

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA - PROMEC

TRANSFORMADOR UTILIZANDO METAL AMORFO

por

ÁLY FERREIRA FLORES FILHO

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC.

Porto Alegre

1989

**TRANSFORMADOR UTILIZANDO METAL AMORFO**

**DISSERTAÇÃO**

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica - PROMEC, como  
parte dos requisitos para obtenção do  
título de

**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GERAÇÃO DE ENERGIA**

por

**ÁLY FERREIRA FLORES FILHO**

**ENGENHEIRO ELETRICISTA**

1989

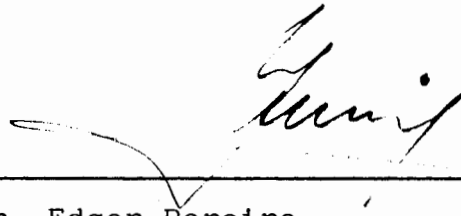
II

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Geração de Energia e aprovada na sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Dr. Edgar Pereira

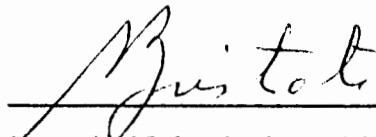
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Banca Examinadora:



Dr. Edgar Pereira

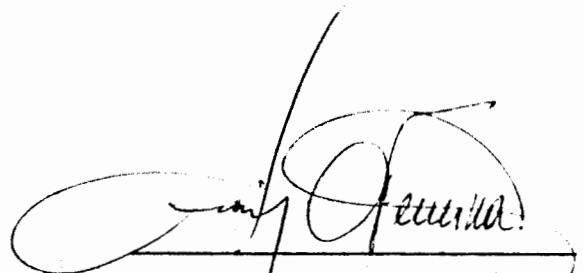
UFRGS



Dr. Anildo Bristoti



Dr. Mario Baibich



Coordenador do PROMEC

Dr. Vilson C. da S. Ferreira

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Edgar Pereira, pelas idéias luminosas e orientação responsável.

Ao pessoal técnico do Laboratório de Máquinas Elétricas, pelo apoio à realização deste trabalho.

Ao meu amigo e colega Roberto P. Homrich, pelo especial apoio.

Ao Professor José Serafim Gomes Franco, pelo encorajamento e incentivo.

Aos meus pais, pela compreensão, ajuda e incentivo sempre presentes de todas as formas.

## RESUMO

Apresenta-se, neste trabalho, um estudo de utilização de metais amorfos, ou também chamados vidros metálicos, na construção do circuito magnético de um pequeno transformador.

As características mais importantes dos metais amorfos e relevantes para este tipo de aplicação são apresentadas, bem como as do material cristalino de ferro-silício com grão orientado. Isto de maneira a compará-los entre si.

O projeto teórico deste transformador também é feito para que se possa estimar as vantagens e desvantagens do uso de metal amorfo e do metal cristalino citados.

São mostrados os resultados experimentais obtidos do ensaio do transformador com metal amorfo, construído com os dados do projeto teórico feito.

O estudo teórico e os dados experimentais oferecem algumas conclusões interessantes e recomendações importantes para a continuidade do estudo de aplicação dos metais amorfos em dispositivos eletromagnéticos.

## ABSTRACT

In this work we study the use of amorphous metals, also known as metallic glasses, for the construction of the magnetic circuit of a small transformer.

The most important characteristics of the amorphous metals that are relevant for that purpose are presented as well as those of oriented-grain crystalline silicon iron so that they could be compared.

The theoretical design of the transformer is done to estimate the relative advantages and disadvantages of the amorphous metal as compared to the crystalline metal.

Experimental results for a transformer built with amorphous metal according to the theoretical design are shown.

The theoretical design and the experimental results show some interesting conclusions and important recommendations for the continuing study of the application of amorphous metals in electromagnetic devices.

## SUMÁRIO

APROVAÇÃO .....	II
AGRADECIMENTOS .....	IV
RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VI
SUMÁRIO .....	VII
SÍMBOLOS .....	X
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	XIII
LISTA DE TABELAS .....	XVI
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Objetivo do Trabalho .....	1
1.2 - Motivação e Justificativa .....	2
2. MATERIAIS MAGNÉTICOS .....	4
2.1 - Introdução .....	4
2.2 - Materiais Ferromagnéticos Convencionais .....	4
2.2.1 - Material Ferromagnético Convencional Baseado em Ferro-silício .....	6
2.2.1.1 - Utilização do Ferro-silício de Grão-Orien- tado .....	10
2.3 - Outros Materiais Ferromagnéticos Convencionais	14
2.4 - Ligas Magnéticas Amorfas .....	15
2.4.1 - Introdução .....	15

2.4.2 - Composição e Natureza do Metal Amorfo .....	16
2.4.3 - Fabricação .....	17
2.4.3.1 - Obtenção de Metal Amorfo por Resfriamento Rápido .....	18
2.4.4 - Características e Propriedades .....	20
2.4.5 - O Metal Amorfo $Fe_{81}B_{13,5}S_{3,5}C_2$ (METGLAS 2605SC) .....	24
2.4.5.1 - Características .....	24
2.4.5.2 - Utilização e Manuseio .....	28
2.4.5.2.1 - Uso .....	28
2.4.5.2.2 - Manuseio, Forma de Emprego e Recozimento ..	28
3. TRANSFORMADORES .....	31
3.1 - Princípio de Funcionamento .....	31
3.2 - Considerações Analíticas .....	33
3.3 - Equações de Projeto .....	34
3.4 - Verificação de Características .....	36
3.4.1 - Testes Gerais .....	36
3.4.2 - Verificação do Laço de Histerese .....	37
4. PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E TESTES .....	40
4.1 - Condições Iniciais de Projeto .....	40
4.2 - Implementação .....	44
4.3 - Implementação Final .....	46
4.4 - Testes e Medições .....	49
4.4.1 - Medidas Elétricas e Magnéticas .....	50
5. ANÁLISE COMPARATIVA GERAL .....	56



6. CONCLUSÕES .....	59
7. RECOMENDAÇÕES .....	61
8. BIBLIOGRAFIA .....	63

## SÍMBOLOS

$\mu$	Permeabilidade magnética absoluta
$B_S$	Indução magnética de saturação
$\mu_i$	Permeabilidade magnética inicial
$P_h$	Perdas magnéticas por histerese
$H_c$	Campo magnético coercitivo
$P_M$	Perdas magnéticas específicas
$P_e$	Potência de excitação específica
$B$	Indução magnética
$H$	Campo magnético
$K_e$	Fator de empilhamento
$\gamma$	Massa específica
$T_C$	Temperatura Curie
$\rho$	Resistividade ôhmica
$\lambda$	Magnetostricção
$P_{MT}$	Perdas magnéticas totais
$e_1$	Tensão instantânea induzida no primário
$e_2$	Tensão instantânea induzida no secundário
$\Phi$	Fluxo magnético
$N_1$	Número de espiras do primário
$N_2$	Número de espiras do secundário

$E_1$	Tensão induzida eficaz no primário
$E_2$	Tensão induzida no secundário
$S_m$	Secção Magnética
$\alpha$	Relação de transformação
$I_2'$	Corrente primária refletida pelo secundário
$I_1$	Corrente primária
$I_0$	Corrente a vazio
$S_1$	Potência aparente no primário
$S_2$	Potência aparente no secundário
$l_m$	Comprimento médio do caminho magnético
$S$	Potência aparente
$D_e$	Diâmetro externo do toróide
$D_i$	Diâmetro interno do toróide
$H_p$	Altura do pacote de fitas
$S_g$	Secção geométrica
$E$	Largura da fita
$V_n$	Volume de material magnético do núcleo
$P_nR$	Peso real do núcleo
$V_1$	Tensão primária
$V_2$	Tensão secundária
$l_{cn}$	Comprimento da espira média
$L_0$	Indutância de magnetização
$R_0$	Resistência equivalente de perdas magnéticas
$V_{r_1}$	Tensão sobre $r_1$
$r_2$	Resistência shunt no secundário

$r_1$	Resistência shunt no primário
C	Capacitância
$i_c$	Corrente no capacitor
$v_c$	Tensão no capacitor
$\phi(t)$	Fluxo magnético instantâneo
$e_f$	Espessura da fita
$R_1$	Resistência do primário
$R_2$	Resistência do secundário
$I_{OM}$	Corrente de magnetização
$\omega$	Velocidade angular
$R_2'$	Resistência do secundário refletida ao primário
$X_2'$	Reatância de dispersão do secundário refletida para o primário
$X_1$	Reatância de dispersão do primário
$G_o$	Condutância associada a $P_{MT}$
$B_o$	Susceptância associada à reatância de magnetização
R	Resistência de carga refletida para o primário
X	Reatância de carga refletida para o primário
$\alpha_2$	Defasagem angular entre $V_2'$ e $E_2$
$\alpha_1$	Defasagem angular entre $V_1$ e $E_1$
$\theta_1$	Ângulo de fase do primário
$I_{h+p}$	Corrente associada às perdas magnéticas
$V_2'$	Tensão de carga refletida para o primário
$Z_2$	Impedância do enrolamento secundário refletida para o primário
$P_o$	Potência a vazio

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.2.1(a)	Curva B x H do GO 128-30 .....	8
FIGURA 2.2.1(b)	Curva B x $P_M$ do GO 128-30 .....	9
FIGURA 2.2.1(c)	Curva B x $P_e$ do GO 128-30 .....	9
FIGURA 2.2.1(d)	Curva $\mu$ x H do GO 128-30 .....	10
FIGURA 2.4.1	Esquema da estrutura atômica cristalizada e amorfa .....	17
FIGURA 2.4.3.1(a)	Representação esquemática do processo de produção contínua de fita amorfa por resfriamento rápido .....	19
FIGURA 2.4.3.1(b)	Esquema de produção industrial de fita amorfa por resfriamento rápido ..	19
FIGURA 2.4.4	Laços de histerese em função do reconhecimento do METGLAS 2605SC .....	23
FIGURA 2.4.5.1(a)	Laço de histerese típico do METGLAS 2605SC .....	26
FIGURA 2.4.5.1(b)	Curva de perdas magnéticas do METGLAS 2605SC .....	26
FIGURA 2.4.5.1(c)	Curva de magnetização inicial do METGLAS 2605SC .....	27

FIGURA 2.4.5.2.2	Curva de tratamento térmico do MET GLAS 2605SC .....	29
FIGURA 3.1(a)	Modelo de transformador de dois en rolamentos .....	32
FIGURA 3.1(b)	Diagrama fasorial do transformador de dois enrolamentos sob carga ...	32
FIGURA 3.4.1	Esquema para testes gerais do trans formador .....	36
FIGURA 3.4.2	Circuito para levantamento de laço de histerese da amostra .....	37
FIGURA 4.1(a)	Secção da fita amorfa utilizada ..	42
FIGURA 4.1(b)	Desenho do núcleo amorfo projetado (T0) .....	43
FIGURA 4.1(c)	Desenho do núcleo com Fe-Si GO pro jetado (T0') .....	43
FIGURA 4.2(a)	Vista superior do núcleo com metal amorfo (T0) já montado .....	44
FIGURA 4.2(b)	Vista lateral do mesmo núcleo ....	45
FIGURA 4.3(a)	Núcleo de metal amorfo (T0) com en rolamento para recozimento .....	47
FIGURA 4.3(b)	Enrolamento sendo montado no núcleo amorfo já recozido .....	48
FIGURA 4.3(c)	Transformador T0 já montado .....	49

FIGURA 4.4.2(a)	Laço de histerese do transformador TO com metal amorfo .....	53
FIGURA 4.4.2(b)	Laço de histerese do pequeno trans- formador com METGLAS 2605SC(T1) ..	54
FIGURA 4.4.2(c)	Laço de histerese do pequeno trans- formador com GO 128-30(T2) .....	55
FIGURA 5	Comparação relativa de custos ....	58

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.2.1	Características do GO 128-30 ...	11
TABELA 2.4.4	Características magnéticas de algumas ligas amorfas e cristalinas	21
TABELA 2.4.5.1	Características nominais da liga amorfa METGLAS 2605SC .....	25
TABELA 4.1	Dimensões e características estimadas dos protótipos de transformadores .....	41
TABELA 4.2	Características estimadas em função da montagem .....	46
TABELA 4.4.2(a)	Dados obtidos do ensaio a vazio do transformador com metal amorfo TO .....	51
TABELA 4.4.2(b)	Característica de magnetização normal dos núcleos T1 e T2 .....	52



## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se os objetivos, motivação e justificativa para este trabalho.

### 1.1 - Objetivo do Trabalho

Quando surge um novo material, tanto quanto uma nova tecnologia, que apresenta características e vantagens incomuns, é necessário que haja imparcialidade e critério na avaliação das mesmas. É necessário que se estude a nível teórico e prático a viabilidade do uso deste material. Isto sob o ponto de vista aplicativo.

Basicamente, o que se propõe neste trabalho é iniciar, em termos de Brasil, um estudo que apresente as vantagens, as desvantagens e a viabilidade de uso de metais amorfos em dispositivos eletromagnéticos de potência.

Como objetivo inicial deste estudo, será analisado o uso de uma liga metálica amorfa de composição nominal  $Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$ , liga esta também conhecida comercialmente como METGLAS 2605SC, fabricada pela Allied Corporation no Estados Unidos.

Mais especificamente, este estudo verificará a aplicação dessa liga em um pequeno transformador.

A partir disso, pode-se analisar as características próprias do metal amorfo em questão nesta aplicação. Será feita também uma análise comparativa com a liga cristalina ferromagnética de composição nominal  $Fe_{97}Si_3$  de grão orientado. No caso, a denominação comercial desta liga é M5, fabricada unicamente

no Brasil, pela Companhia de Aços Especiais - ACESITA e com larga utilização na construção de transformadores no país.

## 1.2 - Motivação e Justificativa

Com a necessidade, no Brasil como em outros países, de se economizar energia elétrica, uma das formas de buscar este objetivo é melhorar o rendimento e diminuir as perdas de energia dos dispositivos eletromagnéticos de uso necessário ou corrente. Por exemplo, transformadores, motores e geradores. Dentro deste princípio, o emprego de novos materiais magnéticos com características de perdas magnéticas mais baixas em relação aos materiais magnéticos convencionais na mesma aplicação deve ser estudado. A economia<sup>7 11 19 23 28</sup> no consumo de energia elétrica e nos gastos a ela pertinentes são fundamentais na tomada de decisão para o emprego dos metais amorfos em sistemas eletromagnéticos de potência. Dado o enorme enfoque deste tipo de uso no exterior<sup>7 8 12 16 19 35</sup> certamente terá reflexos no Brasil, no qual se vislumbra sérios problemas de falta de atendimento da demanda de energia por falta desta última, sendo o caminho natural a economia e a conservação; possivelmente neste enfoque, se rá colcoada a aplicação de transformadores e outras máquinas elétricas que utilizem metais amorfos. É necessário trabalhos e conhecimento nacionais sobre este assunto, para que de forma criteriosa faça-se a melhor escolha. Acredito que este trabalho possa, assim, ajudar.

Isto porque, em termos nacionais, a concepção e aplicação destes materiais ainda é insipiente. São produzidas em ní vel experimental ligas baseadas em ferro e cobalto na forma de fitas com, no máximo, 20 mm de largura<sup>44</sup>. Têm destinação principal para análise físico-química ou metalúrgica de suas propriedades e processos de obtenção.

Cite-se, especialmente, os trabalhos do Prof. Frank Missel, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, e do Prof. Mario Baibich, do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como pioneiros no Brasil. O grupo liderado pelo Prof. Edgar Pereira, do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRGS, iniciou, há dois anos, a partir da colaboração do Instituto de Física da UFRGS, estudos no sentido de analisar o uso de metal amorfo<sup>15 21 41</sup>. Este trabalho é uma conseqüência natural e necessária destes estudos.

## 2. MATERIAIS MAGNÉTICOS

Neste capítulo serão abordados aspectos importantes e fundamentais para este trabalho, no que diz respeito aos materiais magnéticos.

### 2.1 - Introdução

É o circuito magnético de um transformador, ou máquina elétrica em geral, que torna viável o acoplamento magnético entre os circuitos magnéticos deste transformador. Para tanto, os circuitos magnéticos dos transformadores devem ser compostos de material que apresente desempenho adequado à utilização dos mesmos. Este desempenho será, em grande parte, determinado pelas características magnéticas, elétricas e mecânicas do material que compõe o núcleo ou circuito magnético. Desta forma, faz-se necessário analisar para aplicação objeto deste trabalho as características dos metais magnéticos de interesse no caso.

Ao longo deste capítulo, serão abordados os aspectos de interesse dos materiais magnéticos convencionais e dos metais amorfos, com ênfase ao ferro-silício de grão orientado  $Fe_{97}Si_3$  e ao amorfo  $Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$ .

### 2.2 - Materiais Ferromagnéticos Convencionais

O que se define por material ferromagnético convencional pode ser entendido genericamente como uma liga metálica cristalina formada por metais de transição e metalóides com a capacidade de concentrar fortemente as linhas de força de um campo magnético. Trabalha com indução magnética  $B$  elevada, tan-

to de saturação quanto residual ou remanente. Possui permeabilidade magnética entre 300 e 10.000 vezes maior do que a do vácuo ( $\mu$  vácuo =  $12,566 \times 10^{-7}$  H/m)<sup>43</sup>.

Os materiais ferromagnéticos condutores apresentam um apreciável efeito peculiar ("skin effect") mesmo nas baixas frequências. Têm perdas parasitas por correntes de Foucault, pois possuem boa condutividade elétrica<sup>10 43</sup>.

Com o crescimento do campo magnético tendem a diminuir a sua permeabilidade magnética, tanto mais rápido quanto mais próximo à saturação magnética.

Estes materiais, em temperaturas superiores a sua temperatura Curie, tornam-se paramagnéticos<sup>43</sup>.

No uso industrial, apresentam-se especialmente sob a forma de ligas cristalinas obtidas da união do ferro com metalóides, com o objetivo de obter características especiais. Por exemplo, a adição de 30% de níquel ao ferro produz uma liga fracamente magnética com condutividade elétrica percentual de 1,9%. Já com 78% de níquel mais ferro, obtém-se uma liga que, tratada termicamente, produz um efeito de alta permeabilidade magnética. Outra constatação que se faz, levando em consideração que o ferro puro apresenta indução de saturação  $B_s$  elevada de 2 T, é que acrescentando-lhe outros metais, como exceção do cobalto, o fluxo de saturação se reduz. O cobalto acrescentado ao ferro numa proporção de 30% a 40% eleva o fluxo de saturação em cerca de 10%. Exige-se, ainda, uma elevada pureza do material, pois pequenas quantidades de carbono, óxido, etc., pioram as propriedades magnéticas do material<sup>43</sup>.

Quando usadas na construção de dispositivos eletromagnéticos, estes materiais são laminados, com a finalidade de re-

duzir as perdas magnéticas. Explica-se isto, pois quanto menos espessa a lâmina, maior é a resistência ôhmica apresentada por esta. Conseqüentemente, menores serão as correntes elétricas parasitas e, por conseguinte, as perdas Joule a ela associadas no material magnético<sup>10 14 24 43</sup>.

