

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS E MATERIAIS MAGNÉTICOS
UMA NOVA METODOLOGIA

AUTOR: LUIZ HENRIQUE GEROMEL

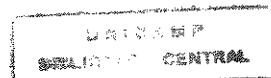
ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS RODRIGUES DE SOUZA

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, UNICAMP, COMO PARTE
DOS REQUISITOS EXIGIDOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE:**

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAMPINAS - SP, FEVEREIRO DE 1998

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por LUIZ HENRIQUE GEROMEL
e aprovada pela Comissão
Julgada em 04 / 02 / 98
Orientador



0657180

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	G319a
V.	Ex.
TOMBO BC/	33985
PROC.	395/98
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	28/05/98
N.º CPD	

CM-00112972-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

G319a

Geromel, Luiz Henrique

Avaliação de processos e materiais magnéticos uma
nova metodologia / Luiz Henrique Geromel --
Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Carlos Rodrigues de Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Materiais magnéticos. 2. Processos de fabricação.
3. Transformadores elétricos. 4. Ligas de aço. I. Souza,
Carlos Rodrigues de. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Carlos Rodrigues de Souza, pela sua preciosa orientação e por todos os ensinamentos que me proporcionou, e acima de tudo pelo companheirismo e amizade sinceros.

À Divisão de Transformadores de Distribuição da Romagnole Produtos Elétricos, personalizada no Eng. Alceu Tarcísio Cesar, pela colaboração indispensável na conclusão deste trabalho.

Resumo

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar uma nova metodologia de ensaio para avaliação de processos e materiais magnéticos utilizados principalmente na fabricação de núcleos de transformadores de distribuição. Esse procedimento de ensaio constitui uma importante ferramenta, não só para a otimização dos projetos e redução da quantidade de matéria prima empregada, mas também para o desenvolvimento de métodos e processos de fabricação mais eficazes, reduzindo o custo do equipamento e melhorando seu desempenho.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAIS MAGNÉTICOS PARA NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES	8
2.1 LIMITAÇÃO DAS TENSÕES MECÂNICAS	9
2.2 MANUTENÇÃO DO ISOLAMENTO SUPERFICIAL	10
2.3 NORMAS E VALORES PARA REFERÊNCIA	10
2.4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS LIGAS DE AÇO-SILÍCIO	14
2.5 ENSAIO EM LIGAS DE AÇO-SILÍCIO	15
2.6 CONCLUSÃO	17
3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE TRANSFORMADORES	18
3.1 CÁLCULO DO CIRCUITO MAGNÉTICO	19
3.2 OUTRAS CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	23
3.3 PROCESSOS PARA CONFEÇÃO DE NÚCLEOS PARA TRANSFORMADORES	24
4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	26
4.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO ENSAIO PROPOSTO	28
4.2 TRATAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	30
5. APLICAÇÃO DO ENSAIO NA INDÚSTRIA DE TRANSFORMADORES	33
6. ANÁLISE DE RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	39
6.1 METODOLOGIA APLICADA ÀS CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS DE AÇO-SILÍCIO	39
6.2 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AOS TRANSFORMADORES	40
6.3 ANÁLISE DA METODOLOGIA APLICADA A DIFERENTES CONJUNTOS	47
6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE UM ENSAIO COMPARATIVO	48
7. COMENTÁRIOS FINAIS	52
8. APÊNDICE	54

8.1 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS	54
8.2 MATERIAIS E LÍQUIDOS ISOLANTES	57
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. Introdução

Nas indústrias os ensaios em materiais magnéticos são usualmente efetuados apenas no momento do seu recebimento. No entanto, as alterações sofridas pelo material, durante a fabricação do equipamento a que se destina, torna questionável a eficiência deste procedimento porque o processamento do material magnético na fabricação diminui as suas qualidades magnéticas.

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar uma nova metodologia de ensaio para avaliação de processos e materiais magnéticos utilizados principalmente na fabricação de núcleos de transformadores de distribuição. Esse procedimento de ensaio constitui uma importante ferramenta, não só para a otimização dos projetos e redução da quantidade de matéria prima empregada, mas também para o desenvolvimento de métodos e processos de fabricação mais eficazes, reduzindo o custo do equipamento e melhorando seu desempenho.

Evidencia-se, neste trabalho, a importância de avaliações de desempenho dos materiais magnéticos, considerando seu desempenho global, ou seja, o desempenho dos materiais já aplicados no equipamento em sua forma final. O crescente desenvolvimento das ligas de ferro-silício e a utilização de ligas ferromagnéticas amorfas na construção de núcleos de transformadores, bem como a evolução dos diferentes métodos e processos de fabricação, é hoje uma realidade inquestionável. Consequentemente, tornou-se impraticável, sem um histórico detalhado do seu comportamento, acompanhar a velocidade e a interação de tais fenômenos. É precisamente este fato que vem justificar o desenvolvimento deste novo procedimento de ensaio ora apresentado.

O capítulo 2 analisa os materiais magnéticos aplicados na fabricação de transformadores de distribuição, como subsídio para o desenvolvimento dos demais capítulos. O capítulo 3 trata das influências dos materiais magnéticos no projeto de transformadores e dos processos envolvidos na sua confecção. No capítulo 4, toda a metodologia proposta nesse trabalho está descrita. O capítulo 5 trata de exemplos de aplicação na indústria do procedimento de ensaio, cujos resultados são analisados no capítulo 6. As conclusões a partir dos resultados e algumas considerações finais são

expostas no capítulo 7. Informações acerca dos ensaios para determinação das perdas em transformadores de distribuição e do processo de envelhecimento, são apreciados no apêndice.

2. Materiais magnéticos para núcleos de transformadores

Este capítulo traz um breve estudo sobre os materiais magnéticos destinados à fabricação de transformadores de distribuição. É importante para a compreensão dos fenômenos que envolvem a metodologia de ensaio proposta.

Os materiais magnéticos mais utilizados na confecção de núcleos de transformadores são provenientes das ligas de aço-silício. Apesar destas possuírem um baixíssimo teor de carbono, em torno de 0,003% [1], o seu nome metalúrgico mais correto seria liga de ferro-silício completamente processada.

Ligas de aço-silício possuem boas características elétricas e magnéticas, sob condições em que o fluxo reverte o sentido ou pulsa muitas vezes a cada segundo.

A composição dessas ligas visa a obtenção de boas propriedades magnéticas. É um de seus principais elementos - o silício - tem a finalidade aumentar a resistividade e, conseqüentemente, reduzir a circulação de correntes parasitas. Deve-se, porém, restringir o teor de silício a aproximadamente 3% [2], pois um alto teor de silício requer correntes de excitação mais intensas, em altas densidades de fluxo magnético, e, além disso, endurece a liga, potencializando os efeitos das tensões mecânicas aplicadas à mesma. Outro importante elemento da composição das ligas de aço-silício é o sulfeto de manganês, o qual tem a finalidade de inibir o crescimento dos grãos.

Na fabricação de núcleos de transformadores, os aços utilizados são de grânulos orientados, que possuem uma forte direcionalidade magnética, ou seja, o valor da permeabilidade varia sensivelmente com a direção do fluxo magnético. Sabe-se que a direção mais favorável para a circulação do fluxo magnético é no sentido da laminação da chapa. Estima-se um aumento no valor da componente de magnetização da corrente de excitação em até 20 vezes, na aplicação de fluxos em outras direções.

É, no entanto, relevante considerar que a conservação das propriedades magnéticas das ligas de aço-silício empregadas depende do controle e otimização dos métodos e processos de fabricação do núcleo. Tensões mecânicas são introduzidas nas operações de estampagem, corte, empilhamento, tracionamento, dobramento e

armazenamento das chapas. Tais tensões, quando elevadas, dificultam a orientação dos domínios, devido à deformação dos cristais de metal, reduzindo a relação entre a indução e a força magnetizante. Resultando uma forte deterioração das propriedades magnéticas, acarretando um aumento substancial nas perdas relacionadas com os efeitos da histerese no núcleo. Consequentemente, cuidados especiais devem ser tomados no manuseio das chapas para assegurar a preservação das características do material.

A preservação do isolamento superficial das chapas é também de fundamental importância para a minimização das correntes parasitas e, conseqüente, para a limitação das perdas relacionadas com os efeitos das correntes de Foucault.

2.1 Limitação das tensões mecânicas

Com a finalidade de limitar a introdução de tensões e preservar as qualidades magnéticas do material, muitos cuidados devem ser tomados no manuseio das chapas de aço-silício. Os principais são:

- Utilização de ferramentas de corte feitas de ferro extremamente duro, bem como aplicação da força puncionadora adequada à espessura e largura da chapa, pois a adição de silício endurece a chapa, dificultando os processos de corte e estampagem (cisalhamento);
- Utilização de tracionadores com diâmetro e força tratora adequados à espessura e largura da chapa, evitando-se ainda a existência de quinas ou cantos em contato com a superfície desta;
- Utilização de bobinadores com diâmetros adequados à espessura e largura das tiras e bobinas de aço-silício;
- Utilização de superfícies com boa planicidade, e não muito rugosas, durante os processos de empilhamento e esquadilhamento;
- As bobinas e chapas devem ser armazenadas em posições e locais adequados à forma física desse material, evitando deformações.

As tensões acima podem ser aliviadas através de um processo de recozimento da chapa com temperatura e atmosfera adequadas (aproximadamente 750°C e livre de CO e CO₂). Esse processo de recozimento provoca a dilatação dos grânulos, que elimina ou minimiza as tensões internas. Porém, como o recozimento acrescenta um tempo considerável ao processo de fabricação. É mais viável refinar o processo de fabricação, preservando as propriedades das mesmas.

2.2 Manutenção do isolamento superficial

A manutenção do isolamento superficial é de fundamental importância para a minimização das correntes parasitas e, conseqüentemente, para a limitação das perdas relacionadas com os efeitos dessas correntes.

Além dos cuidados expostos acima, é necessário limitar, ao mínimo possível, as rebarbas nos processos de corte e estampagem, pois estas oferecem caminho à circulação das correntes de Foucault e danificam a superfície de isolamento das chapas vizinhas.

Para uma análise mais criteriosa, pode-se obter a resistência de isolamento em um lado da chapa através do teste de Franklin, normalizado na A717-75 da ASTM (Sociedade Americana para Testes de Materiais). Aceita-se que um valor satisfatório não deve ser inferior à 100 Ω/cm^2 (25°C). Esse valor é considerado na superfície da chapa, em regiões distantes da ocorrência de cisalhamento decorrente dos processos de corte e estampagem.

2.3 Normas e valores para referência

A característica mais importante nas ligas de aço-silício é sua perda por unidade de massa. Por esta razão, as ligas são classificadas pelas normas existentes conforme o valor de sua perda.

A perda no núcleo é a potência elétrica dissipada em forma de calor, quando o equipamento está submetido a forças magnetizantes alternadas.

Os tipos de ligas de aço-silício de grânulos orientados tem sua designação diferenciada em algumas normas [3], como segue exemplificado na tabela 1:

Tabela 1: Chapas de aço-silício: Características garantidas por normas

Designação da chapa		Perdas Magnéticas 60 Hz		Perdas Magnéticas 50 Hz	
NBR 9119	AISI *	15 kGauss	17 kGauss	15 kGauss	17 kGauss
GO117-27	M-4	1,17 W/kg	1,68 W/kg	0,89 W/kg	1,27 W/kg
GO128-30	M-5	1,28 W/kg	1,83 W/kg	0,97 W/kg	1,39 W/kg
GO146-35	M-6	1,46 W/kg	2,07 W/kg	1,11 W/kg	1,57 W/kg

* AISI - Instituto Americano de Ferro e Aço

Os valores das perdas magnéticas apresentados na tabela 1 são os máximos permitidos para sua respectiva designação na AISI e ABNT.

Mesmo no Brasil, geralmente a designação mais usada é a proposta pelo AISI. Nessa norma, a letra 'M' significa material magnético e o número que se segue à letra está relacionado ao valor máximo da perda.

Na ABNT, as letras GO significam aço-silício de grãos orientados. Os três primeiros números representam o cêntuplo do valor máximo da perda em Watts por kg, em 15 kGauss e 60 Hz, e os últimos dois dígitos representam o cêntuplo da espessura em milímetros do material [4].

Os principais fabricantes de aço-silício fornecem algumas curvas com características médias do comportamento desses materiais [5]. Algumas dessas curvas são mostradas nas figuras 1, 2, 3 e 4.

