

N.T. 674

I N S T I T U T O D E F Í S I C A  
Universidade de São Paulo

SBI-IFUSP



305M810T0674

E S T U D O S O B R E M A G N E T Ô M E T R O S  
D O T I P O " F L U X G A T E "



Trabalho apresentado ao Instituto de Física da  
USP, como parte dos requisitos necessários pa-  
ra obtenção de Título de Mestre em Ciências.

WILSON JOSÉ OHL  
SÃO PAULO-1984



538.4  
037e  
M  
ex.1

LIBRARY OF THE  
BOSTON PUBLIC LIBRARY  
ASTOR LENOX TILDEN FOUNDATION  
1900



FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do  
Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Ohl, Wilson José

Estudo sobre magnetômetros do tipo "Flux  
Gate". São Paulo, 1984.

Tese (mestrado) - Universidade de São  
Paulo. Instituto de Física. Departamento de  
Materiais e Mecânica.

Área de Concentração: Magnetometria.

Unitermos: 1. Flux-Gate. 2. Magnetôme-  
tros.

USP/IF-B54/84

A meus pais .

## A G R A D E C I M E N T O S

Quero deixar aqui meus agradecimentos a :

- toda equipe do GICD pela cooperação, em particular, ao CC Nei Gustavo Albuquerque Lima pelo incentivo e total apoio no que estava ao seu alcance;
- a Srta Marly pela elaboração do trabalho de datilografia;
- a Darcy Ohi pela revisão da sintaxe;
- a Christiane Freire pela revisão final e ,
- em especial, ao Prof. Dr. Nei Fernandes de Oliveira Jr, meu orientador, cujas críticas e sugestões foram valiosas e decisivas para a elaboração deste trabalho.

## R E S U M O

"Fluxgate" é um tipo de magnetômetro vetorial cujo princípio de funcionamento baseia-se no fato de que: na presença de um campo DC,  $-H_0$ , a simetria ímpar da forma de onda de  $B(t)$  de um núcleo excitado por um campo magnetizante,  $-H_v(t)$ , por exemplo senoidal, é quebrada, induzindo harmônicas pares, da frequência de  $H_v(t)$ , nos terminais de uma bobina sensora. Neste trabalho, inicialmente, discutimos todos os conceitos básicos que permitem entender o funcionamento do sensor. - As principais características do sensor "Fluxgate" dependem das propriedades do núcleo. Na parte experimental, montamos um laboratório capaz de: determinar a curva B-H dos núcleos, em regime DC e AC, e realizar os principais testes de funcionamento do sensor. Realizamos testes com um sensor Forster, alemão, utilizado no Complexo de "Degaussing" da MB, e com diversos sensores que pudemos construir de imediato, com núcleo filamental e em forma de anel, feitos de mumetal e um metal amorfo, Metglass 2605SC. O estudo feito e o laboratório construído, orientarão e permitirão, programas de desenvolvimento de sensores com especificações e interesse prático. Os testes realizados com os núcleos de metal amorfo mostraram ser este material adequado para a finalidade.

## A B S T R A C T

"Fluxgate" is a kind of vectorial magnetometer which operation depends upon the fact that: in the presence of a DC field,  $-H_0$ , the odd symmetry of the wave form of  $B(t)$  of the core excited by a magnetizing field,  $-H_v(t)$ , for instance sinusoidally, is broken, inducing even harmonics, of the exciting frequency, in the terminals of a pick-up coil. In this work, formerly, we have discussed all basic concepts which let us understand the operation principles of the sensor. - The main characteristics of the Fluxgate sensor depend upon the core properties. In the experimental work, a laboratory was build capable of: to obtain the core B-H curve, in DC and AC modes, and to perform the main tests of the operating of the sensor. We got tests with a German Forster's sensor, employed by Brazilian Navy on Degaussing Complex, and with several sensors rapidly built by us, of the tipe ring-core and alongated-core, made of mumetal and metal-glass, Metglas 2605-SC. This work, will permit the elaboration of developing programs of sensors with especifications and practical interest. The test made with metal-glass core shows that this material is suitable to this finality.

# Í N D I C E

RESUMO .....	(i)
INDICE .....	(ii)
INTRODUÇÃO .....	01
CAPITULO -I- O "FLUXGATE" .....	06
CAPITULO -II- O MAGNETÔMETRO FORSTER .....	11
CAPITULO-III- CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	15
-Permeabilidade Aparente .....	15
=Equações para o "Fluxgate" .....	16
-Tipos de sensores; Paralelos e ortogonais ....	20
-Segunda harmônica da FEM induzida na bobina sen- sora .....	22
-Cálculo do Fator de Desmagnetização .....	24
-Correntes Parasitas .....	26
-Efeitos de histerese .....	28
-Discussão .....	29
CAPITULO -IV- MONTAGEM DE UM LABORATÓRIO DE TESTES .....	36
-Determinação da curva B-H estática .....	37
-Circuito para testes de avaliação de sen- sores .....	39
-Circuito magnetométrico .....	42
-Campo magnético DC uniforme .....	43
CAPITULO -V- CONSTRUÇÃO E TESTES DE ALGUNS SENSORES ...	44
-Curva B-H estática .....	44
-Descrição dos sensores confeccionados .....	48
a) com núcleo em anel .....	48
b) com núcleo filamentar .....	50
-Descrição dos testes realizados e comentá- rios .....	51
COMENTÁRIOS FINAIS .....	66
BIBLIOGRAFIA .....	67

## INTRODUÇÃO

A apresentação deste trabalho como monografia de mestrado, é, consequência de uma interação da Marinha Brasileira, MB, com o Instituto de Física da Universidade de São Paulo, IFUSP, por ocasião da implantação do "Complexo de Degaussing".

A implantação de um "Complexo de Degaussing" na MB fazia parte do programa de atualização e ampliação da esquadra de Navios Varredores na Força de Minagem e Varredura da MB. O "Degaussing" era, então, um empreendimento inédito no Brasil e, devido à sua complexidade, levou a MB a procurar um apoio técnico, o qual se estabeleceu através de um convênio com o IFUSP criando-se, assim, o Grupo de Implantação do Complexo de Degaussing, GICD. Este convênio, além da consultoria técnica, proporcionaria cursos de Pós-Graduação, na área de Física dos Materiais, com bolsa da MB a alunos selecionados entre os recém-formados em Bacharelado em Física da turma de 1977, com posterior programa de Mestrado, visando formar técnicos qualificados para implantar e operar o "Complexo de Degaussing" na Baía de Todos os Santos, em Salvador, BA.

O "Complexo de Degaussing" tem por finalidade medir e controlar o magnetismo das massas ferromagnéticas dos navios e reduzir o ruído magnético de navios totalmente não magnéticos, como os navios Varredores de minas de influência.

O magnetismo dos navios é decomposto em três componentes, uma longitudinal à quilha do navio (L), outra vertical (V) e uma transversal (A), sendo que em cada componente é distinguida a Magnetização Permanente (P) e a Induzida pelo campo magnético terrestre (I).

Navios ferromagnéticos (construídos em aço) de determinadas categorias são equipados com SPM (Sistema de Proteção Magnética), que consiste de conjuntos de bobinas distribuídas convenientemente

no navio e que, quando devidamente ajustadas quanto ao número de espiras e corrente de alimentação, anulam a magnetização induzida e um residual da magnetização permanente. A parcela significativa da magnetização permanente é anulada num processo conhecido como "De-perming".

As diversas componentes do magnetismo do navio são medidas numa Estação de Medidas de Navios Magnéticos, EMNM, que consiste de raias de corridas, orientadas nas direções N-S e L-0 magnético e equipadas com cadeias de sensores magnéticos conectados a um sistema que registra as variações do campo magnético causadas pela passagem do navio. Estes dados são analisados e fornecem elementos para a ajustagem do SPM de bordo.

Os navios Varredores são amagnéticos (construídos em madeira) e tem a finalidade de enfrentar as áreas minadas eliminando as minas lá existentes. O tratamento feito nestes navios é bem mais refinado que o tratamento feito nos navios ferromagnéticos. Além dos dados registrados em raias de corridas, própria para Varredores, tratamos com dados obtidos com o navio fixo, atracado em uma raia equipada com bobinas e cadeias de sensores. Nesta raia mede-se o campo de dispersão dos motores do navio, o efeito do magnetismo induzido devido ao balanço do mar simulado por campos oscilantes produzidos pelas bobinas, as quais, simulam também o campo magnético em outros pontos do globo terrestre.

As massas magnéticas mais concentradas a bordo dos navios Varredores, como por exemplo, os motores e os geradores, são tratados isoladamente num Laboratório de Medidas Magnéticas, LMM, também equipado com bobinas e cadeias de sensores.

Em resumo, o "Complexo de Degaussing" da MB é, basicamente, constituído por três unidades:

- Laboratório de Medidas Magnéticas, LMM;
- Estação de Medidas de Navios Magnéticos,

para navios ferromagnéticos e Varredores, EMNM

-Estação de Tratamento Magnético, DEPERMING.

Estas instalações são equipadas com sensores magnéticos do tipo "Fluxgate" de procedência Alemã, fabricados pelo Instituto Dr. Forster, somando um total da ordem de duzentas unidades entre instalações submersas no mar, fixa em terra, no laboratório e conjuntos portáteis.

Devido a seu papel fundamental e significativo no "Complexo de Degaussing" da MB, fica evidenciada a importância de estudarmos e compreendermos o melhor possível o funcionamento do sensor "Fluxgate". É desejável, ainda, visto operarmos em larga escala com esse equipamento, que se domine técnicas que possibilitem não apenas a sua manutenção como também, eventualmente, a construção de unidades completas para utilização no sistema.

Neste contexto, o trabalho do estudo dos magnetômetros "Fluxgate" seria desenvolvido paralelamente ao trabalho de implantação do "Complexo de Degaussing", e aos cuidados de um elemento do GICD dentre os bolsistas da MB no curso de Pós-Graduação do IFUSP, concluído em 1979. Este trabalho seria também parte de um programa de mestrado e desenvolvido nas instalações do "Degaussing" da MB.

Infelizmente houve atrasos no programa e as instalações do "Degaussing" foram concluídas apenas no início de 1982. Algum tempo depois o estudo dos magnetômetros "Fluxgate" iniciou-se com uma pesquisa da literatura existente. O sensor Forster, por ser o produto industrial disponível, foi "dissecada" cuidadosamente. Nos estudos subsequentes, a performance deste sensor serviu de guia e padrão para a interpretação dos resultados experimentais por nós obtidos.

Como será visto adiante, o elemento mais importante na avaliação do desempenho de um sensor "Fluxgate", é o conhecimento das propriedades magnéticas do núcleo que preenche as bobinas sensoras. Para possibilitar a investigação de tais propriedades, impos-se a montagem de um pequeno laboratório capaz de levantar a curva B-H, tanto para regime DC como AC, das amostras de núcleos disponíveis.

Essencialmente, além das propriedades do núcleo do sensor Forster, foram investigadas também as do núcleo por nós construídos, partindo de dois materiais diferentes:

- uma liga de Mumetal, utilizada normalmente em transformadores
- uma liga amorfa, fabricada por técnicas modernas de "melt spinning", o METGLASS ALLOY 2605 SC.

Este último material, por ser de desenvolvimento recente, ainda não havia sido utilizado para essa finalidade, sendo o presente estudo pioneiro neste sentido.

Para nós, a utilização de ligas amorfas se reveste de interesse especial, uma vez que o IFUSP desenvolveu recentemente - e já domina, as técnicas necessárias para a fabricação do material adequado para a confecção de núcleos para magnetometria.

A presente monografia apresenta o trabalho realizado em seis partes:

#### Cap. I O "FLUXGATE"

Apresente o magnetômetro, suas características vantagens sobre outros magnetômetros, princípio de funcionamento, diagrama dos circuitos, histórico do seu desenvolvimento, diversas aplicações, objeto de estudos.

#### Cap. II O MAGNETÔMETRO FORSTER

Apresentação, descrição das características e descrição física do sensor.

**CAP. III CONSIDERAÇÕES GERAIS**

- Permeabilidade Aparente.
- Equações para o "Fluxgate".
- Tipos de sensores; paralelos (Filamentares e Anel) e Ortogonais.
- Segunda Harmônica da FEM Induzida na Bobina Sensora.
- Cálculo do Fator de Desmagnetização.
- Correntes Parasitas.
- Efeitos de Histerese.
- Discussão.

**CAP. IV MONTAGEM DE UM LABORATÓRIO DE TESTES**

- Determinação da Curva B-H Estática.
- Circuitos para Testes de Avaliação de Sensores.
- Circuito Magnetométrico.
- Campo Magnético DC Uniforme.

**CAP. V CONSTRUÇÃO E TESTES DE ALGUNS SENSORES**

- Curvas B-H estática.
- Descrição dos sensores confeccionados:
  - a) com núcleo em anel,
  - b) com núcleo filamental.
- Descrição dos testes realizados e comentários.

**COMENTÁRIOS FINAIS**

C A P I T U L O - I -

O " F L U X G A T E "

Apresenta o magnetômetro,  
suas características,  
vantagens sobre outros magnetômetros,  
princípio de funcionamento,  
diagrama dos circuitos,  
histórico do seu desenvolvimento,  
diversas aplicações,  
objeto de estudos.

CAPÍTULO-1- O "FLUXGATE"

O magnetômetro do tipo "fluxgate" mede a intensidade e o sentido da componente do campo magnético ambiente na direção do seu eixo de medida. Por isso, é chamado de magnetômetro vetorial.

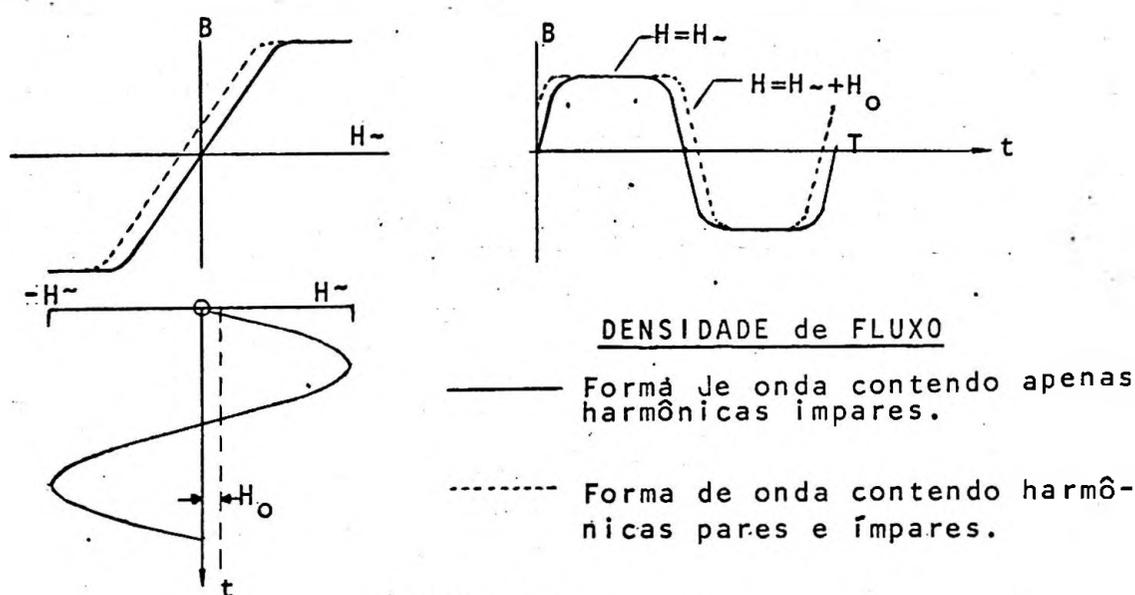
É um equipamento de construção simples, com pequenas dimensões físicas. A sonda "Fluxgate" em sua forma mais comum, consta de dois pequenos transformadores idênticos, feitos de material de magnetismo "mole", de alta permeabilidade, onde são enroladas as bobinas primárias e secundárias. Os transformadores são montados com seus eixos longitudinais paralelos num conjunto com dimensões típicas de centímetros.

A sua característica vetorial, somada a uma relativamente alta sensibilidade e estabilidade, coloca os magnetômetros "Fluxgate" em uma posição especial em relação aos outros métodos magnetométricos (1). Os magnetômetros de precessão de prótons e os de bombardeio óptico, medem apenas a intensidade do campo magnético total, ao contrário, o "Fluxgate" mede diretamente uma componente do campo magnético.

Existem, ainda, outros tipos de magnetômetros vetoriais como os magnetômetros SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) e magnetômetros por efeito Hall. Os magnetômetros por efeito Hall não atingem a estabilidade e sensibilidade dos "Fluxgate"; o método SQUID, apesar de sua altíssima sensibilidade e estabilidade, necessitam de Hélio líquido para sua operação, sendo utilizado apenas em casos especiais.

Para entendermos o princípio de funcionamento (2) de um "Fluxgate", suponhamos que um núcleo de material magnético seja excitado por um campo  $H_v(t)$  que varia senoidalmente com o tempo e de am-

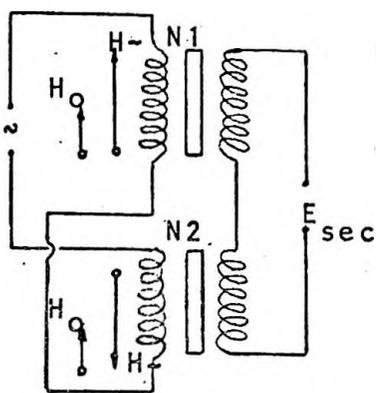
plitude suficiente para saturar o núcleo. Devido à particular simetria da função  $B(H_{\sim}(t))$  = densidade de fluxo no núcleo, que é função de  $H_{\sim}(t)$  e conseqüentemente de  $t$ , sua transformada de Fourier contém apenas as harmônicas ímpares da frequência de excitação. Entretanto, se ao campo senoidal adicionarmos um campo  $H_0$ , constante no tempo, esta simetria é quebrada e a transformada de Fourier de  $B(t)$  passa a conter também harmônicas pares. Para valores pequenos de  $H_0$ , a amplitude de uma dada harmônica par é proporcional à  $H_0$ . A tensão produzida em uma bobina secundária enrolada ao redor do núcleo, tem o mesmo conteúdo harmônico de  $B(t)$  e a amplitude de uma harmônica par, por exemplo a de frequência dupla, é uma medida de  $H_0$ . Mais adiante, no capítulo -III-, discutiremos com mais detalhes este princípio de funcionamento.



**FIGURA-01-**

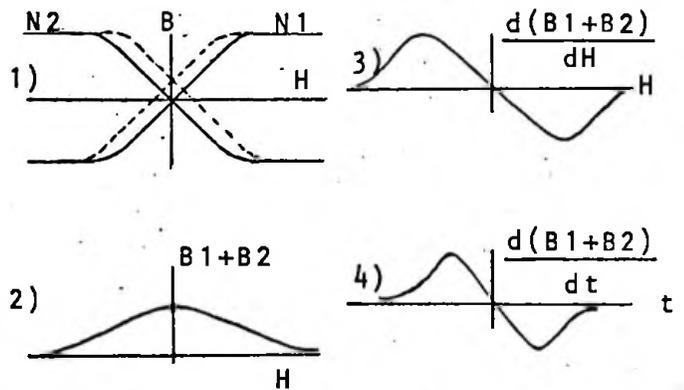
O sensor "Fluxgate", em sua configuração mais comum, funciona utilizando dois transformadores idênticos, como esquematizado na figura-02a-. Os enrolamentos secundários são ligados em série e as bobinas primárias com fase invertida. Os núcleos são montados com seus eixos longitudinais paralelos.

A figura-02b- ilustra a forma de onda induzida no conjunto de bobinas secundárias, bem como o processo de sua formação. A tensão induzida na bobina secundária contém harmônicas pares, proporcionais ao campo magnético constante. As harmônicas ímpares de um núcleo são anuladas pelas mesmas harmônicas ímpares do segundo núcleo, como decorrência da defasagem na ligação das bobinas primárias.



Esquema da sonda "Fluxgate".

(a)



Processo de formação da FEM induzida na bobina secundária da sonda "Fluxgate".

(b)

FIGURA-02-

O sentido do campo magnético,  $H_0$ , é identificado, comparando-se as fases de  $H_N(t)$  com a da tensão induzida nas bobinas sensoras. Através da figura-02b- é fácil constatar que invertendo o sentido do campo magnético  $H_0$ , a forma de onda da FEM induzida permanece inalterada, porém, com fase invertida.

Normalmente, o circuito eletrônico utilizado em um magnetômetro "Fluxgate" moderno contém os elementos esquematizados no diagrama de bloco da figura-03-. Um gerador de corrente AC (1), operando na frequência  $f$ , alimenta a bobina primária da sonda. Um duplicador de frequência (2) gera um sinal com  $2.f$ , que serve de referência. Os terminais da bobina sensora passa por um amplificador retificador com detecção em fase (3), que gera um sinal DC propor-

cional à amplitude da segunda harmônica.