A forma mais barata de material ferromagnético convencional é a do tipo ferro fundido normal, composto de carbono e ferrita, com taxa de tração de 12 kgf/mm<sup>2</sup>. O carbono quimicamente ligado na forma de perlita eleva sensivelmente o valor da força coercitiva Hc, enquanto que o carbono livre tem pouca influência. Pode-se obter a eliminação do carbono na forma de grafita de dois modos: elevando-se o teor de silício ou aplicando-se ao material um recozimento prolongado na faixa de 800 - 900°C, tendo-se, neste caso, a vantagem adicional de eliminar, também, pressões mecânicas internas resultantes da fusão<sup>43</sup>.

### 2.2.1 - Material Ferromagnético Convencional Baseado em Ferro-Silício<sup>43</sup>

As chapas de ferro-silício que, ao contrário do ferro fundido normal, é usado na fundição de peças, são fornecidas como produto da laminação, em chapas com espessura entre 0,3mm a 2mm. Chapas especiais existem também com espessura de 0,03mm, com características altamente favoráveis, bem como em fitas extremamente finas, mais recentemente.

O ferro-silício ou silicioso é resultante de um acréscimo de silício ao ferro, pois pelas propriedades isolantes do silício obtém-se um material com maior resistividade elétrica  $\rho$ . O acréscimo de silício permite, também, eliminar o carbono e, quase totalmente, o oxigênio, elevando a permeabilidade inicial

$\mu_i$ , reduzindo  $H_c$  e diminuindo as perdas por histerese Ph.

O silício, no entanto, endurece o material, sobretudo em acréscimos maiores que 4,5%, dificultando a estampagem. A presença do silício diminui a  $B_s$  do material, mas, em compensação, é praticamente anulada a fadiga magnética do mesmo inibindo o envelhecimento. O uso do ferro associado ao silício, requer a seguinte classificação das chapas resultantes:

- chapas com baixo teor de silício, ou seja, 0,5% a 1,5% de silício;
- chapas com médio teor de silício, isto é, 2% a 3% de silício;
- chapas com alto teor de silício, 3% a 4% de silício.

Um tipo de laminação destas chapas é feita de tal modo que se tenha uma orientação magnética paralela ao sentido de laminação, através de uma laminação adequada a frio com tratamento químico especial. Disto resulta o material ferro-silício de grão orientado (GO), o qual apresenta perdas magnéticas bastante baixas, quando o fluxo magnético aplicado tem direção segundo o eixo preferencial da magnetização, ou seja, na direção da laminação a frio. Este eixo deve ser respeitado devido à elevada anisotropia deste tipo de material. Em outras palavras, na direção da laminação e permeabilidade magnética é maior, a relutância é menor e as perdas magnéticas são menores, ao contrário da direção perpendicular à direção da laminação.

Já o ferro-silício de grão não-orientado (GNO) sofre processo de laminação a quente e não tem direção preferencial de magnetização, possuindo perdas magnéticas maiores que o de grão orientado. Por exemplo, o ferro-silício GO 128-30 tem perdas magnéticas totais de 0,98 W/kg com  $B = 1,4T$ . Já o ferro-si-

lício GNO 385-50, de mesma espessura, tem perdas magnéticas totais de 3,1 W/kg, na mesma indução e na frequência de 60 Hz.

No âmbito deste trabalho, será usado, para fins de comparação, o ferro-silício GO 128-30 (designação segundo NBR 9119) que é material de aplicação comum, com características bem conhecidas e caracterizando-se pelas baixas perdas magnéticas.

Este material, com composição nominal  $Fe_{97}Si_3$ , tem as características<sup>2 3</sup> gerais dadas pela Tabela 2.2.1.

As figuras 2.2.1(a), 2.2.1(b), 2.2.1(c) e 2.2.1(d) apresentam valores nominais<sup>2</sup> das características de indução magnética B, perda magnética específica  $P_M$ , potência de excitação específica  $P_e$ , campo magnético H e permeabilidade magnética  $\mu$ . Elas fornecerão os dados de projeto a serem utilizados mais adiante.

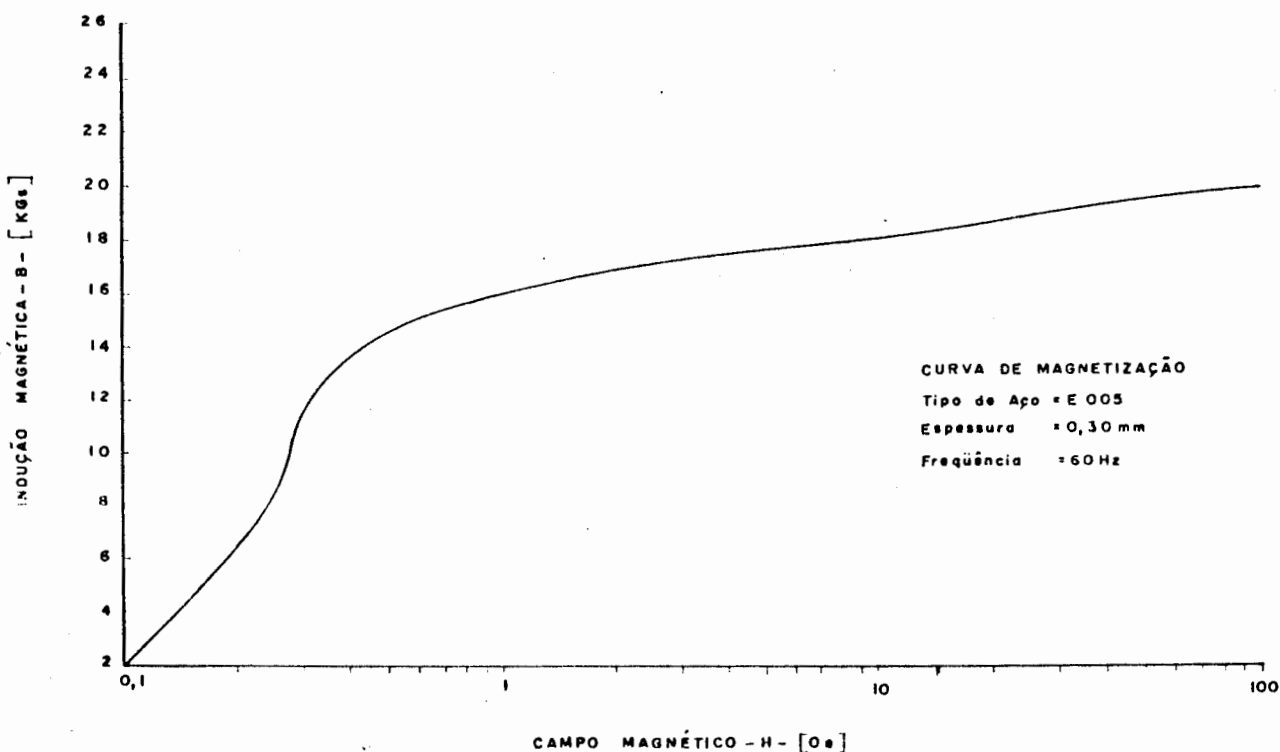


FIGURA 2.2.1(a) - Curva B x H do GO 128-30<sup>2</sup>.



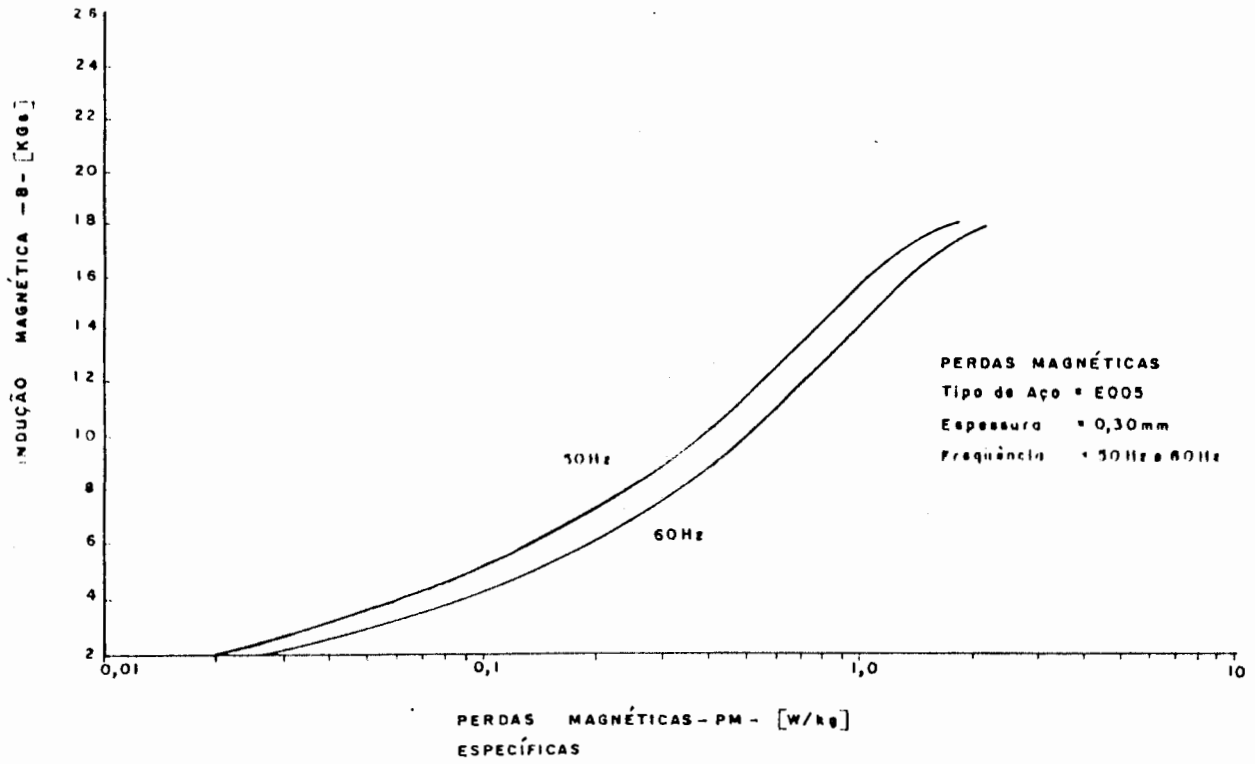


FIGURA 2.2.1(b) - Curva B x P<sub>M</sub> do GO 128-30<sup>2</sup>.

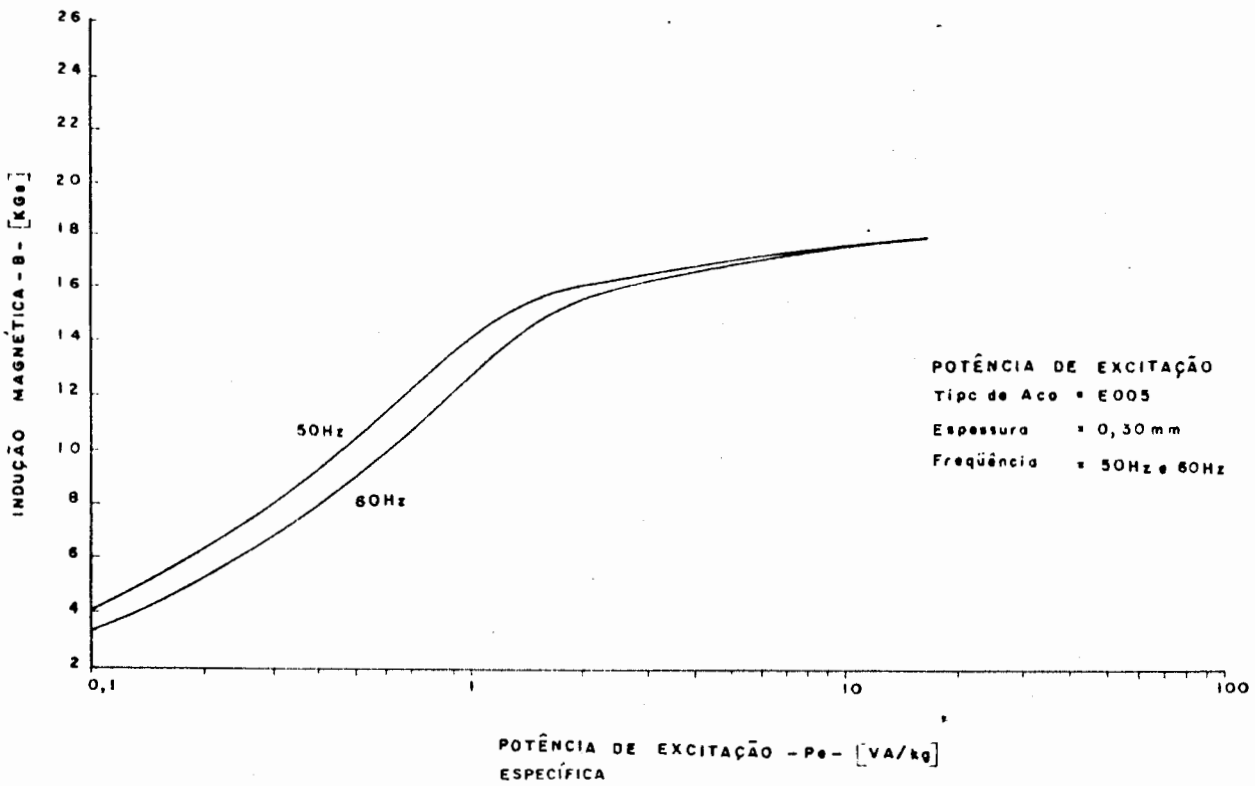


FIGURA 2.2.1(c) - Curva B x P<sub>e</sub> do GO 128-30<sup>2</sup>.

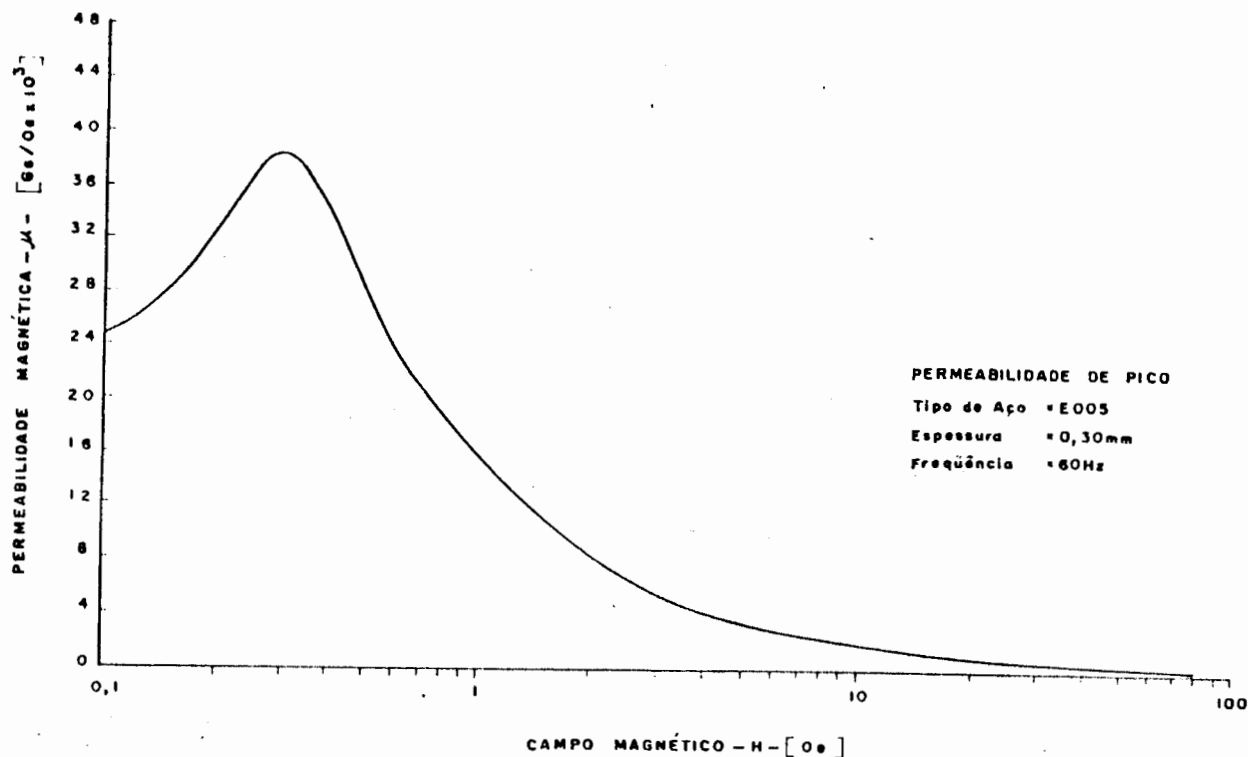


FIGURA 2.2.1(d) - Curva  $\mu$  x H do GO 128-30<sup>2</sup>.

#### 2.2.1.1 - Utilização do Ferro-Silício de Grão Orientado<sup>43</sup>

Após ser sujeita, durante a fabricação, a três etapas diferentes da laminação, a chapa de ferro-silício GO passa, numa etapa final, por um processo de revestimento pelo qual recebe em ambas as faces uma fina camada (30 $\mu$ m aproximadamente) de revestimento inorgânico. O objetivo é proporcionar um isolamento elétrico entre chapas, de modo a evitar correntes de Foucault circulantes entre elas. Caso contrário, um pacote de chapas empilhadas seria equivalente a um pacote maciço sujeito a altíssimas correntes de Foucault e, por consequência, teria altas perdas parasitas. Este isolamento inorgânico, além de atender esta função, deve possuir boa aderência, evitando desprendimento, durante o corte, punção e dobramento. Deve também garantir um alto fator de empilhamento  $K_e$  e suportar altas temperaturas, da ordem de 820°C<sup>2</sup>.

TABELA 2.2.1 - Características do GO 128-30<sup>2</sup>

ESPESSURA (mm)	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )	FATOR DE EMPILHAMEN- TO MÍNIMO (%)	B <sub>s</sub> (T)	H <sub>c</sub> (Oe)	MAGNETOS- TRICÇÃO λ	TEMPERATU- RA CURIE TC (°C)	RESISTIVI- DADE ELÉ- TRICA ρ(μΩcm)
0,30	7,65	95	2,00	0,085	20 x 10 <sup>-6</sup>	740	47

As propriedades magnéticas dos materiais magnético são afetadas por tensões mecânicas. Isto porque a existência de tensões internas ao sistema cristalino desses materiais dificulta a orientação dos domínios magnéticos na aplicação de um campo magnético externo. De modo geral, estas tensões mecânicas fazem diminuir  $\mu$  e aumentar  $H_c$ . Elas têm origem no manuseio ou trabalho mecânico aplicado ao material no processo de montagem de um núcleo. Neste processo, o material está sujeito a esforços de cisalhamento em função da estampagem, dobramento, corte, etc. Nessas condições, os domínios magnéticos são deformados e desalinhados. Se o material ferromagnético sofre um processo de orientação cristalina, ou seja, orientação de grão, parte desses grãos não acompanharão mais a orientação normal do corpo, devido à deformação induzida pelos esforços mecânicos e a permeabilidade do material será baixa, as perdas magnéticas aumentarão, originando pontos ou zonas de aquecimento inaceitável<sup>2 3 4</sup>.

