 08/10. Estudos Computacionais das Energizações da SE-Eunápolis", Uberlândia, 2004.
- APOLÔNIO, R. *Modelagem e Chaveamento Controlado de Transformadores: Análise Computacional e Validação Experimental*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, dezembro 2004.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1. Ed., 2004.
- AZEVEDO, A. C., DELAIBA, A. C., OLIVEIRA, J. C., CARVALHO, B. C., BRONZEADO, H. S., *Transformer Mechanical Stress Caused by External Short-circuit: a Time Domain Approach*. 7th International Conference on Power Systems Transients, France, June/2007
- AZEVEDO, A. C., *Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos "Passantes" e Correntes de Energização*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Fevereiro de 2007.
- BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. 2. Ed. [S.1.]: UFSC, 1992.
- BECHARA, R., BRANDÃO Jr., *Análise de Falhas em Transformadores de Potência e seus Mecanismos de Ocorrência*. XIII ERIAC – Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, Puerto Iguazú, Argentina, Maio, 2009.

- BJERKAN, E. *High Frequency Modeling of Power Transformers – Stresses and Diagnostics*, Doctoral Thesis – Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Trondheim, May 2005.
- BRONZEADO H. S.; YACAMINI R. *Phenomenon of Sympathetic Interaction Between Transformers Caused by Inrush Current*. IEE Proc. - Science, Measurements and Technologies, Vol. 142, No. 4, July 1995.
- BRONZEADO, H. S.; BROGAN, P. B.; YACAMINI, R. *Transformer Interaction Caused by Inrush Current*. In: International Conference on Power System Transients IPST`97, 1997, Seattle. International Conference on Power System Transients IPST`97, 1997.
- BUDYNAS, R., NISBETT, K., *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 8 edition, 2006.
- CALLISTER Jr, W. D., *Materials science and engineering : an introduction*, 7th ed. 1940
- CIGRE, Working Group A2.18. *Life Management Techniques for Power Transformer*. Brochure 227, CIGRE, 2003.
- CIGRE, Working Group, *The Short Circuit Performance of Power Transformers*. Brochure 209, CIGRE, 2002.
- CIGRE, Groupe du Travail 12.05, *Enquête Internationale sur les Défaillances en Service des Transformateurs de Grande Puissance*. ELECTRA, No. 88, 1983.
- COSTA, J. M. S. C.; FREIRE A. R. F.; BARROS, S. A.; GUIMARÃES, A. C. S. L.; CASADO, L. M.; SILVA, R. F. *Metodologia e Critérios para Estudos de Energização de Transformadores de Potência: Experiência da Chesf*. Décimo Terceiro Encontro Regional Iberoamericano de Cigré, Puerto Iguazú – Argentina, Maio 2009.
- DIETER, G. E., *MECHANICAL METALLURGY*, SI Metric Edition ed./adapted by David Bacon. McGraw-Hill series in materials science and engineering, 1988.
- DOBLE, *The Life of a Transformer*. Seminar and Industry Expo, Florida, February 19-25, 2006.
- GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1991.
- GUIMARÃES, R.; DELAIBA, A. C.; SARAIVA, E.; ROSENTINO, A. J. J. P.; LYNCE, M.; BRONZEADO, H. S.; SILVA, C. A. *Investigação sobre Estresses Eletromecânicos em Transformadores Causado pela Corrente de Energização*

- (*Inrush*), 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America, São Paulo, novembro 2010.
- GUY, A. G. *Ciências dos Materiais*. Rio de Janeiro: Editora LTC/EDUSP. Ed., 1980.
- HEATHCOTE, M., FRANKLIN, A. C., FRANKLIN, D. P., *J & P Transformer Book*. Butterworth-Heinemann Ltd. Great Britain, twelfth edition, 1998.
- IEEE Std. - The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., *Guide for Failure Investigation, Documentation and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors*, IEEE Standards Board, 1991.
- IEEE/ANSI C57.109, *Guide for Transformer Through-Fault-Current Duration*, Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society, USA, 1985.
- KULKARNI, S. V., KHAPARDE, S. A., *Transformer Engineering: Design and Practice*. Marcel Dekker, Inc., 2004.
- LAPWORTH, J. A., *Transformer Reliability Surveys*. A2-114, CIGRE, 2006.
- LASZLO, P.; GYORGY, B.; GABOR B.; PETER, B. *Reducing the Magnetizing Inrush Current by Means of Controlled Energization and De-Energization of Large Power Transformers*. International Conference on Power System Transients. IPST 2003, New Orleans.
- LES POOK, *Metal Fatigue What It Is, Why It Matters*, University College London, UK 2007
- LIANG, Z., LI, J., TANG, R., *Axial Vibrations of Transformers Windings Under Short Circuit Conditions*. ICEM 2003 – VI International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003, Vol. 1, pp. 332-335, November 2003.
- LING, P.; BASAK, A. *Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer*. IEEE Transactions on Magnetics, v. 24, n. 6, p. 3217-3222, November 1988.
- L'URE, A. I.,. *Transformer Connection Under No-Load and Short-Circuit Events*. Russian Electrical Engineering, v. 79, n. 2, p. 57-70, 2008.
- McNUTT, W. J., JOHNSON, W. M., NELSON, R. A., AYERS, R. E., *Power Transformer Short-circuit Strength – Requirements, Design and Demonstration*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-89, nº8, p.p. 1955-1969, December 1970.
- Membros do Departamento de Engenharia Elétrica do Massachusetts Institute of Technology. *Magnetics Circuits and Transformers*. Editora: The MIT Press, fifteenth printing, 1965.