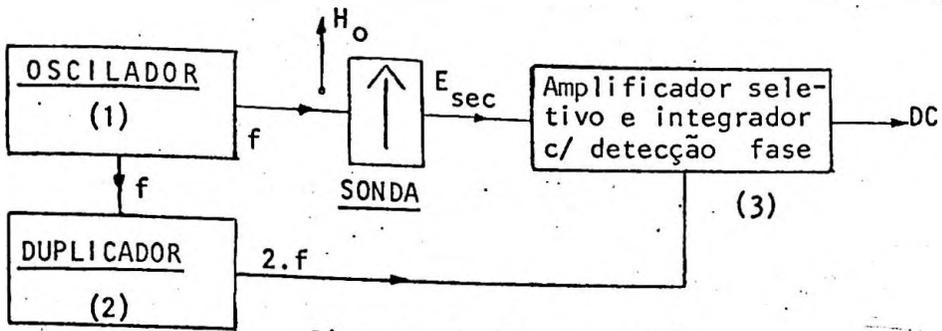
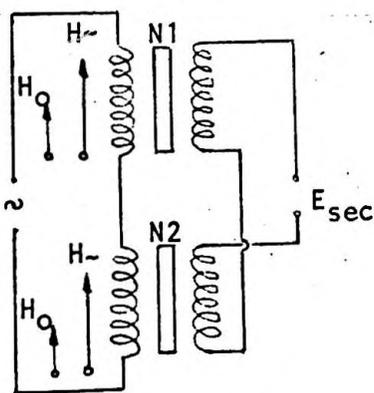


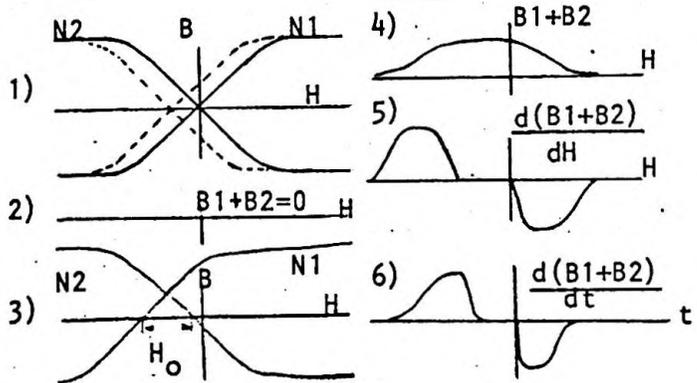
Diagrama de Bloco normalmente usado para sondas "Fluxgate".

FIGURA-03-

Além da medição de campos magnéticos constantes, a sonda "Fluxgate" possibilita a medição direta de diferença de campo ou gradientes de campos magnéticos, através de uma montagem conhecida como Sonda Fluxgate Diferencial SFD<sup>(3)</sup>. A SFD é idêntica a utilizada para medidas de campos magnéticos contínuos, inclusive o circuito elétrico. A única diferença é na ligação das bobinas primárias e secundárias do conjunto de transformadores. Para a SFD, as bobinas primárias são ligadas em fase e as secundárias alternadas. Reconhecemos melhor essa diferença, quando comparamos as figuras -02a- e -04a-. O processo da formação do sinal é ilustrado na



Esquema da SFD.



Processo de formação da FEM induzida na bobina secundária da SFD.

(a)

(b)

FIGURA-04-

figura-04b-. No conjunto SFD, os núcleos são, em geral, montados em cápsulas individuais e medimos sempre a diferença de campo magnético entre os eixos dos dois núcleos.

O magnetômetro "Fluxgate" é conhecido desde os anos 30<sup>(4)</sup>, porém, seu maior desenvolvimento e utilização ocorreu durante a segunda guerra mundial, na detecção de submarinos. Desde então, tem sido aplicado para fins militares e levantamentos geomagnéticos. Na década de 60, com o desenvolvimento da exploração espacial, os magnetômetros "Fluxgate" foram muito estudados e empregados a bordo de foguetes e satélites.

Atualmente, sua utilização é ampla nas áreas industrial<sup>(3)</sup> (testes não destrutivos, identificação de materiais ferromagnéticos, dispositivos de controle, etc.) de investigação científica (por exemplo geofísica e em ciências dos materiais) e na militar.

Vale mencionar aqui, que o funcionamento do magnetômetro "Fluxgate", apesar de conhecido há mais de 50 anos, ainda hoje é objeto de estudos e publicações. Um interessante artigo de revisão foi publicado em 1979, por Prindahl<sup>(1)</sup>. A Earth Physics Branch<sup>(5)</sup> publica, regularmente, uma coletânea de resumos de trabalhos sobre magnetometria. A primeira publicação, datada de 1970, continha 156 artigos sobre "Fluxgate".

C A P I T U L O - I I -

O M A G N E T Ô M E T R O F O R S T E R

Apresentação, descrição das características e descrição física do sensor.

CAPITULO-11- O MAGNETÔMETRO FORSTER

Como mencionamos anteriormente, o magnetômetro Forster foi por nós estudado e utilizado como padrão de comparação na análise quantitativa dos dados experimentais obtidos para os sensores por nós construídos. O magnetômetro Forster é o resultado de um longo estudo, que resultou num produto industrial de excelente performance e qualidade.

O magnetômetro Forster é composto de duas unidades, a sonda, chamada de Sonda Forster, e o conjunto eletrônico, designado pelo fabricante por Oerstedmeter de Precisão.

A sonda Forster é um sensor "Fluxgate" do tipo paralelo, composto por dois núcleos longitudinais. Seus enrolamentos primários são alimentados por uma corrente AC de 10kHz.

O Oerstedmeter de Precisão em conjunto com a sonda Forster, é usado para medir campos magnéticos DC, diferenças entre campos DC e campos AC de baixa frequência, até 240Hz.

Este capítulo tem a finalidade de fornecer os dados técnicos e parâmetros de construção do Oerstedmeter e da sonda Forster.

O Oerstedmeter de Precisão<sup>(6)</sup> consiste de um oscilador (1), com uma saída de potência para excitação do sensor, um filtro para passar 20kHz (3), um amplificador com seletor de intervalos (4), um retificador com controlador de fase (5), que controla e amplifica a saída DC do circuito, e um estágio dobrador de frequência (2), com um amplificador para produzir uma voltagem de referência para o retificador com fase controlada. A unidade é totalmente transistorizada e requer uma voltagem de alimentação DC positiva,

entre 20 e 30V, e uma voltagem negativa DC também entre 20 e 30V. Um filtro para 60Hz é incorporado ao circuito, para eliminar o ruído resultante de campos induzidos no local da sonda, que pode ser da ordem de 01 mOe, causados pelo sistema de potência AC de 60Hz.

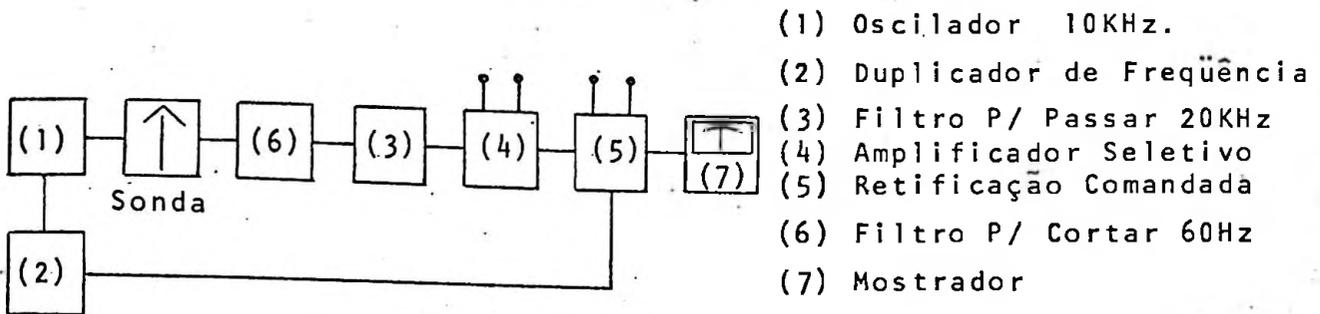


FIGURA-05-

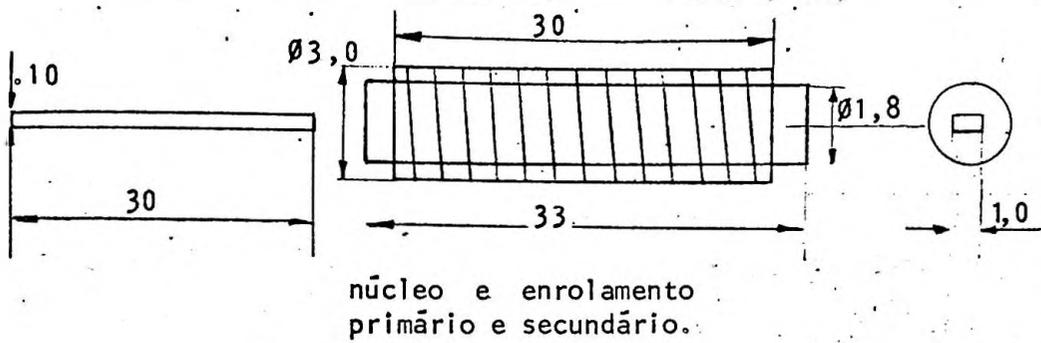
Principais características, típicas do magnetômetro Forster:

- intervalo de medidas	0 a 1 0e
- tolerância de calibração	$\pm 1\%$
- erro na linearidade	0,1 %
- coeficiente de temperatura	0,1% / °C
- sensibilidade	1 V (fundo de escala)
- resolução	$5 \cdot 10^{-6}$ 0e

A sonda Forster é composta por dois transformadores com núcleos longitudinais, como esquematizado na figura-02a-. Os dois transformadores são montados com seus eixos longitudinais paralelos. As bobinas primárias e secundárias de cada transformador são enroladas sobre um suporte cilíndrico de plástico. As camadas de cada enrolamento são isoladas por uma folha de papel com 0,02 mm de espessura. O conjunto de transformadores, incluindo-se os terminais para conexões, são montados num suporte cilíndrico de ce-

teron com diâmetro de  $\varnothing=1,3\text{cm}$  e comprimento  $L=5,8\text{cm}$ .

A figura-06a- representa um dos transformadores utilizados na sonda Forster, e a figura-06b- mostra a sonda Forster explodida. Na tabela-A- encontramos parâmetros dos: conjunto de transformadores e núcleo.



(a)

medidas dadas  
em (mm).

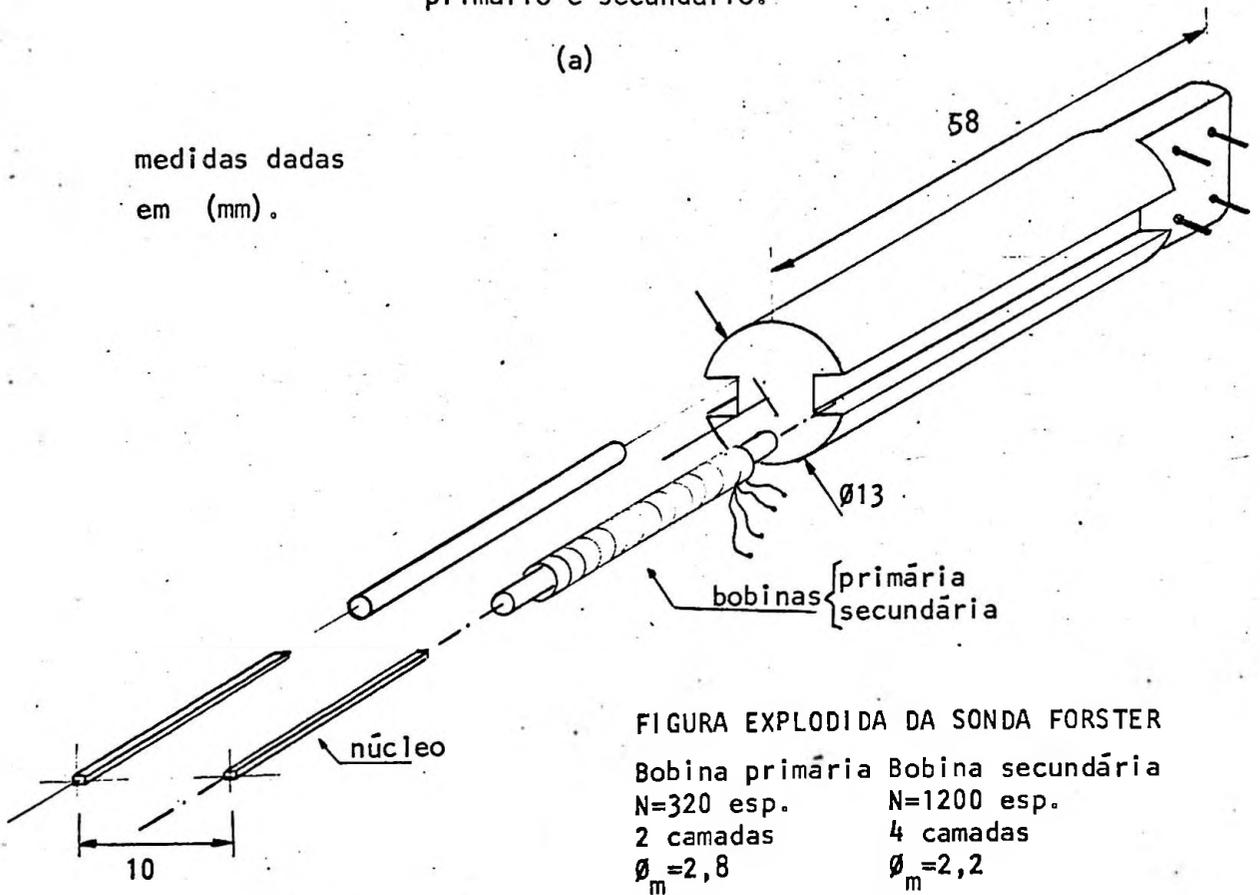


FIGURA EXPLODIDA DA SONDA FORSTER

Bobina primária	Bobina secundária
N=320 esp.	N=1200 esp.
2 camadas	4 camadas
$\varnothing_m=2,8$	$\varnothing_m=2,2$

(b)

FIGURA-06-

	PRIMÁRIO	SECUNDÁRIO	NÚCLEO
CAMPO/CORRENTE (Oe/A)	$H=1,3 \cdot 10^2 \cdot i$	-	-
INDUTÂNCIA (Henry)	$L=5,2 \cdot 10^{-5}$	$L=74 \cdot 10^{-5}$	-
RESISTÊNCIA (ohm)	6	60	
FATOR DE DESMAGNETIZAÇÃO	-	-	$\frac{L}{4 \cdot \pi} = 4,1 \cdot 10^{-4}$

TABELA-A-

## C A P I T U L O - I I I -

### C O N S I D E R A Ç Õ E S   G E R A I S

- Permeabilidade Aparente.
- Equações para o "Fluxgate".
- Tipos de sensores; paralelos (filamentares e anel) e ortogonais.
- Segunda harmônica da FEM Induzida na Bobina Sensora.
- Cálculo do Fator de Desmagnetização.
- Correntes Parasitas.
- Efeitos de Histerese.
- Discussão.

CAPITULO-III-      CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo, teceremos comentários sobre a física envolvida no sensor de um magnetômetro "Fluxgate".

O objetivo é alinhar os conceitos e estabelecer as relações básicas que permitam entender o funcionamento do sensor, bem como identificar os principais fatores que influenciam a sua performance.

Permeabilidade Aparente

Vamos considerar o núcleo da figura-07- como sendo um cilindro com eixo longitudinal muito maior que o diâmetro, e feito de material ferromagnético de alta permeabilidade. Nestas condições, podemos considerar o cilindro como sendo um elipsóide alongado onde a magnetização é uniforme.

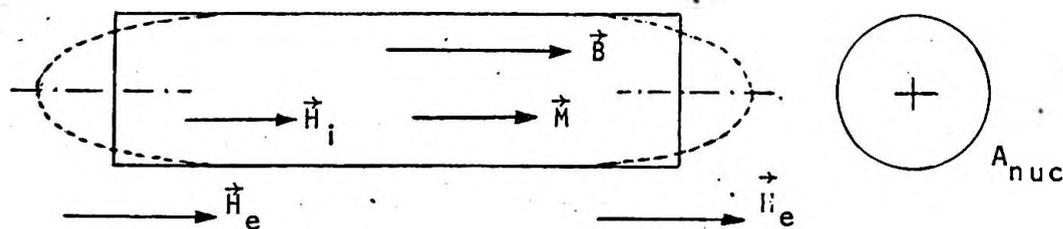


FIGURA-07-

O campo magnético  $\vec{H}_i$  no interior do núcleo é por definição:

$$\vec{H}_i = \vec{H}_e - L \cdot \vec{M} \quad (1)$$

Na equação,  $\vec{M}$  é a magnetização, e  $L$  o fator de desmagnetização do núcleo ao longo do seu eixo principal. O produto  $L \cdot \vec{M}$ , é o campo de desmagnetização, e  $\vec{H}_e$ , o campo magnético externo, apli

cado ao longo do eixo maior.

Sendo  $\vec{B}$  a densidade magnética no núcleo, podemos escrever:

$$\vec{B} = \vec{H}_i + 4 \cdot \pi \cdot \vec{M} \quad (2)$$

$$\text{e} \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}_i \quad (3)$$

onde  $\mu$  é a permeabilidade do material do núcleo.

Das equações (1), (2) e (3) tiramos que:

$$\vec{B} = \frac{\mu}{1 + \frac{L}{4 \cdot \pi} \cdot (\mu - 1)} \cdot \vec{H}_e \quad (4)$$

Esta equação relaciona a densidade de fluxo no núcleo, com o campo externo através de um fator que é normamente chamado de permeabilidade aparente,

$$\vec{B} = \mu_a \cdot \vec{H}_e \quad (5)$$

onde

$$\mu_a = \frac{\mu}{1 + \frac{L}{4 \cdot \pi} \cdot (\mu - 1)} \quad (6)$$

Aqui,  $\mu$  contém as propriedades magnéticas do material do núcleo e  $L$ , fator de desmagnetização, está relacionado às suas dimensões geométricas.

### Equações do "Fluxgate"

Se, no núcleo da figura-07-, enrolarmos  $N_s$  espiras de uma bobina sensora, coaxial com o núcleo, teremos nos terminais deste

enrolamento uma FEM induzida que, segundo a lei de Faraday, será:

$$E_{\text{sec}} = -N_s \cdot 10^{-8} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

onde :  $E_{\text{sec}}$  - FEM induzida (volts),  
 $N_s$  - número total de espiras,  
 $\phi$  - fluxo magnético de  $\vec{B}$  através das espiras (Mx),  
 $t$  - tempo em segundos.

Se construirmos a bobina sensora com área próxima à secção do núcleo e de tal forma que o campo  $\vec{B}$  seja normal ao plano das espiras, podemos considerar o fluxo de  $\vec{B}$  através de cada espira como sendo:

$$\phi = B \cdot A_{\text{nuc}} \quad (8)$$

onde  $A_{\text{nuc}}$  é medido em  $\text{cm}^2$  e  $B$  é medido em Gauss.

Introduzindo a equação (6) na equação (8) obtemos:

$$\phi = \mu_a \cdot H_e \cdot A_{\text{nuc}} \quad (9)$$

onde o campo externo  $H_e$  é medido em Oersteds.

Em um sensor do tipo "Fluxgate",  $\vec{H}_e$  é composto da soma de um campo alternado, que denominamos Campo Magnetizante -  $\vec{H}_m(t)$ , e do campo que se pretende medir -  $\vec{H}_0$ , que é a componente do campo ambiente na direção do eixo do núcleo. A amplitude do campo magnetizante deve ser suficiente para saturar o núcleo e, por isso, certamente,  $\mu_a$  não é constante, variando com  $\vec{H}_e$  e, conseqüentemente, com o tempo.

Nestas condições, a equação (9) fica:

$$\vartheta = \left\{ \mu_a(H_e) \cdot H_{\nu}(t) + \mu_a(H_e) \cdot H_o \right\} \cdot A_{nuc} \quad (10)$$

e para a FEM induzida na bobina sensora, teremos:

$$E_{sec} = -N_s \cdot 10^{-8} \cdot A_{nuc} \cdot \left[ \frac{d}{dt} (\mu_a(H_e) \cdot H_{\nu}(t)) + \frac{d\mu_a(H_e)}{dt} \cdot H_o \right] \quad (11)$$

A equação (11) é uma função periódica, que contém harmônicas pares e ímpares da frequência do campo magnetizante -  $H_{\nu}(t)$ . As harmônicas pares, são resultantes da presença de  $H_o$ , que quebra a simetria de  $\mu_a(H_e)$ , que é uma função simétrica para  $H_e = H_{\nu}(t)$ . Para valores de  $H_o$  pequenos, quando comparados com a amplitude de  $H_{\nu}(t)$ , o conteúdo harmônico do segundo termo de (11) é quase que exclusivamente constituído de harmônicas pares, cuja amplitude pode ser tomada como uma medida de  $H_o$ . Assim podemos escrever:

$$E_{par}(t) \approx N_s \cdot 10^{-8} \cdot A_{nuc} \cdot \frac{d\mu_a(t)}{dt} \cdot H_o \quad (12)$$

que, às vezes, é chamada de equação geral do "Fluxgate". (1)

A separação das harmônicas pares -  $E_{par}$ , do sinal induzido na bobina sensora, pode ser feita eletronicamente através de filtros ou diretamente no próprio sensor. Para isto, o arranjo mais comum é o de dois núcleos filamentosos paralelos, alimentados individualmente e em oposição, semelhante ao esquematizado na figura-02a-.