O processo aplicável para evitar estes inconvenientes, que elimina ou minimiza o efeito de tensão mecânica sobre as características magnéticas do material é o de recozimento. Ele provocará a dilatação do material, eliminando tensões internas e fazendo com que os domínios magnéticos desorientados voltem à condição original de orientação, através da relaxação do material<sup>4 3</sup>.

O recozimento de chapas ferromagnéticas é atualmente uma providência de rotina, quando da fabricação de núcleos laminados a partir de pacotes de chapas ou em núcleos toroidais de chapa contínua. Isto é particularmente necessário quando o uso é em equipamentos de alta qualidade, no caso, alto rendimento energético<sup>4 3</sup>.

No caso do ferro-silício de grão orientado GO 128-30, o recozimento recomendado para alívio de tensões mecânicas exige que o material seja sujeito a uma temperatura de  $750^{\circ}$  a  $820^{\circ}$ C, pelo tempo que for necessário para o material como um todo atingir a temperatura nesta faixa e a relaxação<sup>2</sup>. É importante dizer que o revestimento inorgânico se degrada à temperatura de  $840^{\circ}$ C. Deve-se evitar aquecimento e resfriamento bruscos, pois estes induzem tensões mecânicas no material. A atmosfera de recozimento deve ser neutra e seca para prevenir oxidação e carbonetação, evitando a degradação das propriedades magnéticas e do revestimento do material. É recomendada uma atmosfera de nitrogênio com 3% a 10% de hidrogênio. Para prevenção de carbonetação é necessária a remoção de óleo, graxa e outros compostos orgânicos das lâminas, antes do tratamento. Após o recozimento, o manuseio do material deve ser feito com cuidado, de modo a não introduzir novas tensões mecânicas capazes de degradar as propriedades magnéticas mais uma vez<sup>2</sup>.

Adicionalmente, recomenda-se que em montagem de núcleo toroidal, especialmente, seja colocado internamente ao toróide um núcleo rígido e indeformável durante o recozimento, pois com o alívio da tensão, o toróide tenderá a se deformar e a geometria toroidal de revolução será perdida. O mesmo se aplica ao recozimento de pacotes de chapas, que deverão ser colocadas sobre superfície aplainada<sup>3</sup>.

Complementarmente, cite-se que estas condições de utilização do GO também se aplicam ao GNO<sup>2</sup>.

O emprego típico do ferro-silício GO é em transformadores operando a baixa frequência, motores de corrente alternada e máquinas elétricas em geral que exijam alto rendimento e baixa elevação de temperatura.

### 2.3 - Outros Materiais Ferromagnéticos Convencionais<sup>4, 5</sup>

No espectro de materiais ferromagnéticos há um número razoável de outras ligas de interesse geral, embora neste trabalho dê-se maior ênfase à liga de ferro-silício de grão orientado.

Cite-se, por exemplo, as ligas de ferro-níquel com elevada permeabilidade magnética para baixo campo magnético. A liga denominada Permalloy, composta de 10% a 90% de níquel e o restante de ferro, tem permeabilidade magnética relativa mínima de 10.000 e máxima de 200.000. Tem resistividade elétrica baixa, o que é uma desvantagem superável com o acréscimo de 5% de cobre ou 3% de cromo. Comparativamente com as chapas de ferro-silício, o Permalloy apresenta, em baixos campos magnéticos, permeabilidade 15 a 20 vezes superiores. O seu tratamento térmico consiste em aquecimento até o rubro, em atmosfera de hidrogênio e reaquecimento até 600°C, seguido de resfriamento brusco, pois o resfriamento rápido incrementa sua permeabilidade magnética. É utilizado em transformadores de alta frequência, relé e blindagem eletromagnética.

Já as ligas de alumínio-ferro-silício, conhecidas como alsifer, tem elevada dureza, com permeabilidade relativa máxima de até 100.000. Tem resistividade elétrica de  $0,8\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ . Como peça fundida, é encontrada no circuito magnético de instrumentos de medição. Também é utilizado na fabricação de núcleos sinterizados (ferrites).

As ligas de ferro-cobalto tem, como sua melhor característica uma alta  $B_S$  de 2,5T. Compõe-se de 50% a 70% de cobalto, sendo utilizada em altos-falantes, cápsulas telefônicas, etc.

As variedades são grandes. O aqui citado representa as ligas de aplicação mais comuns.

## 2.4 - Ligas Metálicas Amorfas

A seguir serão analisadas, nos aspectos relevantes para este trabalho, as ligas metálicas amorfas.

### 2.4.1 - Introdução

Na década de 60 foram descobertas as propriedades ferromagnéticas dos metais amorfos, embora as mesmas já tivessem sido previstas por simulações, e feitas as primeiras medidas correspondentes em fitas de material uniforme. Muitos pesquisadores realizaram as mais diversas medidas: propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas e térmicas. Os resultados obtidos apresentavam variações, pois as verificações e ensaios foram realizados em condições de trabalho, equipamentos e manufaturas diversas 11 19 25.

Talvez a maior virtude dos vidros metálicos resida na possibilidade de serem produzidos a baixo custo<sup>2º</sup>.

Em uma comparação baseada nestes custos, eles podem estar entre os materiais mais duros, maleáveis, resistentes à corrosão e facilmente magnetizáveis<sup>1º</sup>.

Estas ligas amorfas têm uma interessante e inesperada combinação de propriedades, como consequência de sua estrutura molecular incomum.

Ao longo deste capítulo, as afirmações anteriores serão melhor explicadas.

#### 2.4.2 - Composição e Natureza do Metal Amorfo

As ligas metálicas amorfas mais comuns, também conhecidas como vidros metálicos, possuem basicamente a composição  $T_{x_0} M_{2_0}$ , onde T representa um ou mais metais de transição como o ferro, cobalto e níquel, e M representa um ou mais metalóides, como o fósforo, boro, carbono e silício<sup>10 27</sup>.

A origem do metal amorfo baseia-se no fato de um certo líquido, quando resfriado rapidamente, não ter tempo suficiente para cristalizar-se, pois seus átomos movem-se vagarosamente, já que a viscosidade cresce rapidamente, fazendo com que sua estrutura assemelhe-se a uma estrutura desordenada que tivesse sido repentinamente paralisada. Entretanto, não se pode dizer que a estrutura atômica dos metais amorfos é tão desordenada como a dos líquidos. Isto é explicado pela existência de laços químicos formados entre os átomos durante a solidificação havendo, por isso, uma certa regularidade entre eles<sup>10 20 25 26</sup>.

A figura 2.4.1 permite visualizar uma estrutura cristalina de um amorfo. Observa-se que a estrutura do metal amorfo sólido não se encontra ordenada como a do cristal. Esta constatação é feita através da difração de raios 'X', efeito Mösbauer e outros<sup>10</sup>.

Esclareça-se que só na década de setenta os sólidos amorfos foram considerados como um novo estado de matéria. Muitas de suas propriedades já haviam sido anteriormente previstas por simulações. Outras são surpreendentes e ambíguas, como, por exemplo, o fato de que embora os sólidos amorfos consistam quase totalmente da agregação aleatória de átomos, sua densidade é 1-2% mais baixa do que a densidade de um cristal de mesma composição<sup>10</sup>.



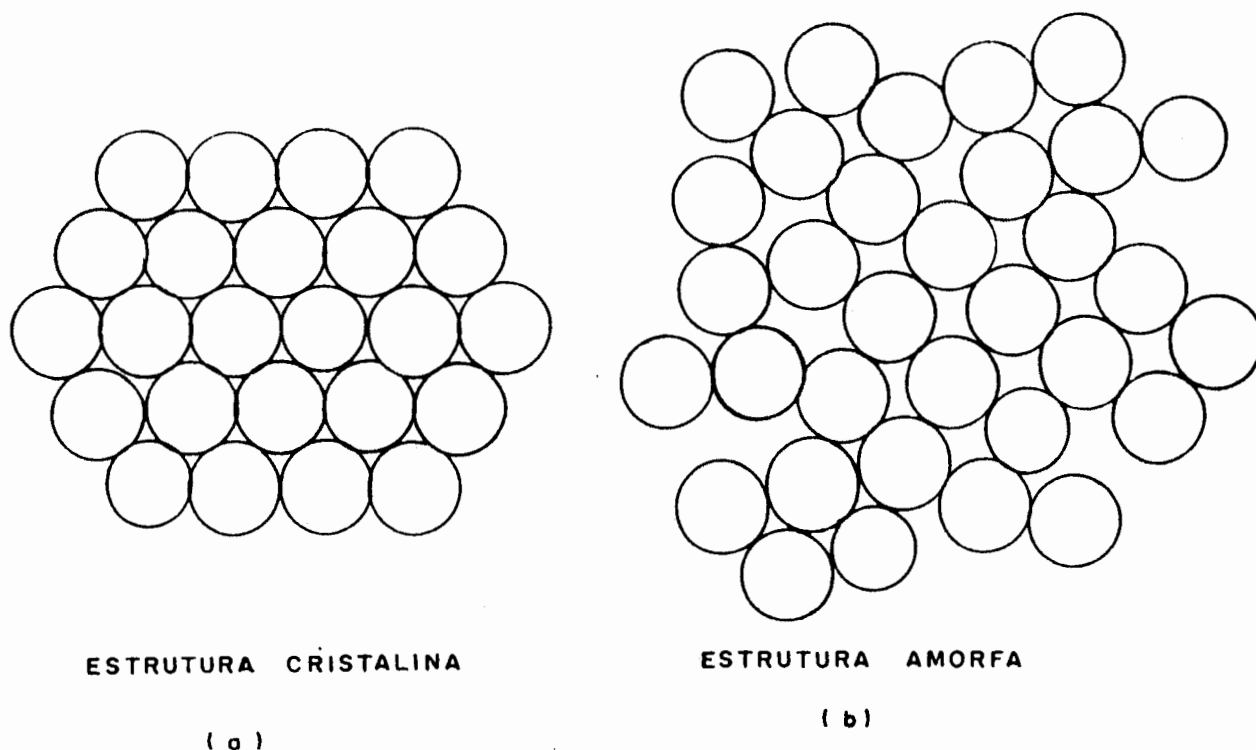


FIGURA 2.4.1 - Esquema da estrutura atômica cristalizada (a) e amorfa (b).

Há duas importantes classes de ligas magnéticas amorfas sob o ponto de vista tecnológico. A primeira, já citada, resulta de ligação de um ou mais metais de transição com um ou mais metalóides. A segunda compõe-se de terra-rara mais metal de transição e não será objeto de discussão deste trabalho<sup>6</sup>.

### 2.4.3 - Fabricação<sup>2 6 2 8</sup>

Existem diversos meios de obtenção e manufatura de metais amorfos como, por exemplo, deposição átomo por átomo, evaporação térmica e resfriamento rápido. A exceção da última técnica, as demais requerem altos custos de fabricação por unidade de

material amorfo produzido. Já a última é a que tem suscitado maior interesse devido aos baixos custos de fabricação, rapidez do processo, resultando um material amorfo com melhor uniformidade. É este processo que será melhor analisado a seguir.

#### 2.4.3.1 - Obtenção de Metal Amorfo por Resfriamento Rápido

O método de resfriamento rápido baseia-se no princípio de que algumas ligas fundidas podem ser resfriadas tão rapidamente que não terão tempo bastante para cristalizarem-se antes de solidificar<sup>26 27</sup>, conforme explicado em 2.4.2.

Isto pode ser feito por meio de uma técnica de produção contínua que provoca o resfriamento rápido a uma taxa de  $10^6$  K/s com a ejeção da liga fundida sobre uma superfície em movimento. A taxa de resfriamento citada ( $10^6$  K/s) é necessária para ativar o estado amorfo em ligas metálicas<sup>26 27</sup>.

A figura 2.4.3.1(a) e 2.4.3.1(b) permitem uma melhor visualização deste processo.

Observe-se que a figura 2.4.3.1(a) a liga metálica é fundida em um tubo de quartzo através do aquecimento por resistência ou por alta frequência. Através da aplicação de um gás a uma pressão na faixa de 0,35-3,5 kg/cm<sup>2</sup> e tendo o tubo de quartzo um orifício de 0,5-2mm de diâmetro, o material é ejetado sobre uma roda ou cilindro que gira à velocidade de 10-50 m/s, a roda esta feita de material de alta condutividade térmica, como o cobre e, se for o caso, com resfriamento contínuo e forçado. A roda não deverá ter falhas ou rugosidades em sua superfície de maneira a evitar falhas na fita que sobre ela se forma, minimizando a rugosidade desta fita. O resultado é a solidificação da

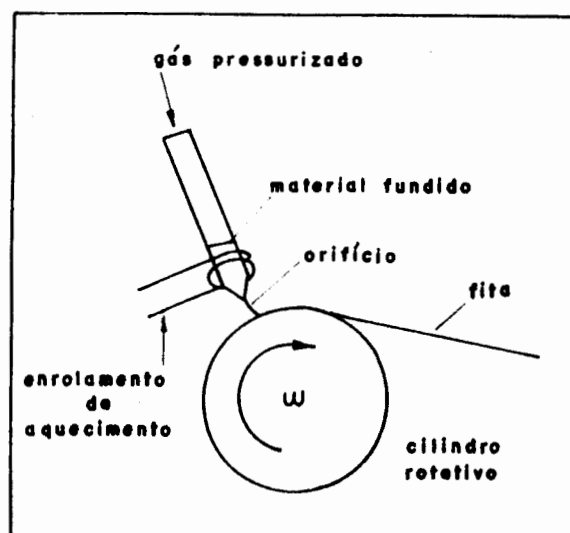


FIGURA 2.4.3.1(a) - Representação esquemática do processo de produção contínua de fita amorfa por resfriamento rápido.

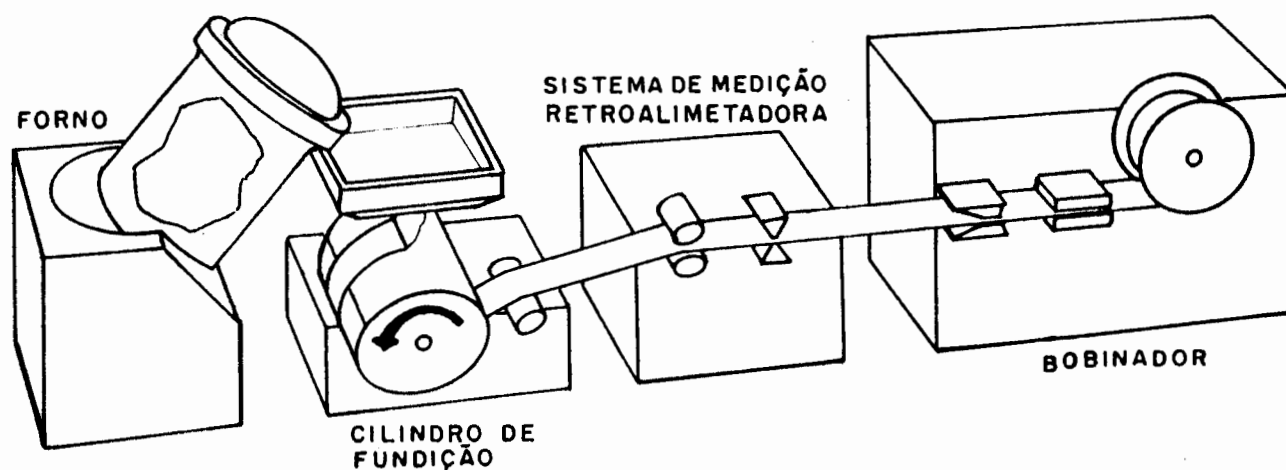


FIGURA 2.4.3.1(b) - Esquema de produção industrial de fita amorfa por resfriamento rápido.

liga na forma de fita contínua com espessura de 10 - 50  $\mu\text{m}$  e largura de 1 - 3 mm. É o efeito de rotação da roda com alta condutibilidade térmica e resfriada que provoca a alta taxa de resfriamento citada. Pode-se obter fitas mais largas usando-se um orifício alongado no tubo de quartzo ou colocando vários tubos em paralelo<sup>26 27</sup>.

Este processo popularizou-se entre os fabricantes e grupos de pesquisa, pois é relativamente simples em relação aos processos utilizados para obter material cristalino. Envolve apenas um passo do material fundido à formação da fita. Já os processos para obtenção de material cristalino envolvem 6 a 10 passos (lingotamento, laminação a quente, a frio, recozimento, decapagem, etc.). Gasta cerca de 80% menos de energia que os processos convencionais para obter fitas cristalinas. Tem condição de produzir industrialmente  $10^3\text{m/min}$  de fita. É facilmente controlável. Esta técnica pode ser feita na presença de ar, mas tem obtido melhores resultados em atmosfera inerte a baixa pressão. Os parâmetros principais a serem considerados são a velocidade da roda ou cilindro, as dimensões do orifício do tubo de quartzo, a temperatura da liga metálica fundida e da roda e o ângulo de ejeção sobre a superfície da roda<sup>26 25</sup>.

#### 2.4.4 - Características e Propriedades

Os metais amorfos reconhecidamente estão entre os materiais ferromagnéticos mais facilmente magnetizáveis. Alguns podem ser magnetizados pela aplicação de campos da ordem de milioerstedes, ou seja, cem vezes menos que o campo magnético terrestre.

Anteriormente ao descobrimento das ligas amorfas magnéticas, somente ligas FeNi, como o Permalloy, podiam ser tão facilmente magnetizáveis.

A tabela 2.4.4 apresenta algumas características relevantes de ligas amorfas<sup>3 10 18 25 26 36 43 45</sup>, bem como de materiais ferromagnéticos convencionais<sup>5 11</sup> para facilitar alguma comparação.

TABELA 2.4.4 - Características magnéticas de algumas ligas amorfas e cristalinas.

LIGA		B <sub>S</sub> (T)	H <sub>c</sub> (A/m)	λ (x10 <sup>-6</sup> )	ρ (μΩcm)	T <sub>C</sub> (°C)	P <sub>M</sub> a 60Hz e 1,4T(W/kg)
AMORFOS	Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub> <sup>3 10</sup>	1,60	8,0	30	140	375	0,8
	Fe <sub>78</sub> B <sub>13</sub> Si <sub>9</sub> <sup>3 18 25</sup>	1,56	2,4	27	130	415	0,23
	Fe <sub>67</sub> Co <sub>18</sub> B <sub>14</sub> Si <sub>3</sub> <sup>36</sup>	1,80	4,0	35	130	415	0,55
	Fe <sub>40</sub> Ni <sub>38</sub> Mo <sub>4</sub> B <sub>10</sub> <sup>46</sup>	0,88	1,2	12	160	353	-
CRISTALINOS	50% Ni - Fe <sup>11 43</sup>	1,6	8,0	25	45	480	0,7
	Fe <sub>97</sub> Si <sub>3</sub> <sup>2 11</sup>	2,0	7	9	47	740	1,0

Na tabela 2.4.4 pode-se verificar a alta resistividade elétrica ρ dos metais amorfos apresentadas em relação aos ferromagnéticos convencionais. É importante mostrar que muitos metais amorfos apresentam menor B<sub>S</sub> e, em muitos casos, menor H<sub>c</sub> relativamente a ligas cristalinas convencionais.