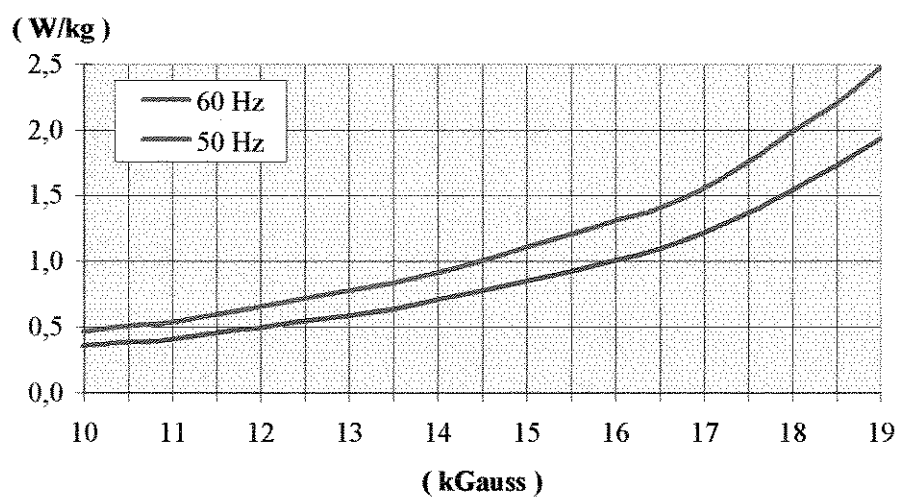


Figura 1: Perdas magnéticas x densidade máxima de fluxo (GO-M4)

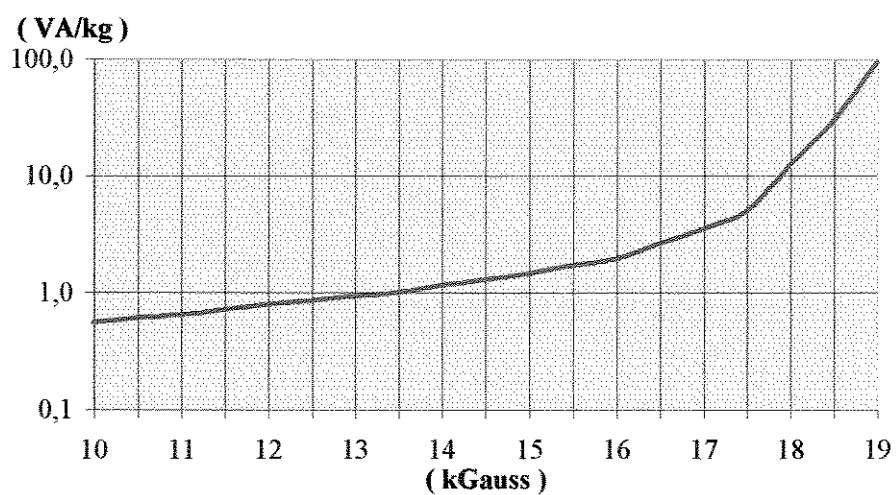


Figura 2: Potência de excitação x densidade máxima de fluxo, em 60 Hz (GO-M4)

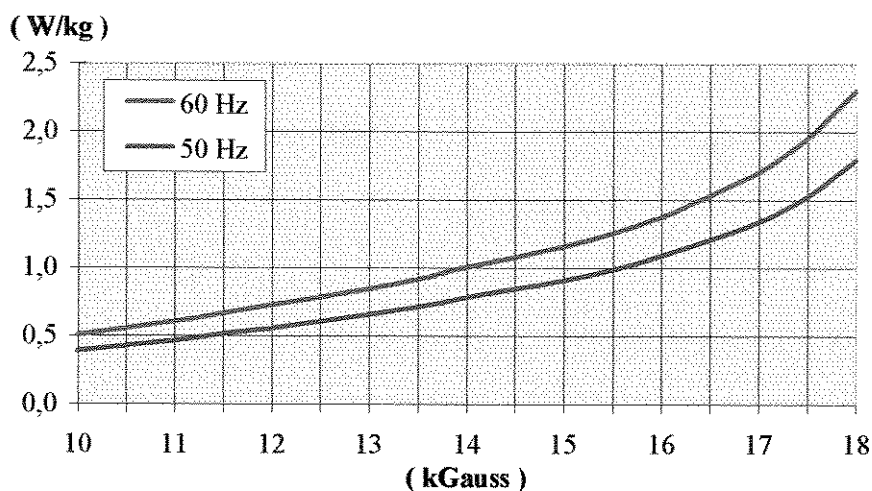


Figura 3: Perdas magnéticas x densidade máxima de fluxo (GO-M5)

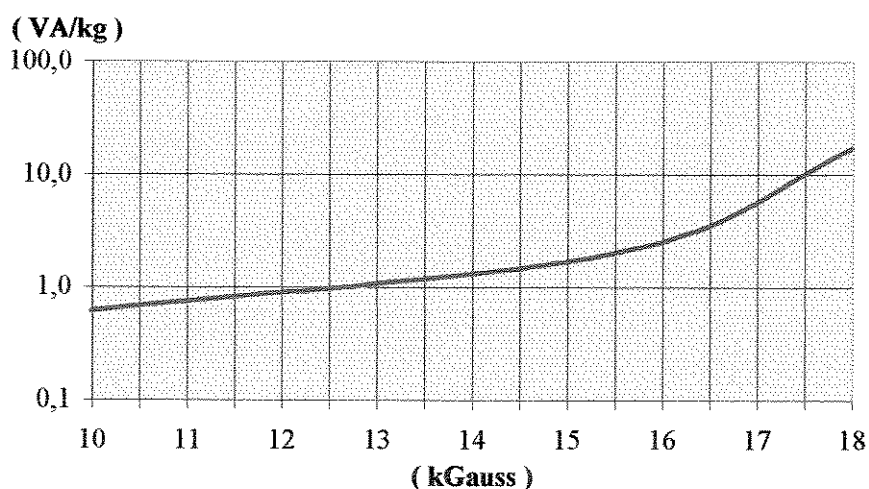


Figura 4: Potência de excitação x densidade máxima de fluxo, em 60 Hz (GO-M5)

Como os valores de perdas magnéticas apresentados na tabela 1 são os máximos permitidos para cada categoria, estes são, portanto, superiores aos encontrados nas curvas características mostradas nas figuras 1 e 3. As curvas apresentadas nas figuras 1 a 4 serão posteriormente utilizadas como referência no procedimento de ensaio que é proposto neste trabalho.

O valor das perdas magnéticas por unidade de massa mostrados nas figuras 1 e 3 são geralmente utilizados nos procedimentos de cálculo das perdas no núcleo do

transformador. Fica evidente que tais perdas devem ser corrigidas para compensar o aumento das perdas relacionadas com as imperfeições decorrentes do processamento da chapa, durante a fabricação do núcleo.

Da mesma forma como o ocorrido com as perdas magnéticas, também o valor da potência de excitação deve sofrer um acréscimo durante o procedimento de cálculo da corrente de excitação. Nesse caso, a maior parcela deste acréscimo é decorrente do aumento no valor da componente de magnetização desta corrente, devido à existência de entreferros nos núcleos de transformadores de tal porte.

2.4 Processos de fabricação das ligas de aço-silício

Durante a sua fabricação, as ligas de aço-silício são submetidas a diversos processos, dos quais destaca-se um processo de laminação que se dá em duas fases, uma a quente, onde as placas são transformadas em bobinas de espessura intermediária e outra a frio, até obter-se a espessura final. Outra etapa importante, no processamento para obtenção das ligas de aço-silício, mostrado no fluxograma da figura 5, é o processo de recozimento da chapa, destinado à configuração das características magnéticas da mesma. Este processo também se dá em duas fases distintas, uma antes e outra após o processo de laminação a frio.

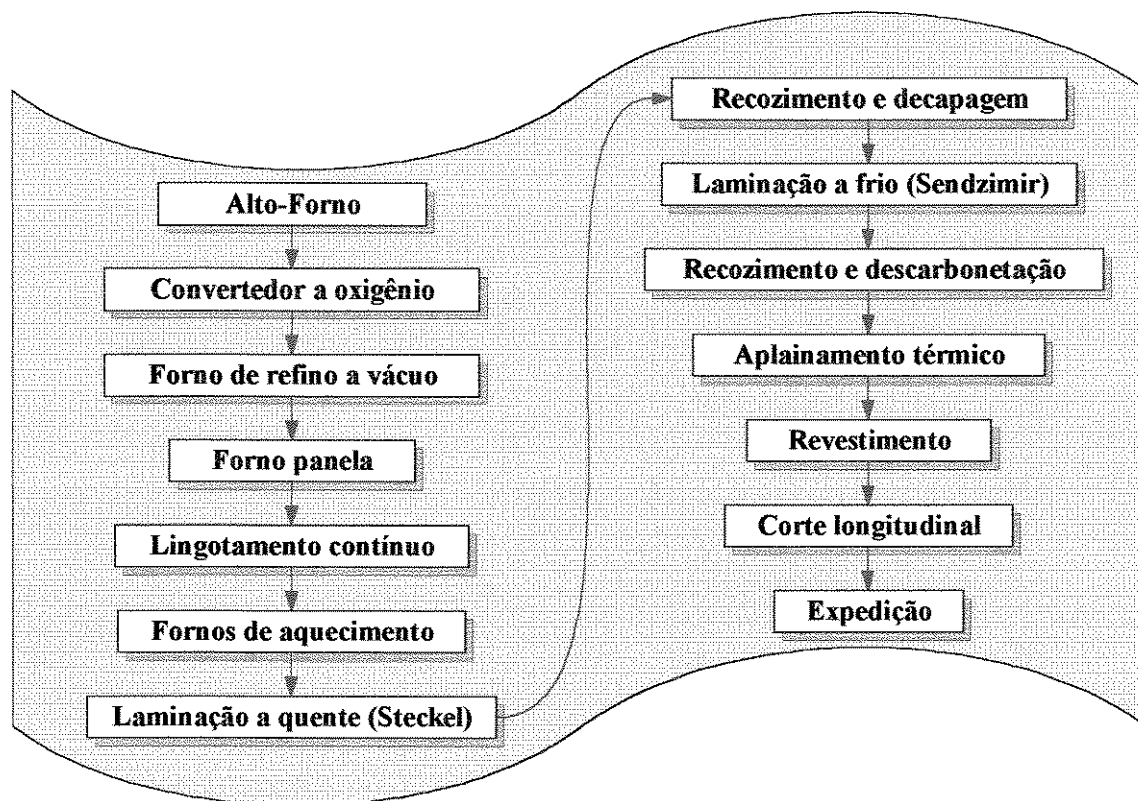


Figura 5: Fluxo de produção das ligas de aço-silício de grão orientado

É importante salientar que a direcionalidade magnética é conferida ao material principalmente durante o processo de laminação a frio. Mesmo as chapas de grânulos não orientados possuem uma pequena direcionalidade magnética, pois seu processo de fabricação é muito semelhante ao das chapas de grânulos orientados.

2.5 Ensaio em ligas de aço-silício

Como descrito no item 2.3, foram padronizadas duas condições para a realização de ensaios no recebimento das chapas de aço-silício: densidade máxima de fluxo magnético e frequência da tensão utilizada no ensaio. Além destas condições, devem ser definidas: a metodologia para aplicação do teste e as dimensões do corpo de prova. Os limites de perdas por unidade de massa de uma determinada chapa são referenciados a essas condições específicas e, dependendo do valor obtido para essas perdas, pode-se

definir, através de valores padronizados (um exemplo são os valores mostrados na tabela 1), se a chapa atende ou não ao respectivo padrão de qualidade.

No caso de determinação das perdas magnéticas, as condições normalmente utilizadas são [3; 4]:

- Método de ensaio: Aparelho de Epstein;
- Densidade máxima de fluxo magnético: 15 ou 17 kGauss;
- Frequência: 50 ou 60 Hz e
- Dimensões do corpo de prova: 3 x 50 cm.

Os valores das perdas obtidas nos ensaios, realizados conforme acima descrito, só são válidos em condições idênticas às citadas. Num estudo mais profundo das características magnéticas do aço-silício, devem ser consideradas tais limitações. Chapas com dimensões diferentes das dimensões dos corpos de prova, tem portanto valores de perdas magnéticas também diferentes. Tal fato se justifica, pois as influências do processamento nas qualidades magnéticas da chapa variam com as dimensões dos corpos de prova.

O aparelho de Epstein é composto basicamente de um conjunto de bobinas primárias e secundárias e um conjunto de medidores (tensão, corrente e potência), ligados conforme esquema mostrado na figura 6. O medidor de potência indica o valor da perda magnética e deve ser apropriado para dar leituras com baixo fator de potência.

Convencionou-se alimentar tal aparelho pelo seu enrolamento secundário, o que não implica em nenhuma alteração no comportamento, pois esse aparelho corresponde a um transformador monofásico com enrolamentos primário e secundário iguais (mesma seção transversal dos condutores e mesmo número de espiras).