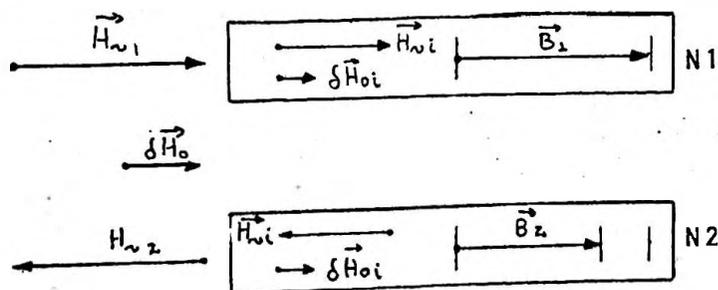


FIGURA -08-

Em presença apenas do campo magnetizante  $H_v(t)$ , AC, de mesma intensidade mas de sentidos opostos em cada núcleo, o fluxo de  $\vec{B}^1 + \vec{B}^2$ , através do secundário, é nulo,  $\vec{B}^1 = -\vec{B}^2$ . A adição de um pequeno campo DC,  $\delta H_o$ , uniforme sobre os dois núcleos, provoca, em cada instante, uma alteração de  $\vec{B}^1(t)$  e de  $\vec{B}^2(t)$ , um para mais e outro para menos, de forma que, para os módulos, podemos escrever:

$$\delta \vec{B} = \vec{B}^1 + \vec{B}^2 = 2 \cdot \delta H_{o,i} \cdot \frac{dB}{dH_{v,i}} = 2 \cdot \delta H_{o,i} \cdot \mu_d \quad (13)$$

Extendendo o conceito de permeabilidade aparente à permeabilidade diferencial (7)  $\mu_d = \frac{dB}{dH}$

$$\delta B = 2 \cdot \mu_{a,d} \cdot \delta H_o \quad (14)$$

onde

$$\mu_{a,d} = \frac{\mu_d}{1 + \frac{L}{4 \cdot \pi} \cdot (\mu_d - 1)} \quad (15)$$

O sinal induzido no secundário devido ao fluxo de  $\delta B$  é :

$$E = 2 \cdot N_s \cdot 10^{-8} \cdot A_{nuc} \cdot \frac{d\mu_{a,d}}{dt} \cdot \delta H_o \quad (16)$$

que contém apenas harmônicas pares da frequência de excitação.

Um outro tipo de sensor comumente usado, e que elimina as harmônicas ímpares no sensor, é o chamado sensor com núcleo em anel, "ring-core" (7). Neste tipo de sensor, o núcleo e a bobina primária formam um anel de Roland. A bobina sensora é colocada de forma transversal e a meio plano do anel.

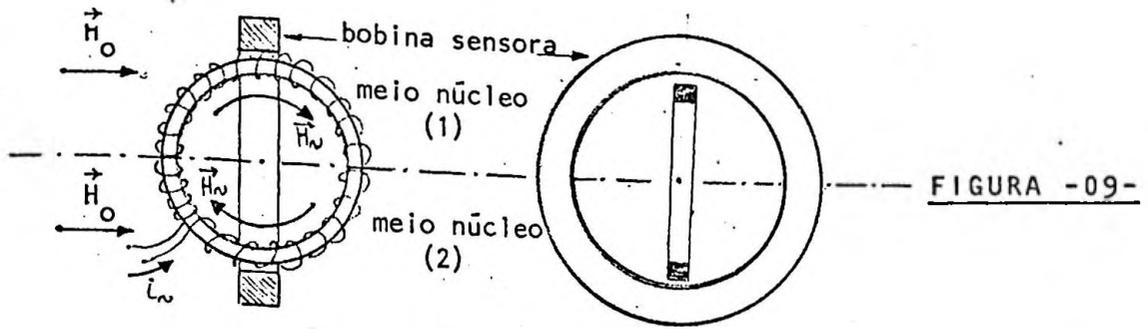


FIGURA -09-

O fluxo, devido ao campo magnetizante, no meio núcleo (1) é, a todo instante, oposto ao meio núcleo (2), isto no plano da bobina sensora. Esta configuração é equivalente à do sensor filamentar com dois núcleos. A indução na bobina sensora, devido ao campo magnetizante no meio núcleo (1), anula a mesma indução produzida no meio núcleo (2).

É interessante chamar a atenção, neste ponto, para o fato de que, para valores de  $H_0$  pequenos, a equação (16) mostra que o sinal produzido é proporcional à derivada temporal da permeabilidade diferencial aparente.

### Sensores Ortogonais

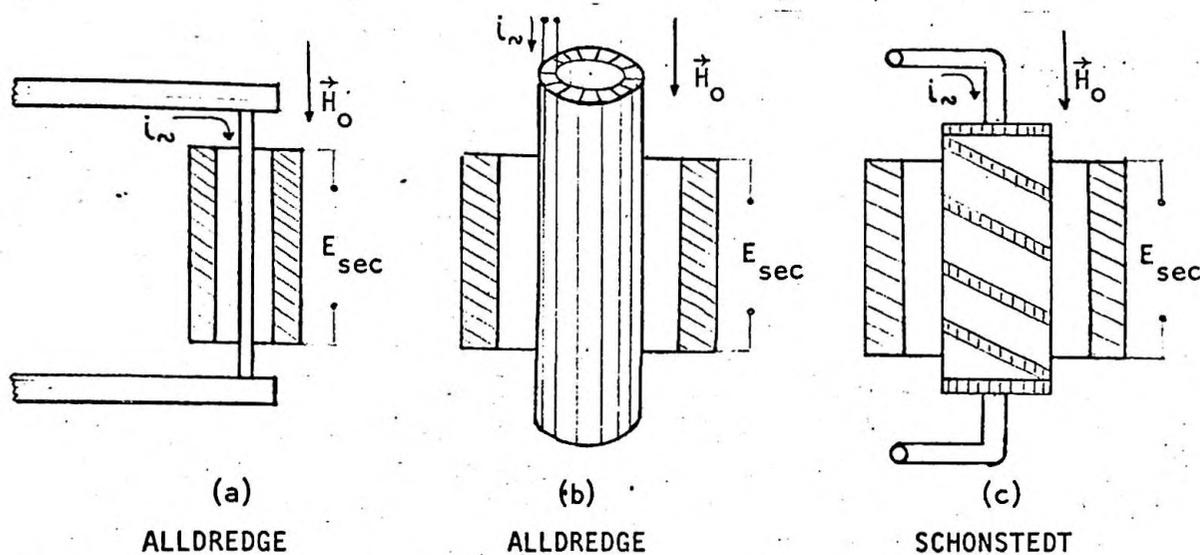
Os tipos de sensores até aqui descritos, guardam uma característica comum, o campo magnetizante  $H_w(t)$  e o campo a ser medido  $H_0$  são paralelos entre si e perpendiculares ao plano da bobina sensora. Sensores com esta característica são chamados de Sensores "Fluxgate" Paralelos (8).

Em uma segunda classe de sensores, os Sensores "Fluxgate" Ortogonais (8), o campo magnetizante é produzido paralelamente ao

plano da bobina sensora e ortogonal ao campo uniforme a ser medido.

Nos sensores "Fluxgate" Ortogonais a FEM induzida na bobina sensora é devida unicamente ao campo a ser medido, que é normal ao plano de bobina sensora. A variação temporal de fluxo no núcleo devido ao campo magnetizante, não induz FEM na bobina sensora por ser paralelo ao plano da bobina.

A figura-10- ilustra alguns tipos de sensores ortogonais.



Sensores "Fluxgate" ortogonal

FIGURA -10-

O sensor da figura-10a-, uma patente apresentada em 1952 por Alldredge, consiste de um único núcleo, envolvido por uma bobina sensora. O núcleo, um fio ferromagnético, serve também como condutor da corrente de excitação.

O sensor da figura-10b-, também apresentado por Alldredge, utiliza um núcleo tubular envolvido por uma bobina de excitação toroidal e com a bobina sensora enrolada coaxial ao núcleo.

A figura-10c- ilustra o sensor descrito por Schonstedt em 1955, que utiliza um núcleo helicoidal envolvido por uma bobina sensora e excitado por um campo AC produzido por um condutor montado.

Cálculo da segunda harmônica da FEM induzida na bobina sensora

A equação (16) permite estimar a voltagem induzida no secundário de um sensor "Fluxgate" paralelo, bifilamentar, a partir do conhecimento da função  $\mu_{a,d}(t)$ .

Esta voltagem contém apenas as harmônicas pares da frequência de excitação, devido a geometria do sensor, que anula as harmônicas ímpares.

Em sensores reais, entretanto, a simetria não é perfeita e um certo nível de harmônicas ímpares está presente. É comum, então, usar-se, mesmo para este tipo de sensor, uma amplificação eletrônica seletiva, capaz de filtrar as componentes indesejáveis. Algumas vezes, é interessante utilizar um amplificador de banda estreita, capaz de amplificar exclusivamente a primeira harmônica par do sinal de entrada, por exemplo um amplificador do tipo "lock-in".

Uma estimativa desta primeira harmônica par pode ser feita através da transformada de Fourier da equação (16).

A amplitude total da primeira harmônica par é dada por:

$$E_2 = \sqrt{E_{2,1}^2 + E_{2,2}^2} \quad (17)$$

onde: 
$$E_{2,1} = 2 \cdot N_s \cdot 10^{-8} \cdot A_{nuc} \cdot \delta H_o \cdot \frac{4}{T} \cdot \int_{-T/4}^{T/4} \frac{d\mu_{a,d}}{dt} \cdot \text{sen}(2w \cdot t) \cdot dt \quad (18)$$

$$E_{2,2} = 2 \cdot N_s \cdot 10^{-8} \cdot A_{nuc} \cdot \delta H_o \cdot \frac{4}{T} \cdot \int_{-T/4}^{T/4} \frac{d\mu_{a,d}}{dt} \cdot \text{cos}(2w \cdot t) \cdot dt \quad (19)$$

e  $w = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ , e  $T$  é o período do campo magnetizante  $H_v(t)$ .

Encontramos na literatura estimativas feitas a partir de modelos simplificados da função  $\mu_{a,d}(t)$ .

Um modelo muito simples, Prindahl<sup>(1)</sup>, assume a função  $\mu_{a,d}(t)$ , como uma senóide, com frequência igual ao dobro da frequência de excitação, ou seja:

$$\mu_{a,d}(t) = \mu_{a,d,max.} \cdot \cos(2\omega \cdot t) \quad (20)$$

Substituindo nas equações (18) e (19), temos:

$$E_{2,2} = 0$$

$$e \quad E_{2,1} = E_2 = \frac{4}{T} \cdot N_s \cdot 10^{-8} \cdot A_{nuc} \cdot \mu_{a,d,max.} \cdot \delta H_o \quad (21)$$

Outro modelo, já um pouco mais elaborado, Zadoff<sup>(9)</sup>, assume a curva B-H do material do núcleo, como mostra a figura-11-

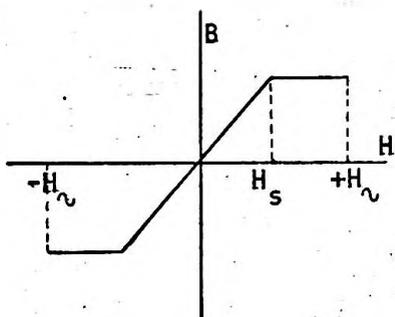


FIGURA -11-

onde a curva  $\frac{d\mu_{a,d}(t)}{dt}$  versus  $t$  fica:

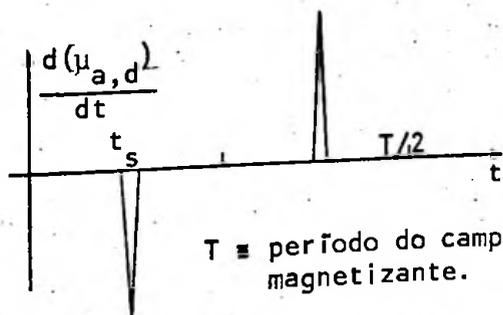


FIGURA -12-

$T \equiv$  período do campo magnetizante.

Nesta figura, tomamos a origem dos tempos no ponto em que  $H=0$  e mostramos um período completo, que corresponde a meio período do campo magnetizante. A função  $d\mu_{a,d}/dt$  é representada por uma função delta no instante  $t=t_s$  que corresponde a  $H_e=H_{s,e}$ , sendo  $H_s$  o campo de saturação do núcleo.

Para integrar as equações (18) e (19), é sempre possível escolher a origem dos tempos de forma que uma delas seja nula, assim, podemos escrever:

$$E_2 = \frac{16}{T} \cdot N_s \cdot 10^{-8} \cdot A_{nuc} \cdot \text{sen}\left(4\pi \cdot \frac{t_s}{T}\right) \cdot \mu_{a,d} \cdot \delta H_0 \quad (22)$$

Um ponto interessante da equação (22) é que ela mostra a dependência de  $E_2$  com as características do campo magnetizante,  $H_n(t)$ , através do termo  $\text{sen}(4\pi \cdot t_s/T)$ . Em particular  $E_2$  é máximo para  $t_s = T/8$ , condição esta que pode ser satisfeita, ajustando-se a amplitude do campo magnetizante para uma dada frequência constante.

Os dois modelos apresentados mostram que um parâmetro importante para o desenho de um sensor é o produto  $A_{nuc} \cdot \mu_{a,d,max}$  que, muitas vezes, é chamado de "Área de Captura do Núcleo" (1). Mais adiante, apresentaremos algumas considerações sobre este parâmetro.

### Fator de Desmagnetização

Núcleos de sensores magnetométricos do tipo "Fluxgate", tem, em geral, formas geométricas que procuram minimizar os efeitos de desmagnetização. São comuns, por exemplo, núcleos filamentosos em forma de paralelepípedos muito alongado. Para geometrias assim, é normal a utilização do conceito de fator de desmagnetização, conforme definido para uma amostra elipsoidal, onde a magnetização é

uniforme. Assume-se, neste caso, o mesmo fator de desmagnetização utilizado para um elipsóide cujos eixos coincidam com as dimensões do paralelepípedo.

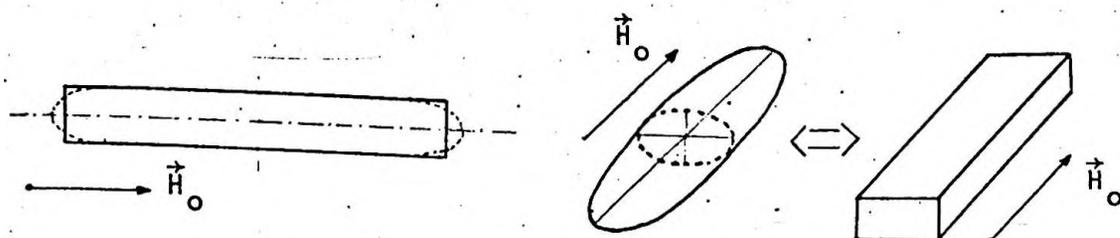


FIGURA-13-

O cálculo do fator de desmagnetização para amostras elipsoidais foi realizado por Osborn<sup>(10)</sup>. Para o caso em que um dos eixos é muito maior do que os outros,  $a \gg b \gg c$ , o valor de  $L$ , como definido na primeira secção deste capítulo, é dado por:

$$\frac{L}{4 \cdot \pi} = \frac{b \cdot c}{a^2} \cdot \left( \ln\left(\frac{4 \cdot a}{b+c}\right) - 1 \right) \quad (23)$$

Cálculos mais exatos para geometrias não elipsoidais, como paralelepípedos e cilindros, implicam em um valor de  $L$  para cada ponto do volume da amostra. Um exemplo deste tipo de cálculo pode ser encontrado, por exemplo, no artigo de Joseph e Schloman<sup>(11)</sup>.

Uma outra configuração de interesse, é o caso de um anel su jeito a um campo uniforme, no plano do anel.

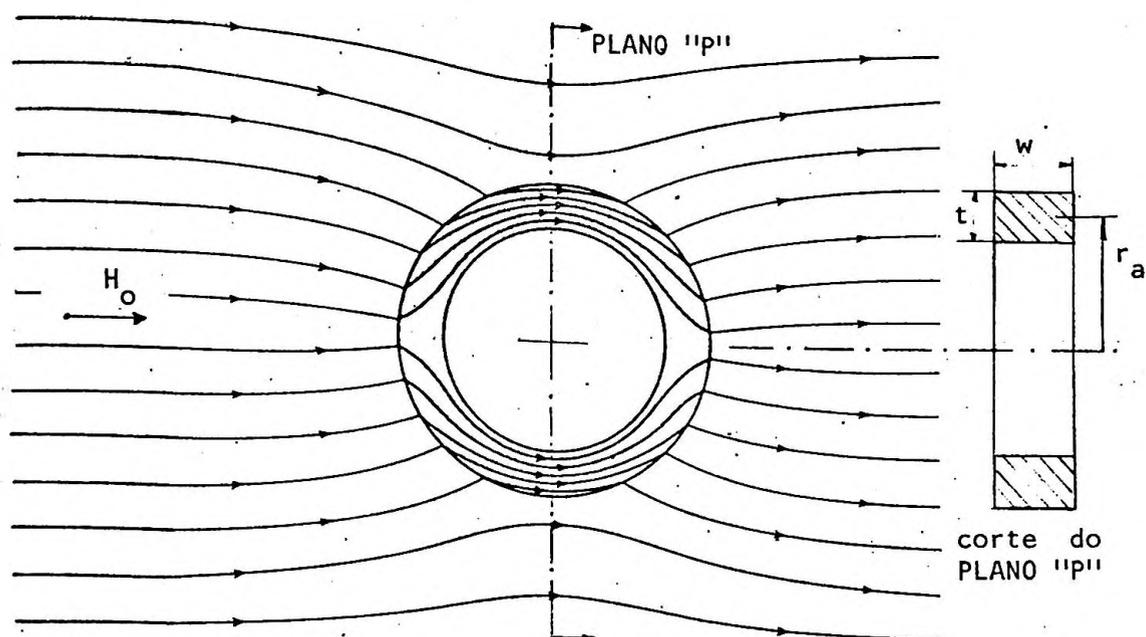


FIGURA -14-

Neste caso, é possível definir um fator de desmagnetização para as secções retas do anel, definidas pela intersecção de um plano (P na fig.) perpendicular ao campo, e que divide o anel em duas partes iguais. Zadoff<sup>(9)</sup> obteve para este caso:

$$\frac{L}{4 \cdot \pi} = \frac{t \cdot w}{2 \pi \cdot r_a^2} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot r_a}{t+w}\right) \quad (24)$$

#### Correntes parasitas e profundidade de penetração

Em geral, os materiais adequados para a fabricação de núcleos são metálicos. Em um metal, a aplicação de um campo alternado produz correntes parasitas, muitas vezes chamadas de corrente de Foucault. Estas correntes aparecem de modo a atenuar o campo no núcleo, quando a corrente de excitação esta aumentando, e a reforçar o campo no núcleo, quando a corrente esta diminuindo. Isto é equivalente a uma histerese que se soma à histerese natural do núcleo. Sobre isto comentaremos mais adiante.

Outro efeito das correntes parasitas, é o de dificultar a penetração do campo alternado no interior do material condutor. Sob certas condições, o campo decai, exponencialmente, da superfície para o interior do material e é comum definir-se uma profundidade de penetração, como sendo a profundidade para a qual o campo é atenuado de um fator  $e^{-1}$ . Esta profundidade, característica do material, é dada por:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (\text{cm}) \quad (25)$$

onde  $\rho$  é a resistividade em ohm-cm,  $\mu$  é a permeabilidade e  $f$  a frequência (Hertz).

Um tratamento bastante completo deste efeito para amostras filamentosas, pode ser encontrado, por exemplo, no livro de Bozorth<sup>(12)</sup>. No Artigo de Brailsford,<sup>(13)</sup> encontramos um tratamento para lâminas.

No caso de núcleos de "Fluxgate" a situação é bastante complicada, devido ao fato do campo magnetizante ser suficiente para fazer o núcleo passar por saturação. Por isso, temos uma permeabilidade magnética que varia com  $H$  e conseqüentemente com o tempo, e, mais ainda, varia com a profundidade no material para cada instante fixo.

Esta situação pode ser qualitativamente ilustrada pela figura -13-. Esta figura foi obtida por Brailsford<sup>(13)</sup>, a partir de um modelo que simula, razoavelmente, a nossa situação.

A figura mostra um período de  $B(t)$  para quatro profundidades diferentes na amostra. Próximo à superfície,  $B$  mostra claramente os efeitos da saturação. À medida que nos aprofundamos, a forma de onda se distorce, com cada vez menos tempo de  $B$  próximo a saturação. Além disso, é visível uma defasagem (um atraso da onda em relação à superfície) que aumenta com a profundidade.