As perdas magnéticas por histerese mais baixas são explicadas pela mobilidade dos domínios magnéticos, pois não há fronteiras de grão. Isto resulta da sua estrutura homogênea. Deve-se esclarecer que a nível macroscópico, as baixas perdas mag-

néticas totais são devidas também à sua alta resistividade elétrica, que conjugada com a pequena espessura da fita, resulta em alta resistência elétrica, diminuindo com isto, as perdas por correntes parasitas. Observe-se que é quase quatro vezes maior que em ligas cristalinas.

No que diz respeito à estabilidade térmica<sup>26 20</sup>, os metais amorfos têm, para a temperatura de operação normal, vida útil de mais de 25 anos. Por exemplo, o  $Fe_{80}B_{20}$  é um dos menos estáveis. Nele a cristalização começará a  $175^{\circ}C$  depois de 550 anos ou a  $200^{\circ}C$  depois de 25 anos. Este tempo de vida é razoável para a maioria das aplicações.

Os laços de histerese de metais amorfos são controláveis a partir de variados processos de recozimento do material. A figura 2.4.4 mostra isto. A alta magnetostricção de certas ligas amorfas faz com que elas sejam sensíveis aos esforços mecânicos a que forem sujeitas. Isto significa que suas qualidades magnéticas se degradarão. É, de certa forma, semelhante ao já exposto com relação aos materiais ferromagnéticos convencionais. Faz-se, portanto, necessário, neste caso também, que o metal amorfo, após ter sido sujeito a esforços mecânicos oriundos do processo de manufatura de circuitos magnéticos que o use, sofra um processo de recozimento térmico. Adicionalmente, deve ser aplicado durante o recozimento um campo magnético de elevado valor que coloque o material em situação de saturação magnética durante o recozimento. Via de regra, o valor desse campo é de 10 Oe. A temperatura de recozimento máxima é em torno da temperatura Curie da liga<sup>3</sup>.

A ausência de grão no metal amorfo explica a sua alta resistência à corrosão, pois é justamente na fronteira de grão que inicia e tem lugar a corrosão. Por isso, no metal amorfo a

INDUÇÃO MAGNÉTICA - B - [ T ]

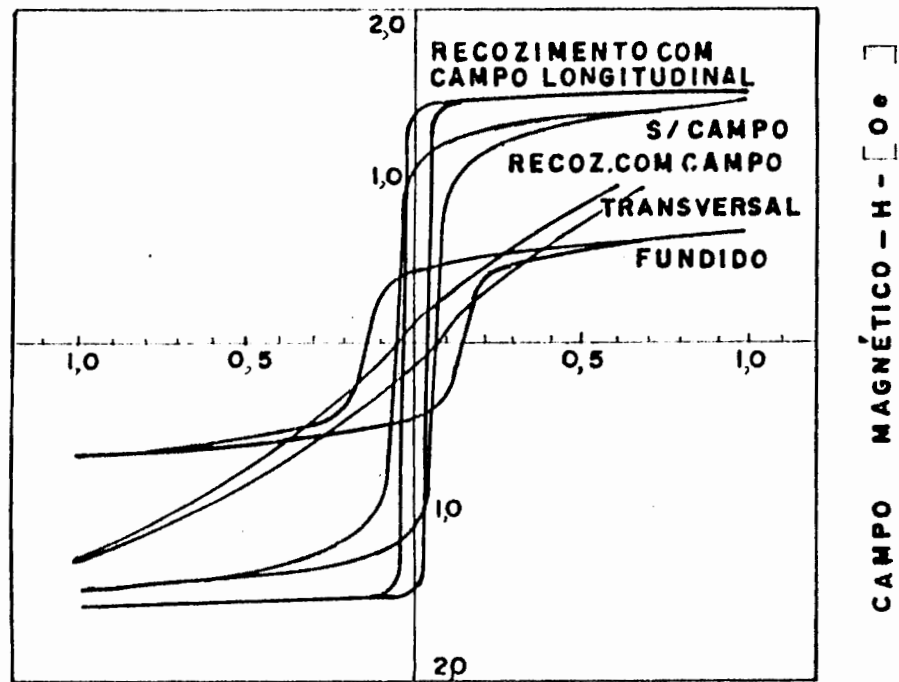


FIGURA 2.4.4 - Laços de histerese em função do recozimento do METGLAS 2605SC<sup>3</sup>

corrosão se dá a nível superficial.

É surpreendente que os metais amorfos apresentem, ao mesmo tempo, alta dureza e extrema ductibilidade. Por isso uma das primeiras aplicações sugeridas para eles foi mecânica e não magnética<sup>6</sup>. Têm alta flexibilidade sem perda de dureza e alta tensão de cisalhamento. No entanto, estas características dificultam a manufatura de circuitos magnéticos.

#### 2.4.5 - O Metal Amorfo $Fe_{81}B_{13}Si_3C_2$ (METGLAS 2605SC)<sup>3</sup>

Será apresentado de forma mais detalhada as características deste material, uma vez que ele foi escolhido, basicamente em função da disponibilidade, para este trabalho, no estudo da aplicação de metais amorfos.

##### 2.4.5.1 - Características

De forma geral, esta liga amorfa tem as mesmas características interessantes de outras baseadas em ferro: baixo  $B_S$ , baixo  $H_c$ , alta  $\rho$ , baixa  $P_{MT}$ .

A tabela 2.4.5.1<sup>3</sup> apresenta detalhadamente as características nominais de interesse deste material e que servirão de base para seu estudo neste trabalho.

As figuras 2.4.5.1(a), 2.4.5.1.(b) e 2.4.5.1(c) apresentam as características de laço de histerese, perdas magnéticas e magnetização de interesse deste trabalho para o material corretamente recozido.



TABELA 2.4.5.1 - Características nominais da liga amorfa METGLAS 2605SC<sup>3</sup>

B <sub>S</sub> (T)	T <sub>C</sub> (°C)	T Cristal. (°C)	ρ (μ cm)	λ de saturação (x10 <sup>-6</sup> )	μ máx	γ (g/cm <sup>3</sup> )	Ke (%)	Espessura de fita (μm)	Largura de fita (mm)	Dureza Vicker Hv-30g
1,61	370	480	135	30	300.000	7,32	> 75	25	50	880

Módulo de Elasticidade (x10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup> )	Expansão Térmica (x10 <sup>-6</sup> /°C)	Condutividade Térmica 10-100°C (W/m°C)	Temperatura de Serviço Contí- nuo (°C)
58	5,9	9	125

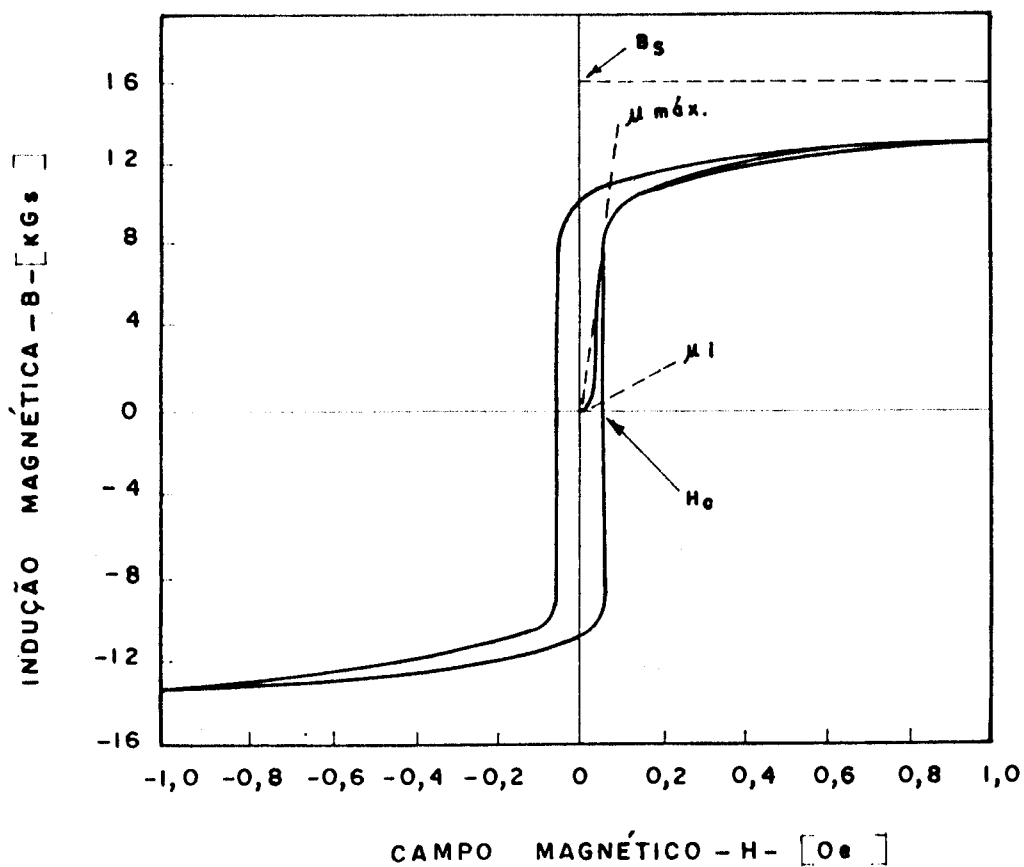


FIGURA 2.4.5.1(a) - Laço de histerese típico do METGLAS 2605SC<sup>3</sup>

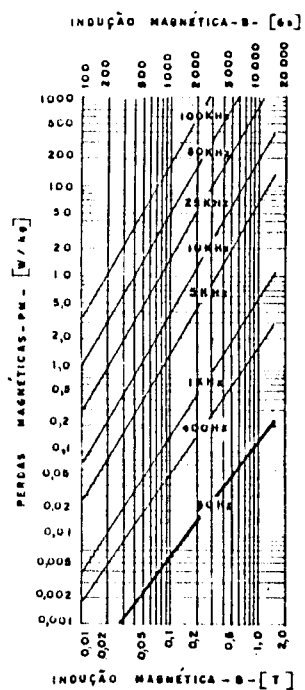


FIGURA 2.4.5.1(b) - Curva de perdas magnéticas do METGLAS 2605SC<sup>3</sup>

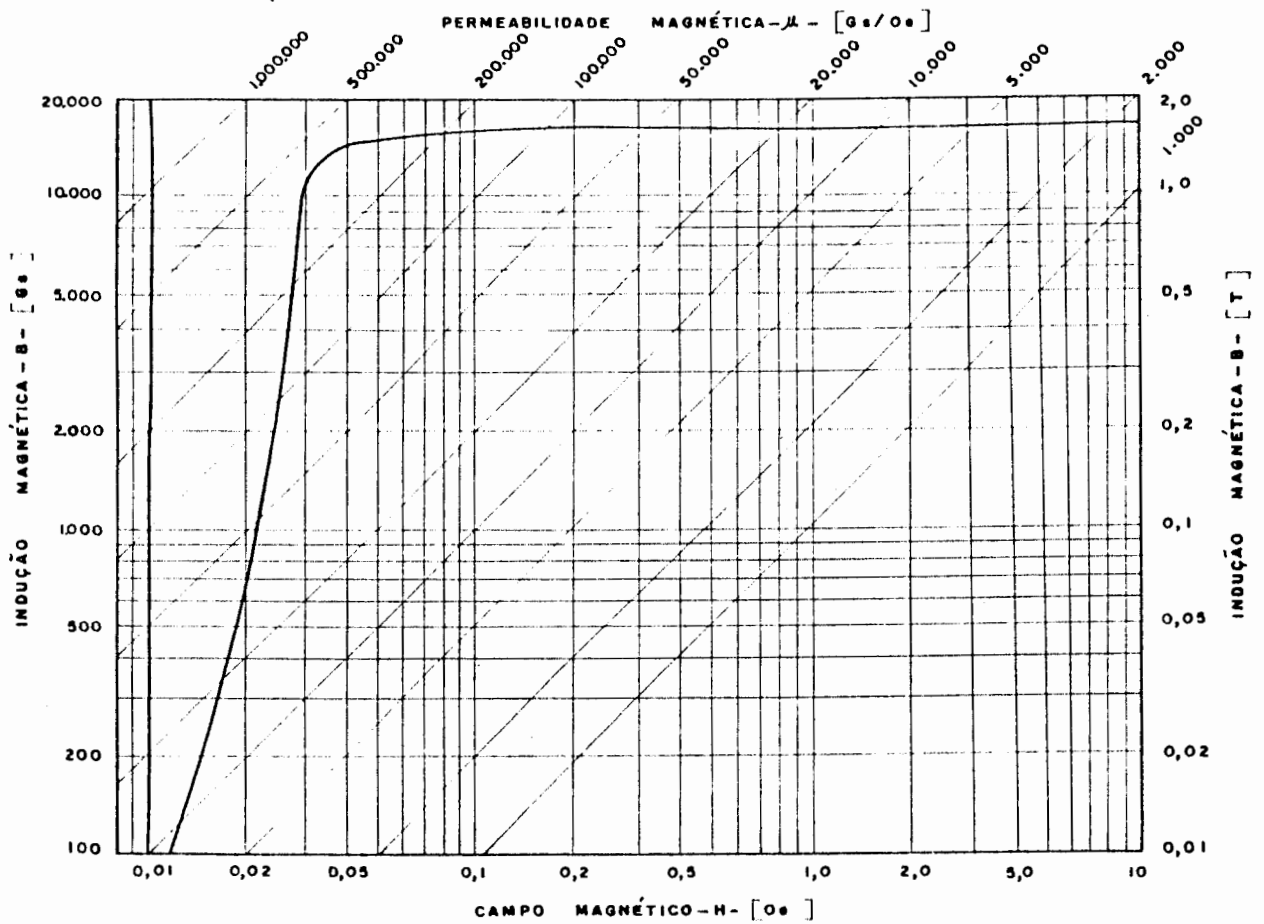


FIGURA 2.4.5.1(c) - Curva de magnetização inicial do METGLAS 2605SC<sup>3</sup>

#### 2.4.5.2 - Utilização e Manuseio

É importante, no escopo deste trabalho, esclarecimentos sobre a utilização e manuseio da liga amorfa  $Fe_{81}B_{13}Si_3C_2$ . É o que se apresenta a seguir.

##### 2.4.5.2.1 - Uso<sup>3</sup>

As características da liga amorfa  $Fe_{81}B_{13}Si_3C_2$  indicam para o seu uso em transformadores de pulso, chaves magnéticas e transdutores magnetoelásticos (esta última em função da elevada magnetostricção  $\lambda$ ). No entanto, seu uso pode também atender outras aplicações magnéticas.

##### 2.4.5.2.2 - Manuseio, Forma de Emprego e Recozimento

Pela sua forma em fita muito fina, é importante usar luvas de couro para evitar cortes durante o manuseio. Deve-se evitar tocar diretamente no material e é necessário conservá-lo, durante o armazenamento, em atmosfera seca. Isto diminui a formação de oxidação prejudicial à montagem, que piora o fator de empilhamento e introduz tensões mecânicas superficiais<sup>3 34</sup>.

Recomenda-se que, na confecção de um núcleo toroidal, as faces deste núcleo fiquem na horizontal para facilitar a acomodação do material.

Procurar enrolar o núcleo a uma taxa de 15m/min com tensão constante de 750gf. Após a montagem do núcleo, acinturá-lo com material resistente à temperatura de recozimento da liga e de coeficiente de dilatação similar ao dela. O toróide deverá ser montado sobre um suporte de material rígido, indeformável e resistente ao recozimento. Por exemplo, um cilindro de material cerâmico. Isto de forma a evitar a deformação do núcleo durante o recozimento. Ao final, deverá ser removido<sup>3 34</sup>.

O recozimento, necessário para eliminar tensões mecânicas originadas na montagem e restituir ao material suas características magnéticas, deverá ocorrer em atmosfera inerte (por exemplo, nitrogênio) e segundo a curva de tratamento térmico apresentada na figura 2.4.5.2.2.

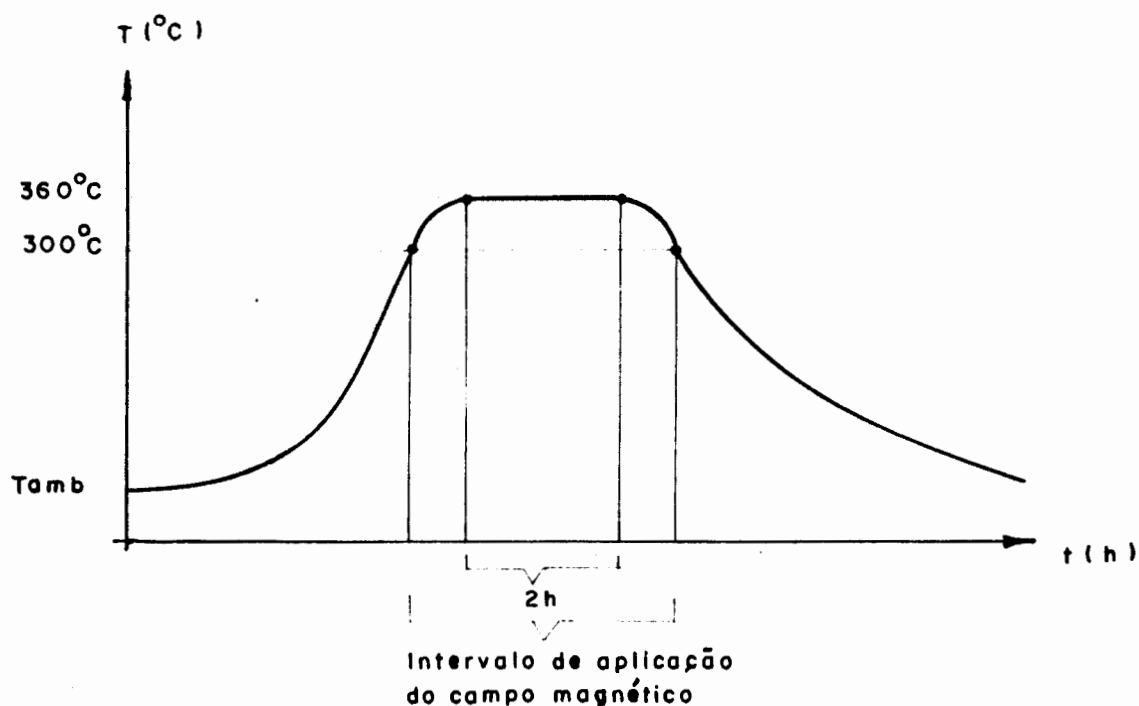


FIGURA 2.4.5.2.2 - Curva de tratamento térmico do METGLAS 2605SC<sup>3</sup>.