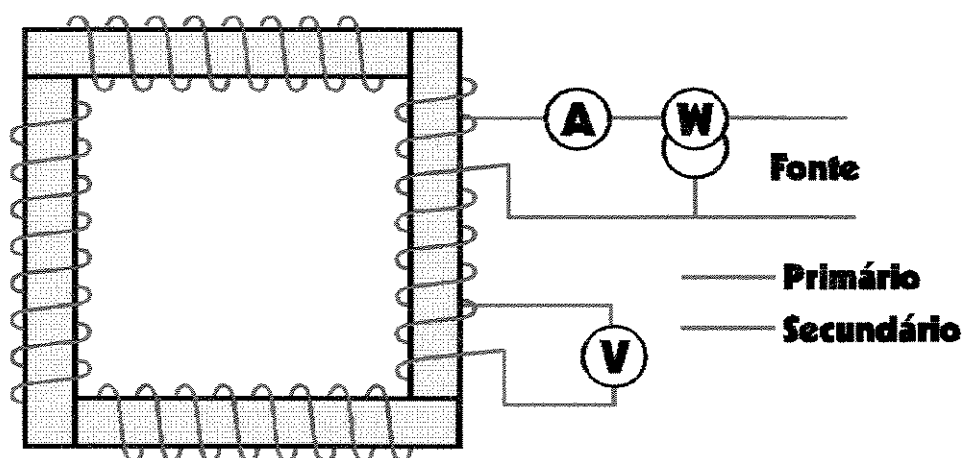


Figura 6: Esquema de ligação do aparelho de Epstein

2.6 Conclusão

Quando as chapas de aço-silício são magnetizadas, os domínios magnéticos invertem sua orientação granular com a alternância da corrente. O atrito entre os domínios, proveniente dessa alternância, causa perdas e elevação de temperatura no núcleo. Quando ocorrem falhas de isolamento entre as chapas e ou tensões mecânicas são aplicadas a essa chapa, esses efeitos (perdas e elevação de temperatura) são potencializados.

Verifica-se neste capítulo, que é importante preservar as características magnéticas das chapas e os cuidados necessários quando do seu processamento para a confecção do núcleo. A limitação de tensões mecânicas e a manutenção da integridade do seu isolamento superficial tem portanto um papel fundamental na preservação da qualidade magnética das chapas.

3. Considerações sobre o projeto de transformadores

Nesse capítulo, são detalhados alguns procedimentos de cálculo referentes ao projeto de transformadores de distribuição. São tratados apenas aspectos que influem ou que sejam influenciados pelo circuito magnético do transformador, não sendo considerados os fatores relativos a refrigeração, isolamento, esforços dinâmicos e tempo de operação.

Os transformadores tem como finalidade transferir energia elétrica entre dois ou mais circuitos, mantendo a mesma frequência e variando a tensão e a corrente elétrica. Como consequência dessa transferência de energia, resultam perdas[6]. As perdas em transformadores classificam-se basicamente em dois tipos: perdas por efeito joule nos enrolamentos e perdas magnéticas no núcleo.

Normalmente, o regime de funcionamento dos transformadores oscila entre operação com carga nominal e operação em vazio, sendo que na maior parte do tempo eles podem estar operando com uma carga muito reduzida. Diferentemente das perdas nos enrolamentos, que variam com o valor da carga, as perdas magnéticas no núcleo praticamente independem da carga aplicada ao transformador.

Considerando o exposto acima, e o fato de os transformadores estarem permanentemente energizados, evidencia-se a importância das perdas magnéticas restringirem-se a valores muito reduzidos, para que rendimentos melhores sejam obtidos com o equipamento operando em torno de aproximadamente 50% de sua carga nominal.

O projetista, além do custo indireto das perdas magnéticas, deve considerar na execução do projeto os custos referentes a matéria prima e ao processo de fabricação. A escolha dos valores apropriados para o chamado gradiente de projeto e densidade máxima de fluxo magnético constitui um fator vital para que o transformador tenha boa qualidade e custo baixo.

3.1 Cálculo do circuito magnético

A determinação da seção transversal no núcleo e do número de espiras do transformador depende do valor do gradiente de projeto.

A escolha do valor do gradiente de projeto E é resultante dos custos individuais dos materiais (principalmente o aço-silício, o cobre e o fluido isolante) utilizados na fabricação do equipamento. Já na escolha da indução, deve-se utilizar curvas características da chapa de aço-silício em sua forma final. Isto constitui uma das principais contribuições desse trabalho. No entanto, é preciso mencionar que é comum o uso das curvas mostradas nas figuras 1 a 4 nesta escolha, onde são utilizados fatores empíricos na correção das imprecisões relativas ao processamento. Mas é importante lembrar que este trabalho pretende mostrar que esta não é a melhor opção.

Definidos os valores do gradiente E e da densidade máxima de fluxo $B_{\text{máxima}}$, calculam-se:

A seção transversal do núcleo $S_{\text{núcleo}}$:

$$S_{\text{núcleo}} = \frac{\sqrt{2} E 10^5}{2\pi B_{\text{máxima}} f} \quad (\text{cm}^2) \quad (3.1)$$

O número de espiras N , para cada nível de tensão é dado por:

$$N = \frac{U}{E} \quad (3.2)$$

onde U é a tensão nominal em Volts. A densidade máxima de fluxo magnético $B_{\text{máxima}}$ é dada em kGauss; E é o gradiente de projeto em Volts por espiras e f é a frequência nominal em Hz.

Os transformadores de potência possuem em geral núcleos com seções transversais aproximadamente circulares.

A área de uma circunferência é calculada através da expressão:

$$A_{\text{circunferência}} = \frac{\pi \Phi n^2}{4} \quad (3.3)$$

onde Φ_n é o diâmetro da circunferência

A relação entre a seção magnética e a área de uma circunferência é o fator de utilização k_U , fator este que depende da quantidade de larguras diferentes que compõem a seção, conforme indicado na figura 7:

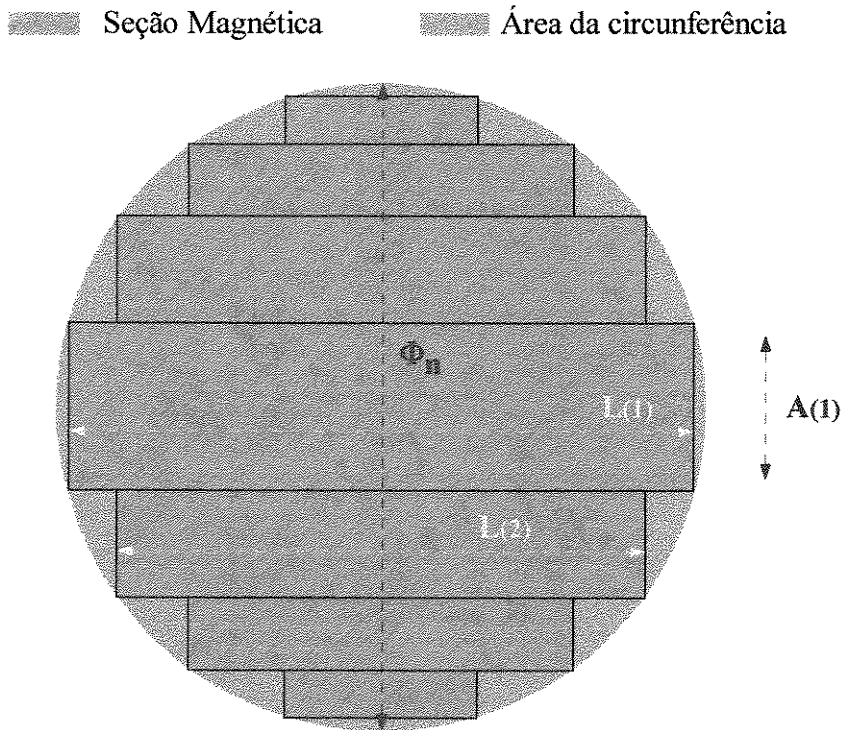


Figura 7: Relação entre seção magnética e área da circunferência

Para obtenção das larguras que proporcionam um maior aproveitamento da seção transversal do núcleo, é comum utilizar o seguinte procedimento de cálculo:

Define-se o número de estampos (chapas) com larguras diferentes Z e utilizando o valor dos ângulos $\delta(n)$ da tabela 2 dimensiona-se a largura da chapa $L(n)$ e a altura do degrau $A(n)$, através das equações (3.4) e (3.5):

$$L(n) = \Phi_n \cos \delta(n) \quad (3.4)$$

$$A(n) = \sqrt{\left(\frac{\Phi_n}{2}\right)^2 - \left(\frac{L(n)}{2}\right)^2} - A(n-1) \quad (3.5)$$

Lembrando que, para a equação (3.5), $A(0) = 0$

Tabela 2: Fator de utilização

k_U	Z	$\delta(1)$	$\delta(2)$	$\delta(3)$	$\delta(4)$	$\delta(5)$	$\delta(6)$	$\delta(7)$	$\delta(8)$	$\delta(9)$	$\delta(10)$
0,8510	3	25,09	45,00	64,91							
0,8860	4	21,05	37,34	52,66	68,92						
0,9079	5	18,29	32,25	45,00	57,75	71,71					
0,9228	6	16,28	28,59	39,64	50,36	61,41	73,72				
0,9337	7	14,76	25,85	35,70	45,00	54,30	64,15	75,24			
0,9419	8	13,54	23,61	32,51	40,89	49,11	57,49	66,39	76,50		
0,9483	9	12,50	21,83	29,99	37,61	45,00	52,39	60,01	68,17	77,50	
0,9534	10	11,66	20,34	27,91	34,92	41,67	48,33	55,08	62,09	69,66	78,34

O fator de empilhamento k_E , também conhecido como fator de empacotamento, é a relação obtida entre a seção magnética e a área resultante da justaposição das chapas de aço-silício devidamente isoladas. Este fator depende da planicidade da chapa e principalmente da espessura e uniformidade de seu revestimento isolante, conforme mostrado na figura 8:



Figura 8: Espessura de um pacote de chapas isoladas e justapostas

A seção transversal do núcleo (seção magnética) também pode ser representada em função da área da circunferência pela equação:

$$S_{\text{núcleo}} = k_U k_E A_{\text{circunferência}} \tag{3.6}$$

O diâmetro dos enrolamentos é proporcional ao diâmetro Φ_n dessa circunferência, que pode ser calculado substituindo-se a equação (3.3) na equação (3.6), que resulta na expressão:

$$\Phi_n = \sqrt{\frac{4 S_{\text{núcleo}}}{\pi k_U k_E}} \quad (\text{cm}) \quad (3.7)$$

Considerando-se uma dada seção magnética, quanto maiores forem os fatores de utilização e empilhamento, menor será o diâmetro da circunferência e, conseqüentemente, o diâmetro do enrolamento. Enrolamentos com diâmetros menores tem menor peso e portanto custo mais baixo. É importante lembrar que alterações no diâmetro dos enrolamentos provocam uma variação na quantidade de fluxo disperso (convencionou-se como fluxo disperso todo o conjunto de linhas de fluxo magnético que não atuam sobre os enrolamentos primário e secundário conjuntamente), o que ocasiona importantes mudanças nos parâmetros que compõem o circuito elétrico equivalente do transformador.

A limitação de tais fatores esta ligada aos processos de confecção dos núcleos magnéticos. Quanto maiores forem os fatores de utilização e empilhamento, mais complexos e trabalhosos serão os processos envolvidos na sua confecção.

O volume V de aço-silício também varia proporcionalmente com o diâmetro da circunferência, o qual deve ser calculado descontando-se, obviamente, os fatores de empilhamento e utilização.

As perdas magnéticas do núcleo W_o , dependem da indução magnética máxima a que este é submetido, das propriedades magnéticas das ligas de aço-silício, das características construtivas e do volume do núcleo. Equaciona-se o exposto na forma da expressão:

$$W_o = k_o V B_{\text{máximo}}^n \quad (\text{Watts}) \quad (3.8)$$

onde k_o e n representam tanto as propriedades magnéticas das ligas de aço-silício após seu processamento e quanto as características construtivas do núcleo.

3.2 Outras considerações de projeto

Todo esse conjunto de variáveis, somado às volúveis condições de mercado, torna indispensável um profundo e continuado acompanhamento da evolução dos processos, materiais e ligas utilizados na fabricação de núcleos.

Além do anteriormente exposto, deve-se considerar, nos projetos de transformadores de distribuição, alguns outros fatores que também influenciam em seu custo e desempenho, tais como: altitude, temperatura ambiente, umidade, ventilação, características de carregamento, normas locais, custo local da energia, tipos de proteção, agressores naturais e a arquitetura da rede de distribuição. Estes fatores são de fundamental importância na concepção do projeto, principalmente no que se refere ao formato, isolamento e dimensionamento dos enrolamentos.

Sabe-se também que as dimensões dos enrolamentos influenciam o valor do volume do material magnético e, conseqüentemente, o valor das perdas magnéticas no núcleo. Portanto o projeto do enrolamento deve ser adequado às características do núcleo.

Os condutores que formam os enrolamentos são constituídos geralmente de cobre eletrolítico trefilado sem rebarbas e com os cantos arredondados (o que reduz ao mínimo a concentração de tensões). Podem também possuir seção circular. O isolamento desses condutores é feito através de capas de papel ou através de esmalte (vernizes). Entre os enrolamentos são colocadas barreiras de papelão ou material adequado para isolamento.

Os transformadores devem ser projetados e construídos para suportar, sem danos, os efeitos térmicos e dinâmicos de curtos-circuitos externos, nas condições especificadas em norma (NBR-5356).

As condições de carregamento a que será submetido o transformador devem ser levadas em consideração quando do seu projeto. A carga equivalente C_E aplicada em um transformador pode ser calculada de acordo com a expressão (3.9):

$$C_E = \sqrt{\frac{S_1^2 t_1 + S_2^2 t_2 + S_3^2 t_3 + \dots + S_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} \quad (3.9)$$

onde: S_1 , S_2 , S_3 e etc. são os vários degraus de carga e t_1 , t_2 , t_3 e etc. representam a duração respectivas dessas cargas.