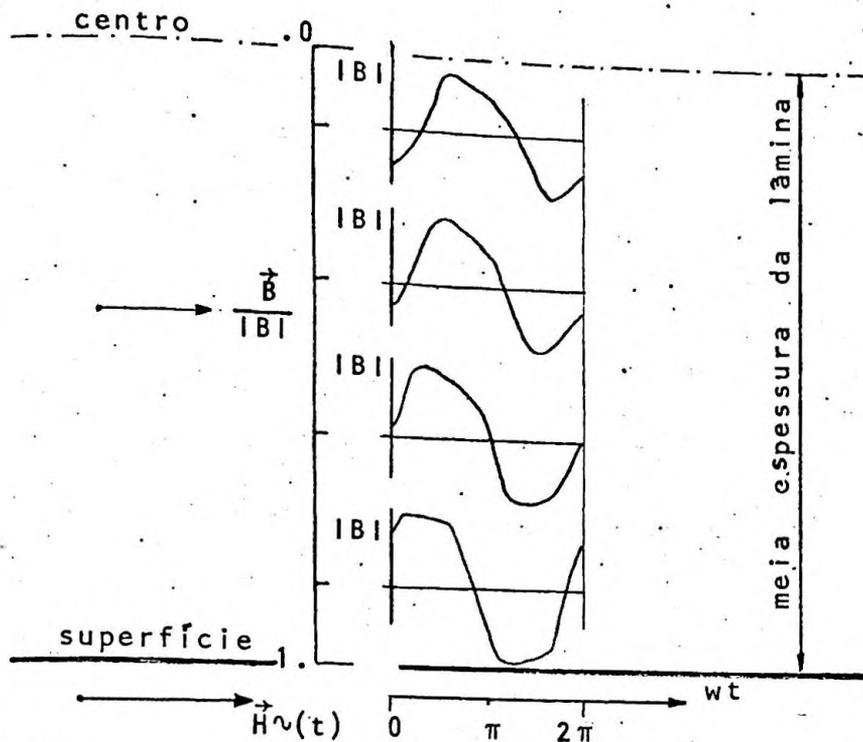


FIGURA -15-

Para fins práticos, interessa o valor integrado do fluxo de  $B$  através de uma secção reta do núcleo, a cada instante e isto é mais fácil de ser medido do que estimado. Permanece, entretanto, a equação (25) como um guia inicial para projetos de sensores. Do ponto de vista das correntes parasitas, é sempre interessante manter a espessura típica do núcleo da mesma ordem ou menor que  $\delta$ .

### Efeitos de Histerese

Em geral, a curva  $B$ - $H$  de um material magnético excitado por um campo alternado, apresenta efeitos de histerese que se acentuam com o aumento da frequência. Desde que o núcleo atinja a saturação a histerese, pouco ou nada afeta o funcionamento de um sensor "Fluxgate". Isto porque o efeito da histerese é apenas o de deslocar no tempo a curva  $B(t)$  e, conseqüentemente, a curva  $E_2(t)$ , acrescentando um ângulo de fase inicial, que pode ser compensado facilmente na eletrônica.

## Discussão

As considerações até aqui feitas, resumem os fatos mais importantes que precisam ser considerados no projeto de um magnetômetro "Fluxgate". O ponto inicial é o núcleo do sensor e suas propriedades magnéticas. No sensor, a atenção inicial é para a confecção de núcleos adequados.

O estudo anterior e a presente discussão, indicam a dependência das principais características de um sensor com as propriedades do núcleo. Fica claro, também, a necessidade de se poder determinar estas propriedades para núcleos em teste. Para isso, montamos um pequeno laboratório capaz de determinar a curva B-H estática ( $f=0$ ) e dinâmica (até 10 kHz), que descrevemos no capítulo seguinte.

Outra necessidade, é a de se obter materiais de partida em forma de fita ou filamento de baixa espessura. Neste trabalho damos ênfase a um material amorfo, obtido por técnicas de "melt-spinner", cujo método de fabricação foi recentemente desenvolvido no IFUSP.

As equações da sensibilidade, eq.(21) e (22), mostram ser importante o produto  $D=A_{\text{nuc}} \cdot \mu_{a,d,\text{max}}$ , às vezes chamado de área de captura. Maximizar D, implica na escolha de materiais com a mais alta permeabilidade. É comum a utilização de duas ligas: -o "mumetal" (Fe,Ni,Cu,Cr) e o "permalloy" (Fe,Ni). Estas ligas devem receber tratamento térmico adequado, em geral na presença de campo magnético (ver por exemplo Bozorth<sup>(12)</sup> e Chen<sup>(14)</sup>). Permeabilidades máximas típicas se situam entre  $10^4$  e  $10^5$ .

Para sensores paralelos filamentosos (os mais utilizados), é preciso tomar cuidado com o fator de desmagnetização L, que pode reduzir consideravelmente a  $\mu_a$ . A equação (6) permite estimar corretamente este efeito. Tomemos, inicialmente, um filamento cilíndrico

co ( $b=c$ ) na equação (23). O que determina  $L$  é, então, a razão  $\ell/d$ , comprimento/diâmetro. A tabela-B- mostra o efeito por vários  $\ell/d$ , entre dois limites práticos razoáveis de  $\mu$ , 20.000 e 80.000.

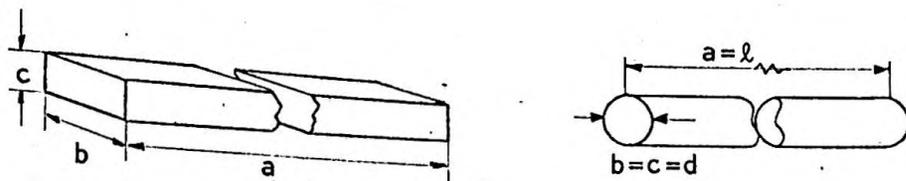
$\ell/d$	$\frac{L}{4\pi}$	$\mu=20.000$ $\mu a$	$\mu=80.000$ $\mu a$
10	$2 \cdot 10^{-4}$	50	50
100	$4 \cdot 10^{-4}$	2.200	2.400
1000	$7 \cdot 10^{-6}$	17.500	51.300

TABELA-B-

A tabela evidencia que, mesmo para valores de  $\ell/d$  da ordem de 100, a desmagnetização não permite que se tire partido da permeabilidade intrínseca alta. É preciso ir a valores da ordem de 1.000. Para isso, se pretendemos sensores com dimensão típica de centímetros, precisamos de espessuras da ordem de centésimos de milímetros.

Como o que interessa para a sensibilidade é  $D = \mu_a A_{nuc}$  é possível melhorá-la com núcleos em forma de fita (paralelepípedo alongado) ao invés de filamentos cilíndricos, que tem uma secção reta maior.

A tabela-C- mostra a evolução de  $D$  em duas fitas de larguras diferentes, mas do mesmo comprimento (5cm) e espessura (0.005cm), comparadas com um fio que corresponde à última linha da tabela anterior ( $\frac{\ell}{d} = 1.000$ ), e para um material de  $\mu=80.000$ .



b (cm)	$\frac{l}{4\pi}$	$\mu_a$	D (cm <sup>2</sup> )
0.005 (fio)	$7 \times 10^{-6}$	51.300	1
0.1	$8,5 \times 10^{-5}$	10.300	5
1	$4 \times 10^{-4}$	2.400	12

TABELA-C-

Na montagem dos dois núcleos filamentos, a distância entre seus eixos paralelos, deve ser estimada levando-se em conta que a área de captura de um núcleo não coincida com a área de captura do segundo núcleo. Em uma primeira aproximação, a distância entre os eixos dos núcleos pode ser calculada como sendo o diâmetro de um círculo com área igual a área de captura  $D = \mu_{a, \max} \cdot A_{\text{nuc}}$  do núcleo.

Outro fator importante a ser considerado é a profundidade de penetração do campo AC no núcleo. Os materiais normalmente utilizados são metálicos ( $\rho \approx 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ) e o efeito de correntes de Foucault pode ser importante. A tabela-D- mostra algumas profundidades de penetração  $\delta$  estimadas a partir da equação (25).

f (Hz)	$\delta$ (cm)		
	$\mu$ 20.000	$\mu$ 80.000	$\mu a$ 3.000
1.000	0,011	0,006	0,03
5.000	0,005	0,003	0,01
10.000	0,004	0,002	0,01

$$\rho \approx 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$$

TABELA-D-

Fica claro que a região de frequência de 1 a 10 KiloHertz, é compatível com espessuras de centésimos de milímetros, se quisermos manter a espessura do núcleo da ordem da profundidade de penetração.

Para um sensor na configuração de anel, a situação é idêntica. O fator de desmagnetização obtidos por Zadoff, equação (23), é comparável ao fator de desmagnetização para elipsóides alongados equação (22). De fato, um núcleo filamental de comprimento de 5cm (tabela-C-) é equivalente, em área de captura, a um núcleo em anel feito do mesmo filamento (mesma espessura e mesma largura), mas com diâmetro de 4cm.

A discussão acima mostra que o melhor formato para o material de partida para a confecção de núcleos, é a fita de baixa espessura. Primeiro por minimizar a área de captura, e também por minimizar os efeitos deletérios das correntes de Foucault.

Na parte experimental deste trabalho, construímos sensores a partir de um material moderno que nos parece mais adequado do que os materiais comumente em uso. Trata-se da fita de "Metglass", material amorfo, obtida por resfriamento rápido, já em forma de fita de espessura de centésimos de milímetro, e de altíssima permeabilidade. O caráter amorfo é responsável por uma baixa condutividade elétrica que minimiza efeitos de correntes de Foucault e profundidade de penetração. Além disso, o IFUSP construiu recentemente um aparelho para produção dessas fitas, que mesmo em sua forma inicial pode produzir material perfeitamente adequado à construção de sensores.

Nas considerações apresentadas, tratamos de duas configurações específicas: filamentos paralelos e anel. São duas configurações clássicas. Outras podem ser (e tem sido) utilizadas, combinando as duas idéias, como por exemplo, o sensor em forma de pista ou "anel achatado" ("race-track")<sup>(15)</sup> e o sensor em forma de U. Ambos melhoram um pouco o fator de desmagnetização para uma dada dimensão física do sensor, mas permanecem dentro das ordens de grandeza aqui apresentadas.

Além da sensibilidade, outras características de um "Fluxgate" dependem das propriedades do núcleo. O campo magnetizante  $H_n$  deve exceder o campo de saturação,  $H_s$ , e quanto menor for  $H_n$ , menor a potência consumida pelo magnetômetro. A economia de potência pode ser fator importante para certas aplicações. Neste ponto, a geometria do sensor também é importante, com os sensores de núcleo fechado (anel, "racetrack", etc) sendo mais econômicos, por evitarem a energia consumida na formação de campos desmagnetizantes produzi

dos por  $H_0$ .

Por outro lado, o máximo valor de campo que se pretende medir,  $\Delta H_0$ , deve ser bem menor do que o campo de saturação ( $\Delta H_0 \ll H_s$ ) para se obter uma certa linearidade de resposta ( $E \propto H_0$ ). Como, em geral, alto  $\mu_{\max}$  corresponde a um baixo  $H_s$ , alta sensibilidade implica em um pequeno  $\Delta H_0$ .

Para aumentar  $\Delta H_0$ , mantendo a sensibilidade, é comum adotar-se o seguinte esquema.

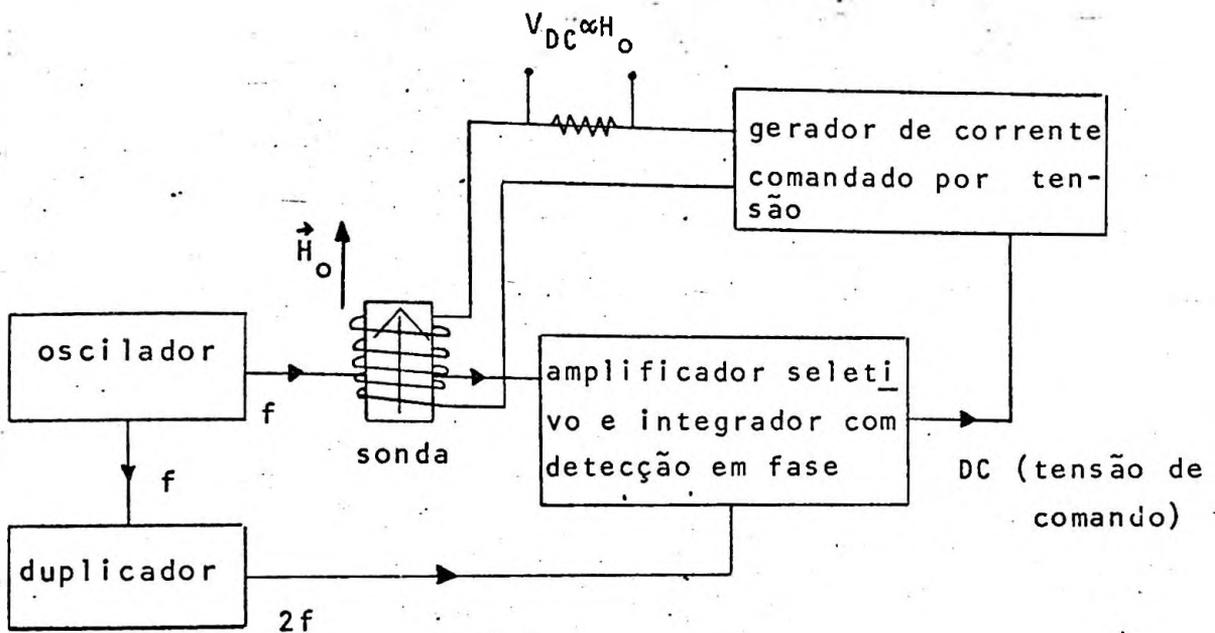


FIGURA-16-

Coloca-se o sensor dentro de um solenoide capaz de produzir campos de até  $\Delta H_0$ , alimentado por um gerador de corrente comandada por tensão. Quando o campo do solenoide anula o campo ambiente, o sensor indica zero, e uma voltagem proporcional à corrente no solenoide (tirada de um shunt), é uma medida do campo ambiente. É comum, neste caso, fazer o sinal do sensor atuar como "sinal erro" em uma malha de realimentação no circuito de comando do gerador de corrente. Assim, o sensor funciona sempre muito mais próximo de zero, e o valor de  $\Delta H_0$  passa a depender do gerador e do solenoide

apenas. Outra característica importante deste arranjo, é que a linearidade fica praticamente assegurada, dependendo apenas do "Shunt".

Além do sensor, as características de um magnetômetro dependem da sua eletrônica. Neste trabalho, estudamos apenas a construção de sensores, como um início para a possível futura fabricação de magnetômetros.

C A P I T U L O - I V -

M O N T A G E M D E U M L A B O R A T Ó R I O D E T E S T E S

- Determinação da curva ~~B-H~~ Estática.
- Circuitos para Testes de Avaliação de Sensores.
- Circuito Magnetométrico.
- Campo Magnético DC Uniforme.

CAPÍTULO -IV- MONTAGEM DE UM LABORATÓRIO DE TESTES

A primeira parte prática deste trabalho foi o planejamento e montagem da instrumentação para atender à duas necessidades principais:

- i) determinar as propriedades magnéticas relevantes de materiais adequados para núcleos; e
- ii) efetuar os principais testes de funcionamento de sensores.

As informações mais importantes sobre núcleos, podem ser obtidas a partir da curva B-H. O primeiro circuito, por nós construído, é capaz de determinar a curva B-H estática de materiais de alta permeabilidade.

Para avaliar o funcionamento de sensores é de grande importância:

- a) pode determinar a evolução da curva B-H do núcleo, com a frequência de excitação;
- b) obter o espectro de Fourier do sinal de saída;
- c) poder integrar uma componente de Fourier específica em geral a harmônica com  $2.f$ ,  $E_2$ .

Um segundo circuito capaz de desempenhar estas funções, foi por nós montado.

Além disso, construímos um solenóide suficientemente grande para abrigar os sensores, e capaz de produzir os campos magnéticos necessários para os testes.

Nas seções seguintes descrevemos estas montagens.

### Determinação da curva B-H estática

A determinação de uma curva B-H pode ser feita de maneira simples, fazendo com que a amostra se constitua no núcleo de um par de bobinas, a primária e a secundária. A bobina primária gera um campo H que magnetiza a amostra. Durante o tempo em que ocorre a magnetização, aparece no secundário uma tensão cuja integral em relação ao tempo é proporcional ao fluxo magnético da amostra e, conseqüentemente, proporcional a B. O campo H pode ser medido pela corrente que atravessa o primário. O B, diretamente de um aparelho eletrônico capaz de integrar a voltagem do secundário em relação ao tempo. (16)

Em geral, as amostras de materiais de alta permeabilidade, utilizadas na determinação da sua curva B-H devem ser preparadas em forma de toroides, para evitar os efeitos de desmagnetização, formando, com os enrolamentos primário e secundário, um anel de Rowland.

As dimensões do núcleo e do enrolamento secundário, devem ser calculadas de forma que o fluxo magnético através da bobina secundária seja suficiente para ser detectado pelo instrumento medidor de fluxo. Disponhamos de um FLUXMETER IEW cuja sensibilidade varia entre  $10^2$  e  $10^5$  kMx-turns de fundo de escala, com uma resolução de 1% do fundo de escala. Como a densidade de fluxo, saturado, para os materiais de interesse é da ordem de 10kGauss, uma amostra típica pode ser construída, por exemplo, com  $10^{-2}$  cm<sup>2</sup> de secção transversal e  $10^3$  espiras no enrolamento secundário. Ambos os números são facilmente obtensíveis, e é quase sempre possível produzir amostras de secção bastante maiores.

Com relação ao enrolamento de excitação, é preciso que se produza campos suficientes para saturar os núcleos. Os campos de saturação, normalmente, são da ordem de 10e ou mesmo inferiores, e, assim, campos da ordem de 10.0e são mais que suficientes. Para isto, em uma bobina toroidal, é preciso ter o produto  $n \cdot I$  da ordem de 10 Ampères.Espiras/cm. Uma combinação razoável é projetar a fonte para correntes máximas da ordem de 1 Ampères e bobinas toroidais de cerca de 100 espiras para cada cm de raio. Um fio de cobre AWG 27, por exemplo, é perfeitamente adequado à finalidade e a resistência elétrica típica da bobina é da ordem de 1 ohm.

Com estes dados em mente e os equipamentos disponíveis, projetamos o circuito mostrado na figura-17-.

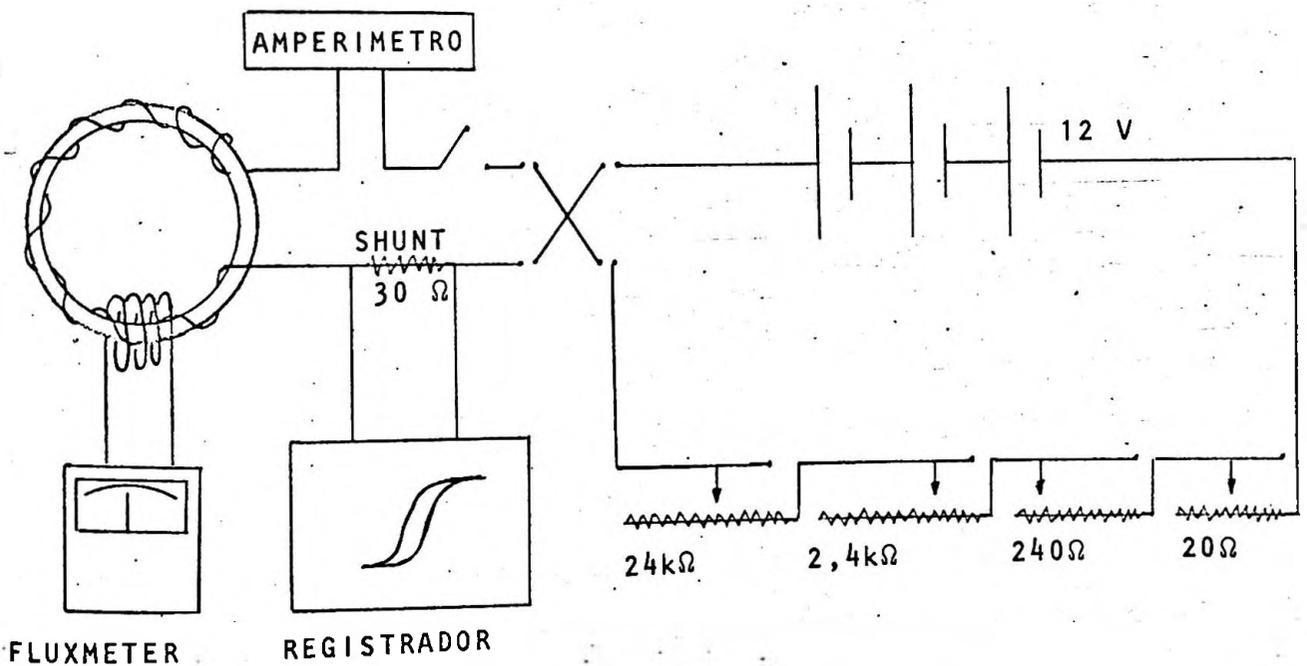


FIGURA - 17 -

Fluxmeter tipo 2354 IEW (Iokogawa Electric Works, Japão) - Amperímetro H.P. 3466 - Registrador x-y Siemens

A fonte de corrente do primário é composta de uma bateria de 12V ( 120 A-hora) e um Shunt de 30 ohms. Um conjunto de reostatos em série, permite variar a corrente com resolução suficiente para se obter, com clareza, os detalhes da curva B-H na região de permeabilidade máxima.

Um amperímetro e um registrador x-y, servem para a tomada e o registro dos dados.

O valor de H pode ser obtido com razoável precisão, da relação teórica com a corrente da bobina toroidal. O valor de B pode ser obtido do fluxo, medido pelo fluxímetro, dividido pela área da secção do núcleo e pelo número de espiras do secundário. Neste caso, a precisão é mais baixa, e, as vezes, utiliza-se um material de  $B_s$  (saturação) conhecido para a calibração.