É importante não esquecer que se deve sujeitar o núcleo, durante o recozimento, à aplicação de um campo magnético de 10 Oe produzindo um fluxo no sentido do fluxo de operação do transformador. É importante, durante o recozimento, monitorar a temperatura sobre a amostra, evitando diferenças de temperatura superiores a  $10^{\circ}\text{C}$  na mesma e variação de temperatura de recozimento maiores que  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Durante o aquecimento da amostra no recozimento, a taxa de elevação de temperatura deve ser de  $1-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Da mesma forma no resfriamento<sup>3 34</sup>.

O enrolamento provisório que se colocará no núcleo de metal amorfo para possibilitar a aplicação de campo durante o recozimento deve ter isolamento que suporte a temperatura de recozimento.

Após o recozimento, o material estará relaxado. É necessário, por isto e para evitar a indução de novas tensões mecânicas durante a confecção do enrolamento, manuseá-lo com cuidado<sup>34</sup>.

### 3. TRANSFORMADORES

Como objetivo deste trabalho, pretende-se verificar a aplicação de metal amorfo na construção do circuito magnético de um pequeno transformador.

Faz-se, portanto, necessário apresentar aqui a introdução à teoria do transformador, a análise do mesmo, características, marcha de projeto e tipos de testes realizáveis para sua caracterização.

#### 3.1 - Princípio de Funcionamento

Essencialmente, um transformador é constituído por dois ou mais enrolamentos concatenados por um fluxo magnético mútuo. Quando um desses enrolamentos, o primário for ligado à fonte de tensão senoidal, será produzido um fluxo magnético também senoidal, cuja amplitude dependerá da tensão, do núcleo de espiras, do primário, da frequência e da seção magnética do núcleo<sup>13</sup>.

O fluxo mútuo concatenar-se-á com outro enrolamento, o secundário, e induzirá uma tensão cujo valor dependerá do número de espiras deste enrolamento. Tal efeito poderá ser obtido utilizando um núcleo de ar, porém o acoplamento magnético é muito melhor com a utilização de material ferromagnético. O material ferromagnético proporciona um confinamento do fluxo magné-

tico a um caminho definido, concatenando ambos os enrolamentos, pois tem permeabilidade magnética muito mais alta que o ar.

A figura 3.1(a) apresenta o modelo de transformador de dois enrolamentos real.

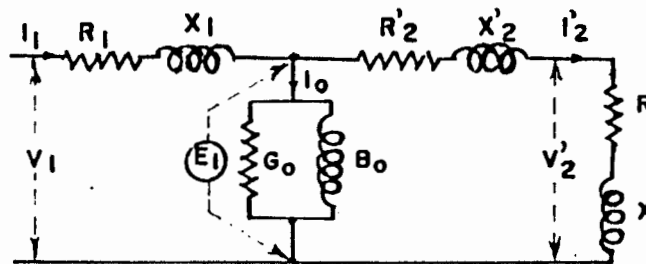


FIGURA 3.1(a) - Modelo de transformador de dois enrolamentos<sup>1,3</sup>.

Já a figura 3.1(b) apresenta o diagrama fasorial do transformador de dois enrolamentos sob carga.

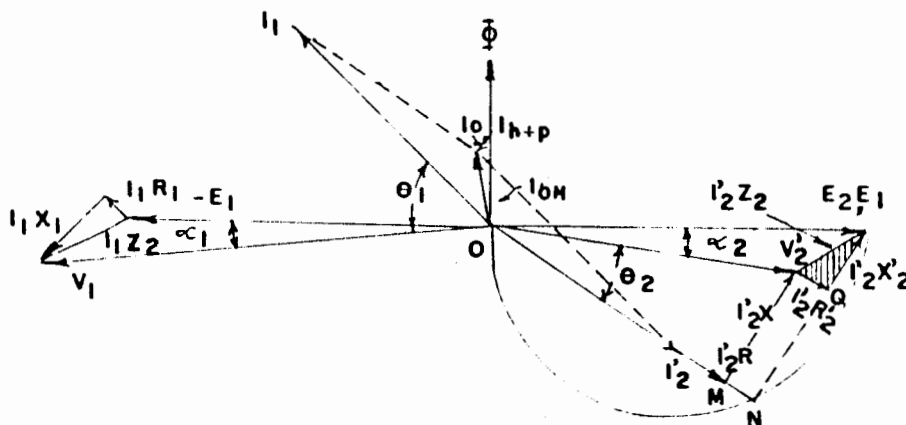


FIGURA 3.1(b) - Diagrama fasorial do transformador de dois enrolamentos sob carga<sup>1,3</sup>.



### 3.2 - Considerações Analíticas

As tensões induzidas em valores instantâneos  $e_1$  e  $e_2$  são dadas por:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2.1)$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2.2)$$

onde  $N_1$  = número de espiras no primário,

$N_2$  = número de espiras no secundário,

$\phi$  = fluxo magnético em função do tempo, em Wb,

$t$  = tempo, em s.

Operando (3.2.1) e (3.2.2) obtém-se, para uma variação senoidal de fluxo os valores eficazes de tensão  $E_1$  e  $E_2$

$$E_1 = 4,44 f N_1 Sm B \quad (3.2.3)$$

$$E_2 = 4,44 f N_2 Sm B \quad (3.2.4)$$

pois

$$\phi = B \cdot Sm \quad (3.2.5)$$

sendo  $f$  = frequência de alimentação, em Hz,

$B$  = indução magnética, em Wb/m<sup>2</sup>,

$Sm$  = secção magnética.

Operando (3.2.3) e (3.2.4), obtém-se a relação de transformação  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.2.6)$$

Da conservação de energia, sendo

$$I_2' = I_1 - I_0 \quad (3.2.7)$$

$$S_1 = E_1 I_2' \quad (3.2.8)$$

$$S_2 = E_2 I_2 \quad (3.2.9)$$

onde  $I_2'$  = corrente de carga do primário, em A,

$I_1$  = corrente primária, em A,

$I_0$  = corrente de excitação, em A,

$S_1$  = potência aparente primária, em VA,

$S_2$  = potência aparente no secundário, em VA,

tem-se

$$S_1 = S_2 \quad (3.2.10)$$

Logo:

$$\frac{I_2'}{I_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = \alpha \quad (3.2.11)$$

Da lei de Ampère

$$N_1 \cdot I_0 = H \cdot \ell_m \quad (3.2.12)$$

sendo  $H$  = campo magnético em Aesp/m,

$\ell_m$  = comprimento médio do caminho magnético, em m.

### 3.3 - Equações de Projeto<sup>24 42</sup>

O cálculo da secção magnética  $S_m$  é dado por:

$$S_m = 6\left(\frac{S}{f}\right)^{1/2} \quad (3.3.1)$$

onde  $S$  = potência aparente do transformador, em VA.

Em um núcleo toroidal, sendo:

$H_p$  = altura do pacote de fitas, em m,

$D_e$  = diâmetro externo do toróide, em m,

$E$  = largura da fita, em m,

$K_e$  = fator de empilhamento absoluto,

$V_n$  = volume de material magnético do núcleo, em  $m^3$ ,

$S_g$  = secção geométrica do núcleo, em  $m^2$ ,

$P_nR$  = peso real do núcleo, em kg,

$\gamma$  = massa específica, em  $kg/m^3$ ,

$V_1$  = tensão primária,

$V_2$  = tensão secundária,

$P_M$  = perdas magnéticas específicas, em W/kg,

$P_{MT}$  = perdas magnéticas totais, em W e

$\ell_{cn}$  = comprimento da espira média, em m, temos:

$$H_p = \frac{D_e - D_i}{2} \quad (3.3.2)$$

$$S_g = \frac{E(D_e - D_i)}{2} \quad (3.3.3)$$

$$\ell_m = \frac{\pi}{2} (D_e + D_i) \quad (3.3.4)$$

$$V_n = \frac{\pi}{4} k_e E (D_e^2 - D_i^2) \quad (3.3.5)$$

$$K_e = \frac{S_m}{S_g} = \frac{4 P_n R}{\gamma E \pi (D_e^2 - D_i^2)} \quad (3.3.6)$$

$$P_n = \gamma V_n \quad (3.3.7)$$

$$N_1 = \frac{V_1}{4,44 f S_m B} \quad (3.3.8)$$

$$N_2 = \frac{V_2}{4,44 f S_m B} \quad (3.3.9)$$

$$P_{MT} = P_M \cdot P_n R \quad (3.3.10)$$

$$\ell_{cn} = 2,20 (H_p + E) \quad (3.3.11)$$

Considera-se a relação de Arnold para este tipo de transformador:

$$\frac{\ell_{cn}}{\ell_m} \approx 0,70 \quad (3.3.12)$$

$$L_0 = \frac{B S_m N_1}{I_{OM}} \quad (3.3.13)$$

$$R_0 = \frac{V_1^2}{P_{MT}} \quad (3.3.14)$$

onde  $L_0$  = indutância de magnetização, em H,

$R_0$  = resistência equivalente de perdas magnéticas, em ohm,

$I_{OM}$  = corrente de magnetização, em A.

### 3.4 - Verificação de Características

Será apresentado neste item, os tipos de testes a serem sujeitos os protótipos montados, com vistas a verificar-lhes as características.

#### 3.4.1 - Testes Gerais

Estes testes permitirão analisar  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $\alpha$ ,  $I_0$  e  $P_{MT}$ .

Para tanto, utiliza-se o circuito apresentado na figura 3.41, onde 'T' representa o transformador a ser ensaiado, 'V' é voltímetro de ferro móvel, 'mA' é um miliamperímetro de ferro móvel e 'W' um wattímetro monofásico, sendo que este último mede a potência a vazio de 'T', isto é,  $P_0$ .

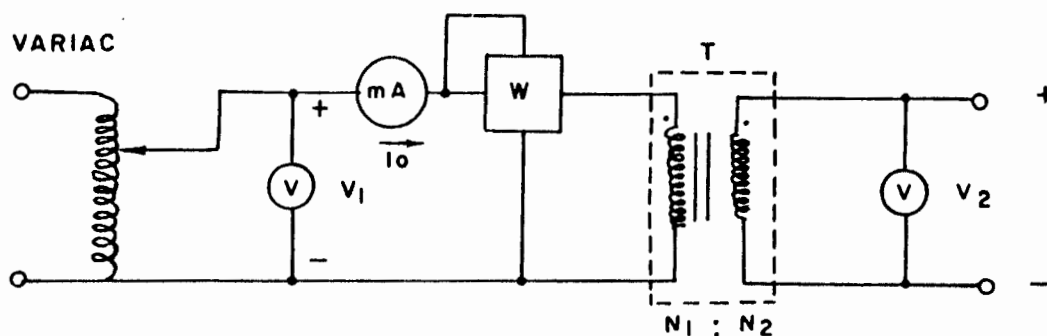


FIGURA 3.4.1 - Esquema para testes gerais do transformador.

A vantagem de utilizar o variac (variador de tensão) na alimentação do sistema é por propiciar o levantamento de relação entre  $I_0$  e  $V_1$  e entre  $P_{MT}$  e  $V_1$ .

### 3.4.2 - Verificação de Laço de Histerese"

A idéia é, de forma rápida e confiável e utilizando o transformador em teste, visualizar e avaliar o laço de histerese da amostra nas condições normais de funcionamento para as quais foi projetada.

Basicamente, implementa-se o circuito da figura 3.4.2.

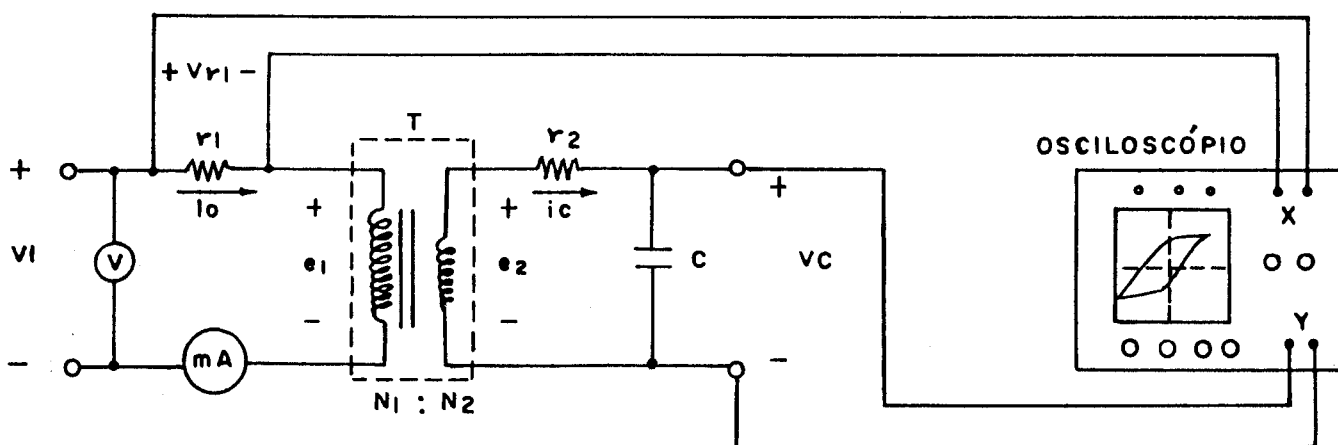


FIGURA 3.4.2 - Circuito para levantamento de laço de histerese da amostra.

De (3.4.12) temos:

$$H = \frac{N_1 I_0}{\ell_m} \quad (3.4.2.1)$$

Da figura 3.4.2 deduz-se que:

$$I_o = \frac{V_{r_1}}{r_1} \quad (3.4.2.2)$$

onde  $V_{r_1}$  = tensão sobre o resistor  $r_1$ , em V

e  $r_1$  = resistor de amostragem no primário, em ohm

então:

$$H = \frac{N_1 V_{r_1}}{\ell_m r_1} \quad (3.4.2.3)$$

A condição para que o circuito  $r_2C$  seja integrador é

que:

$$r_2 \gg \frac{1}{C} \quad (3.4.2.4)$$

sendo  $r_2$  = resistência do integrador, em ohm

e  $C$  = capacitância do integrador, em F.

Então:

$$\frac{V_2}{r_2} \approx C \frac{dV_c}{dt} = i_c \quad (3.4.2.5)$$

onde  $i_c$  = corrente no capacitor, em A

e  $V_c$  = tensão no capacitor, em V.

Substituindo (3.2.2) em (3.4.2.5), tem-se:

$$i_c = \frac{N_2}{r_2} \frac{d\phi}{dt} \quad (3.4.2.6)$$

Por conseguinte:

$$\frac{N_2}{r_2} \frac{d\phi}{dt} = C \frac{dV_c}{dt}$$

$$d\phi = \frac{r_2 C}{N_2} dV_c \quad (3.4.2.7)$$

Integrando (3.4.2.7)

$$\int_0^{\phi} d\phi = \int_0^{V_c} \frac{r_2 C}{N_2} dV_c \quad (3.4.2.8)$$

$$\phi(t) = \frac{r_2 C}{N_2} V_c(t) \quad (3.4.2.9)$$

Ou seja, H está diretamente relacionado com  $V_{r_1}$  e  $\phi$  está relacionado com  $V_c$ .

Medindo o sinal  $V_{r_1}$  pelo canal horizontal do osciloscópio e  $V_c$  pelo vertical, temos como resultado a composição de  $V_{r_1}$  com relação a  $V_c$ , ou seja, a menos das constantes de correção nas expressões (3.4.2.3) e (3.4.2.9), visualizaremos a relação entre  $\phi$  e H, que é o laço de histerese da amostra.

#### 4. PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

A partir do formulário para projeto de pequenos transformadores ( $S < 1\text{kVA}$ ) apresentado no capítulo 3, dos dados característicos nominais da liga amorfa  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13,5}\text{Si}_{3,5}\text{C}_2$  e da liga  $\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$ , bem como das condições iniciais de projeto que a seguir serão estabelecidos, será apresentado o projeto teórico dos dois protótipos, a forma de implementação e o resultado dos testes feitos.

##### 4.1 - Condições Iniciais do projeto

Para o protótipo do transformador com  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13,5}\text{Si}_{3,5}\text{C}_2$ , denominado T0, do qual dispunha-se 1,4kg, decidiu-se por projetá-lo com potência aparente  $S = 100\text{ VA}$ , tensão primária  $V_1 = 230\text{V}$ , tensão secundária  $V_2 = 115\text{V}$ , frequência  $f = 60\text{Hz}$ , indução de trabalho  $B = 1,5\text{T}$ . Supõe-se, inicialmente, fator de empilhamento  $K_e = 75\%$ . Adicionalmente, para a fita amorfa temos espessura  $e_f = 25\mu\text{m}$ , largura  $E = 50\text{mm}$  e  $\gamma = 7,32\text{g/cm}^3$ .

Os dados de potência, tensão e frequência e indução magnética são os mesmos para o protótipo com  $\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$ , denominado T0'. Isto deve-se ao fato de querer-se comparar os transformadores no que diz respeito a corrente de magnetização, perdas magnéticas e construção, tendo em ambos os mesmos dados de entrada.

No caso do  $\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$ , temos  $e_f = 0,3\text{mm}$ ,  $E = 50\text{mm}$ ,  $K_e = 95\%$  e  $\gamma = 7,65\text{ g/cm}^3$ . Relembrando, a geometria do núcleo é toroidal.



A tabela 4.1 apresenta as dimensões e dados calculados em primeira aproximação.

TABELA 4.1 - Dimensões e Características Estimadas dos Protótipos de Transformadores.

GRANDEZAS	MATERIAL	
	METGLAS 2605SC(TO)	GO 128-30(TO')
$I_1$ (mA)	435	435
$I_2$ (mA)	870	870
$S_m$ (cm <sup>2</sup> )	7,75	7,75
$H_{pe}$ (cm)	1,55	1,55
$H_p$ (cm)	2,00	1,63
$l_{cn}$ (cm)	15,4	14,9
$l_m$ (cm)	22,0	20,84
$D_e$ (cm)	9,0	8,26
$D_i$ (cm)	5,0	5,0
$V_n$ (cm <sup>3</sup> )	164,93	161,27
$P_nR$ (kg)	1,21	1,23
$P_{MT}$ (W)	0,2959	1,42
$N_1$ (esp)	742	742
$N_2$ (esp)	371	371
$I_0$ (μA)	667,4	9.170,00
$f_{10}N_1$ (AWG)	24	24
$f_{10}N_2$ (AWG)	22	22
$H$ (Oe)	0,04	0,58

A figura 4.1(a) mostra uma secção da fita amorfa de  $Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$  utilizada (METGLAS 2605SC).

Para o projeto teórico foram utilizadas as figuras 2.2.1(a), 2.2.1(b), 2.2.1(c), 2.4.5.1(b) e 2.4.5.1(c).