Sugere-se intervalo de uma hora para a aplicação da equação [7].

As condições de carga aplicada a um transformador são também normalizadas (NBR 5416).

3.3 Processos para confecção de núcleos para transformadores

Na fabricação de transformadores de distribuição, dá-se especial atenção ao circuito magnético, devido a característica desses equipamentos em geral apresentarem rendimentos máximos na condição de meia carga, o que exige baixas perdas magnéticas. Conforme mostra a figura 9, as chapas magnéticas chegam à fábrica na forma de bobinas em larguras padrão, são testadas e, se estiverem de acordo com a norma, são armazenadas em locais de baixa umidade, em ambiente que não possua agentes agressivos, para que se evite sua deterioração. O tamanho da pilha e posição de armazenagem são fatores importantes para que chapa não fique exposta a elevadas tensões mecânicas.

Geralmente a chapa é cortada primeiramente no sentido longitudinal, onde as bobinas são processadas em tiras na forma de rolos, nas larguras utilizadas para compor a seção transversal do núcleo, conforme já mostrado na figura 7. As tiras são recortadas, e posteriormente empilhadas e esquadrihadas na posição horizontal, dando formato ao núcleo.

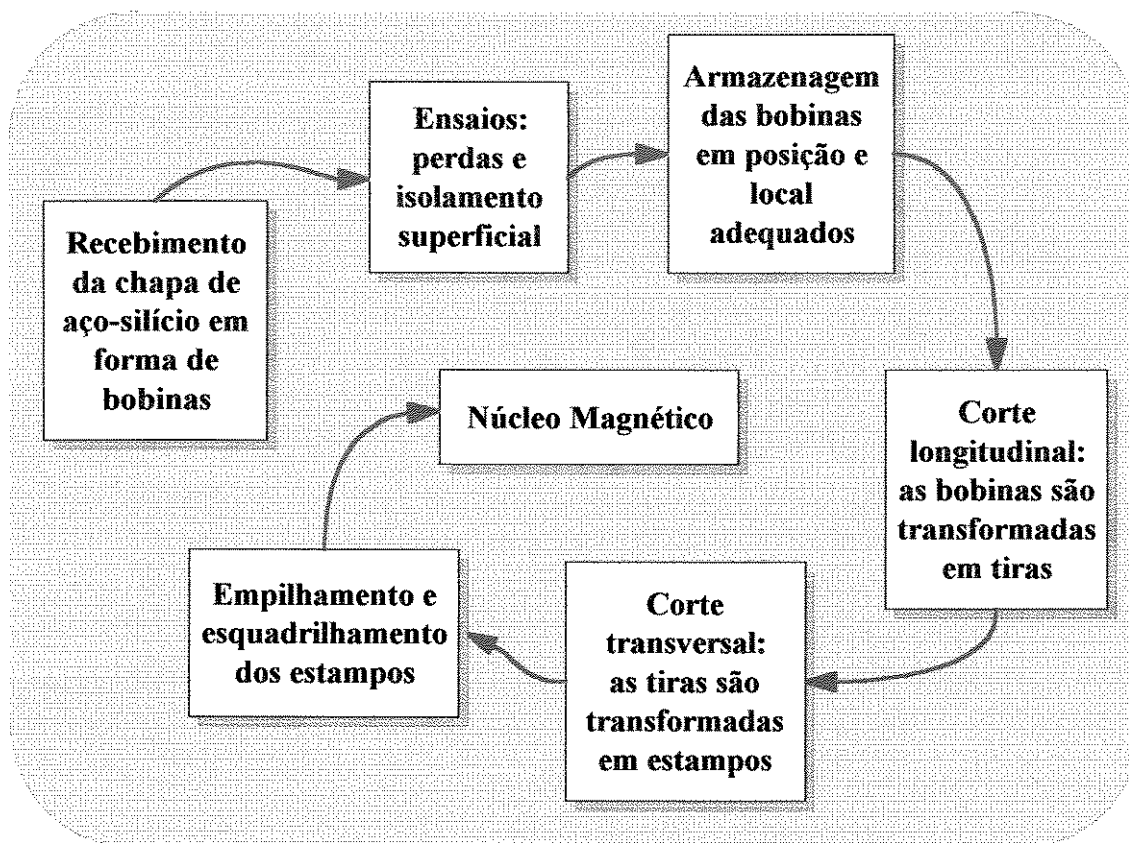


Figura 9: Processos envolvidos na confecção do núcleo magnético

Na montagem do núcleo deve-se dar atenção ao sentido de laminação da chapa, pois como se sabe, no processo metalúrgico de fabricação das chapas, principalmente as de grânulos orientados, há etapas de laminação à frio (*laminador Sedzimir*), conforme já mostrado na figura 5, que fazem aparecer uma elevada anisotropia cristalina. Há um sentido preferencial de magnetização, o que ocasiona um aumento consideravelmente grande nas perdas e na corrente de excitação, quando o fluxo não tem o mesmo sentido da laminação. Antes do deslocamento para a posição vertical, o núcleo deve ser firmemente amarrado, evitando o aumento do enterferro e o deslocamento das larguras menores no momento da sua inclinação.

4. Procedimentos de ensaio

Ensaio do material magnético, que são usualmente realizados nas indústrias de transformadores para conferir as características das chapas, conforme exposto no item 2.5, não avaliam os processos a que estes são submetidos posteriormente porque são aplicados a amostras do material, quando do seu recebimento na indústria. Já o ensaio proposto neste trabalho difere significativamente dos usuais e será demonstrado que é bem mais adequado que aqueles.

A metodologia proposta neste trabalho é aplicada em quatro fases distintas, durante duas etapas da produção do equipamento, como mostra o fluxograma da Figura 10. Esta é a diferença fundamental a que já se fez referência.

A quantidade e diversidade de transformadores ensaiados através da metodologia proposta permitirá introduzir modificações ao processamento do material, quando da confecção do núcleo, resultando em economia de recursos e melhoria da qualidade do produto. Além disso, será uma importante ferramenta para o refinamento dos procedimentos de cálculo, conferindo a estes uma maior precisão e segurança.

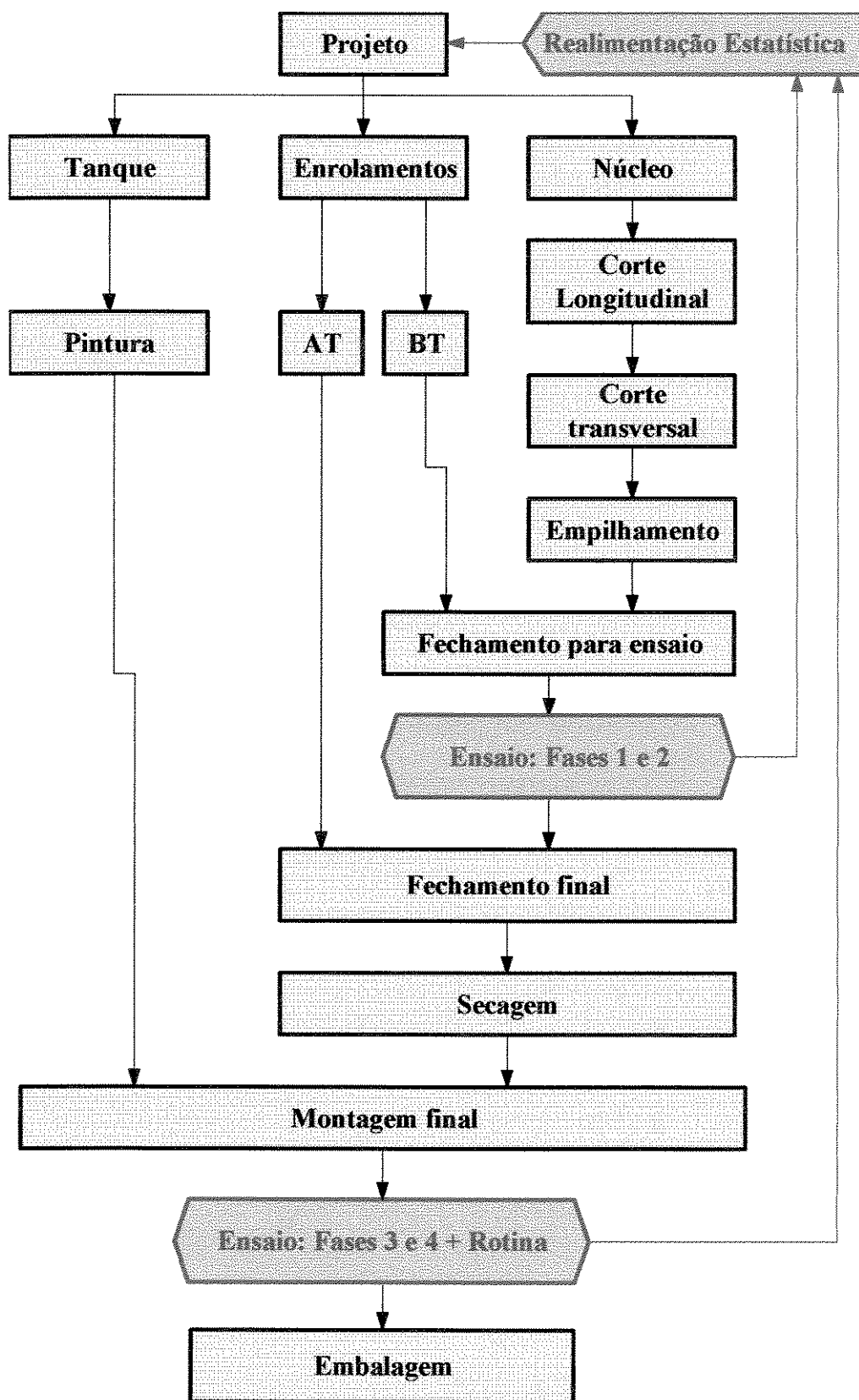


Figura 10: Etapas de produção do equipamento

4.1 Descrição das etapas do ensaio proposto

Fase 1: Logo ao término da construção do núcleo e do enrolamento de baixa tensão, ligam-se as pontas desse enrolamento, conforme o esquema de ligação. Uma fonte variável de tensão alternada, com forma de onda senoidal, na frequência nominal, é utilizada para elevar gradativamente o valor da tensão até 110 % da tensão nominal. Mede-se, então, os valores das perdas e corrente de excitação para 9 valores de tensão compreendidos entre 90 e 110 % da tensão nominal.

Fase 2: Mede-se, a seguir, os valores das perdas e corrente de excitação, para outros 9 valores de tensão de mesmas densidades máximas de fluxo magnético da fase 1, porém com uma frequência diferente da nominal.

Nas fases 1 e 2, o equipamento é ensaiado sem fluido isolante e, por isso, deve estar desprovido dos enrolamentos de alta tensão, o qual é geralmente dimensionado para operação imerso em fluido isolante. A figura 11 apresenta o esquema de ligação correspondente a estas duas fases iniciais do processo.

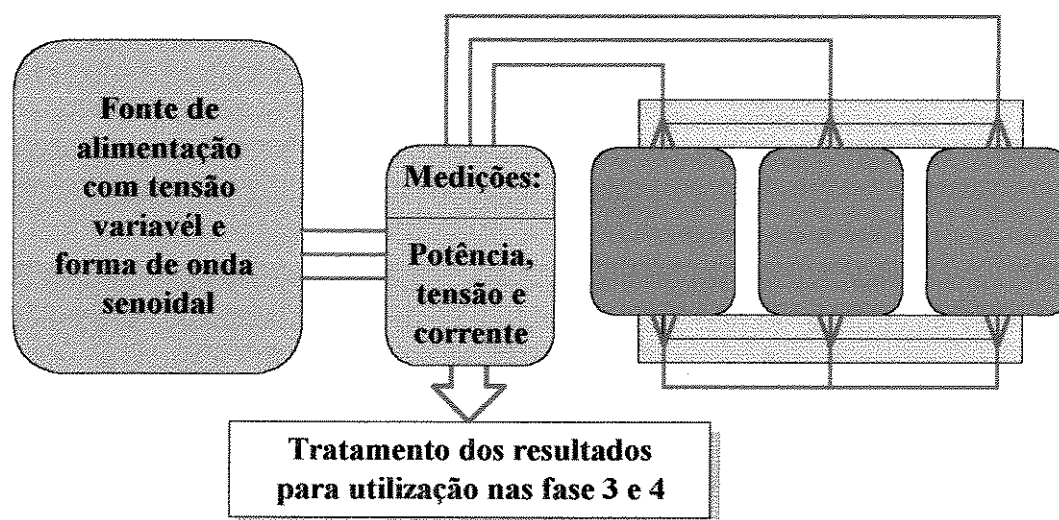


Figura 11: Esquema de medições para as fases 1 e 2

Fase 3: Terminada a construção do equipamento, em meio aos ensaios de rotina, com auxílio de uma fonte variável de tensão alternada, com forma de onda senoidal, na frequência nominal, deve se elevar gradativamente o valor da tensão aplicada

entre os terminais de baixa tensão, até 110 % da tensão nominal . Mede-se então os valores das perdas e corrente de excitação, para 9 valores de tensão compreendidos entre 90 e 110 % da tensão nominal.