#### Circuito para testes de avaliação de sensores

Para testes de avaliação de sensores, projetamos e montamos o circuito descrito na figura-18-.

O primeiro teste de interesse, consiste em medir a curva B-H efetiva, quando em excitação alternada, e sua evolução em função da frequência. Para isso, são necessários um circuito de alimentação AC, para a bobina de excitação, e um circuito de detecção de B.

A alimentação AC é produzida a partir de um oscilador de frequência variável (H.P. modelo 209A), capaz de operar desde 2Hz até 2MHz. Um freqüencímetro (H.P. modelo 5301A) mede a frequência produzida. Um amplificador de audio (TOSHIBA SA-445), produz as correntes necessárias, desde que as frequências de interesse não ul-

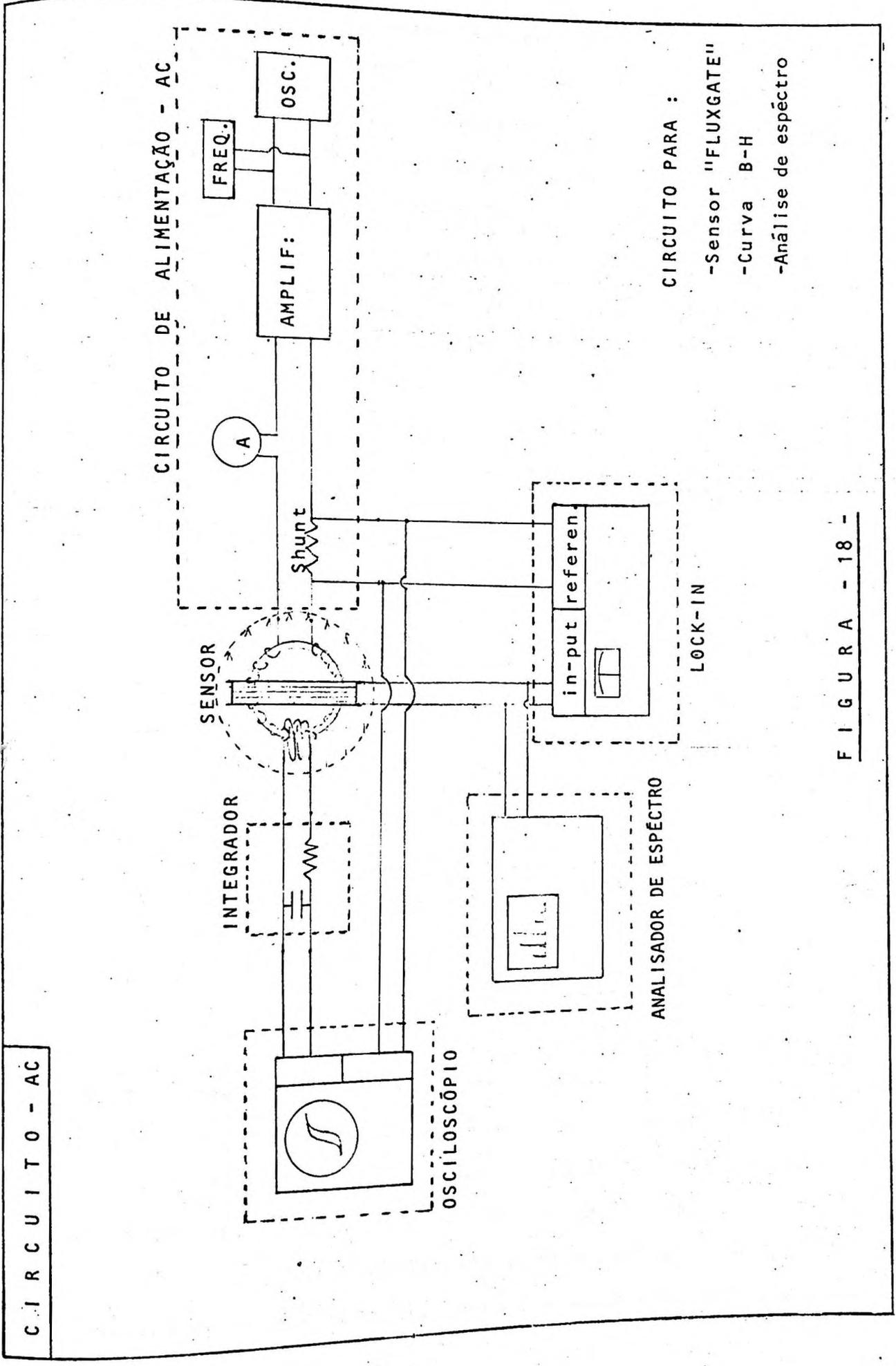
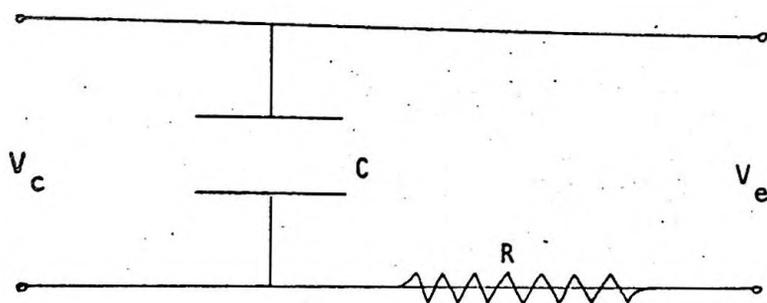


FIGURA - 18 -

CIRCUITO - AC

trapassam 100kHz. Estas correntes são medidas por um amperímetro (H.P. modelo 3466A) e, eventualmente, convertidas em unidades de H e alta potência, em série, completa o circuito. Esta resistência serve para produzir um sinal proporcional à corrente, e também para manter a forma de onda da corrente razoavelmente senoidal.

Para a detecção de B, é necessário um enrolamento secundário e um circuito integrador. O circuito integrador utilizado é um conjunto RC.



Circuito RC integrador

FIGURA-18-

Neste circuito, para  $\omega RC \gg 1$  <sup>(17)</sup>, temos:

$$v_c = \frac{1}{\omega RC} \cdot \int v_c \cdot dt \quad (28)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular de excitação.

Na montagem do circuito utilizamos um capacitor variável da H.P., modelo 4440B DECADE CAPACITOR, com capacitâncias entre 40pF e 1,2 $\mu$ F, e uma resistência comum de carvão de  $1,2 \cdot 10^5$  ohm.

A saída do integrador alimenta diretamente o eixo vertical de um osciloscópio (H.P. 1200A), sendo o eixo horizontal alimenta-

do pela tensão retirada do Shunt do circuito de alimentação AC.

A calibração dos eixos do osciloscópio, em termos de H e B, pode ser feita através de:

Eixo horizontal - pela relação teórica entre I e H para a bobina de excitação.

Eixo vertical - através da relação,

$$B = \frac{wRC}{N_s \cdot 10^{-8} \cdot A_{nuc}} \cdot v_c \quad (29)$$

que é válida para frequências baixas, ou estritamente para  $f \rightarrow 0$ .

Para um sensor bifilamentar, pode-se utilizar um dos transformadores para a medição de B-H. Para um sensor em forma de anel, a bobina de excitação pode ser a mesma, mas é preciso enrolar uma bobina secundária extra, como indicado na figura-17-, completando o anel de Rowland.

### Circuito magnetométrico

Para que o sensor funcione como magnetômetro, basta a adição de um amplificador do tipo "lock-in", conectado ao sinal de saída do sensor. O Shunt do circuito de alimentação AC, providencia um sinal em fase com a corrente, que serve como referência para o amplificador. Este pode ser sintonizado na harmônica de frequência dupla, integrando apenas esta componente de "Fourier". A amplitude desta componente, aparece como um sinal DC na saída do amplificador, sinal este que é proporcional à componente do campo ambiente, na direção do eixo do sensor.

O "lock-in" por nós adquirido para esta finalidade, é o "ITHA

CO modelo 393", que dispõe da opção de sintonia direta na frequência dupla de uma referência externa, atuando também como analisador de sinal.

Completa o circuito, um analisador de espectro, H.P.SPECTRUM ANALYZER 3580, capaz de operar entre 5Hz e 50kHz.

#### Campos magnéticos DC uniforme

Para os testes de sensores, é sempre conveniente dispor-se de um conjunto de bobinas e fonte de corrente capaz de produzir um campo magnético, uniforme em um volume de espaço de dimensões razoavelmente maiores que as dimensões do volume do sensor. Para esta finalidade, utilizamos um solenóide de precisão, construído no laboratório com as seguintes características:

- Comprimento 50cm.
- Diâmetro 10cm.
- nº de espiras 100 espiras espaçadas regularmente.
- Campo no centro 2,46 Oe/A.
- Uniformidade dentro de 1% no volume central de  $L = 10\text{cm}$  e  $\varnothing = 5\text{cm}$ .
- Alimentação 12V, fornecido pelo conjunto de baterias VARTA com 120 A-hora.
- Controle de corrente feito por reostatos.
- Corrente máxima de 0,5 A produzindo 1,2 Oe.

C A P I T U L O - V -

C O N S T R U Ç Ã O E T E S T E S D E A L G U N S S E N S O R E S

- Curvas B-H estática.
- Descrição dos sensores confeccionados:
  - a) com núcleo em anel ;
  - b) com núcleo filamentar.
- Descrição dos testes realizados e comentários.

## CAPÍTULO -V- CONSTRUÇÃO E TESTES DE ALGUNS SENSORES

Montada a bancada de testes, passamos a utilizá-la, primeiro em um sensor Forster, retirado de um dos magnetômetros do Degaussing da MB, e, depois, em vários sensores que pudemos construir.

Os sensores por nós construídos, e aqui descritos, representam apenas uma experiência preliminar, com o objetivo de se obter uma impressão inicial das dificuldades em confeccioná-los sem qualquer preocupação com especificações ou otimização.

Representam também, e principalmente, uma oportunidade para testar materiais possivelmente adequados à fabricação de núcleos.

Os sensores foram confeccionados em duas configurações: anel e filamentar, contando apenas com os materiais imediatamente disponíveis no laboratório.

Para os núcleos, utilizamos três ligas: uma fita de "mumetal" com 0,027cm de espessura, normalmente utilizada para transformadores, cedida pela companhia Tectrol, de São Paulo; uma amostra de material de núcleo, normalmente utilizado pela companhia Thonson-CSF, França, em magnetômetros comerciais, com 0,006cm de espessura, a qual identificamos como sendo "mumetal"; fitas amostras de Metglass 2605SC, com 0,003cm de espessura, obtidas da Companhia Allied Corp., USA, através do IFUSP. O Metglass é um material moderno, de tecnologia recente, que, pelo que sabemos, não foi ainda utilizado para esta finalidade.

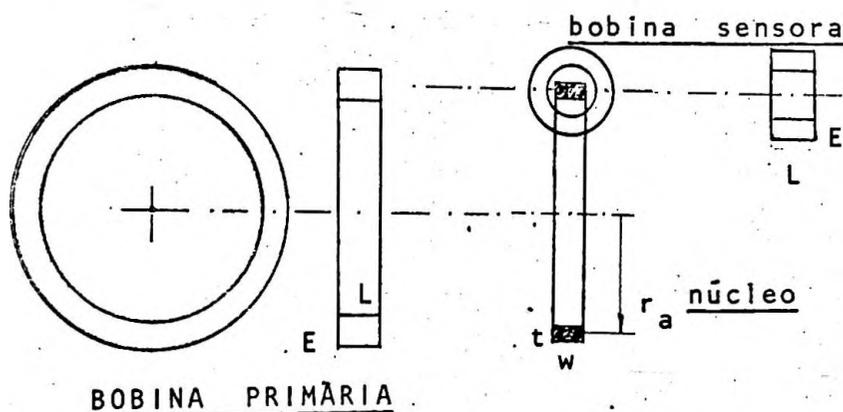
### Curvas B-H estática

Face à disponibilidade de amostras, foi possível determinar

as curvas B-H estática, somente para o "mumetal" de transformadores e para a fita de "metglass".

Para confeccionar toroides com as especificações expostas no capítulo anterior, foi necessário cortar tiras das amostras de "mumetal" e "metglass" e enrolar algumas camadas sobre um suporte cilíndrico, até obter uma área suficiente. As tiras foram cortadas com largura de aproximadamente 0,1cm, e enroladas em um cilindro com raio de cerca de 1cm. Estas dimensões são típicas dos sensores "Fluxgate".

Na figura-20-, identificamos os parâmetros de construção do anel de Rowland construído, cujas dimensões dos núcleos e bobinas secundárias são fornecidas pela tabela-E-.



Anel de Rowland.

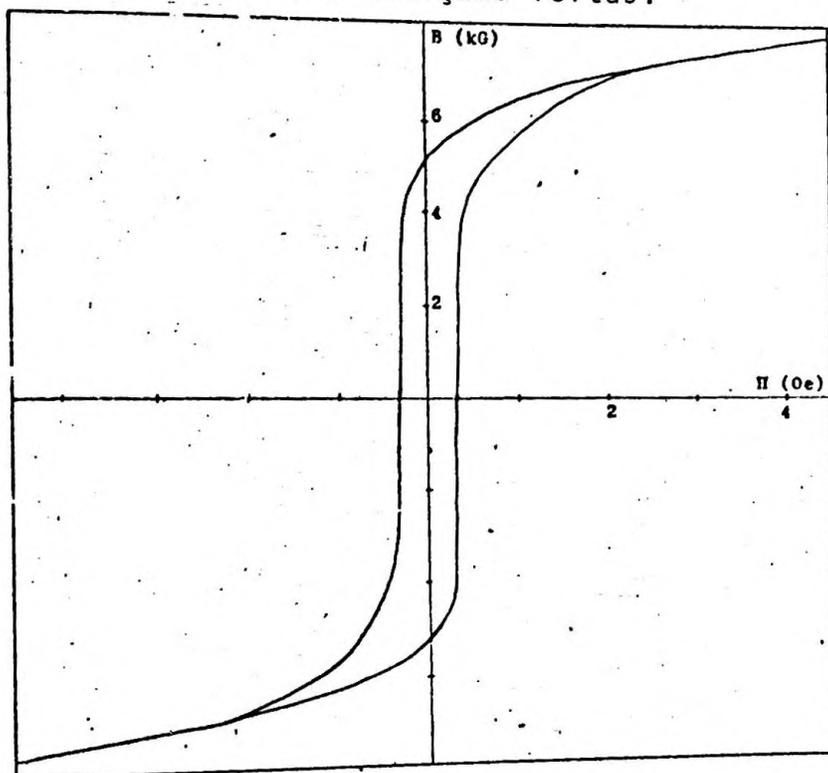
FIGURA -20-

	NÚCLEO				BOBINA SECUNDÁRIA						
	$r_a$ cm	t cm	w cm	$A_{nuc.}$ $cm^2$	$\phi_M$ cm	L cm	E cm	$A_{bob-II}$ $cm^2$	$N_s$ esp.	R ohm	$A_{nuc.} \cdot N_s$ $cm^2 \cdot esp.$
mumetal	1,4	0,11 4.c.	0,14	$15 \cdot 10^{-3}$	2,6	0,4	0,3	0,12	$1,6 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^2$	24
metglas	1,3	0,03 10.c	0,27	$8,1 \cdot 10^{-3}$	2,6	0,4	0,3	0,12	$1,6 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^2$	13

TABELA-E-

A bobina primária constituída de 155 espiras de fio de cobre AWG 27, foi enrolada em um suporte de plástico, que aloja, no seu centro, o núcleo. As largura e espessura da bobina primária, como indicado na figura, foram:  $L = 0,4\text{cm}$  e  $E = 0,3\text{cm}$ . O campo magnético produzido no eixo central do toroide é:  $H = 24.1 \text{ Oe/A}$ .

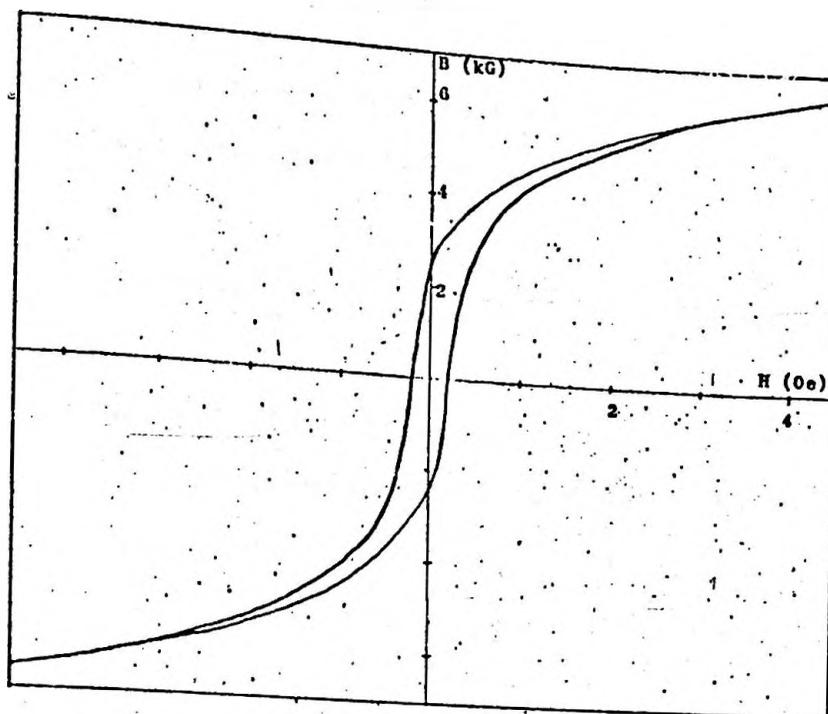
Os resultados obtidos são os reproduzidos nas figuras -21- e -22-. Complementam cada figura, tabela dos valores esperados para os parâmetros das curvas, obtidos de Hand-Books e catálogos, bem como os valores resultantes das medições feitas.



	catálogo		medido
	c/t.t.	s/t.t.	
$H_c$ (Oe)	0,04	0,08	0,33
$B_r$ (kG)	14,2	6,7	5,2
$B(1 \text{ Oe})$ (kG)	15,4	8,0	6,0
$B_{\text{sat.}}$ (kG)	16,1	15,7	-

t.t.=tratamento termico

FIGURA -21-  
Curva B-H (estática)  
para o "Metglas".



	Hand-Book	medido
$H_c$ (Oe)	0,05	0,2
$B_r$ (kG)	2,3	2,4
$B(1 \text{ Oe})$ (kG)	6,0	4,5
$B_{\text{sat.}}$ (kG)	6,5	-

FIGURA-22-

Curva B-H (estática)  
para o "Mumetal".

Os valores medidos, quando comparados com os valores típicos para material de alta qualidade, revelam uma sensível degradação das propriedades magnéticas nas nossas amostras. Esta degradação é razoável, considerando que os materiais utilizados não passaram por qualquer tratamento térmico, mas, ao contrário, sofreram considerável trabalho mecânico, principalmente nos processos de cortes.

Das curvas B-H, pudemos estimar também as permeabilidades máximas para cada material. Resultou um valor entre 15000 e 20000 para o "mumetal", e entre 70000 e 80000 para o "metglass". O valor obtido para o "mumetal" é razoável, tendo em vista a degradação da amostra. O valor obtido para o "metglass", é surpreendentemente

alto, posto não se ter tomado qualquer cuidado especial durante toda a manipulação a que esse material foi submetido.

Consoante o discutido no capítulo-III-, cumpre ressaltar que, para utilização em núcleos de sensores "Fluxgate", a propriedade importante é a permeabilidade máxima. O campo coercitivo, se mantido dentro de certos limites, não influi no funcionamento do sensor. Desse ponto-de-vista, a fita de "metglass", por ter mantido uma alta permeabilidade, apesar da ausência de cuidados especiais na manipulação, mostra-se bem mais adequada à finalidade.

### Descrição dos sensores confeccionados

a) com núcleo em anel.

A figura-23- esquematiza a confecção dos sensores em anel.