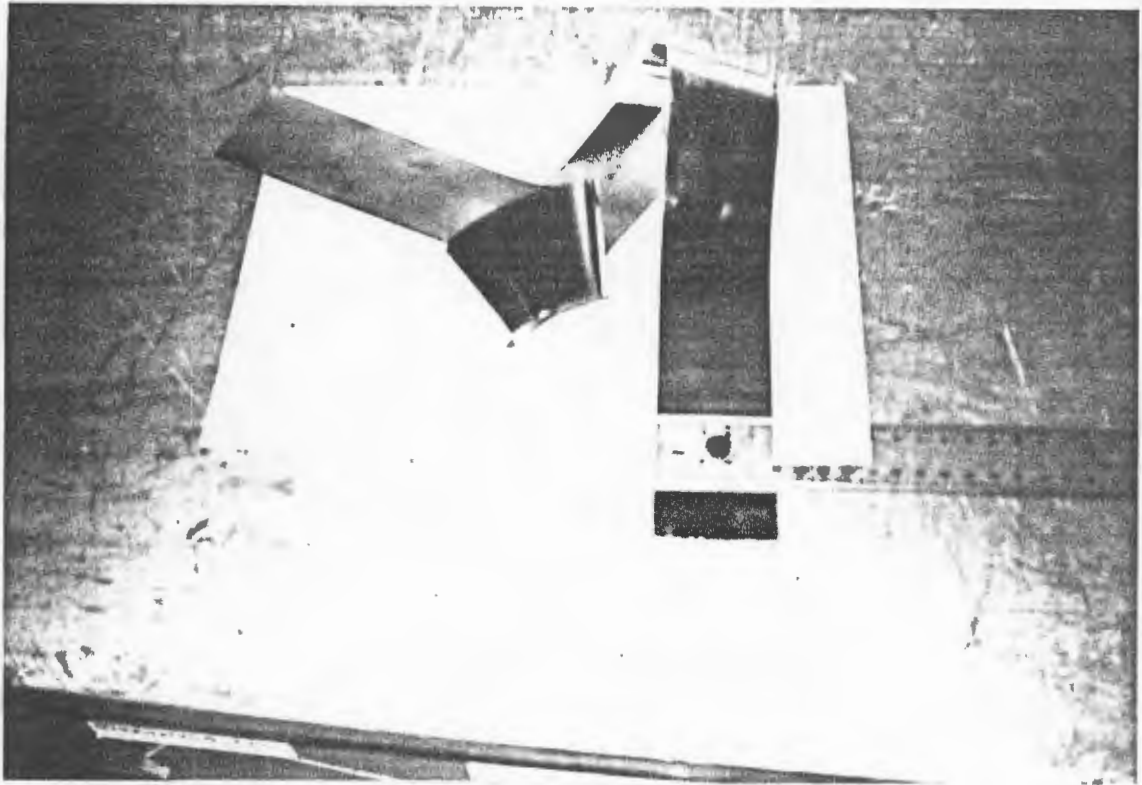
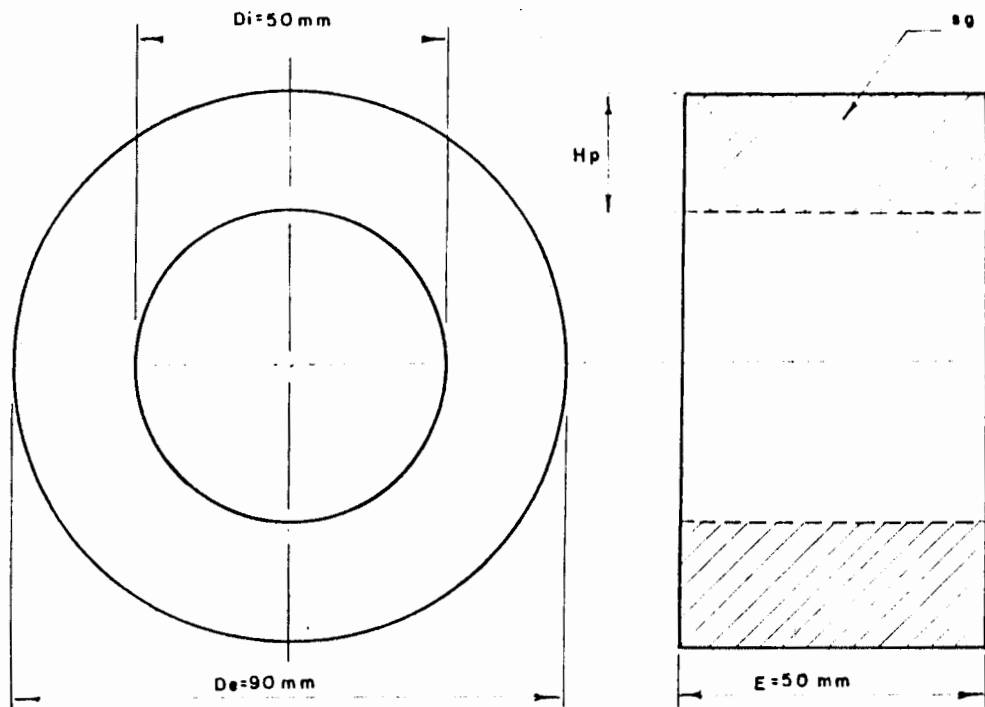


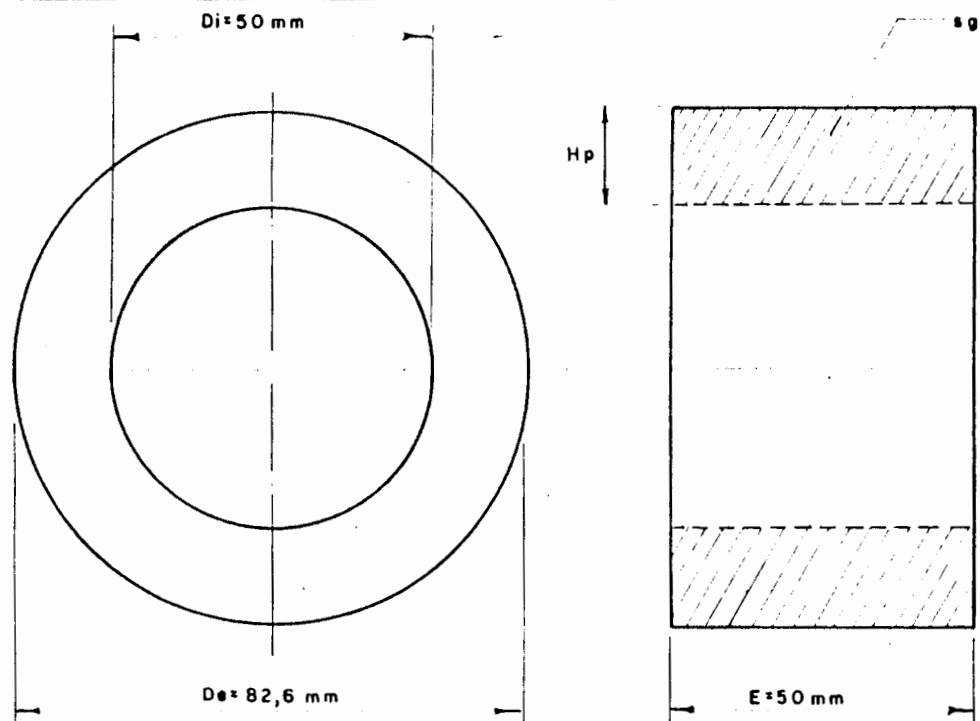
FIGURA 4.1(a) - Secção da fita amorfa utilizada.

Já as figuras 4.1(b) e 4.1(c) representam os desenhos do núcleo projetado com metal amorfo e com Fe-Si GO, respectivamente.



ESCALA: 1:1

FIGURA 4.1(b) - Desenho do núcleo amorfo projetado (TO).



ESCALA: 1:1

FIGURA 4.1(c) - Desenho do núcleo com Fe-Si GO projetado (TO').

#### 4.2 - Implementação

Com as dimensões calculadas no item anterior, os núcleos com metal amorfo (TO) e com Fe-Si GO (TO') foram implementados.

As figuras 4.2(a) e 4.2(b) mostram o núcleo com metal amorfo já montado.

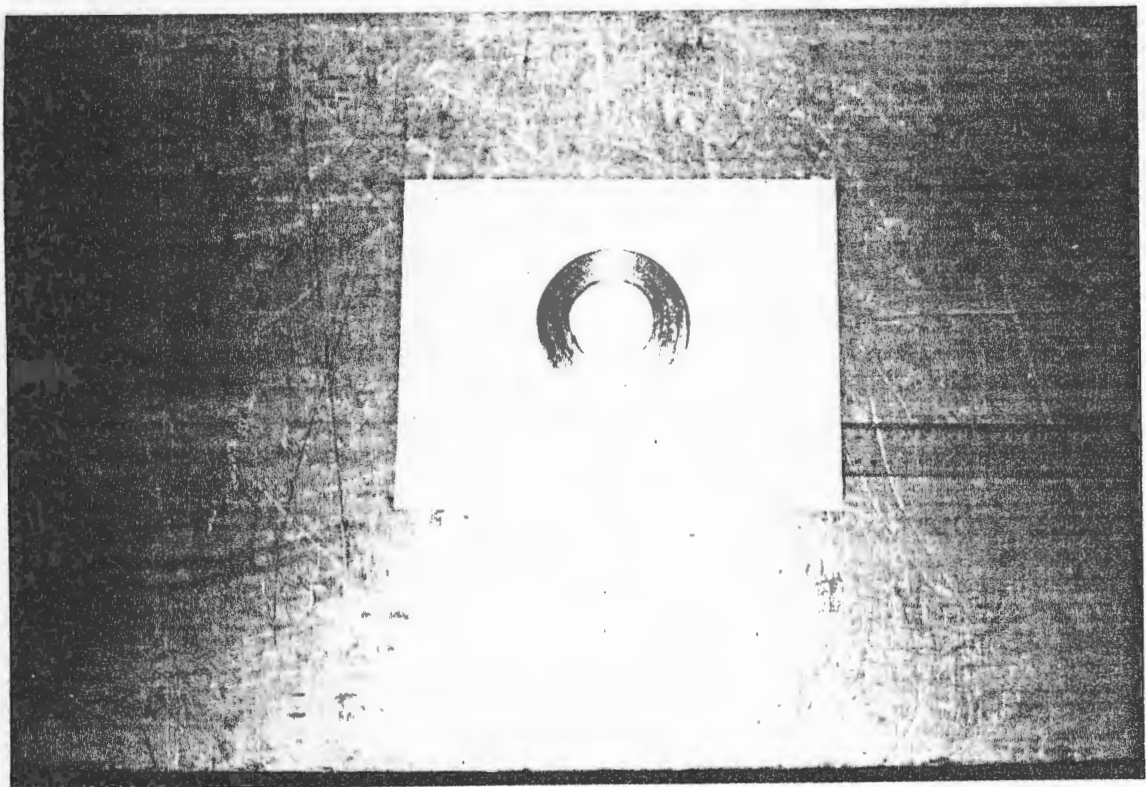


FIGURA 4.2(a) - Vista superior do núcleo com metal amorfo (TO) já montado.

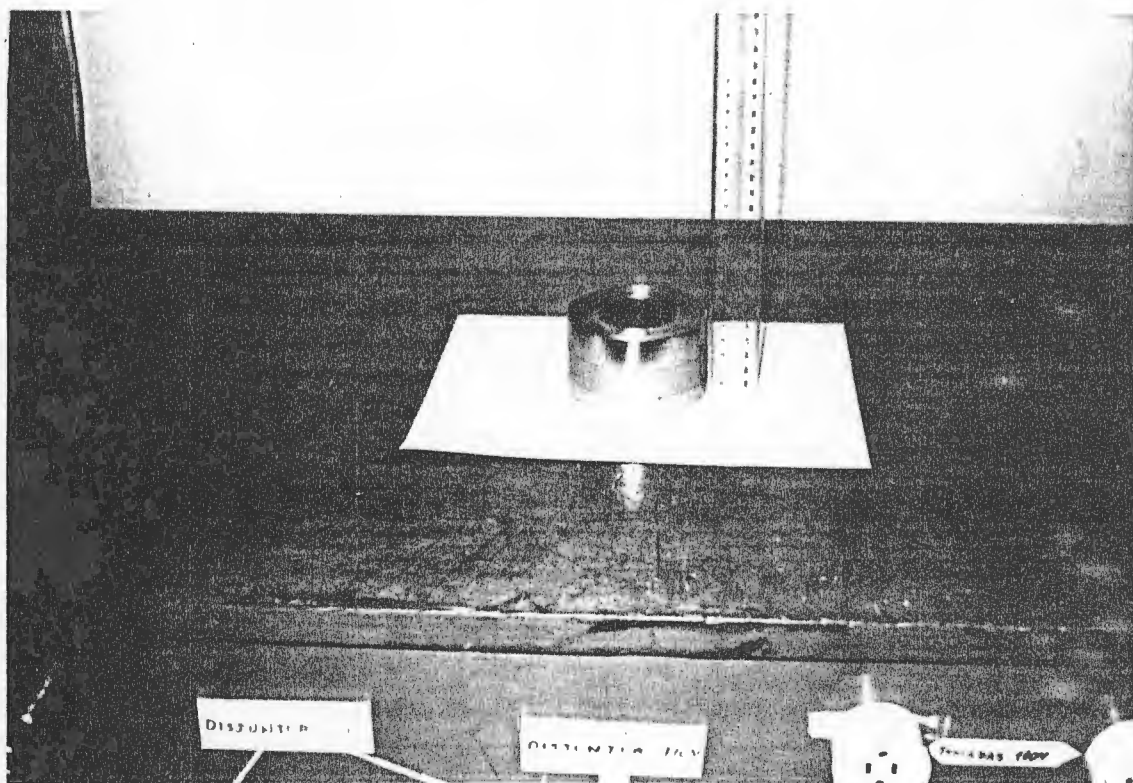


FIGURA 4.2(b) - Vista lateral do mesmo núcleo.

Na montagem manual dos núcleos, tendo havido o cuidado de tracionar as fitas de forma a melhorar o fator de empilhamento das montagens, com tração não superior a 1 kgf, feitos sobre um carretel adequado acoplado a uma máquina bobinadeira manual e limpar as fitas de resíduos orgânicos e sólidos, verificou-se as seguintes especificações finais e alterações em relação à primeira aproximação dadas na tabela 4.2.

TABELA 4.2 - Características estimadas que se alteraram em função da montagem.

GRANDEZA \ MATERIAL	METGLAS 2605SC(TO) (Fe <sub>8,1</sub> B <sub>1,3</sub> , <sub>5</sub> Si <sub>3,5</sub> C <sub>2</sub> )	GO 128-30(TO') (Fe <sub>9,7</sub> Si <sub>3</sub> )
PnR(kg)	1,12	1,62.
Ke (%)	69,58	93,72
Sm (cm <sup>2</sup> )	6,958	19,19
N <sub>1</sub> (esp)	826	826
N <sub>2</sub> (esp)	413	413
P <sub>MT</sub> (W).	0,275	1,87
I <sub>O</sub> (μA)	599,5	8.235
De (cm)	90	90,95

As alterações ocorridas devem-se as processo de montagem que obteve fatores de empilhamento diferentes dos estipulados inicialmente, pois o fator de empilhamento é uma função não só das características superficiais dos materiais como também do processo utilizado na manufatura dos núcleos. Partindo-se da condição de manter  $B = 1,5T$ , a alteração de Ke se refletiu sobre as outras grandezas de interesse.

#### 4.3 - Implementação Final

A partir dos resultados mostrados na tabela 4.2, procede-se a implementação final.

Dimensionou-se, para um campo magnético de 10 Oe, um

enrolamento isolado em amianto com 15 espiras e corrente de 12A. A figura 4.3(a) mostra o núcleo com enrolamento para o recozimento.

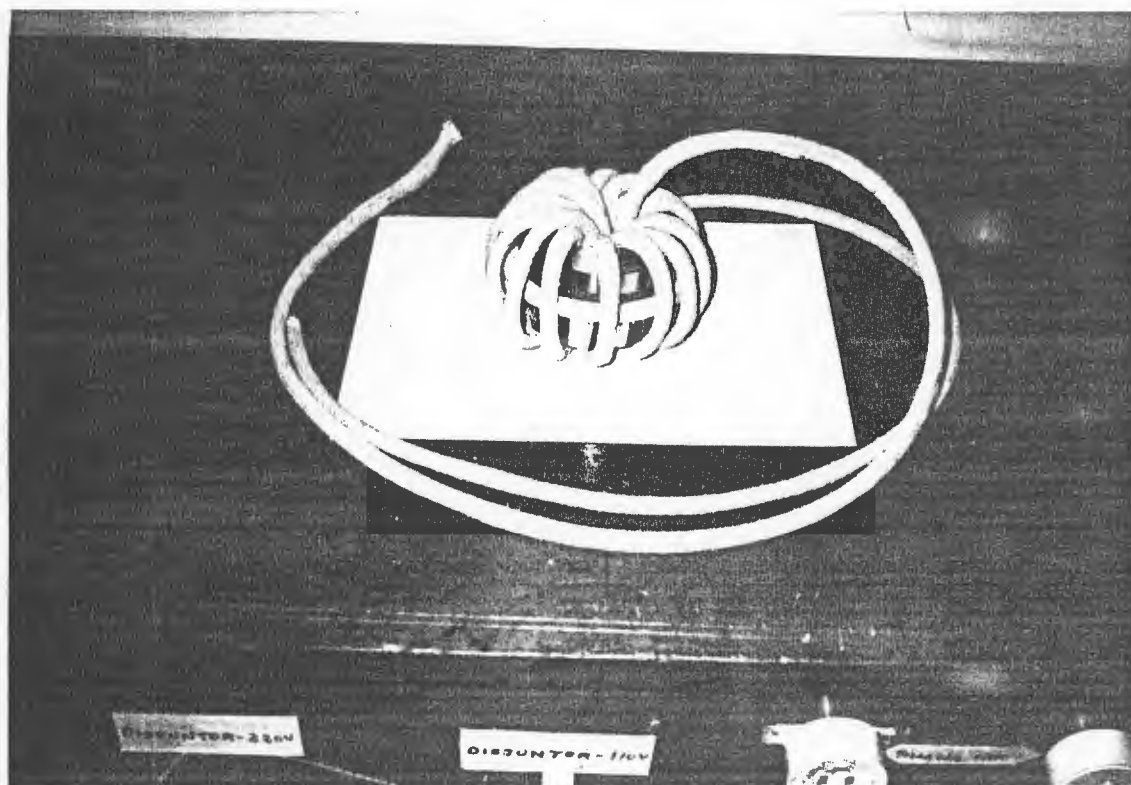


FIGURA 4.3(a) - Núcleo de metal amorfo (TO) com enro-  
lamento para recozimento.