Fase 4: Terminada a fase 3, deve-se medir os valores das perdas e corrente de excitação para outros 9 valores de tensão de mesmas densidades máximas de fluxo magnético da fase anterior, porém com frequência diferente da nominal.

Iniciam-se as medições sempre pela tensão correspondente ao maior valor de densidade de fluxo magnético. O esquema de medição destas duas últimas fases está apresentado na figura 12:

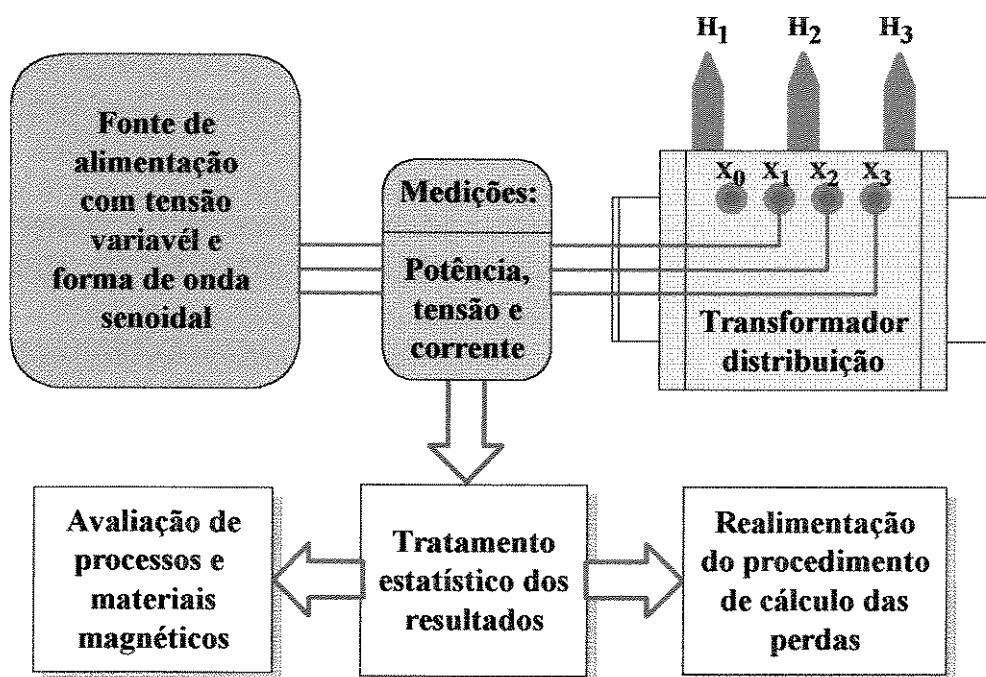


Figura 12: Esquema de medições para as fases 3 e 4

4.2 Tratamento dos resultados experimentais

Ensaia-se uma certa quantidade de transformadores, inclusive com potências nominais distintas, os resultados obtidos precisam ser devidamente processados e examinados para se chegar a alguma conclusão a respeito dos mesmos.

Para cada valor de tensão e em cada uma das fases do ensaio, são calculados os respectivos valores de:

- Potência de excitação;
- Densidade máxima de fluxo magnético
- Fator de potência;
- Componente de perdas da corrente de excitação;
- Componente de magnetização da corrente de excitação;
- Perdas relacionadas com efeitos de histerese e
- Perdas relacionadas com os efeitos das correntes de Foucault.

De acordo com teoria eletromagnética clássica, as perdas podem ser compostas de vários tipos de componentes.

Em primeira aproximação, as perdas magnéticas W_o no transformador podem ser escritas, considerando a sua dependência com a frequência, como mostrado na equação (4.1) [8].

$$W_o = W_{\text{Histerese}} + W_{\text{Foucault}} = \Delta_{\text{Histerese}} f + \Delta_{\text{Foucault}} f^2 \quad (4.1)$$

As grandezas $\Delta_{\text{Histerese}}$ e Δ_{Foucault} são fatores que caracterizam as perdas por histerese e Foucault, respectivamente. Para determiná-los, executa-se o ensaio com duas frequências distintas (usualmente, 50 e 60 Hz) medindo-se, para cada valor de densidade máxima de fluxo magnético, os valores da perda magnética para ambas as frequências.

A opção pelas frequências de 50 e 60 Hz é motivada devido a maioria dos laboratórios estarem equipados para medições em ambas as frequências. Também justifica tal escolha a necessidade do estudo aproximar-se das condições de operação dos

equipamentos, haja visto que o mercado sul-americano requer transformadores nas citadas frequências.

Substituindo-se cada medida, para respectiva frequência, na equação (4.1), obtêm-se:

$$W_{60\text{Hz}} = \Delta_{\text{Histerese}} 60 + \Delta_{\text{Foucault}} 60^2 \quad (4.2)$$

$$W_{50\text{Hz}} = \Delta_{\text{Histerese}} 50 + \Delta_{\text{Foucault}} 50^2 \quad (4.3)$$

Do sistema acima obtêm-se:

$$\Delta_{\text{Histerese}} = \frac{3 W_{50\text{Hz}}}{25} - \frac{W_{60\text{Hz}}}{12} \quad (4.4)$$

$$\Delta_{\text{Foucault}} = \frac{W_{60\text{Hz}}}{600} - \frac{W_{50\text{Hz}}}{500} \quad (4.5)$$

em que $W_{50\text{Hz}}$ e $W_{60\text{Hz}}$ são respectivamente as perdas em vazio na frequência indicada.

Os fatores $\Delta_{\text{Histerese}}$ e Δ_{Foucault} são utilizados nos cálculos das perdas.

A caracterização das perdas é mostrada nas equações (4.6) a (4.8):

$$W_{\text{histerese}} = \Delta_{\text{Histerese}} f = \left(\frac{3 W_{50\text{Hz}}}{25} - \frac{W_{60\text{Hz}}}{12} \right) f \quad (4.6)$$

$$W_{\text{foucault}} = \Delta_{\text{Foucault}} f^2 = \left(\frac{W_{60\text{Hz}}}{600} - \frac{W_{50\text{Hz}}}{500} \right) f^2 \quad (4.7)$$

$$W_o = \left(\frac{3 W_{50\text{Hz}}}{25} - \frac{W_{60\text{Hz}}}{12} \right) f + \left(\frac{W_{60\text{Hz}}}{600} - \frac{W_{50\text{Hz}}}{500} \right) f^2 \quad (4.8)$$

Caracterizadas e calculadas as perdas magnéticas para cada valor de densidade máxima de fluxo magnético, deve-se, a partir das curvas obtidas para cada condição, obter as equações que representam as mesmas. Estas equações são de inquestionável utilidade no refinamento dos processos de fabricação e no procedimento de cálculo do circuito magnético, minimizando muito a margem de erro, ou seja, a diferença entre o valor real e o valor esperado. A equação (4.9) tem demonstrado ser a mais adequada na representação das perdas magnéticas por unidade de massa [9].

$$W_o = k_o B_{\text{máximo}}^n \quad (4.9)$$

onde k_o e n são valores calculados para cada fase do ensaio, conforme mostram as equações (4.10) a (4.13):

$$x = \log B_{\text{máximo}} \quad (4.10)$$

$$y = \log W_o \quad (4.11)$$

$$n = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad (4.12)$$

$$\log k_o = \bar{y} - n \bar{x} \quad (4.13)$$

onde W_o é a perda por unidade de massa e $B_{\text{máximo}}$ é a densidade máxima de fluxo magnético.

Nos cálculos das perdas relacionadas com as correntes de Foucault, das perdas relacionadas com os efeitos de histerese e das componentes da corrente de excitação não são consideradas as resistências dos enrolamentos e a parcela de fluxo que é dispersa.

Através do exposto acima, pode-se analisar o comportamento do material magnético do qual é constituído o núcleo do transformador ensaiado, para diferentes valores de indução magnética, nas duas etapas do processo produtivo. As curvas e equações obtidas em cada amostra devem ser devidamente tratadas estatisticamente, pois elas constituem a principal ferramenta na análise do material e processos de fabricação a que este está sujeito.

5. Aplicação do ensaio na indústria de transformadores

Com o intuito de demonstrar as vantagens da utilização do método proposto, um conjunto de transformadores fabricados por uma conceituada empresa do ramo foi selecionado para ser submetido aos ensaios propostos neste trabalho. Todos esses transformadores sob ensaio foram construídos em série, com características idênticas de projeto e sob as mesmas condições de fabricação [10]. As principais características do conjunto de transformadores sob ensaio são:

- Potência nominal: 45 kVA;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Método de resfriamento: ONAN;
- Tensão máxima do equipamento: 15 kV;
- Tensão primária: 13800 V, com taps para religação;
- Tensão secundária: 380 V;
- Ligação: Dyn1 (primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela);
- Material magnético: chapa de aço-silício de grãos orientados, tipo E0047 (correspondente ao M4 da AISI), fabricado pela ACESITA;
- Formato do núcleo: plano com três colunas de seção transversal aproximadamente circular;
- Formato dos enrolamentos: bobinas circulares e concêntricas;
- Material condutor: cobre eletrolítico isolado com papel no secundário e esmalte no primário;
- Perdas magnéticas máximas: 260 W, conforme norma NBR 5440 da ABNT;
- Corrente de excitação máxima: 3,9 % da corrente nominal, conforme norma NBR 5440 e

- Nível médio de ruído: 48db, em condições nominais.

Com a finalidade de sempre obter valores confiáveis e ao mesmo tempo representativos dos fenômenos sob estudo, foram mantidas as mesmas condições de ensaio para todos os equipamento sob teste, tais como:

- Fonte de alimentação: com tensão alternada variável e com forma de onda senoidal;
- Medidores: para tensão, corrente e potência, apropriados para leituras com baixo fator de potência;
- Ambiente de teste: com umidade e temperaturas controladas [11], conforme procedimento usual nos melhores laboratórios;
- Condutores e conexões: de perdas baixas.

Como já mostrado no capítulo 4, este ensaio é realizado em quatro fases durante duas etapas do processo de fabricação de transformadores. A primeira fase é a iniciada logo ao término da construção do núcleo e do enrolamento de baixa tensão, onde ambos são acoplados, ligando-se as pontas desse enrolamento em estrela. Através da fonte variável de tensão alternada, com 60 Hz, eleva-se a tensão aplicada às extremidades da estrela até 420 V, que é a tensão correspondente ao maior valor de densidade máxima de fluxo magnético. Mede-se, então, os valores das perdas e corrente de excitação para 9 valores de tensão compreendidos entre 340 e 420 V, conforme é mostrado na tabela 3.

Mede-se, a seguir, os valores das perdas e corrente de excitação, para os 9 valores de tensão correspondentes às mesmas densidades máximas de fluxo magnético da fase 1, porém com uma frequência de 50 Hz. Os valores calculados para as tensões em 50 Hz a serem empregados na fase seguinte são apresentados na tabela 4, juntamente com aqueles que foram utilizados para o teste em 60 Hz.

Tabela 3: Medições na Fase 1

Tensão	Corrente	Perdas
Volts	Amperes	Watts
340,0	1,39	156,1
350,0	1,60	171,5
360,0	1,85	188,0
370,0	2,18	205,4
380,0	2,54	224,0
390,0	3,03	243,7
400,0	3,65	264,5
410,0	4,36	286,6
420,0	5,27	310,0

Tabela 4: Equivalência de tensão em 60 e 50 Hz para a mesma densidade máxima de fluxo

Indução	Tensão em 60 Hz	Tensão em 50 Hz
kGauss	Volts	Volts
15,5	340,0	283,3
15,9	350,0	291,6
16,4	360,0	300,0
16,8	370,0	308,3
17,3	380,0	316,6
17,7	390,0	325,0
18,2	400,0	333,3
18,7	410,0	341,6
19,1	420,0	350,0

Os resultados das medições de corrente e potência da fase 2 estão apresentados na tabela 5:

Tabela 5: Medições na Fase 2

Tensão	Corrente	Perdas
Volts	Amperes	Watts
283,3	1,37	119,9
291,6	1,58	132,6
300,0	1,84	146,4
308,3	2,15	161,0
316,6	2,54	176,7
325,0	3,01	193,6
333,3	3,64	211,4
341,6	4,37	230,4
350,0	5,42	250,7

Terminada as medições referentes às fases 1 e 2, o equipamento volta à linha de produção, para conclusão de sua montagem. Numa etapa posterior (fase 3), em meio aos ensaios de rotina, deve-se, através de uma fonte de tensão variável, elevar gradativamente o valor da tensão aplicada entre os terminais de baixa tensão, até que seu valor atinja os mesmos 420 V, na frequência de 60 Hz, da fase 1. Mede-se então os valores das perdas e corrente de excitação, para 9 valores de tensão compreendidos entre 340 e 420 V, conforme está mostrado na tabela 6.

Concluídas as medições referentes à fase 3, inicia-se a fase 4 na qual deve-se medir os valores das perdas e corrente de excitação para outros 9 valores de tensão de mesmas densidades máximas de fluxo magnético da fase anterior, porém com frequência de 50 Hz, conforme já mostrado na tabela 4.