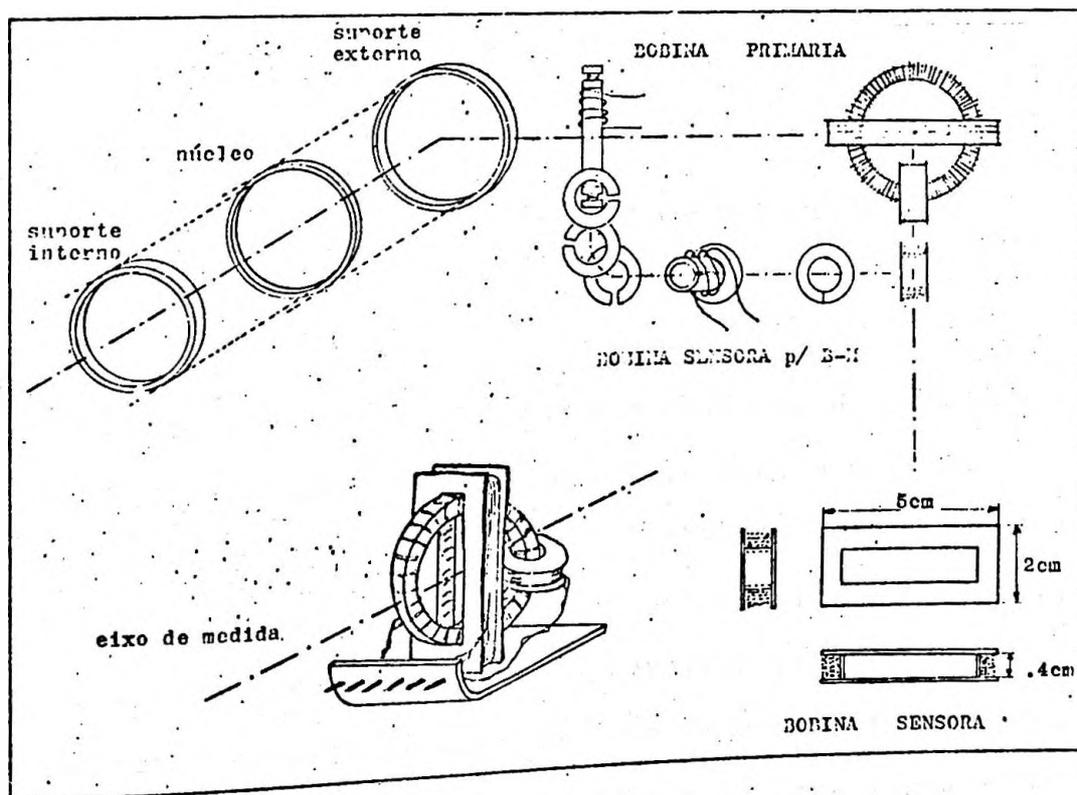


FIGURA -23-

O núcleo foi obtido a partir de tiras cortadas das fitas originais, com larguras entre 0,1 e 0,2cm., e comprimento suficiente para várias voltas feitas em um suporte plástico de forma de anel, com 2,5cm de diâmetro externo e 0,4cm de largura. Sobre o núcleo, ajustamos outro anel de plástico, sendo o conjunto, anel interno-núcleo-anel externo, encapsulado em araldite formando um toróide de secção quadrada de  $0,4 \times 0,4 \text{ cm}^2$ .

Sobre este toróide, enrolamos, manualmente, a bobina primária de excitação, constituída de 160 espiras de fio de cobre AWG-27, tomando cuidado para distribuição o mais uniformemente possível. Com esta bobina conseguimos, no volume ocupado pelo núcleo, um campo magnético de  $H=25.1 \text{ Oe/A}$ .

A bobina sensora foi enrolada sobre um carretel de forma retangular, com secção reta quadrada, usinado em celeron. As dimensões internas do retângulo, foram ajustadas de forma a receberem o anel com o núcleo e a bobina de excitação. A bobina sensora contém  $1,6 \cdot 10^3$  espiras de fio de cobre AWG-40, que tem uma resistência de  $4 \cdot 10^2 \Omega$ . As principais dimensões desta bobina estão indicadas na figura-23-. A mesma bobina foi utilizada com diversos aneis, com núcleos diferentes.

Para a determinação da curva B-H dinâmica dos núcleos destes sensores, montamos uma segunda bobina sensora, a qual forma, com o núcleo e bobina primária, um anel de Rowland. Esta bobina, constituída de  $1,6 \cdot 10^3$  espiras de fio AWG-40, foi enrolada manualmente em um carretel feito de um pequeno tubo de celeron e aneis de papelão antecipadamente montado no toróide. As dimensões desta segunda bobina são as mesmas fornecidas pela tabela-E-, e a figura-23- mostra

um esquema de como foi montada.

b) como núcleo filamentar.

A construção deste tipo de sensor é bem mais simples. O núcleo é alojado num suporte cilíndrico de madeira com  $\varnothing = 0,6\text{cm}$ , sobre o qual é enrolado por uma bobinadeira, primeiro a bobina secundária, e, sobre esta, a primeira. A figura-24- ilustra esta montagem.

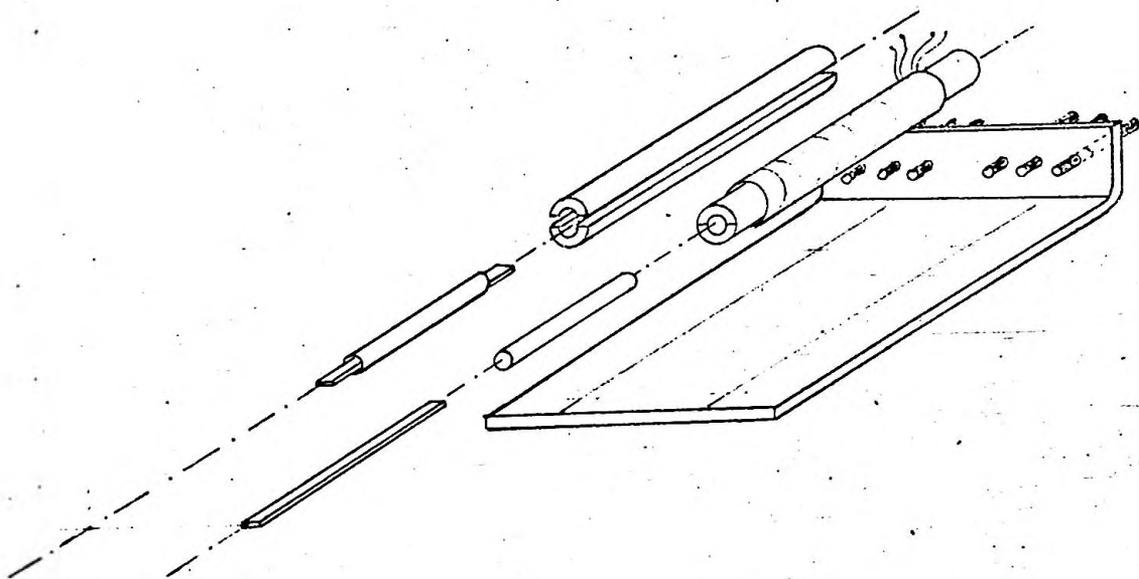


FIGURA-24-

Montagem do Sensor Filamentar.

A bobina secundária é composta por quatro camadas de fio AWG-40, isoladas entre si por uma folha de papel de seda de 0,003cm de espessura. O número de espiras variou entre 1000 e 2000, conforme o comprimento do núcleo. O enrolamento secundário, foi construído



de forma a cobrir 80% do comprimento do núcleo, deixando cerca de um décimo em cada extremo.

A bobina primária é composta de uma única camada de fio AWG30, com 20 espiras por cm. O comprimento desta bobina foi projetado para manter uma razoável homogeneidade do campo, no volume ocupado pelo núcleo. O campo magnético assim produzido, é de  $H=25.1 \text{ Oe/A}$  no eixo do selenóide; o mesmo produzido nos sensores com núcleo em anel.

Os dois transformadores componentes do sensor, montados com seus eixos paralelos num suporte de acrílico, que contém os terminais para conexões, guardam entre si uma distância de 2,5cm.

### Descrição dos testes realizados e comentários

As tabelas-F- e -G- mostram, para efeito comparativo, alguns dados relevantes dos núcleos dos sensores construídos e testados. As dimensões escolhidas correspondem às dimensões típicas de sensores de magnetômetros comerciais.

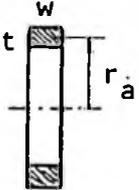
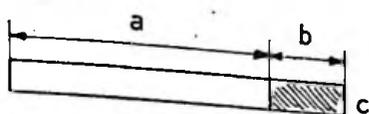
sensores com núc. em <u>anel</u>			$A_{nuc} = t \cdot w$ $r_a = 1,3 \text{ cm}$	$\frac{L}{4 \cdot \pi} = \frac{1}{2} \cdot \frac{t \cdot w}{r_a} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot r_a}{t+w}\right)$		
	núcleos	w (cm)	t (cm)	$A_{nuc}$ ( $10^{-3} \text{ cm}^2$ )	fator de desmag. ( $L/4\pi$ )	limite $\mu_{a,max.}$ ( $L/4\pi$ ) <sup>-1</sup>
mumetal	0,12	0,027 1x.027	3,2	$11 \cdot 10^{-4}$	900	2,9
Thonson	0,16	0,012 2x.006	1,9	$6,2 \cdot 10^{-4}$	1600	3,0
amorfo	0,19	0,015 5x.003	2,9	$8,7 \cdot 10^{-4}$	1200	3,5

TABELA-F-

sensores  
com núcleo  
filamentar



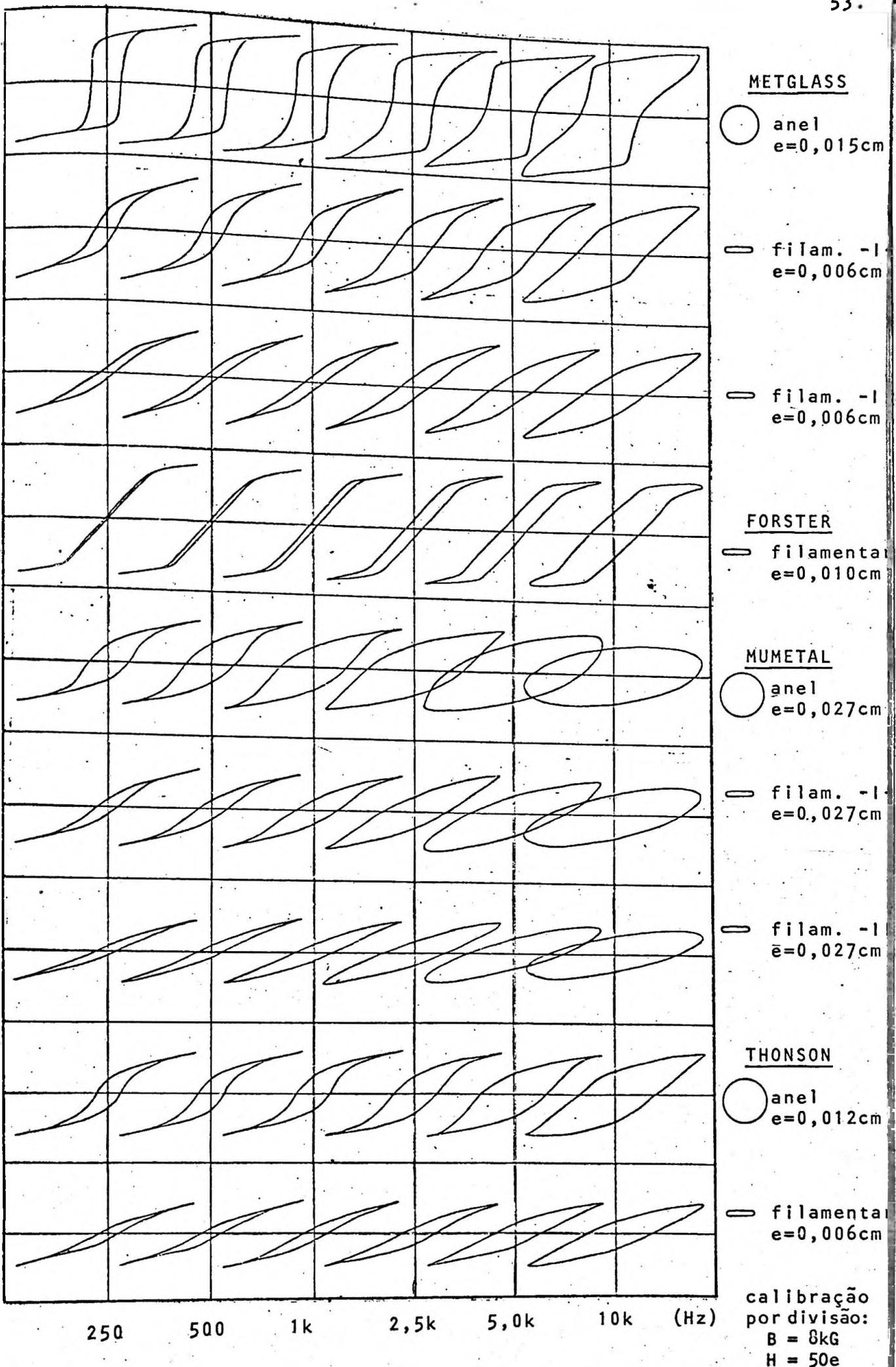
$$A_{nuc} = b \cdot c$$

$$\frac{L}{4\pi} = \frac{b \cdot c}{a^2} \left( \ln \left( \frac{4a}{b+c} \right) - 1 \right)$$

núcleos	a (cm)	b (cm)	c (cm)	$A_{nuc}$ $10^{-3}$ (cm <sup>2</sup> )	fator de desmag. (L/4π)	limite $\mu_{a,max.}$ (L/4π) <sup>-1</sup>	limite da Área de captura (cm <sup>2</sup> )
forster	3,0	0,10	0,010	1,0	$4,1 \cdot 10^{-4}$	2400	2,4
mumetal -I-	6,0	0,14	0,027	3,7	$3,7 \cdot 10^{-4}$	2400	9,1
mumetal -II-	3,7	0,13	0,027	3,5	$9,1 \cdot 10^{-4}$	1100	3,9
amorfo -I-	5,0	0,23	0,006 2x.003	1,3	$5,5 \cdot 10^{-4}$	5200	7,4
amorfo -II-	2,6	0,22	0,006 2x.003	1,3	$5,5 \cdot 10^{-4}$	1800	2,4
Thonson	2,5	0,20	0,006	1,2	$5,5 \cdot 10^{-4}$	1800	2,2

TABELA-G-

A figura-25- mostra a evolução das curvas B-H, dos diversos núcleos, com a frequência da excitação. As curvas foram copiadas diretamente da tela do osciloscópio e, posteriormente, reduzidas para compor a figura.



Curvas B-H dinâmicas.

FIGURA -25-

As curvas mostram, claramente, um aumento do efeito de histerese com o aumento da frequência.

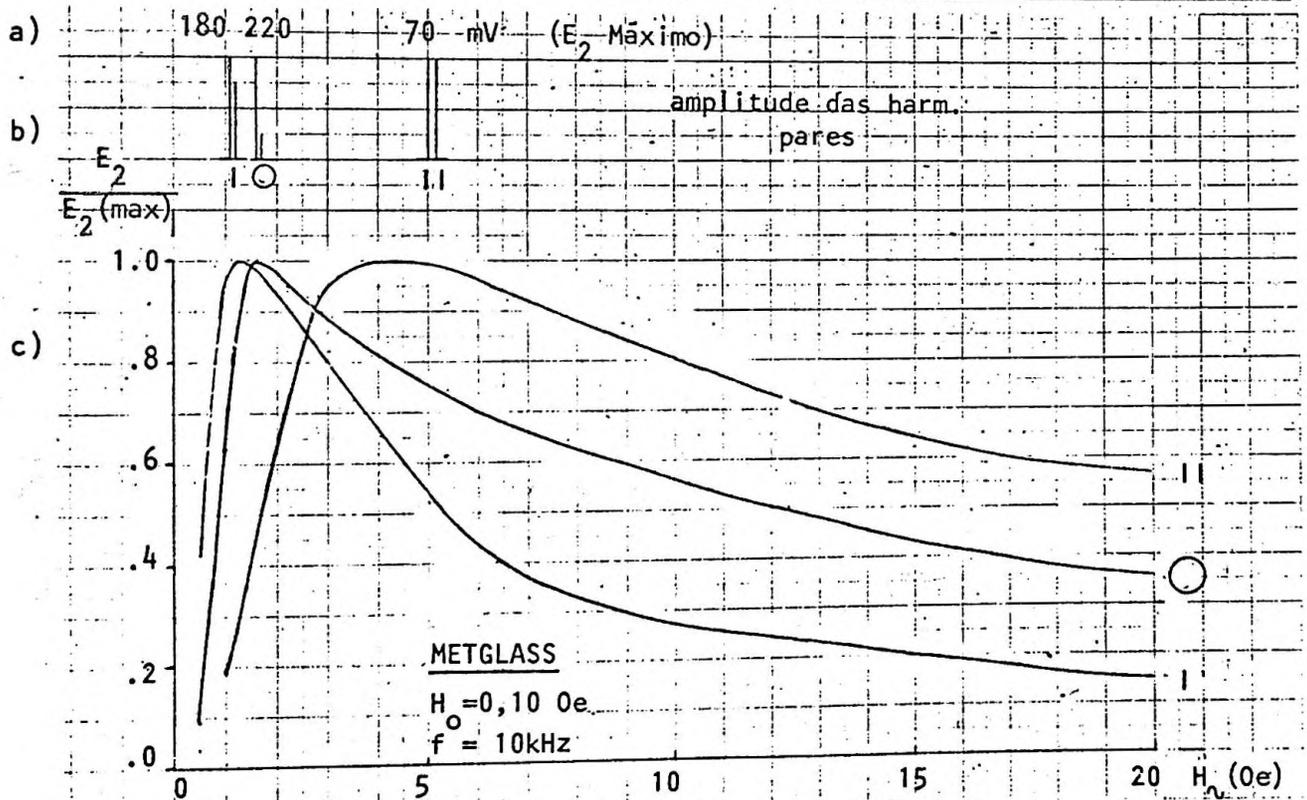
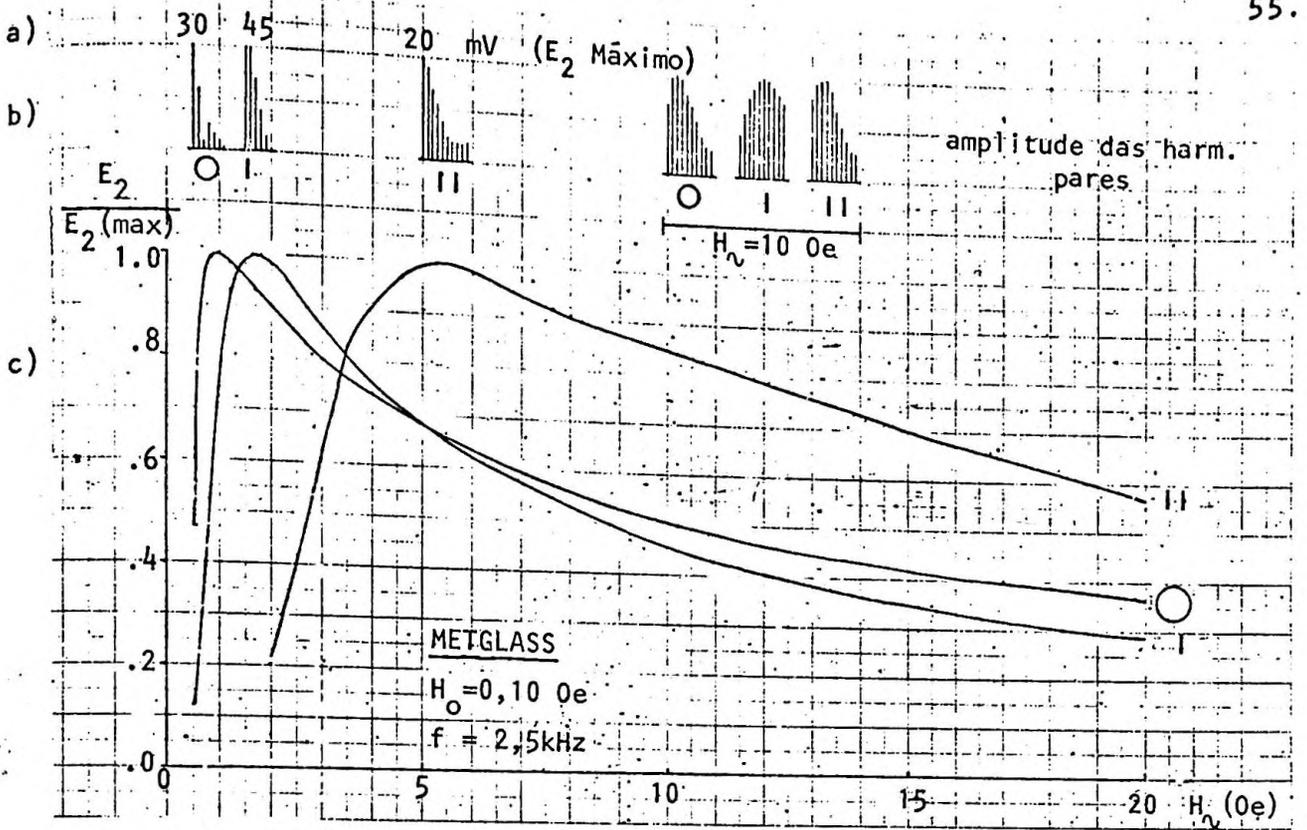
Mesmo para as mais altas frequências, o núcleo em anel do Metglass apresenta características de alta permeabilidade, e, pelo menos em alguns sensores, uma diminuição sensível da permeabilidade máxima.

Comparando curvas de núcleos feitos com o mesmo material, mas em forma filamentar e anel, e mesmo núcleos filamentosos com diferentes fatores de desmagnetização, verificamos os efeitos da desmagnetização nas curvas B-H.

Comparando a série de curvas para núcleos em anel do mumetal e Thonson, somos levados a crer que a liga utilizada pela Thonson, para confeccionar seus núcleos, é o mumetal.