Não foi possível executar o recozimento em atmosfera i nerte. Além disso, o forno disponível não tinha boas condições de controle. Foi constatado, onde possível, através de um termopar tipo K, gradientes de temperatura superiores a  $20^{\circ}\text{C}$  na amostra durante o recozimento. Certos pontos da amostra não eram acessíveis à medição de temperatura em função das características físi cas do forno. Portanto, não é possível garantir que toda a amostra estivesse na faixa de temperatura de recozimento.

Realizado o recozimento, partes do núcleo apresentavam uma coloração azul escuro e estavam, em alguns pontos, extremamente

te frágil, indicando cristalização destas partes.

A figura 4.3(b) mostra o enrolamento sendo manualmente instalado no núcleo com metal amorfo. Já a figura 4.3(c) mostra o transformador T0 já montado.

Em função das dificuldades encontradas para recozimento do núcleo com  $Fe_{80}Si_{10}G0$ , o transformador (T0') com este núcleo não teve os enrolamentos implementados.

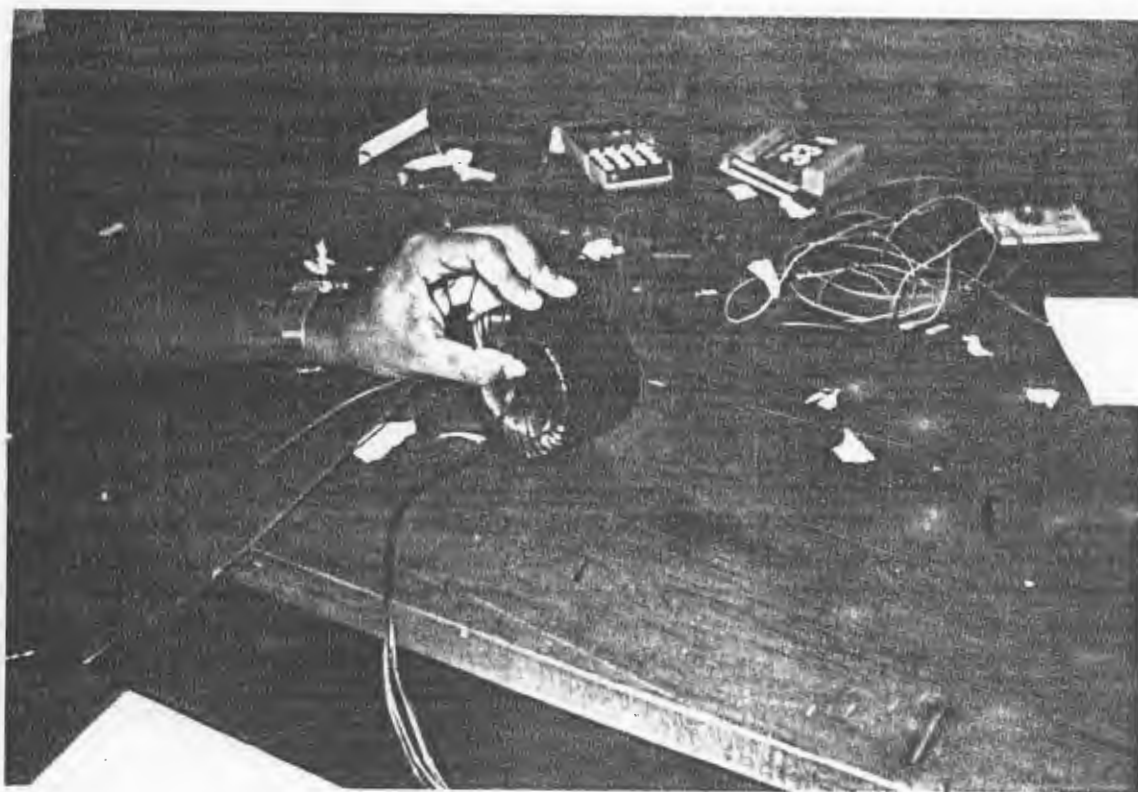


FIGURA 4.3(b) - Enrolamento sendo montado no núcleo amorfo já recozido.



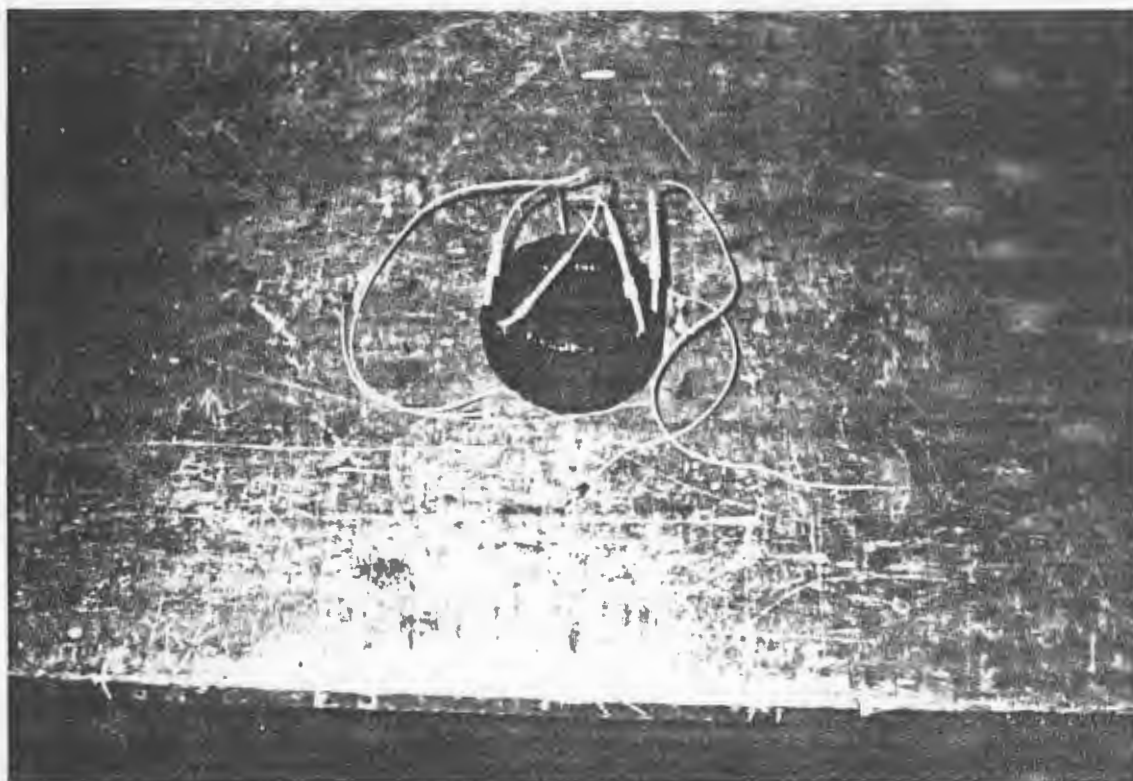


FIGURA 4.3(c) - Transformador TO já montado.

#### 4.4 - Testes e Medições

A seguir, são apresentados os resultados dos testes e medição realizados nos núcleos montados.

##### 4.4.1 - Medidas Físicas

A avaliação de dimensões físicas dos núcleos foi feita utilizando-se um paquímetro marca Mitutoyo, com resolução de 0,01mm.

Já o peso dos núcleos foi medido com uma balança de ponteiros marca Kratos, com resolução de 20g aferida. Esta medição de peso é essencial para avaliação do fator de empilhamento conseguido, utilizando-se a expressão (3.3.6) e para uma nova estimativa de perdas magnéticas totais.

#### 4.4.1 - Medidas Elétricas e Magnéticas

No núcleo do transformador T0 com metal amorfo, verificou-se os esquemas de testes especificados no capítulo 3 deste trabalho.

O valor medido da resistência primária  $R_1$  é  $11,55\Omega$  e do secundário  $R_2$  é  $3,96\Omega$ .

A tabela 4.4.2(a) apresenta o resultado destes testes.

No teste anterior foram utilizados um multímetro digital CIE 7005, classe 0,03%, aferido para medir  $V_1$ , um multímetro digital ECB, modelo MDM 220, classe 0,03% para medir  $V_2$ , um multímetro digital TEMA T2-050, classe 0,05% para medir  $I_0$  e um wattímetro Sullivan Multi Range, classe 0,2%. Todos estes instrumentos foram aferidos recentemente.

Já a partir do circuito de levantamento de laço de histerese, obteve-se a figura 4.4.2(a), que representa o laço de histerese obtido no transformador T0 com metal amorfo para  $V_1 = 230$  V.

No eixo horizontal da figura 4.4.2(a) pode-se ver o valor de campo H, pois a escala é de 4 Oe/cm. Na vertical, onde se lê o valor da indução B, a escala é 0,5T/cm. No ponto máximo, pela figura 4.4.2(a),  $B = 1,3$ T e  $H = 14,4$  Oe. Comparando com o obtido na tabela 4.4.2(a) para  $V_1 = 230$  V, ou seja,  $B = 1,47$ T e  $H = 13,9$  Oe e os valores da figura 4.4.2(a) estão dentro da exatidão aceitável, pois neste processo utilizou-se uma aproximação de circuito integrador.

TABELA 4.4.2(a) - Dados obtidos do ensaio a vazio do transformador com metal amorfo TO.

$V_1$ (V)	$V_2$ (V)	$I_0$ (mA)	$P_0$ (W)	$P_{MT} = P_0 - I_0^2 R_1$ (W)	$B(T)$	$H(Oe)$
10	4,96	9	-	-	$6,47 \times 10^{-2}$	0,42
20	9,96	17,3	-	-	0,13	0,81
30	14,9	26	-	-	0,19	1,22
40	19,8	34,7	-	-	0,25	1,63
50	24,8	43,5	-	-	0,32	2,05
60	29,8	55,5	0,2	0,168	0,38	2,47
70	34,7	61,6	0,3	0,256	0,45	2,90
80	39,6	71	0,4	0,341	0,51	3,34
90	44,5	80,7	0,5	0,424	0,58	3,80
100	49,6	90,4	0,7	0,605	0,64	4,26
110	54,5	100,2	0,8	0,684	0,71	4,72
120	59,6	110,9	1,0	0,858	0,77	5,23
130	64,6	121	1,3	1,131	0,84	5,70
140	69,6	133	1,5	1,296	0,90	6,27
150	74,2	145	2,0	1,757	0,96	6,84
160	79	158	2,8	2,512	1,03	7,45
170	83,9	172,5	3,5	3,156	1,09	8,13
180	88,8	187	4,8	4,396	1,15	8,82
190	93,8	201	6,0	5,533	1,22	9,48
200	98,5	222	7,5	6,931	1,28	10,47
210	103,3	241	9,5	8,829	1,34	11,37
220	108,2	266	11,75	10,933	1,41	12,54
230	113,1	295	14,0	12,995	1,47	13,91
240	118	331	17,75	16,485	1,54	15,61
250	122,9	387	21	19,27	1,60	18,25

Neste teste utilizou-se um osciloscópio Tektronix, tipo 502 Dual-Beam ao qual estava acoplada uma máquina fotográfica tipo Polaroid para registrar a tela.

Adicionalmente, realizou-se ensaio a vazio e de laço de histerese em dois pequenos transformadores sendo um com núcleo de METGLAS 2605SC(T1) e outro com GO 128-30(T2). Estes núcleos não sofreram recozimento. Apresentam, então, as características de fabricação originais.

A tabela 4.4.2(b) apresenta os pontos da característica de magnetização inicial para estes núcleos não tratados.

TABELA 4.4.2(b) - Característica de magnetização normal dos núcleos T1 e T2.

H (A/cm)	B (T)	
	GO 128-30(T2)	METGLAS 2605SC(T1)
1,49	1,16	0,89
2,99	1,34	1,04
4,48	1,43	1,13
5,97	1,49	1,19
7,46	1,54	1,25
8,96	1,58	1,30
10,45	1,64	1,33
11,94	1,70	1,37
13,43	1,76	1,40
14,93	1,85	1,42

Estes dois pequenos transformadores possuem  $D_i = 3\text{cm}$ ,  $D_e = 3,824\text{ cm}$ ,  $N_1 = 160$  espiras,  $N_2 = 80$  espiras,  $l_m = 10,72\text{ cm}$ ,  $S_m = 157,52\text{ mm}^2$ .

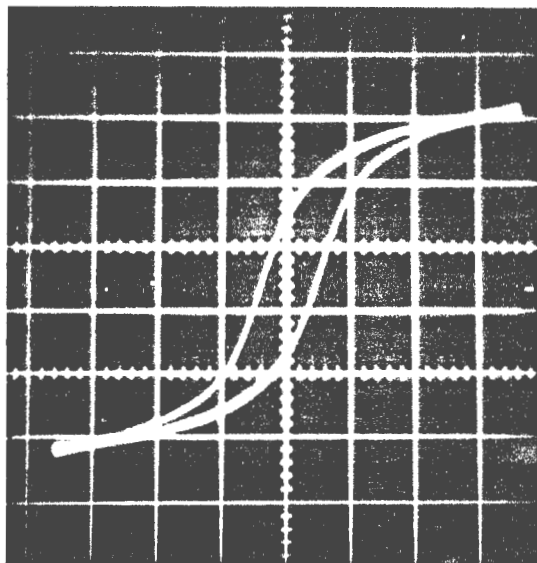


FIGURA 4.4.2(a) - Laço de histerese do transformador  
T0 com metal amorfo.

As figuras 4.4.2(b) e 4.4.2(c) mostram o resultado do levantamento de laço de histerese, como especificado em 3.4.2.

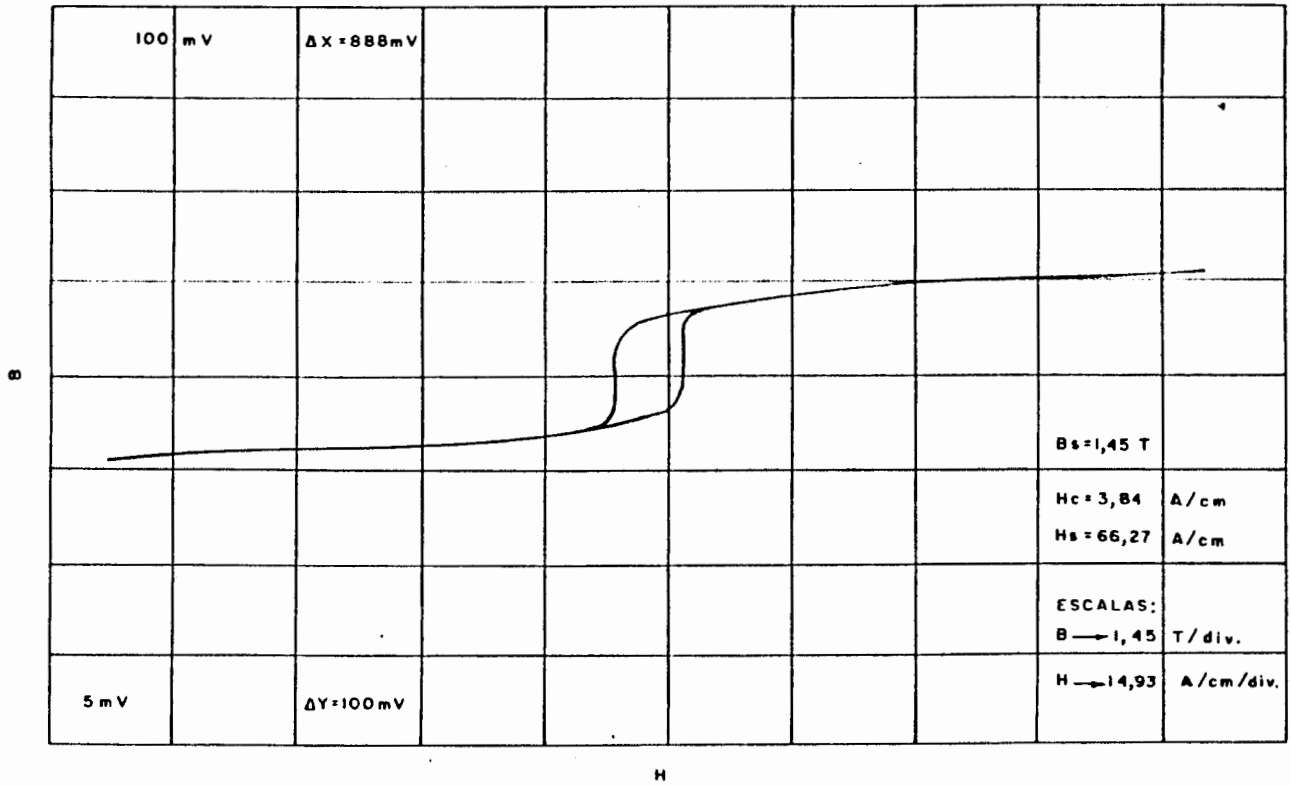


FIGURA 4.4.2(b) - Laço de histerese do pequeno transformador com METGLAS 2605SC(T1).

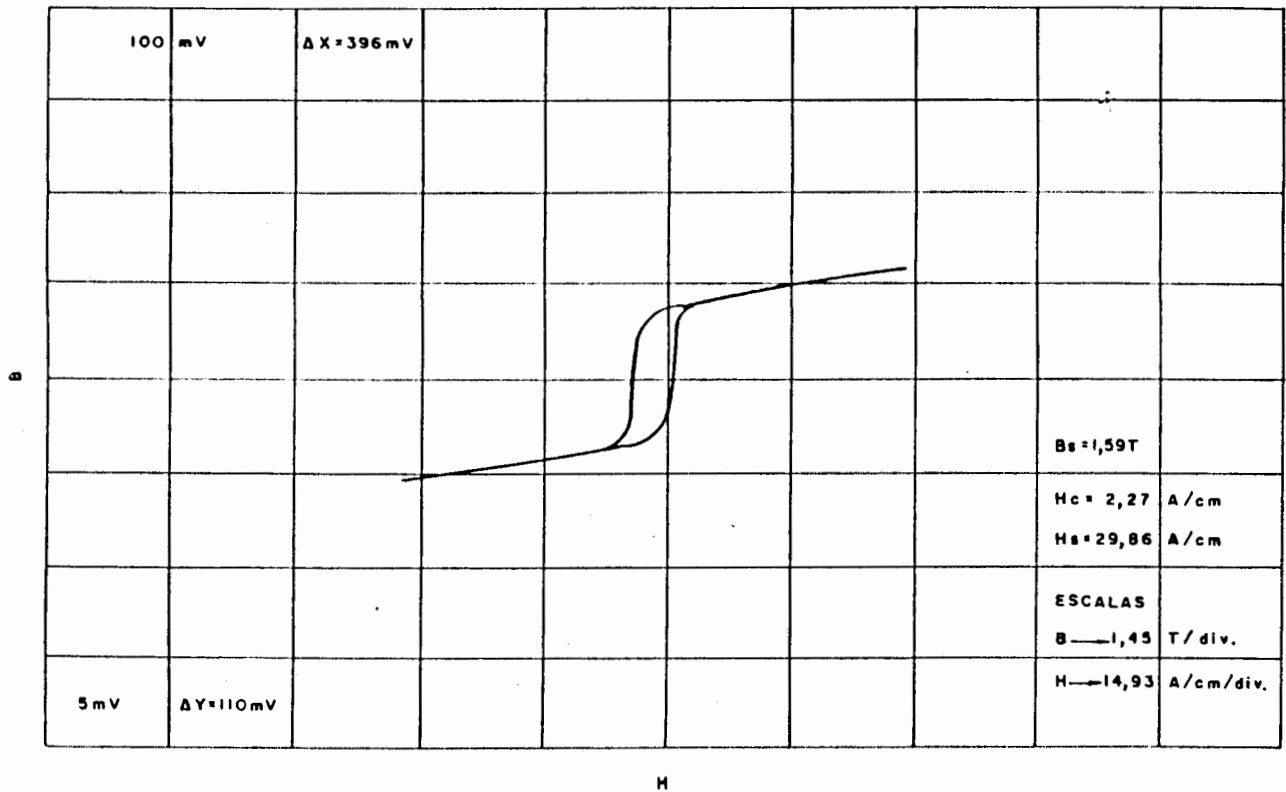


FIGURA 4.4.2(c) - Laço de histerese do pequeno transformador com GO 128-30 (T2).