Tabela 6: Medições na Fase 3

Tensão	Corrente	Perdas
Volts	Amperes	Watts
340,0	1,01	137,7
350,0	1,20	151,4
360,0	1,44	166,1
370,0	1,73	181,6
380,0	2,08	198,1
390,0	2,55	215,8
400,0	3,15	234,3
410,0	3,83	254,0
420,0	4,82	274,9

Os valores obtidos na fase 4 são mostrados na tabela 7:

Tabela 7: Medições na Fase 4

Tensão	Corrente	Perdas
Volts	Amperes	Watts
283,3	1,06	104,4
291,6	1,25	115,7
300,0	1,48	127,7
308,3	1,76	140,6
316,6	2,11	154,5
325,0	2,58	169,3
333,3	3,19	185,1
341,6	3,96	201,8
350,0	4,99	219,8

É importante salientar que os valores compreendidos nas tabelas 3, 5, 6 e 7 são os valores médios obtidos do conjunto de transformadores sob ensaio. Portanto todas as curvas e valores calculados a partir destes são considerados também valores médios, na análises expostas nos capítulos seguintes.

6. Análise de resultados da aplicação da metodologia proposta

É conveniente, antes da análise dos valores experimentais obtidos no capítulo 5, proceder inicialmente uma análise, nos mesmos moldes do ensaio a que se submeteram os equipamentos, sobre as curvas e tabelas características fornecidas pelos fabricantes de chapa de aço-silício, com a finalidade de obter-se valores de referência e tornar mais criteriosa as comparações.

6.1 Metodologia aplicada às curvas características das ligas de aço-silício

A partir das curvas de perdas magnéticas extraídas dos catálogos e mostradas nas figuras 1 e 3, referentes à chapa de aço-silício GO M4 e M5 respectivamente, calculam-se as componentes das perdas relacionadas com efeitos de histerese e perdas relacionadas com os efeitos das correntes de Foucault, para valores de indução magnética compreendidos no intervalo de 10 a 19 kGauss. Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos das figuras 13 e 14:

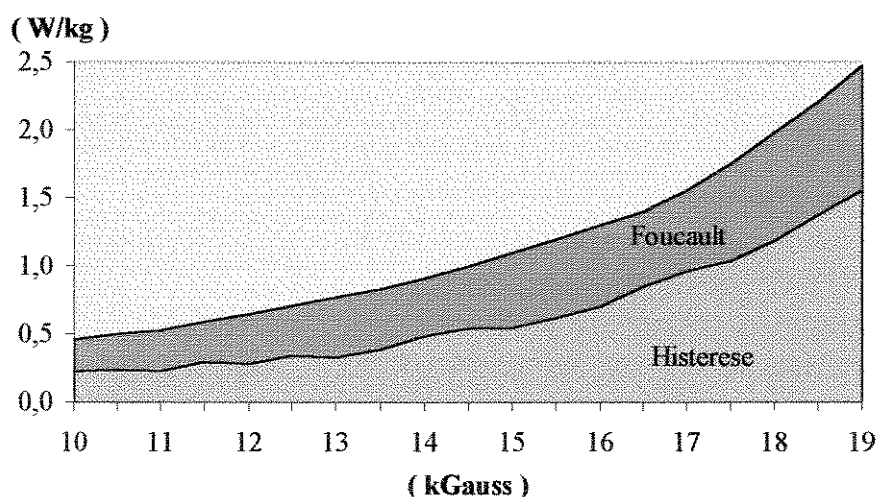


Figura 13: Caracterização das perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo (GO M4)

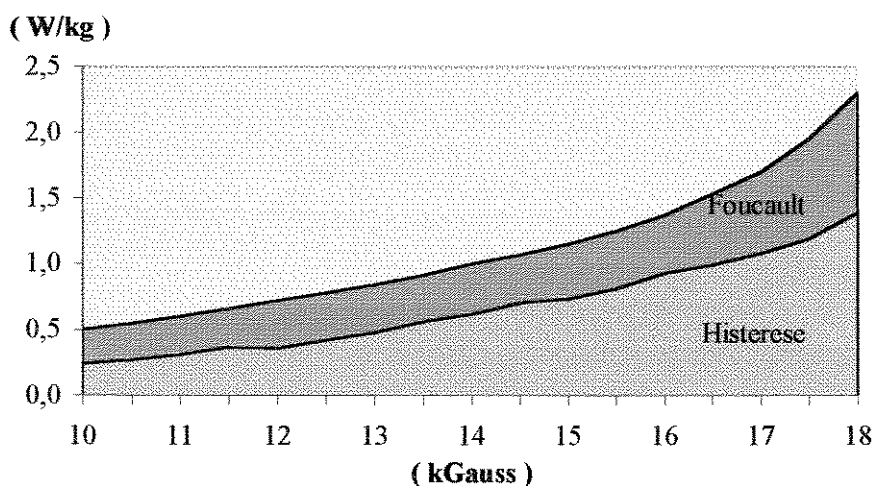


Figura 14: Caracterização das perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo (GO M5)

6.2 Análise da aplicação da metodologia aos transformadores

Os resultados experimentais correspondentes ao conjunto de transformadores de 45 kVA, obtidos no capítulo 5, são agora analisados:

Para cada valor de tensão (tabela 3) e em cada uma das fases do ensaio, são calculados os respectivos valores de:

- Densidade máxima de fluxo magnético;
- Potência de excitação;
- Fator de potência;
- Perdas relacionadas com efeitos de histerese;
- Perdas relacionadas com os efeitos das correntes de Foucault;
- Componente de perdas da corrente de excitação e
- Componente de magnetização da corrente de excitação.

A partir das medições dos valores de perdas magnéticas das fases 1 e 2, pode-se caracterizar aproximadamente as perdas relacionadas aos efeitos da correntes de

Foucault e as perdas relacionadas com os fenômenos da histerese, para o equipamento constituído apenas de núcleo e secundário. Este procedimento é detalhado no item 4.2, onde, a partir das perdas magnéticas obtidas para as frequências de 60 e 50 Hz, calculam-se os fatores que caracterizam as respectivas perdas magnéticas. Repete-se tal procedimento para os 9 valores de densidade máxima de fluxo magnético calculados e expostos na tabela 3.

A caracterização das perdas magnéticas relacionadas aos efeitos das correntes de Foucault e da histerese conjuntamente, para o transformador semi-acabado, é exposta na forma gráfica mostrada na figura 15:

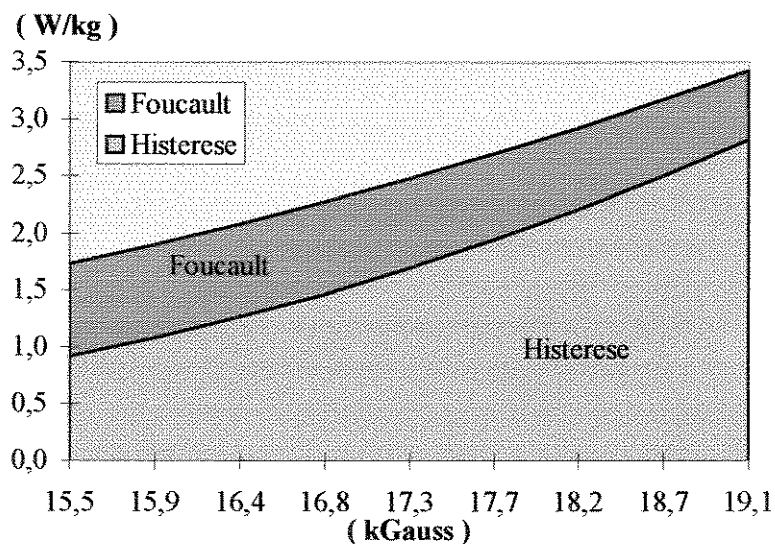


Figura 15 Caracterização das perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo (montados apenas: núcleo + baixa tensão)

Utilizando-se agora os valores de perdas magnéticas das fases 3 e 4, com o transformador acabado, podemos caracterizar aproximadamente estas mesmas perdas para a nova situação. Este procedimento, como já descrito, é detalhado no item 4.2. O comportamento resultante da caracterização das respectivas perdas magnéticas, para o transformador em sua forma final, é exposto na forma do gráfico mostrado na figura 16:

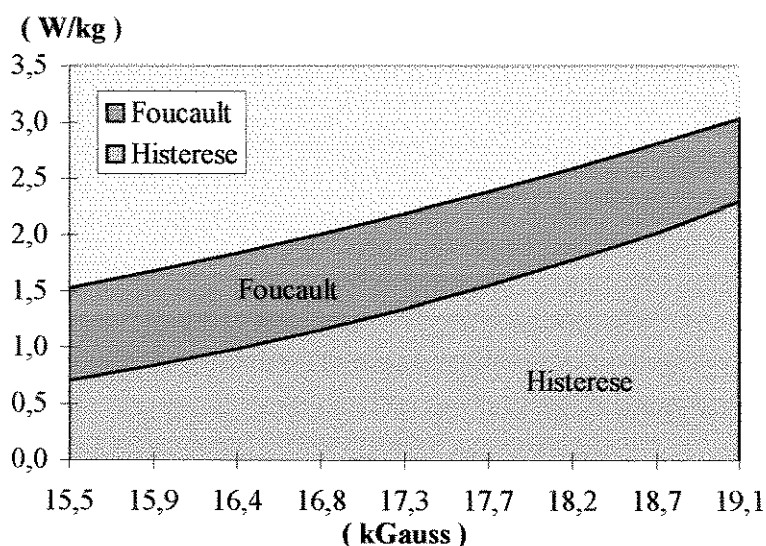


Figura 16: Caracterização das perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo (montagem do transformador concluída)

Comparando-se os gráficos das figuras 15 e 16, pode-se notar que o comportamento das perdas relacionadas com os fenômenos da histerese, para o transformador acabado (figura 16), é menor em aproximadamente 30 %, se comparado ao comportamento do mesmo quando semi-acabado (núcleo + baixa tensão), mostrado na figura 15. Tal diferença de comportamento se explica pelo fato de o transformador acabado ter o núcleo mais uniformemente apertado e, conseqüentemente, ocasionando entreferros menores, quando comparados aos do equipamento numa etapa intermediária de fabricação (núcleo + baixa tensão).

Já as perdas relacionadas aos efeitos das correntes de Foucault apresentam um comportamento oposto, ou seja, há um pequeno acréscimo dessa perdas no transformador, quando em sua forma final, comparado ao estágio intermediário, onde o mesmo é constituído apenas núcleo e baixa tensão. Este fato se explica, pois um aperto mais uniforme no núcleo reduz o valor da resistência interlamear, aumentando conseqüentemente o valor das correntes de Foucault, que circulam no núcleo.

A componente resultante das perdas magnéticas consideradas conjuntamente para ambas as frequências, quando o transformador encontra-se acabado, tem seu valor reduzido a cerca de 80 a 90 % do valor das perdas para equipamento semi-acabado, conforme vem mostrar o gráfico da figura 17:

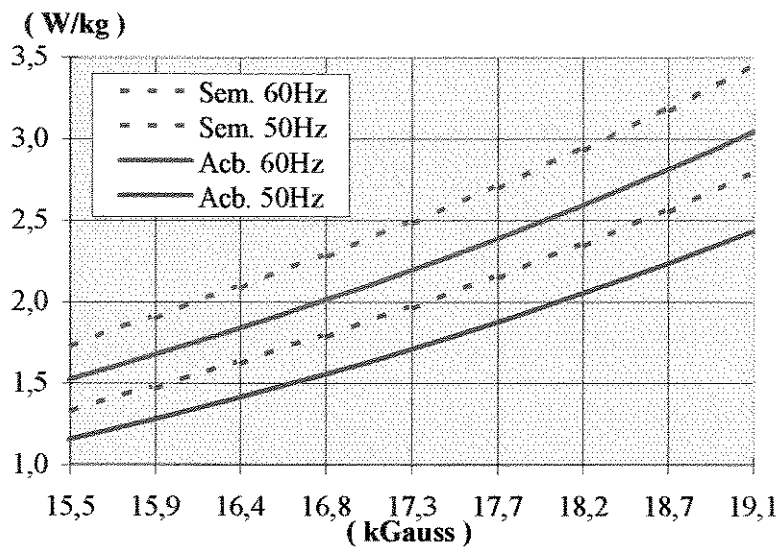


Figura 17: Comportamento das perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo

Sabe-se que o comportamento das perdas magnéticas no núcleo de um transformador varia com a frequência da tensão aplicada ao mesmo, ou seja, frequências maiores ocasionam perdas maiores. Nesta aplicação, as perdas em 60 Hz são maiores em aproximadamente 25 % das perdas em 50 Hz. Essa variação pode ser notada no gráfico da figura 17, onde são comparadas as perdas para as frequências de 50 e 60 Hz.