- MINHAS, M.; REYNDERS, J.; KLERK, P. D., *Failures in Power System Transformers and Appropriate Monitoring Techniques*. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. (Conf. Publ. No. 467), v. 1, 1999.
- MIRZAIE, M.; GOLAM, A.; TAYEBI, H. R.. *Insulation Condition Assessment of Power Transformers Using Accelerated Ageing Tests*. Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.17, No.1, 2009.
- MURAKAMI, H., HOSOKAWA, N., NAKATSUKA, S., BANJOYA, N., KISHI, A., TAKANO, M., *Short Circuit Strength of Shell Form Transformer*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, 2001.
- NAJDENKOSKI K., MANOV, D., *Electromagnetic Forces Calculation on Power Transformers Winding Under Short Circuit*. International Journal of Computation and Mathematics in Electrical and Electronics Engineering, Vol.17, nº 1/2/3, pp. 374-377, 1998.
- PATEL, M. R. *Instability of the Continuously Transposed Cable Under Axial Short Circuit Forces in Transformers*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.1, 2002.
- PATEL, M. R., *Dynamic Response of Power Transformers Under Axial Short Circuit Forces: Part 2 – winding and clamps as a combined system*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.92, 1973.
- PAULINO, M. E. C., “*Avaliação de Transformadores Utilizando Análise de Resposta em Frequência, Capítulo I – Introdução a Análise de Resposta em Frequência*”. O Setor Elétrico, Setembro, 2009.
- PENA MEDINA, M. C., *Falha em Transformadores de Potência: Uma Contribuição para Análise, Definições, Causas e Soluções*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Março 2003.
- P-IEC 60076-5, *Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit*. {Ed.3.0}. International Electrotechnical Commission.
- PREVOST, T. A., *Transformer Fleet Health and Risk Assessment*. IEEE PES Transformers Committee Tutorial, Dallas Texas, March 2007.
- RELATÓRIO, *Projeto de P&D “Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (“Inrush”) e de Curtos-Circuitos “Passantes”*, CHESF-UFU-UFCG, 2009.

- REIS, A. K. C., *Compensação de Potência Reativa Através do Controle da Saturação de Reatores*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Fevereiro 1997.
- RIBEIRO, C. F., ÁLVARES, M. V. A., ORTEGA, B. G. P., COSTA, C. A., *Contribuição ao Estudo e Aplicação de Transformadores de Distribuição no Sistema Elétrico da COELBA*. II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, 2003.
- ROSENTINO, A. J. J. P., *Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Julho de 2010.
- ROSENTINO, A. J. J. P.; SARAIVA, E.; DELAIBA, A. C.; BRONZEADO, H. S.; OLIVEIRA, J. C.; CHAVES, M. L. R. “*Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos Trifásicos*”, The 8th Latin - American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE, Ubatuba, outubro 2009.
- ROSENTINO, A. J. J. P.; SARAIVA, E.; DELAIBA, A. C.; GUIMARÃES, R.; OLIVEIRA, J. C.; CHAVES, M. L. R.; FERNANDES, D. J.; NEVES, W. L. A.; BALTAR, F. J. A., “*Modelagem e Análise dos Estresses Eletromecânicos em Transformadores Causados por Curtos-circuitos*”, IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - IX CBQEE, Cuiabá, julho/agosto 2011.
- SALON, S., LaMARTINA, B., SIVASUBRAMANIAM, K., *Comparision of Assumptions in Computation of Short Circuit Forces in Transformers*. IEEE Transaction on Magnetics, Vol.36 nº 5 pp. 3521-3523, September/2000.
- SARAIVA, E.; CHAVES, M. L. R.; CAMACHO, J. R. “*Modelagem de um Transformador de 15 kVA no FEMM, e Metodologia para Cálculo dos Entreferros*”, VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – VIII Induscon, Poço de Caldas, agosto 2008.
- SARAIVA E., *Um estudo das alterações dos parâmetros de transformadores oriundas de deformações nos enrolamentos: uma contribuição para o diagnóstico de vida útil*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Setembro de 2011.
- STENKVIST E., TORSEKE L., *What is Known about the Ability of Large Powers Transformers to Withstand a Short Circuit*. CIGRE Report, 1961.

- STEURER, M.; FROHLICH, K. "The Impact of Inrush Currents on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n. 1, p. 155-160, January 2002.
- TIMOSHENKO, S., *Strength of Materials*, 3rd Edition, D.Van Nostrand Co., Inc., Princeton, N.J., 1956).
- VAILLES, C.; MALEWSKI, R.; DAI-DO, X.; AUBIN, J., *Measurements of Dielectric Stress in EHV Power Transformer Insulation*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10. No. 4, outubro 1995.
- VECCHIO, R. M. del, POULIN, B., FEGHALI, P. T., SHAH, D., RAJENDRA, *TRANSFORMER DESIGN PRINCIPLES With Applications to Core-Form Power*. CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C, 2002.
- WANG, H., BUTLER, K. L., *Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in Distribution Transformers*. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 16, No. 3, pgs: 1422 - 1428. July 2001.
- 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.
- WATERS M., *The Short-Circuit Strength of Power Transformers*. Editora: Macdonald & Co., London, 1966.
- WEIHSMANN, P. R. *Fatigue curves without testing*. Materials Engineering, vol. 91, no. 3, March 1980, pp. 52-54.
- YUN-QIU, T., JING'QIU, Q., ZI-HONG, X., *Numerical Calculation of Short Circuit Electromagnetic Forces on the Transformers Winding*. IEEE Transaction on Magnetics, Vol.26, nº 2, pp. 1039-1041, March/1990.