## 5. ANÁLISE COMPARATIVA GERAL

Em linhas gerais<sup>2,3</sup>, a liga  $Fe_{81}B_{13}Si_5C_2$  tem vantagens sobre a liga cristalina  $Fe_{97}Si_3GO$ : campo coercitivo e potência magnetizante menores, resistividade elétrica maior, perdas magnéticas totais bem menores (cerca de 20%) pela tabela 4.1 em relação à liga  $Fe_{97}Si_3GO$ . Já esta última tem como vantagem uma maior indução magnética.

Sob o ponto de vista do emprego e uso, a liga cristalina tem seu processo de fabricação bem conhecido e o uso não oferece maiores dificuldades. No entanto, o processo<sup>2,7</sup> de fabricação de liga cristalina envolve 6 - 10 passos diferentes, com consumo de energia maior que o empregado na fabricação de metais amorfos, a qual utiliza um passo apenas e de forma relativamente simples, no processo por resfriamento rápido (2.4.3.1).

Os materiais de Fe-Si cristalinos exigem que suas chapas ou fitas tenham revestimento isolante elétrico<sup>2</sup>, pois sua resistividade  $\rho$  é baixa. Já os amorfos metálicos têm  $\rho$  muito maior e dispensam o uso de revestimento<sup>4,8</sup>, que tende a piorar o fator de empilhamento.

No que diz respeito a características, pode-se resumir que as desvantagens da liga metálica amorfa utilizada são as seguintes:

- pequena espessura requer um grande número de camadas para formar um pacote, resultando em baixo fator de empilhamento em relação ao Fe-Si usado; isto afeta o empilhamento, pois amplia a quantidade total de irregularidades superficiais;



- é dúctil e tem alta sensibilidade a esforços mecânicos;
- o projeto e construção convencionais não são completamente apropriados em metais amorfos para aplicações magnéticas;
- tem baixo fluxo ou indução magnética de saturação;
- no recozimento, necessita também a aplicação de campo magnético;
- é muito duro, dificultando corte e estampagens.

As vantagens da liga metálica amorfa em questão em aplicações magnéticas são:

- perdas magnéticas 75-80% mais baixas que nas ligas cristalinas convencionais;
- resistividade  $\rho$  é elevada;
- a temperatura e energia no recozimento é baixa;
- a energia consumida por unidade fabricada é baixa.

Do ponto de vista econômico, as ligas amorfas ainda estão caras, seja porque a produção comercial é relativamente nova, seja porque há poucos fabricantes e uma baixa demanda de consumo.

A figura 5 apresenta uma perspectiva de custo de produção decrescente. Antevê-se, para a década de 90, um custo competitivo de produção e utilização com o do ferro-silício.

O que se acena é com uma grande justificativa de uso dos amorfos metálicos como meio de economizar a energia de excitação em equipamentos eletromecânicos de sistemas de potência.

Estima-se que em 1977, se todos os núcleos de transformadores de distribuição em operação nos Estados Unidos fossem substituídos por núcleos com metais amorfos, a economia seria da ordem de 48 TWh de energia<sup>6</sup>. Se igual providência fosse tomada com relação aos motores elétricos, a economia seria de 20 TWh<sup>6</sup>.

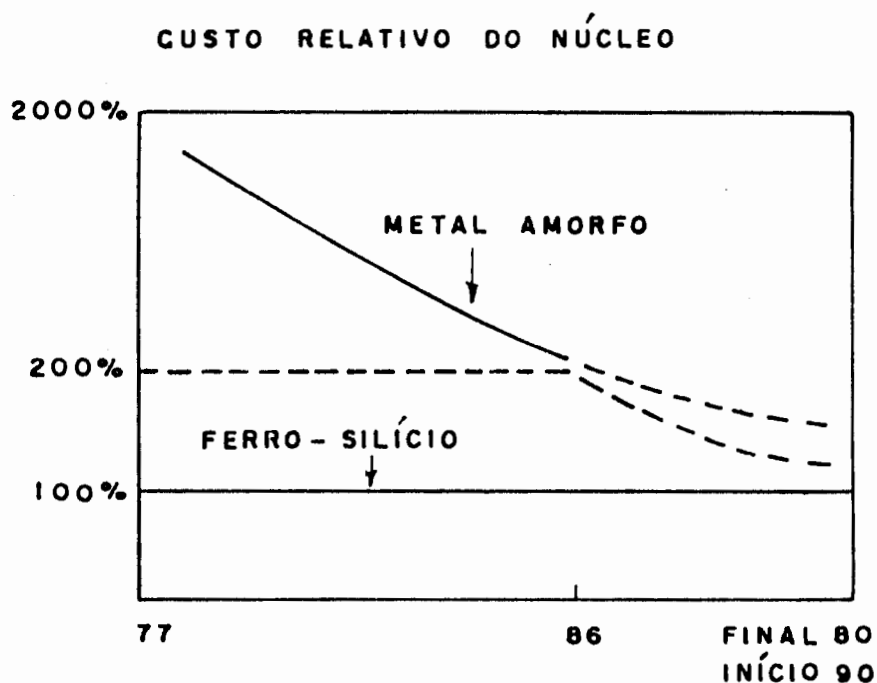


FIGURA 5 - Comparação relativa de custos<sup>11</sup>.

## 6. CONCLUSÕES

No que diz respeito aos protótipos projetados neste trabalho, as vantagens teóricas do metal amorfo, em termos de perdas magnéticas são evidentes. Há dificuldades de emprego, mas acredita-se ser esta uma dificuldade superável.

No entanto, as medidas  $B$ ,  $H$  e  $P_{MT}$  feitas no protótipo construído T0 apresentam valores pouco recomendáveis e distantes dos indicados pela literatura. A razão é devido a um processo de recozimento que, não tendo sido corretamente controlado e implementado, provavelmente provocou a cristalização do metal amorfo. Esta conclusão é reforçada pela análise feita de pedaços de metal amorfo que se desprenderam do núcleo após o recozimento. Os mesmos, em análise de raio 'X', apresentavam características cristalinas, fato este não constatado antes do recozimento, quando a mesma análise foi feita e indicou haver o caráter amorfo da liga empregada.

O elevado valor de  $H$  medido no transformador T0, que é 348 vezes superior ao previsto e a perda  $P_{MT}$  que, medida, é 9 vezes maior que a calculada teoricamente para operação nominal, indicam que a liga, trabalhando próximo da indução prevista, sofre um processo de degradação de sua qualidade em função da cristalização total ou parcial, após ter-se submetido ao processo de recozimento.

É importante dizer que, dado este aspecto, a comparação efetiva e prática com a liga  $Fe_{80}Si_{20}$ , fica prejudicada. Is-

to porque o comportamento verificado experimentalmente nas condições descritas da liga amorfa não condiz com o esperado e já, em várias publicações, atestado.

Os testes dos pequenos transformadores T1 e T2 mostram que, implementados os núcleos, a relação  $B \times H$  medida não condiz com os valores nominais dos fabricantes. Pode-se explicar isto pelo fato de que não estando estes núcleo recozidos de forma alguma, o processo de manufatura alterou as características magnéticas medidas nos testes. Ou as ligas utilizadas não têm originalmente as características nominais dos fabricantes. De qualquer maneira, percebe-se que o núcleo com GO 128-30 (T2) tem menor campo H, menor  $H_c$ , maior  $B_S$  e menor  $P_{MT}$  do que o núcleo com METGLAS 2605SC(T1).

No entanto, a experiência prática de estudo do material, utilização e teste é extremamente válido, pois dá condições que o trabalho continue de forma a obter melhores resultados; dá também condições de verificar os cuidados e as novas abordagens que se deve ter para com os metais amorfos.

Do ponto de vista geral, é necessário prepararmos-nos para o emprego normal de metais amorfos com vistas a economia de energia. Isto pelas perspectivas em termos de Brasil, que apontam para a necessidade de conservação de energia, já que no exterior isto já está sendo implementado em larga escala. Esta preparação passa pela formação de uma mentalidade imparcial para uso desses materiais, bem como pelo domínio da tecnologia.

No que diz respeito a outras aplicações, como por exemplo cabeçotes de gravação magnética, blindagem magnética, transdutores de corrente, tensão e força, etc., é necessário também aí dominar esta nova tecnologia de ponta que tem várias vantagens.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Com vistas a esclarecer dúvidas que a literatura não faz, principalmente no que diz respeito a características ainda não bem explicadas dos metais amorfos, ao entendimento e domínio de uma tecnologia nova em termos de Brasil, formando massa crítica de recursos humanos com mentalidade crítica imparcial sobre o emprego de metais amorfos, as experiências e estudos relativos a este trabalho sugerem que sejam orientados novos trabalhos de:

- desenvolver técnicas inovadoras e custo aceitável para construção rápida de núcleos de transformadores utilizando metais amorfos, melhorando seu fator de empilhamento;
- estudar o emprego de metais amorfos em circuitos magnéticos de máquinas elétricas girantes, encontrando soluções para implementação de ranhuras para bobinas, utilizando, por exemplo, processos de ataque químico ou de eletroerosão, já que a estampagem é muito difícil em função da dureza e pouca espessura do material;
- no caso do grupo de máquinas elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRGS, há necessidade de implementar uma infraestrutura de laboratório que permita empregar corretamente os metais amorfos, recozê-los adequadamente, bobiná-los com o mínimo de indução de tensão mecânica e analisar-lhes as características nas variadas aplicações vislumbradas;
- por terem baixas perdas magnéticas e serem de utili

zação mais fácil na construção de pequenos núcleos, sugere-se que seja estudado o seu uso em transformadores de medição de corrente e tensão, pois, com menores perdas magnéticas, pode-se diminuir erros de relação de transformação e de fase.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. ABOALKAZ, I.A.M.A.; RABIAS, J.; OVERSHOTT, K.J. The effect of annealing and surface roughness on the flux harmonic content (domain wall motion) of amorphous ribbons. IEEE Transactions on Magnetics, 19(5): 1928-30, Sept. 1983.
2. ACESITA. Aço ao silício de grão orientado (GO). Belo Horizonte, 1989. 20p.
3. ALLIED-SIGNAL. METGLAS magnetic alloys. Parsippany, N. J., 1987. 23p.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Produtos laminados planos de aço para fins elétricos. MB 450. Rio de Janeiro, 1977.
5. \_\_\_\_\_. Transformador de potencial. Ensaios: NBR 6820. Rio de Janeiro, 1981. 44p.
6. \_\_\_\_\_. Transformador de potencial. Especificações: NBR 6855. Rio de Janeiro, 1981. 35p.
7. BAILLEY, D. J. & LOWDERMILK, L.A. Amorphous core distribution transformers - opportunity and challenge. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RAPIDLY QUENCHED METALS, 1985. Proceedings... Amsterdam, Elsevier, 1985. p.1625-8.
8. BAILLEY, D.J. et alii. Field performance of amorphous metal core distribution transformers. Journal of Magnetism and

Magnetic Properties, 54(57): 1618-20, 1986.

9. BLUNDELL, M.G. & OVERSHOTT, K.J. A comparison of the power loss and domain structure of wide and narrow amorphous ribbons. IEEE Transactions on Magnetics, 16(5) 1224-6, Sept. 1980.
10. BOLL, R. Soft magnetic materials. Hanau, Heyden & Son, 1979. 353p.
11. COMPTON, P.E.O. The importance of better magnetic materials for electric utility transformers. In: IEEE SUMMER POWER MEETING. Panel Discussion on Amorphous Metals, Portland, Oregon, July 26, 1988.
12. CURRAN, P.M. Metglas alloy for distribution transformer cores. In: IEEE SUMMER POWER MEETING. Panel Discussion on Amorphous Metals, Portland, Oregon, July 26, 1988. 20p.
13. FEIO, L.A.R. O transformador. Porto Alegre, s. ed. 1973. 197p.
14. FITZGERALD, A.E. & KINGSLEY Jr., C. Electric machinery. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1961, 568p.
15. FLORES FILHO, A.F. et alii. Projeto de um gerador síncrono utilizando vidro metálico. In: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS MAGNÉTICOS, 1. São paulo, 9-12 nov., 1987. Anais... São Paulo, ABM, 1987. p.503-15.
16. FREWIN, K. Distribution transformer development. Electronics and Power, 31(2): 133-6, Feb. 1985.



17. FUJIMORI, H.; YOSHIMOTO, H.; MORITA, H. Anomalous eddy current loss in amorphous magnetic thin sheets and its improvement. IEEE Transactions on Magnetics, 16(5): 1227-9, Sept. 1980.
18. GILMAN, J.J. Metallic glasses. Physics Today, p.46-50, May 1975.
19. HASEGAWA, R. Metallic glasses in devices for energy conversion and conservation. Journal of Non-Crystalline Solids. 61/62: 725-36, 1984.
20. \_\_\_\_\_. Soft magnetic properties of metallic glasses. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 41:79-85, 1984.
21. HOMRICH, R. et alii. Comparação entre motores de indução trifásicos com material magnético convencional e material amorfo. In: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS MAGNÉTICOS, 1., São Paulo, 9-12 nov., 1987. Anais... São paulo, ABM, 1987. p.525-39.
22. JANOT, Chr. Les amorphes métalliques et leurs propriétés magnétiques. Revue de Physique Appliquée, 21:635-47, nov. 1986.
23. JOHNSON, L.A. et alii. Application of low loss amorphous metals in motors and transformers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 101(7):2109-14, July, 1982.
24. LANGSDORF, A.S. Theory of alternating-current machinery. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1955. 666p.

25. LEVY, R.A. & HASEGAWA, R. Amorphous magnetism II. New York, Plenum, 1977. 680p.
26. LUBORSKY, F.E.; FRISHMANN, P.G.; JOHNSON, L.A. Amorphous materials - a new class of soft magnetic alloys. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 19:130-7, 1980.
27. \_\_\_\_\_. The role of amorphous materials in the magnetic industry. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 8:318-29, 1978.
28. LUBORSKY, F.E. et alii. Potential of amorphous alloys for application in magnetic devices. Journal of Applied Physics, 49(3): 1769-74, Mar. 1978.
29. MA. B.M. & GRAHAM, C.D. Core loss measurements on FeBC amorphous alloys. IEEE Transactions on Magnetics, 16(5): 1144-6, Sept. 1980.
30. McLYMAN, C.W.T. Transformer and inductor design handbook. New York, Marcel Dekker, 1978. 428p.
31. MARTIGNONI, A. Transformadores. 4. ed. Porto Alegre, Globo, 1979. 307p.
32. MARTIN, J.C. Calculo optimo de transformadores. Barcelona, Universidad Politécnica de Barcelona, 1978. 99p.
33. MISCHLER, W.R. et alii. Tests results on a low loss amorphous iron induction motor. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 100(6):2907-11, June 1981.

34. MIZOGUCHI, T. et alii. Effects on annealing and fabrication conditions on the magnetic properties of amorphous ferromagnetic alloys. IEEE Transactions on Magnetics, 16(5): 1147-9, Sept. 1980.
35. MULKEY, D. Amorphous transformers, a utility's perspective. San Francisco, Calif. Pacific Gas & Electric Company, s. d. 13p.
36. OVERSHOTT, K.J. Amorphous ribbon materials and their possibilities. Electronics and Power. 25(5): 347-50, May 1979.
37. \_\_\_\_\_. The causes of the anomalous loss in amorphous ribbon materials. IEEE Transactions on Magnetics, 17(6):2698-700, Nov. 1981.
38. OVERSHOTT, K.J. & BLUNDELL, M.G. The variation of power loss and domain wall spacing with applied stress in wide amorphous ribbon material. IEEE Transactions on Magnetics, 16(5):1221-3, Sept. 1980.
39. OVERSHOTT, K.J. & PRICE, M.H. The effects of toroid winding methods on properties of amorphous ribbon toroids. IEEE Transactions on Magnetics, 19(5):1940-2, Sept. 1983.
40. PRICE, H.J.; PRICE, M.H.; OVERSHOTT, K.J. The effect of coating on the power loss of amorphous ribbon toroids. IEEE Transactions on Magnetics, 19(5):1943-5, Sept. 1983.
41. ROSA, J.L. et alii. Perspectiva de utilização de amorfos metálicos na construção de transformadores de distribuição. In: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS MAGNÉTICOS, L., São Paulo

- 9-12 nov., 1987. Anais ... São paulo, ABM, 1987. p.517-24.
42. SAY, M.G. The performance and design of alternating current machines. 3. ed. London, Pitman Paperbacks, 1968. 664p.
43. SCHIMIDT, W. Materiais elétricos: isolantes e mangéticos. 2. ed. São Paulo, Edgar Blücher, 1979, V. 2, 141p.
44. SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS MAGNÉTICOS, 1., São paulo, 9-12, nov., 1987. Anais ... São Paulo, ABM, 1987.
45. SHEPPARD, H.R. & NORTON, E. T. Amorphous metal core power transformers (economic considerations). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RAPIDLY QUENCHED METALS, 1985. Proceedings ... Amsterdam, Elsevier, 1985. p.1647-52.
46. SMITH, C.H. Magnetic shielding to multi-gigawatt magnetic switches—ten years of amorphous magnetic applications (invited). IEEE Transactions on Magnetics, 18(6):1376-81, Nov. 1982.
47. SWIFT, W.M. & FOSTER, L.A.C. Losses and temperature dependent magnetic properties of an amorphous magnetic alloy. Materials Science and Engineering, 23:267-70, 1976.
48. VACCUMSCHMELZE GMBH. VITROVAC amorphous metals. 2. ed. Hanau, 1983. 15p.
49. WASHKO, S.D.; OSBORN, M.L.; VEERARAGHAVEN, W.G. Origin of losses in 2.54 cm wide metglas alloy 2605SC. Journal of Applied Physics, 52(3):1899-904, Mar. 1981.