Outra característica importante a ser calculada, nas duas frequências de ensaio, é a potência de excitação do equipamento, a qual também varia com a frequência. A potência de excitação, quando o transformador encontra-se acabado, tem seu valor reduzido a cerca de 80 a 90 % do valor da potência de excitação do equipamento semi-acabado, conforme vem mostrar o gráfico da figura 18:

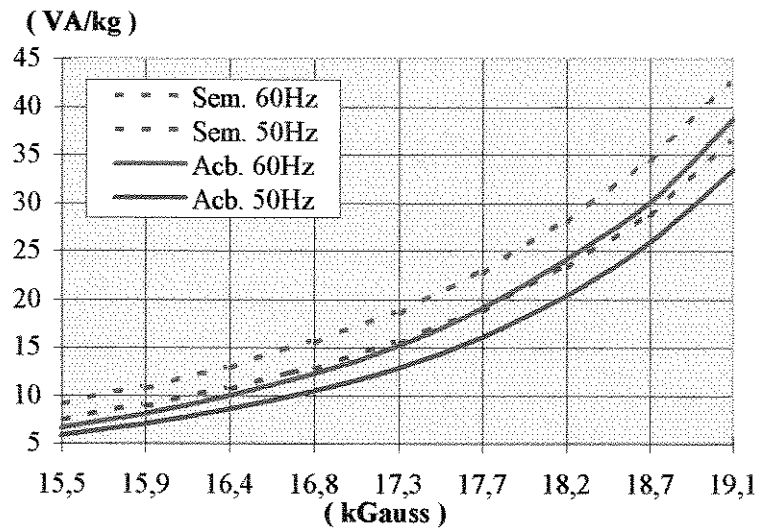


Figura 18: Comportamento da potência de excitação em função da densidade máxima de fluxo

Como é conhecido, a corrente de excitação de um transformador pode ser decomposta em duas componentes ortogonais entre si. Uma componente de magnetização representa a corrente responsável pela manutenção do fluxo magnético no núcleo, e a componente de perdas representa a potência dissipada na forma de calor no núcleo.

A componente de perdas tem um comportamento aproximado ao das perdas magnéticas, como mostra o gráfico da figura 19:

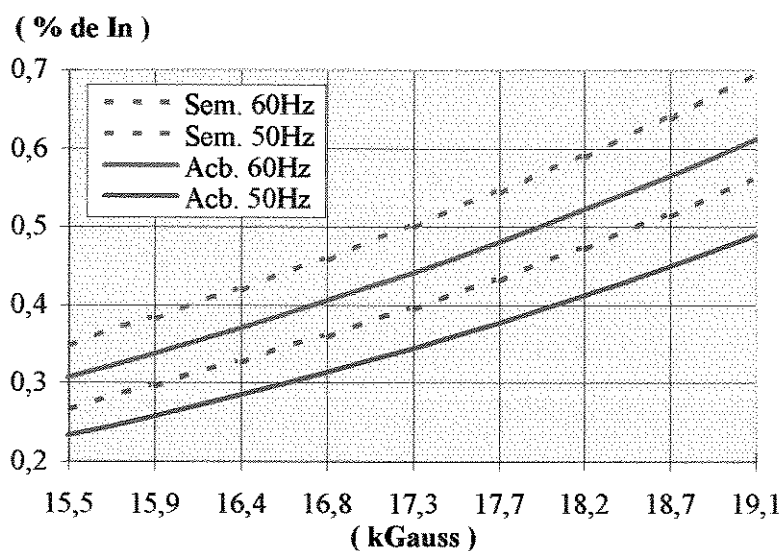


Figura 19: Componente de perdas da corrente de excitação em função da densidade máxima de fluxo

Como é mostrado no gráfico da figura 20, é bem mais acentuada a diferença no comportamento da componente de magnetização da corrente de excitação entre as duas situações, transformador acabado e composto apenas de núcleo e secundário. Isto acontece porque o tamanho e a uniformidade do entreferro afetam diretamente este componente, ou seja entreferros menores ocasionam componentes de magnetização com valores menores.

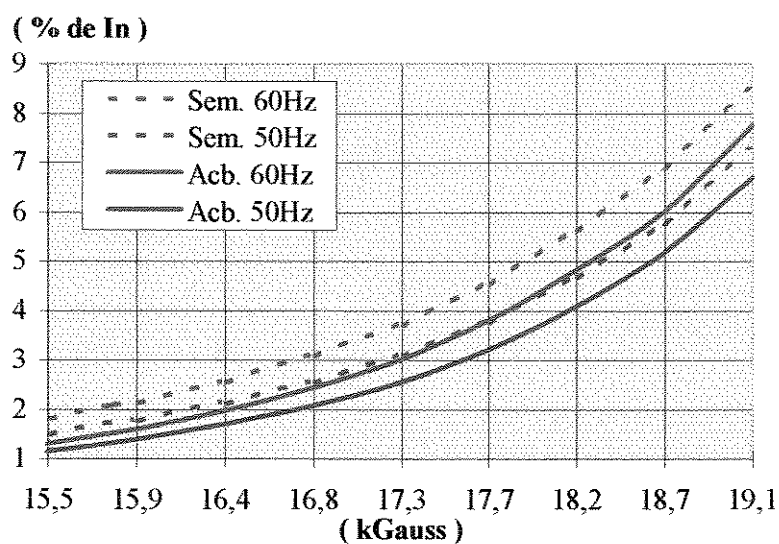


Figura 20: Componente de magnetização da corrente de excitação em função da densidade máxima de fluxo

O gráfico da figura 21 mostra o comportamento das componentes da corrente de excitação obtidas através das medições da fase 3 do ensaio (transformador acabado e 60 Hz de frequência). Observa-se no referido gráfico, que a componente de magnetização possui uma maior variação com a densidade máxima de fluxo do que a componente de perdas.

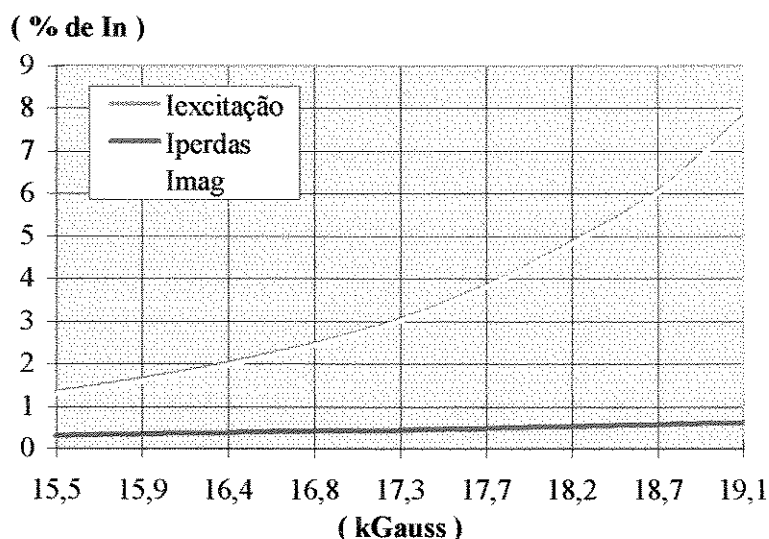


Figura 21: Decomposição da corrente de excitação em função da densidade máxima de fluxo, referente a fase 3 do ensaio

As curvas expostas neste capítulo representam uma imagem fiel do comportamento do material magnético usado na construção do núcleo de um transformador de características idênticas ao do conjunto ensaiado. É importante aumentar a diversidade de tipos de transformadores a serem ensaiados para que possam ser levantadas as curvas características médias, para possibilitar uma análise global do material magnético sob teste e dos processos produtivos dessa fábrica.

6.3 Análise da metodologia aplicada a diferentes conjuntos

Procedendo-se uma análise sobre o comportamento de alguns conjuntos de transformadores ensaiados, com potências diferentes, nota-se que, decorrente das semelhanças no comportamento, é possível levantar curvas e calcular valores que representem o comportamento médio desses conjuntos. Um exemplo é mostrado na figura 22, onde as perdas magnéticas por unidade de massa são comparadas, para três conjuntos de potências diferentes.

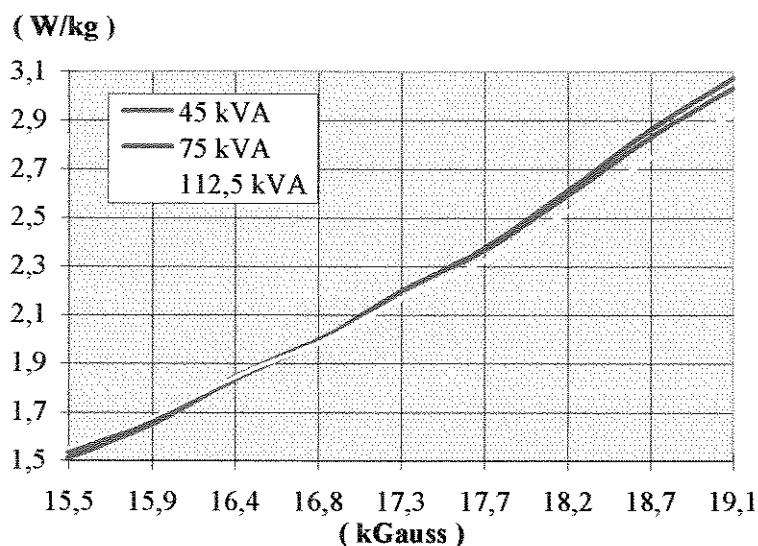


Figura 22: Comparativo das perdas de três conjuntos.

Pode-se, através das curvas mostradas na figura 22, obter os fatores k_0 e n , úteis no refinamento do procedimento de cálculo do circuito magnético. Isto é feito através da aplicação da equação (4.9), obtendo-se, finalmente: $k_0 = 1,9 \cdot 10^{-4}$ e $n = 3,3$

6.4 Análise dos resultados de um ensaio comparativo

Para, mais uma vez, salientar a importância da metodologia proposta, foram ainda ensaiados dois transformadores trifásicos de distribuição T_1 e T_2 que utilizam o mesmo tipo de chapa magnética (GO-M5), com características iguais de projeto, conforme mostrado na tabela 8, porém com processos diferentes de fabricação. T_1 foi construído utilizando-se de processos de fabricação menos rigorosos no que se refere a manutenção da integridade do isolamento superficial e da limitação das tensões mecânicas aplicadas a chapa de aço-silício. Em T_2 foram utilizados processos de fabricação mais cuidadosos no que se refere a preservação das qualidades magnéticas da chapa.

Tabela 8: Características dos transformadores ensaiados

Potência nominal:	75 kVA
Frequência:	60 Hz
Tensão primária:	13800 à 10200 V
Tensão secundária:	220 V
Ligação:	Dyn1
Impedância:	3,5 %

Os ensaios foram realizados conforme procedimento descrito no capítulo 4. Tendo em vista o caráter demonstrativo do ensaio, apenas as fases 1 e 3 estão sendo consideradas na apresentação deste exemplo.

Para ambos os transformadores, as perdas magnéticas, em função da densidade de fluxo, são apresentadas na figura 23, juntamente com a característica da chapa magnética utilizada.

As perdas introduzidas pelo processo de fabricação, aproximadamente 15 % maiores em T₁, quando comparado com T₂, ficam evidentes na figura 25.

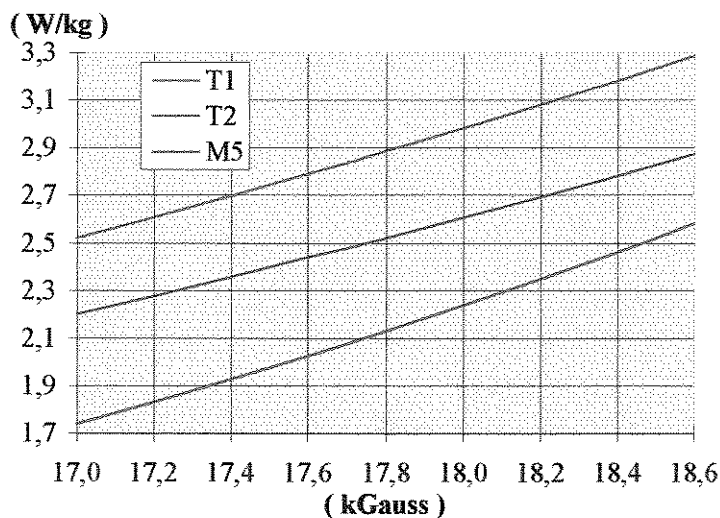


Figura 23: Perdas magnéticas x densidade máxima de fluxo

Nesta figura, as perdas magnéticas estão representadas através das expressões (6.1) e (6.2):

$$W_o = 5,9 \cdot 10^{-4} B_{\text{máximo}}^{3,0}, \text{ para } T_1 \quad (6.1)$$

$$W_o = 4,8 \cdot 10^{-4} B_{\text{máximo}}^{3,0}, \text{ para } T_2 \quad (6.2)$$

onde k_o e n são valores calculados para cada ensaio e as unidades de W_o e $B_{\text{máximo}}$ são aquelas da figura 23. A aplicação dessas expressões deve ser limitada a variação da densidade máxima de fluxo correspondente ao ensaio.

Os valores de k_o e n , calculados para este e outros casos, são realimentados ao procedimento de cálculo das perdas magnéticas. Vale lembrar que quanto maior for o número de amostras, mais precisas serão as estimativas desse procedimento.

A potência de excitação e a corrente de magnetização, em função da densidade de fluxo, são apresentadas nas figuras 24 e 25, respectivamente.