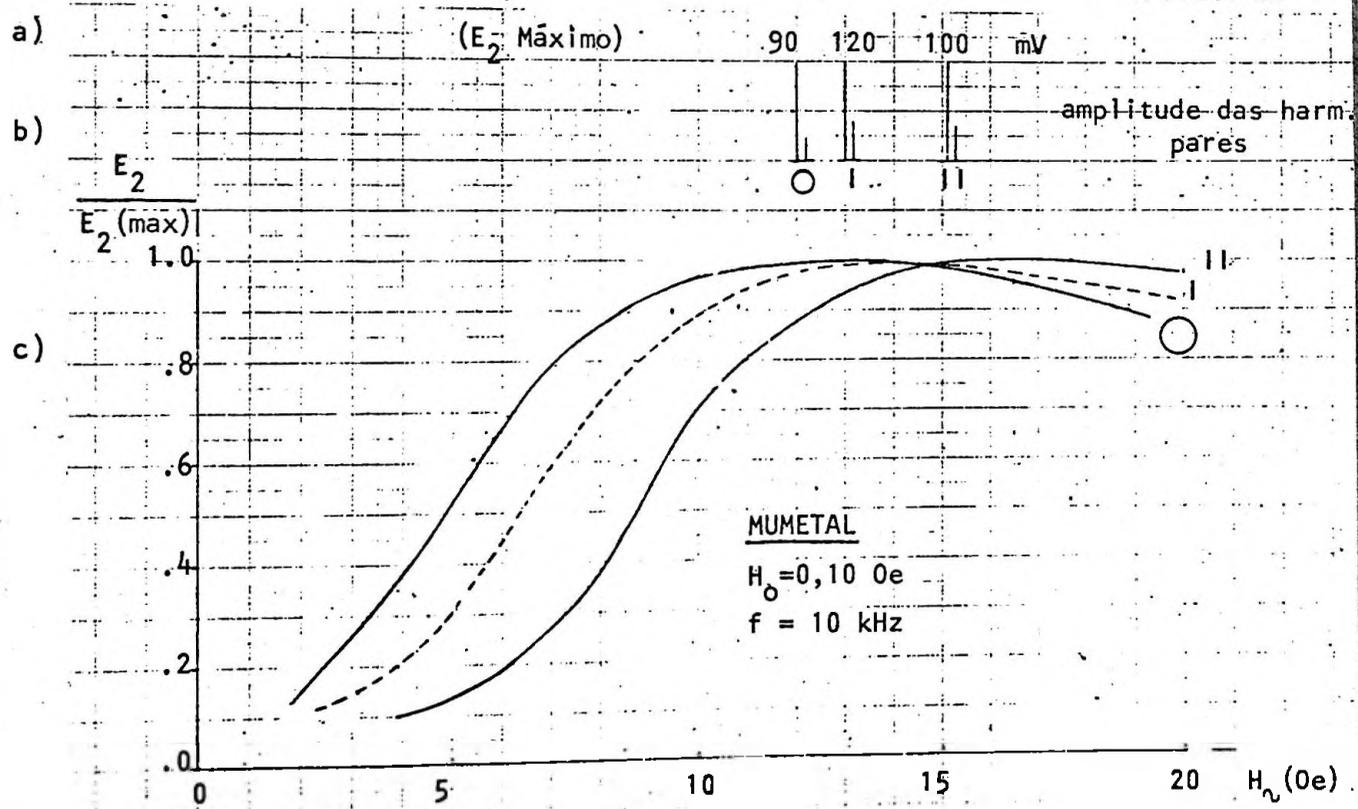
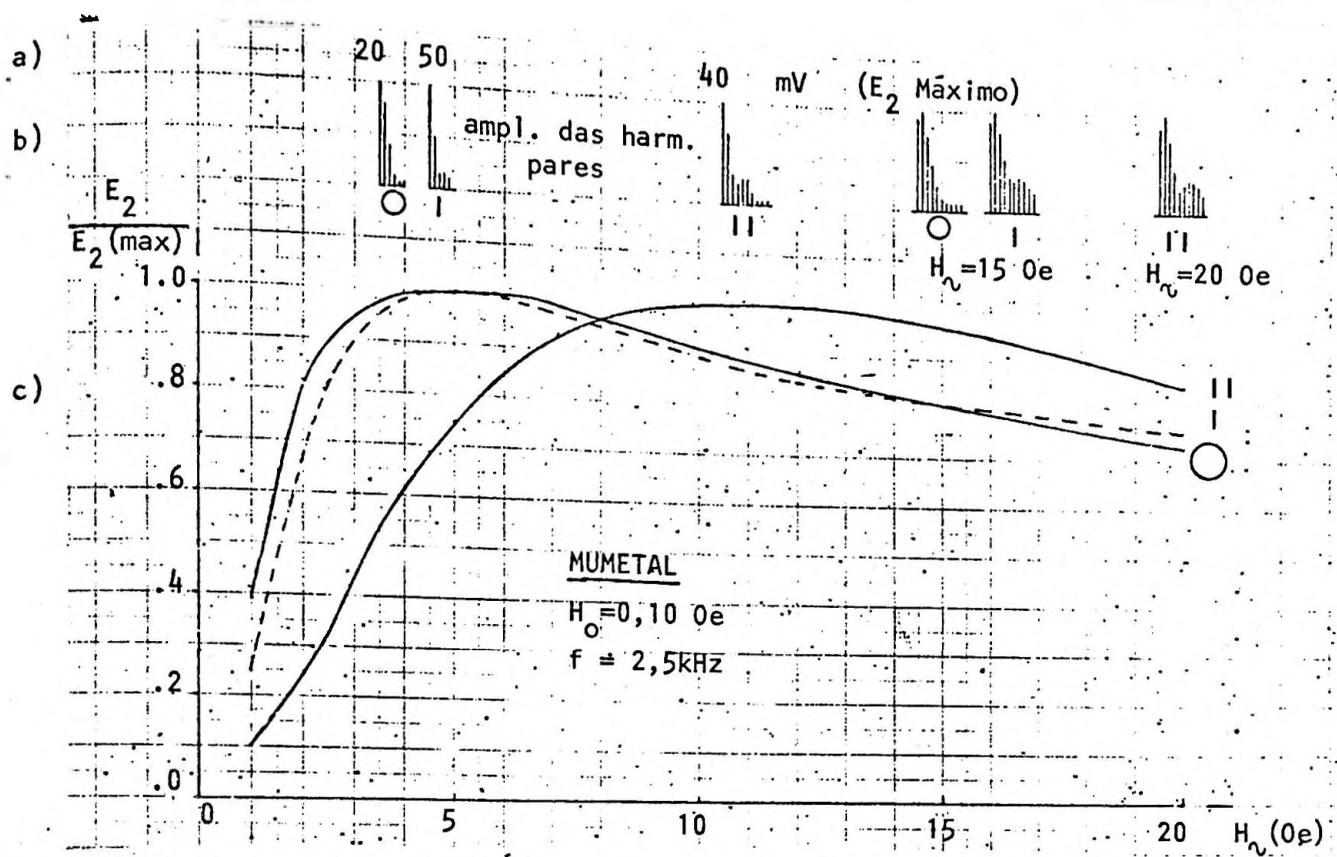
A 10kHz, o efeito das correntes de Foucault nos núcleos de mumetal é tão significativo que, mesmo com as amplitudes de excitação de  $H_{\nu}=50e$ , não foi possível saturar nem o núcleo toroidal. Já os núcleos da Thonson, supostamente também de mumetal, mostram, nas mesmas condições, características de saturação, significando que os efeitos de correntes de Foucault, nestes núcleos, são menos significativos, isto devido à menor espessura da lâmina.

As figuras 26, 27 e 28, mostram dados sobre o conteúdo harmônico do sinal induzido e dados da dependência da amplitude  $E_2$  (a primeira harmônica par) com a amplitude de  $H_{\nu}(t)$  - campo magnetizante. Nestes testes, o campo magnético DC, ao longo do eixo de medida dos sensores, foi  $H_0=0,100e$ . A frequência de  $H_{\nu}(t)$ , foi de 2,5kHz e 10,0kHz. As curvas  $E_2 \times H_{\nu}$ , foram normalizadas em relação ao valor máximo de  $E_2$ . Uma linha acima de cada figura, indica os valores máximos de  $E_2$  medidos em mV. A figura mostra, também, os espectros de Fourier do sinal induzido: na condição de máximo de  $E_2$ ; com  $H_{\nu}$  muito maior que a condição de máximo de  $E_2$ . As figuras em seqüência, mostram os testes para os sensores com núcleo de Metglass, mumetal, Thonson e sensor Forster.



- a)  $E_2$  máximo, medido em mV, com  $H_0 = 0,1 \text{ Oe}$ .  
 b) Conteúdo harmônico (par) de  $E_{\text{sec}}$  para :  
 max. de  $E_2$  e  $H_n = 10 \text{ Oe}$ .  
 c) curvas  $E_2$  versus  $H_n$  para  $f = 2,5 \text{ kHz}$  e  
 $f = 10 \text{ kHz}$  com  $H_0 = 0,10 \text{ Oe}$ .

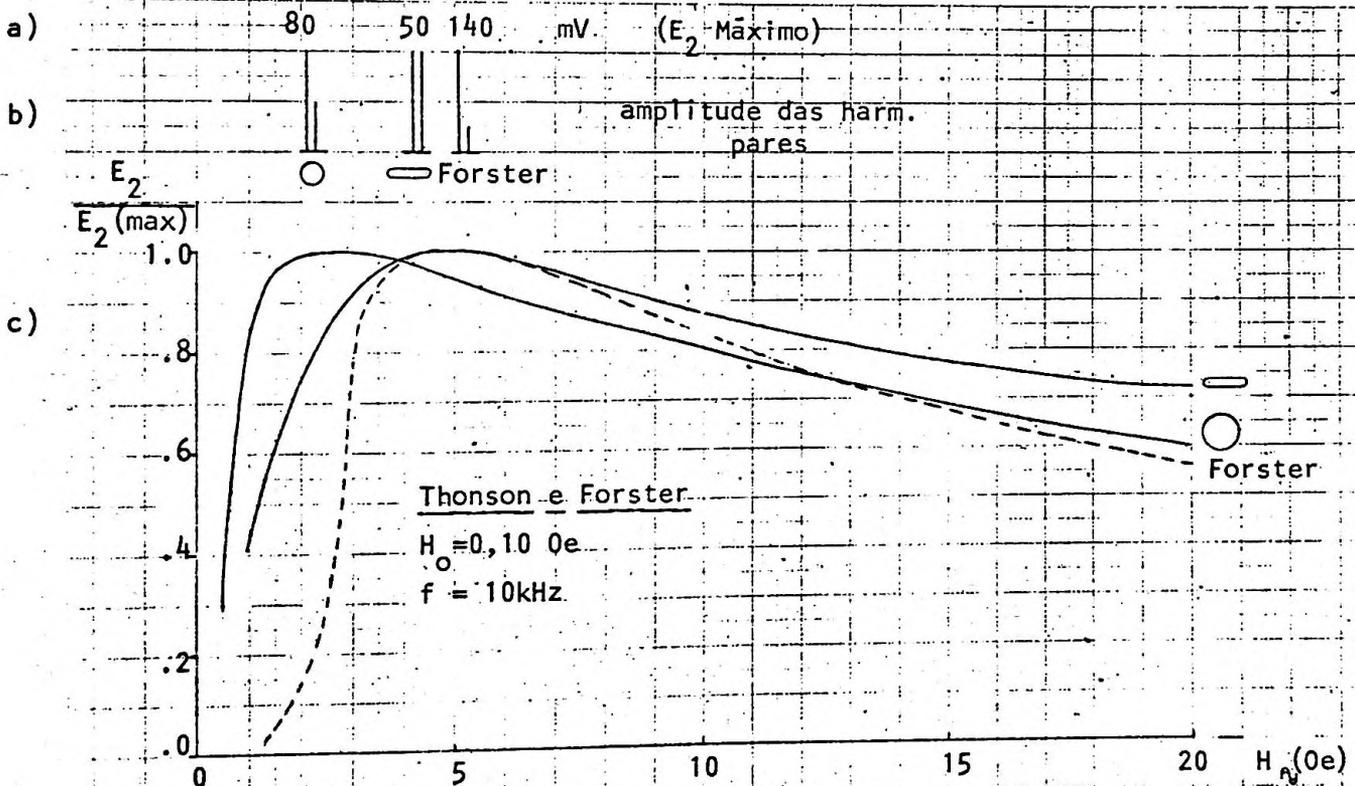
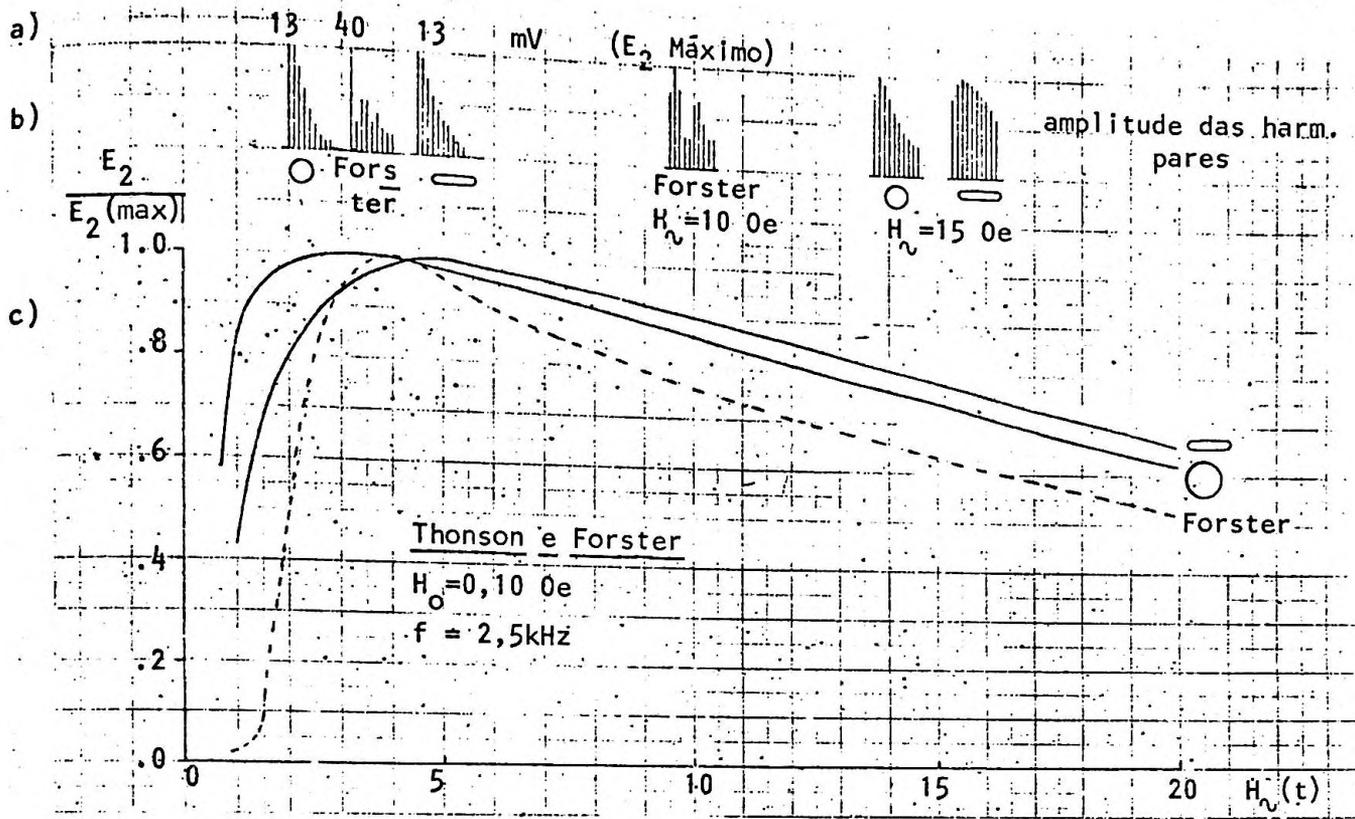
Os símbolos: , I e II correspondem respectivamente a: sensor em anel; filamental I e filamental II.



a)  $E_2$  máximo, medido em mV, com  $H_0 = 0,10 \text{ Oe}$ .  
 b) Conteúdo harmônico (par) de  $E_{sec}$  para :  
 max. de  $E_2$  e  $H_n = 15 \text{ Oe}$  e  $H_n = 20 \text{ Oe}$ .  
 c) curvas  $E_2$  versus  $H_n$  para  $f = 2,5 \text{ kHz}$  e  
 $f = 10 \text{ kHz}$  com  $H_0 = 0,10 \text{ Oe}$ .

Os símbolos: , I e II correspondem respectivamente a : sensor em anel; filamntar I e filamntar II.

FIGURA -27-



- a)  $E_2$  máximo, medido em mV, com  $H_0 = 0,1$  Oe.
- b) Conteúdo harmônico (par) de  $E_{sec}$  para: max. de  $E_2$  e  $H_n = 10$  Oe para o sensor Forster e  $H_n = 15$  Oe para Thonson.
- c) curvas  $E_2$  versus  $H_n$  para  $f = 2,5$  kHz e  $f = 10$  kHz com  $H_0 = 0,10$  Oe.

Os símbolos:  $\circ$  e  $\ominus$  correspondem respectivamente a sensor filamental e anel.

As curvas indicam que, quanto maior a permeabilidade do núcleo, mais definido é o  $H_v$  para o máximo de  $E_2$ . Verificamos que os núcleos construídos com o metglass, apresentam um pico de máximo bem determinado e estreito. Ainda nas curvas dos núcleos feitos com o metglass, observamos um sensível alargamento, na condições de máximo para o sensor filamentar II, o que é razoável, uma vez que o seu alto fator de desmagnetização limita, sensivelmente, a permeabilidade máxima aparente do núcleo.

As curvas para os demais núcleos, mumetal, Thonson e Forster, apresentam características decorrentes da baixa permeabilidade máxima aparente dos núcleos.

Com o aumento da frequência de excitação, verificamos que as curvas que mais se deslocaram com seus máximos, procurando altas amplitudes do campo magnetizante, foram as dos sensores com núcleos feitos a partir da lâmina de mumetal. Mais uma vez, temos indicação do significativo papel do efeito das correntes de Foucault, para estes núcleos feitos de lâminas com espessura relativamente alta. Para os demais sensores, com o aumento da frequência, a curva  $E_2 \times H_v$  sofreram poucas alterações.

Comparando o espectro das harmônicas, na condição de máximo de  $E_2$  para 2,5kHz e 10kHz, verificamos que, em geral, para os sensores com núcleo em anel, com o aumento da frequência, o espectro do sinal induzido tende para um espectro com componente única. Para todos os sensores com núcleo em anel, verificamos que a 2ª harmônica par,  $E_4$ , decaiu, sensivelmente, com o aumento da frequência de excitação. Este efeito deve estar relacionado com a ausência de desmagnetização do núcleo para o campo de excitação  $H_v(t)$ .

Verificamos que, para todos os sensores, um aumento de  $H_v$  produz um aumento nas componentes de Fourier,  $E_n$ , com  $n > 2$ , e, eventualmente, um deslocamento para ordens superiores, de componente de am-

plitude máxima. Este comportamento pode ser entendido, a partir, por exemplo, do modelo de Zadoff, discutido na pag. 23. Para  $f$  constante, e aumentando  $H_v$ , o tempo de saturação  $t_s$  se torna uma fração cada vez menor de  $T$ . A relação  $t_s = (T/8)$ , determina o máximo de  $E_2$ . Neste mesmo modelo, um valor de  $t_s = (T/16)$ , por exemplo, maximiza  $E_4$ .

A figura -29- mostra a variação da amplitude máxima,  $E_2$ , -com  $H_0 = 0,10 \text{ Oe}$  ao longo do eixo do sensor, com a frequência de excitação de  $H_v(t)$ . Na figura, o valor de  $E_2(f)$  está normalizado, em relação ao valor medido com  $f = 2,0 \text{ kHz}$ . Uma coluna à direita da figura, fornece os valores de  $E_2$ , medido em mV, com a frequência de excitação máxima  $f = 10,0 \text{ kHz}$ .

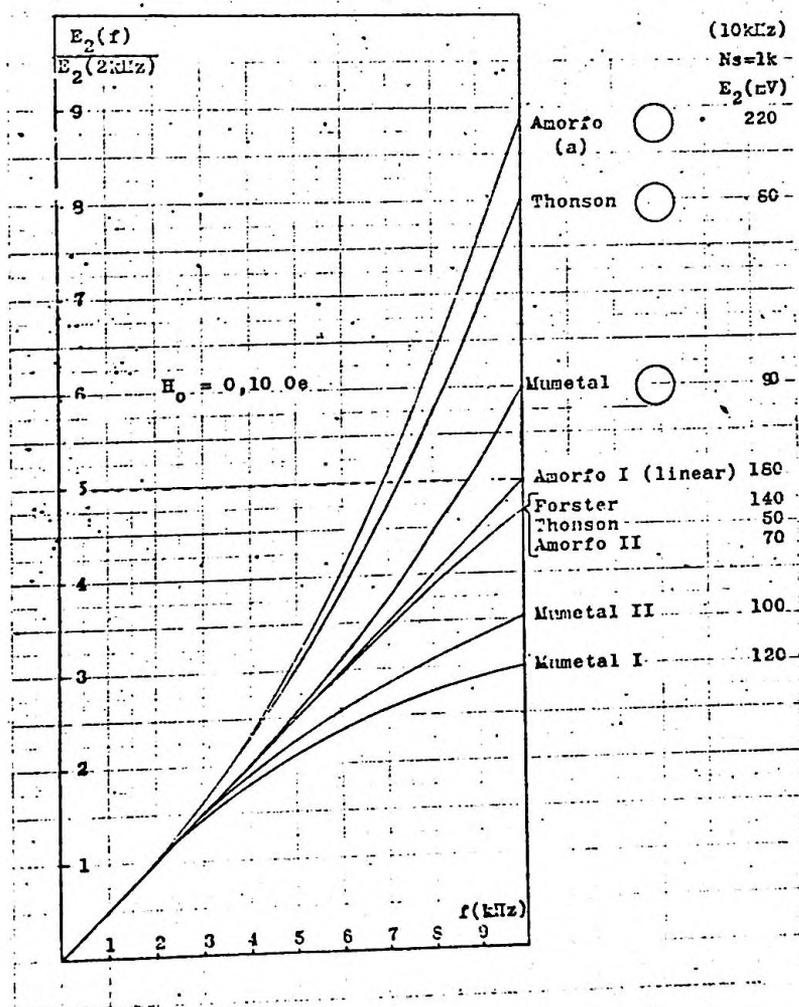


FIGURA -29-

A figura evidencia dois comportamentos distintos: um para os sensores em anel; outro para os sensores filamentosares. A sensibilidade dos sensores em anel (para  $E_2$ ) cresce mais do que proporcionalmente à frequência, ao passo que, para os filamentosares,  $E_2$ , cresce menos que proporcionalmente a  $f$ . Isto se deve ao fato - mostrado também nas figuras anteriores, de que a participação da componente  $E_2$ , no sinal total, cresce com o aumento da frequência nos sensores em anel.

A tabela -H- mostra os valores: máximo de  $E_2$ , medidos em mV, com  $f=2,0$  kHz e  $H_0=0,10$  Oe e calculados para a área de captura de cada sensor testado; complementando, a última coluna da direita, indica os valores de amplitude de  $H_{\nu}(t)$ , utilizados nos testes, que correspondem à amplitude do máximo de  $E_2$ .

núcleo	sensor	tipo	área de captura (cm <sup>2</sup> )	$E_2$ (mV)	$H \sim$ (Oe)
<u>mumetal</u> $\mu_{\max}=20.000$	mumetal I		7,9	40	4,5
	mumetal II		3,7	30	11,0
	mumetal		2,8	15	6,2
	Thonson		2,8	10	2,7
	Thonson		2,0	10	5,0
<u>metglass</u> $\mu_{\max}=80.000$	amorfo I		6,4	35	1,2
	amorfo (a)		3,2	25	1,2
	amorfo II		2,3	15	4,5
<u>Forster</u> $\mu_{\max} \rightarrow \infty$	Forster		2,4	30	3,7

TABELA-H-

Os dados indicados na tabela mostram, conforme já demonstrado teoricamente, que, para sensores com núcleos feitos do mesmo material, quanto maior a área de captura do núcleo, maior a sensibilidade do sensor. Comparamos valores obtidos para frequências de 2,0kHz. Nesta frequência, ainda não se fez sentir o efeito de seletividade de  $E_2$ , observado nos sensores com núcleos em anel.

A figura -30- mostra a variação da "Área de Captura",  $\mu_a \cdot A_{nuc}$ , com a permeabilidade, calculada para dois sensores com núcleo em anel, feitos de uma mesma fita de Metglass com largura  $w=0,13$  cm. A diferença entre estes sensores, está no número de voltas da fita de Metglass no suporte com raio  $r_a=1,3$  cm. Um sensor foi feito com uma única volta de fita; o segundo com três.

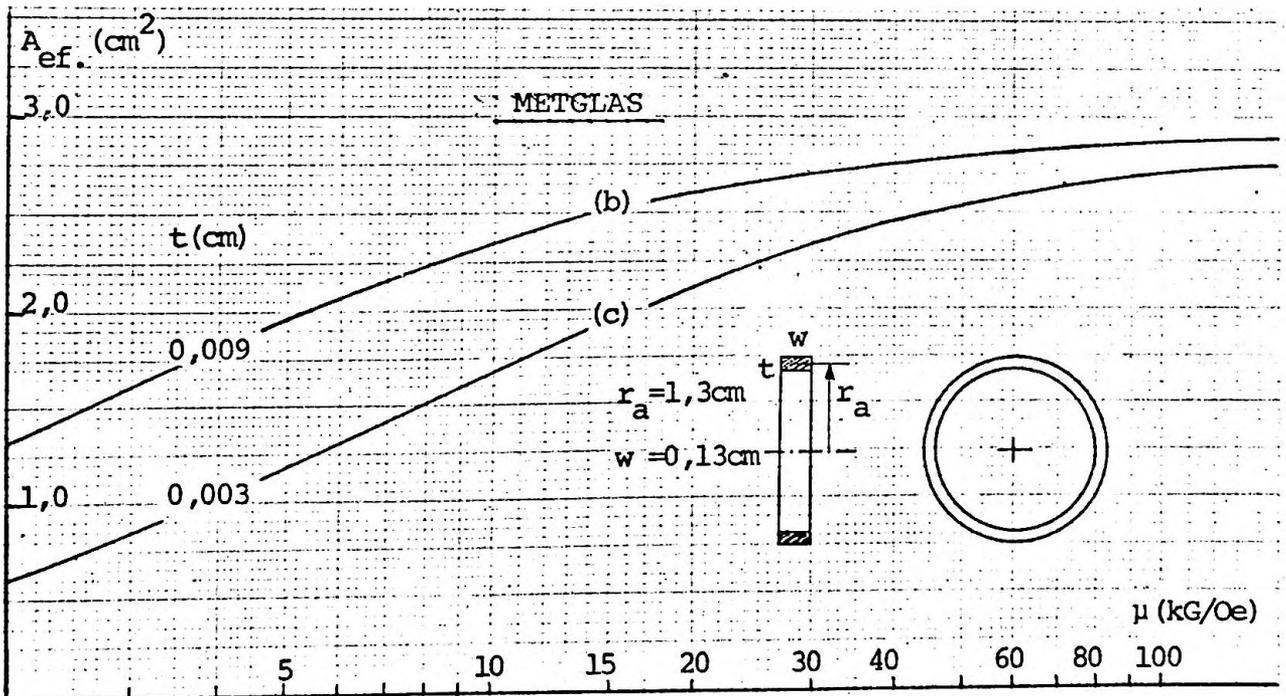


FIGURA -30-

Na figura, verificamos que com o aumento da permeabilidade, as curvas tendem a se encontrar. Para  $\mu=80k$ , verificamos que a Área de Captura dos sensores são 2,8 e 2,6  $cm^2$ , valores bem próximos, principalmente, quando comparados com os valores para baixas permeabilidade.

Desde que estes sensores são equivalentes, e tendo Área de Capturas quase iguais, é de se esperar que tenham também sensibilidades próximas. Medimos para estes sensores  $E_2$ , na condição de máximo com  $H_0=0,10$  Oe, e para  $f=2,0$  kHz e  $f=10$  kHz. As tabelas -I- e -J- mostram os valores de  $E_2$  medidos, bem como as amplitudes de campo magnetizante  $H_v(t)$  utilizados. De fato, as sensibilidades de ambos sensores são sensivelmente iguais.

Esta experiência ilustra a vantagem que se pode obter de núcleos com alto  $\mu_{max}$ , conforme discutido no capítulo -III-. Em particular, a figura-30- mostra que, para fitas com espessura da ordem de centésimos de milímetros, a área de captura satura por volta de permeabilidades de 100.000; quanto a sensibilidade, fato idêntico ocorre, conforme demonstrado na experiência realizada. Este fato mostra que as fitas amorfas de Metglass é um material cujas propriedades (espessura típica e permeabilidades) o tornam excepcionalmente adequado para a confecção de núcleos.

sensor	$\frac{L}{4 \cdot \pi}$	Área de Captura ( $cm^2$ )	max. de $E_2$ (mV) p/ $H_0=0,10$ Oe	
			f=2,0 kHz	f=10,0 kHz
(b)	$4,0 \cdot 10^{-4}$	2,8	20	155
(c)	$1,4 \cdot 10^{-4}$	2,6	20	150

TABELA-I-

p/ $\mu=80k$ e $\rho=10^{-4}\Omega \cdot cm$	sensor	t (cm)	amplitude de $H_v(t)$ em Oe.	
			f=2,0 kHz	f=10,0 kHz
f=10,0 kHz $\delta=0,002$ cm	(b)	0,009	1,1	1,2
f=2,0 kHz $\delta=0,004$ cm	(c)	0,003	1,0	1,1

TABELA-J-

As figuras 31 e 32, mostram a dependência de  $E_2$  com  $H_0$ . A amplitude do campo magnetizante, correspondeu ao máximo de  $E_2$ , com  $H_0 = 0,10$  Oe; a frequência de excitação foi de 10kHz. Variamos  $H_0$  de 0 a 1 0e. A figura -31- mostra as curvas obtidas para os sensores com núcleos confeccionados com a lâmina de mumetal e para o sensor Forster. A figura -32-, as dos sensores com núcleos feitos a partir da amostra de Metglass.

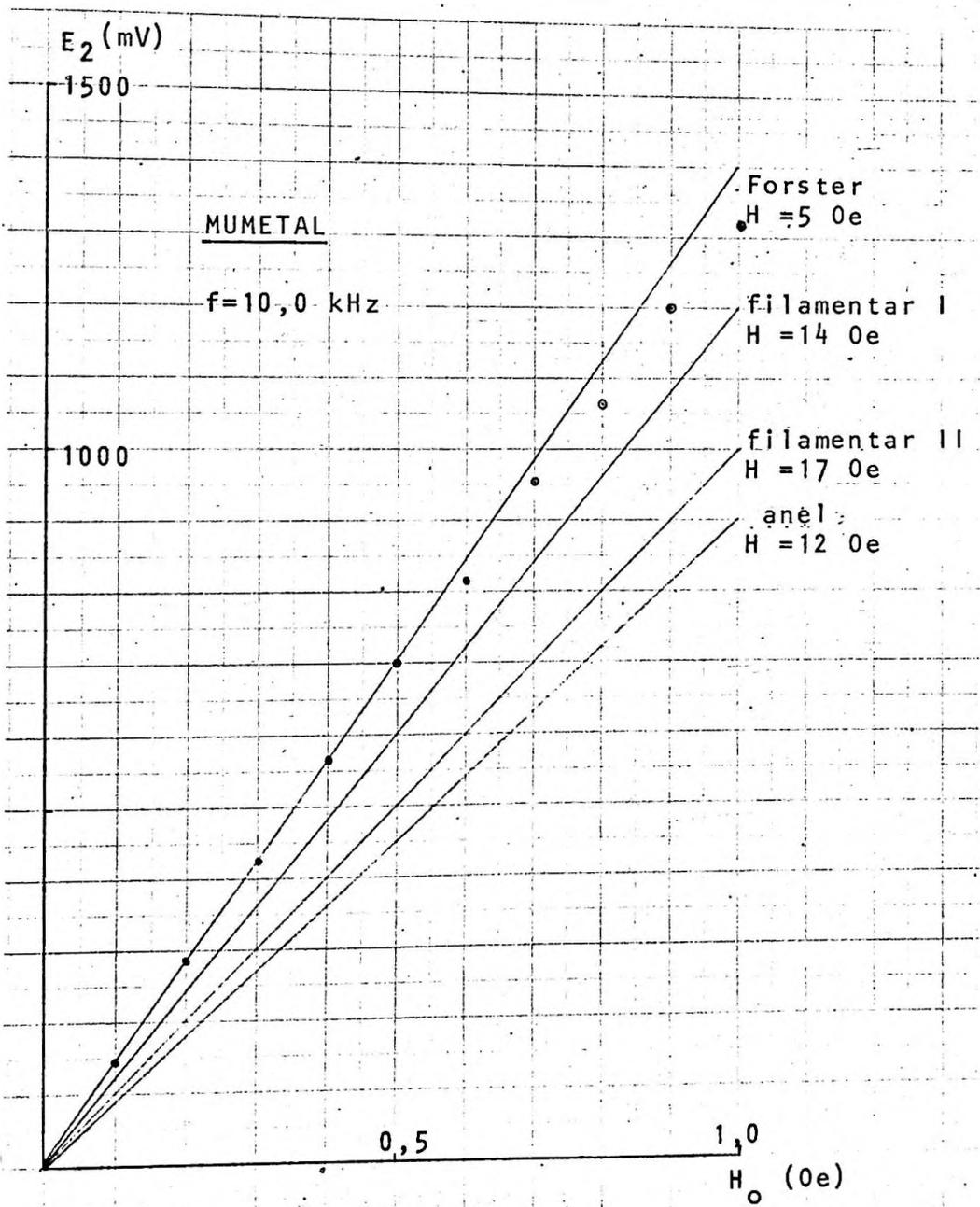


FIGURA-31-

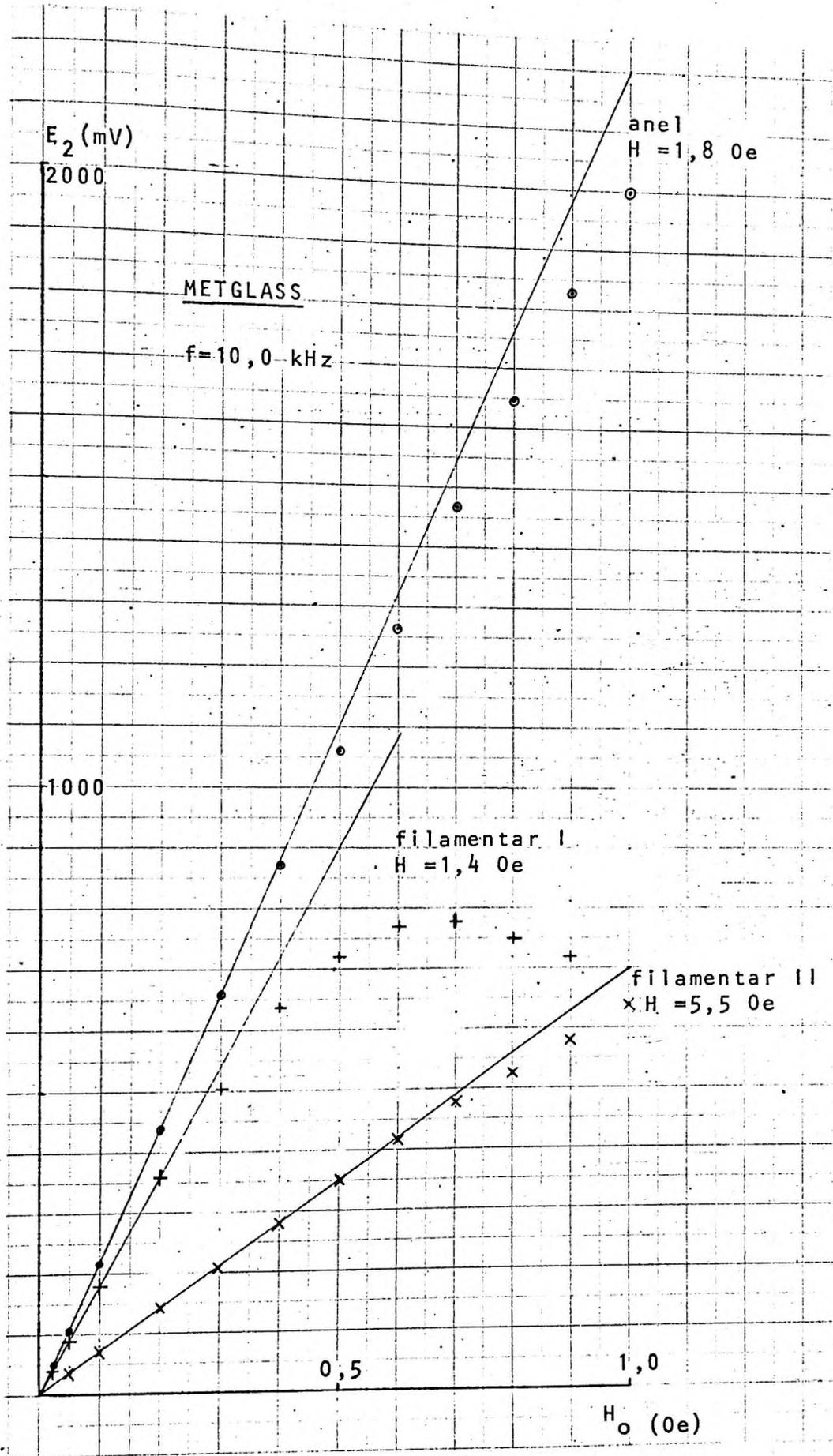


FIGURA-32-

A linearidade de um sensor, depende do grau com que é obedecida a desigualdade  $H_{o,i} \ll H_{s,i} < H_{\nu,i}$ , o índice  $i$ , significando campos internos do núcleo. As figuras ilustram este fato.

Nas figuras, o campo  $H_{\nu}$  foi sempre escolhido de forma a produzir  $E_2$  máximo com  $H_o = 0,10$  Oe.

A figura -31-, mostra boa linearidade nos sensores de "mumetal" até 1 Oe, onde as desigualdades estão claramente obedecidas. A única exceção, é o sensor Forster. Vale aqui dizer que, para obter linearidade até 1 Oe, o magnetômetro Forster opera com  $H_{\nu}$  acima da condição de máximo de  $E_2$ , ou seja com  $H_{\nu} \approx 10$  Oe.

A figura -32-, compara os sensores de Metglass- Os valores de  $H_{\nu}$  (para  $E_2$  máximos) são muito menores. Ainda assim, o sensor em anel mostra razoável linearidade, devido a não haver desmagnetização para o campo excitante, mas apenas para  $H_o$ .

COMENTÁRIOS FINAIS

COMENTÁRIOS FINAIS

Esta monografia descreve etapa de um trabalho ainda não concluído. O objetivo final é maior, é desenvolver a habilidade de construção de magnetômetros tipo "Fluxgate", com especificações semelhantes aos atualmente produzidos comercialmente, e, tanto quanto possível, a partir de materiais nacionais. Nesta etapa, fizemos um estudo crítico do sensor, montamos um pequeno laboratório de testes, que utilizamos em alguns sensores que pudemos construir imediatamente. O estudo feito e o laboratório construído, orientarão e permitirão, daqui para a frente, a realização de programas de desenvolvimento de sensores para magnetômetros com especificações definidas e de interesse prático. Os testes realizados, deixaram como saldo principal, a sugestão de utilização de fitas amorfas semelhantes ao "Metglass", para a confecção de núcleos. Estas fitas parecem possuir características físicas e magnéticas excepcionais para a finalidade. Além disso, a tecnologia para a sua produção está sendo desenvolvida atualmente no IFUSP. Na realidade, no atual estágio, o instrumental existente no laboratório do Prof. Frank P. Missell, é suficiente para produzir fitas adequadas para núcleos de magnetômetros "Fluxgate".

## BIBLIOGRAFIA

- 1) F. Prindahl | Review Article - The Fluxgate Magnetometer. - J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 12, 1979.
- 2) L.D. Armstrong - The use of High Bermeability Materials in Magnetometers. - Can. J. Phys., 25, Sec. A, pp. 124-133, 1947.
- 3) Inst. Dr. Forster Relatório sobre exames não destrutivos de materiais. - Zeitschrift fur Metallkunde. 46, 1955. Tradução para o português do GICD - Base Naval de Aratú Salvador, BA.
- 4) S. V. Marshall An Analitic Model for the Fluxgate Magnetometer. - IEEE Trans. Mag., Vol. MAG-3 nº 3, 1967.
- 5) F. Prindahl Bibliography of Fluxgate Magnetometers, - Earth Physics Branch - Dep. of Energy, Mines and Resources; Vol. 41 nº 1 (Ottawa, Canada). 1970.
- 6) Ins. Dr. Forster Manual do Oerstedmeter de Precisão. Publicação que acompanha o equipamento. (cópias-GICD Base Naval de Aratú Salvador, BA).
- 7) J. R. Burger The Theoretical Out-put of a Ring Core Fluxgate Sensor. - IEEE Trans. Mag. Vol. MAG-8 nº 4. 1972.
- 8) F. Prindahl The Fluxgate Mechanism. - IEEE Trans. Mag., Vol. MAG-6 nº 2. 1970.
- 9) L. Zadoff Fluxgate Magnetometer with Tape-Wound Core. - Publicação Privada. EMS Developement Corp. - Farmingdale, N.Y. 11735. 1980.
- 10) J. A. Osborn Demagnetizing Factor of the General Ellipsoid. - Physical Review, Vol. 67 nº 11 e 12. 1945.

- 11) R. J. Joseph Demagnetizing Field in Nonellipsoidal Bodies. -  
J. of Appl. Phys. Vol. 36 nº 5. 1965.
- 12) R. M. Bozorth Ferromagnetism. - D. Van Nostrand Comp. (Canadá)  
Ltd. Set. 1968.
- 13) F. Brailsford Investigation of the Eddy-Current Anomaly in  
Electrical Sheet Steels.
- 14) C. W. Chen Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials.  
ISBN North-Holland. 1977.
- 15) D. L. Gordon A Fluxgate Sensor of High Stability for Low  
Filed Magnetometry. - IEEE Trans. Mag. Vol.  
MAG-4 nº 3 1968.
- 16) B. D. Cullity Introduction to Magnetic Materials  
Addison-Wesley Publishing Co-USA - 1972.
- 17) J. J. Stout Basic Electronic for Scientists.  
Mac Graw Hill Kogakusha Ltd. 3º Ed. 1977.