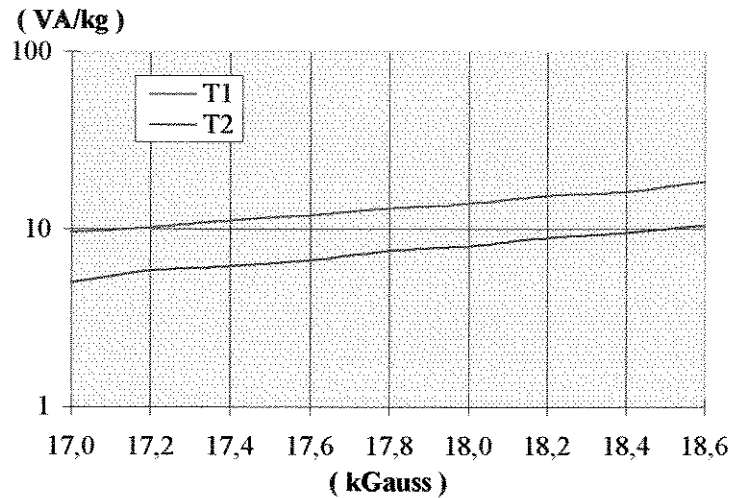


Figura 24: Potência de Excitação x densidade máxima de fluxo

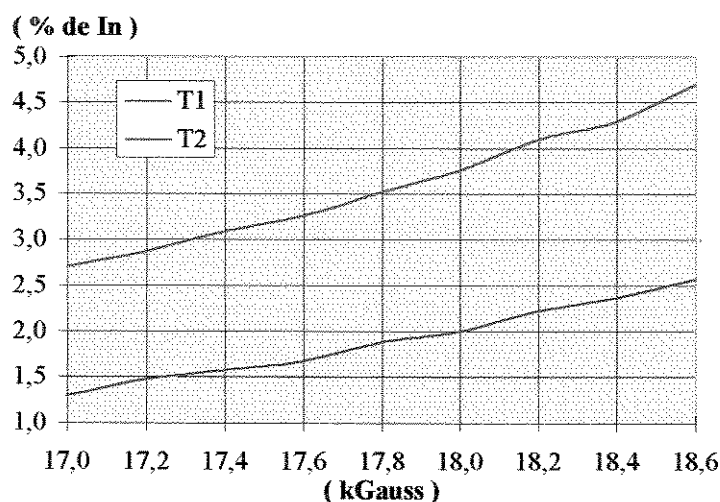


Figura 25: Corrente de magnetização x densidade máxima de fluxo

Observa-se, na figura 25, que a corrente de magnetização é aproximadamente 90% maior em T_1 , comparado a T_2 . Evidencia-se que os processos de empilhamento ou de estampagem de T_2 são muito mais eficientes que aqueles aplicados ao transformador T_1 . Este fato está explicado pelo valor da componente magnetizante da corrente de excitação, que é proporcional ao tamanho dos entreferros que, neste caso, certamente são maiores no transformador T_1 . Confirma-se, pelos ensaios, que os métodos e processos a que as chapas se submetem durante a fabricação podem afetar significativamente o desempenho do produto. O que vem salientar a importância da realização dos ensaios conforme está sendo proposto neste trabalho.

Mesmo um ensaio relativamente simples, como este que foi realizado nestes dois transformadores, é capaz de demonstrar o nítido comprometimento da eficiência do transformador T_1 , comparado ao T_2 . Essa diferença de desempenho reflete a grande importância da aplicação de processos eficientes de fabricação, no que se refere à limitação das tensões mecânicas aplicadas a chapa de aço-silício e à manutenção da integridade do seu isolamento superficial.

Observa-se também uma considerável distância das características da “chapa silicosa” para os transformadores em que elas foram empregadas, reforçando-se assim a necessidade de melhorias nos métodos e processos de fabricação de ambos os equipamentos.

7. Comentários finais

Quando as chapas de aço-silício são magnetizadas, os domínios magnéticos invertem sua orientação granular com a alternância da corrente. O atrito entre os domínios, proveniente dessa alternância, causa perdas e elevação de temperatura no núcleo. Quando tensões mecânicas são aplicadas a essa chapa, esses efeitos (perdas e elevação de temperatura) são potencializados.

A corrente magnetizante não é senoidal. O aumento do valor eficaz real da corrente (aumento do valor de crista), devido as suas componentes harmônicas, contribui para o aumento das perdas adicionais nos enrolamentos e também das perdas relacionadas com as correntes de Foucault. Estas variam com o quadrado da frequência, que nesse caso é relativamente elevada. Portanto, um pequeno aumento dessa corrente causa uma maior elevação de temperatura no núcleo e no enrolamento. Esse acréscimo na elevação de temperatura, somado às condições de carregamento do transformador, pode acelerar seu envelhecimento.

Estes fatos evidenciam a importância de uma análise profunda do comportamento dos materiais magnéticos durante o processo de fabricação do transformador. Esta foi a motivação essencial deste trabalho, que resultou na metodologia proposta.

A partir desta metodologia de ensaio pode-se através das curvas médias que representam as condições dos materiais magnéticos após seu processamento, comparar:

- Diferentes materiais magnéticos aplicados em núcleos de transformadores;
- A qualidade de diversos tipos e processos de fabricação de “chapas silicosas”;
- Os diferentes métodos e processos de fabricação dos núcleos de transformadores.

Também através destas curvas médias se pode avaliar a evolução e o refinamento dos processos produtivos e da utilização de novos materiais magnéticos.

Ocorrendo alterações nas características do material magnético que é recebido na fábrica ou em alguma das etapas do processo de fabricação do transformador, as curvas médias que resultam da aplicação da metodologia de ensaio proposta vão refleti-las,

quando comparadas com a situação anteriormente verificada. Isto permite avaliar se melhoraram ou pioraram as condições em que os transformadores são fabricados ou a qualidade do material magnético empregado. Consequentemente, o trabalho na verdade propõe uma ferramenta que permite aferir a qualidade global do produto.

Além disso, com este estudo pode-se determinar, com boa precisão, um valor ideal para a densidade máxima de fluxo magnético que:

- Reduza o custo do transformador (quantidade de material e capitalização das perdas);
- Faça as perdas magnéticas permanecerem nos níveis desejáveis;
- Prolongue o tempo de vida do transformador;
- Limite a corrente magnetizante à valores aceitáveis;
- Minimize o consumo de energia do transformador.

Isto vem aprimorar a qualidade do projeto do transformador porque permite utilizar parâmetros mais realistas no processo de cálculo.

8. Apêndice

São abordados nesse apêndice informações sobre os ensaios para determinação das perdas em transformadores e o processo de envelhecimento.

8.1 Ensaio para determinação das perdas

- **Perdas em Vazio e Corrente de Excitação [7;11]:**

Esse ensaio possibilita a determinação das perdas e da corrente de um transformador operando sem carga.

Aplica-se tensão nominal nos terminais de um dos enrolamentos do transformador (geralmente o de menor tensão, para facilitar a leitura da corrente de excitação) e mantém-se os terminais do outro enrolamento em aberto (sem carga). Executam-se as medições de tensão, corrente (de excitação) e potência (perdas em vazio) W_0 .

O valor percentual da corrente de excitação $I_{\%}$, pode ser calculado conforme a expressão:

$$I_{\%} = \frac{I_o}{I_n} 100 \quad (A) \quad (8.1)$$

onde: I_n é a corrente nominal em A e I_o é a corrente de excitação em A

- **Perdas em Carga e Impedância de Curto-circuito:**

Esse ensaio possibilita a determinação das perdas e da impedância de curto-circuito de um transformador operando com carga nominal (100 % de carga).

Aplica-se uma corrente nominal nos terminais de um dos enrolamentos do transformador (geralmente o de maior tensão, para facilitar a leitura) e curto circuitando-se os terminais do outro enrolamento. Executam-se as medições de tensão (tensão de curto-circuito), corrente e potência (perdas em carga). Essas medições devem ser

$$Z_{\%} = \frac{V_{cc}}{V_n} 100 \quad (8.6)$$

onde V_{cc} é a tensão de curto-circuito em Volts e V_n é a tensão nominal.

• Perdas Totais em plena carga

As perdas totais W_T do transformador podem ser representadas pela soma das perdas à vazio e em carga, como mostra a expressão (8.7)

$$W_T = W_E + W_o \quad (8.7)$$

O ensaio deve verificar se os valores das perdas em vazio e totais, garantidos pelo fabricante, foram atendidos, dentro das tolerâncias mostradas na tabela 9:

Tabela 9: Tolerâncias

Características Específicas	Tolerância
Impedância de curto-circuito	
- No valor medido em relação ao valor declarado pelo fabricante e entre dois transformadores de mesmo projeto:	
a) Transformadores de dois enrolamentos;	$\pm 7,5 \%$
b) Transformadores com mais de dois enrolamentos;	$\pm 10 \%$
c) Transformadores com enrolamentos em Zigue-zague;	$\pm 10 \%$
d) Autotransformadores.	$\pm 10 \%$
Perdas em Vazio	
- Em cada unidade, considerada individualmente	$+ 10 \%$
- Na média aritmética obtida de mais de uma unidade	$+ 0 \%$
Perdas Totais	
- Em cada unidade, considerada individualmente	$+ 6 \%$
- Na média aritmética obtida de mais de uma unidade	$+ 0 \%$
Corrente de Excitação	
- Em cada unidade, considerada individualmente	$+ 20 \%$
- Na média aritmética obtida de mais de uma unidade	$+ 0 \%$

8.2 Materiais e líquidos isolantes

Um fator determinante no tempo de operação de um equipamento é o tipo de material isolante empregado. Este por sua vez tem seu processo de envelhecimento acelerado com a temperatura a que é submetido. Além disso, esses materiais devem ser apropriados para contato com o óleo e são classificados de acordo com sua temperatura-máxima-limite, como mostra a tabela 10:

Tabela 10: Classificação térmica dos materiais isolantes

Classe de Temp.	Temp.-limite °C	Elevação de Temp. °C	$T_{pto+quente} \neq T_{médio}$ °C	Descrição dos componentes
Y	90	45	5	Materiais fibrosos, à base de celulose ou seda, não imersos em fluido (líquido) isolante.
A	105	60	5	Materiais fibrosos, à base de celulose ou seda, impregnados com fluido isolante.
E	120	75	5	Fibras orgânicas sintéticas
B	130	80	10	Materiais à base de poliéster e polimídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados.
F	155	100	15	Materiais à base de mica, amianto ou fibra de vidro aglutinados com materiais sintético, usualmente silicones, poliésteres ou epóxis.
H	180	125	15	Materiais à base de mica, asbestos ou fibra de vidro aglutinados tipicamente com silicones de alta estabilidade térmica (ISO).
C	Acima de 180			Mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinantes.

Os líquidos isolantes em transformadores, além de isolarem as partes vivas (energizadas) possuem a finalidade de dissipar o calor gerado nos enrolamentos e núcleo. Geralmente é utilizado óleo mineral isolante base parafínica (tipo ‘B’) ou naftênica (tipo ‘A’), cujas características estão normalizadas na NBR 10576 e as principais são mostradas na tabela 11:

Tabela 11: Características gerais para avaliação do óleo mineral isolante

Características do óleo	Norma	Unidade	Valores Garantidos	
Tensão interfacial a 25°C	NBR 6234	mN/m	Mínimo	40
Teor de água	NBR 5755	mg/kg	Máximo	25
Rigidez dielétrica	NBR 6869	kV	Mínimo	30
Fator de potência dielétrica a 100°C	ASTM D 924	%	Máximo	0,9
Fator de potência dielétrica a 90°C	IEC 247	%	Máximo	0,7

Podem ser também utilizados, em área de segurança, fluidos isolantes especiais R-Temp e a base de Silicone. Essa utilização se justifica devido a característica desses fluidos possuírem baixa inflamabilidade.

9. Referências bibliográficas

- [1] - Lawrence H. Van Vlack; Princípio de Ciências dos Materiais; Editora Edgard Blücher Ltda.; São Paulo; 1970.
- [2] - W. Schmidt; Materiais Elétricos Vol. 2; 2ª edição; Editora Edgard Blücher Ltda.; São Paulo; 1979.
- [3] - NBR 9119; Produtos laminados plano de aço para fins elétricos de grânulos orientados.
- [4] - NBR 5161; Método de ensaio para laminados planos de aço para fins elétricos
- [5] - Catálogo de Chapas Acesita :GO-E005; GO-E004.
- [6] - Richard I. Bean, Nicolas Chackan, Harold R. Moore, Edward C. Wentz; Transformers For the Electric Power Industry; Editora Mcgrawhill Book Company Inc.; New York; 1959.
- [7] - NBR 5356; Transformadores de Potência.
- [8] - L. F. Blume, A. Boyajian, G. Camili, T. C. Lennox, S. Minneci, V. M. Montsinger; Transformer Engineering; 2ª edição; Gec - John Wiley & Sons Inc; New York; 1951.
- [9] - William J Stevenson; Estatística Aplicada à Administração; Editora Harbra Ltda.; São Paulo; 1986.
- [10] - NBR 5440; Transformadores de distribuição.
- [11] - NBR 5380; Método de ensaio para Transformadores de Potência.