

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**Projeto, construção
e calibração de um permeâmetro
magnético**



Prof. Waldir Garlipp
Eng.º Ayrton de Marchi

Publicação n.º 153

Serviço de Publicações e Encadernação
da Escola de Engenharia de São Carlos

1 9 6 8

DEDALUS - Acervo - EESC



31100103395

I -	Introdução	pg. 1
II-	Conceitos Físicos	pg. 2
II.1.	-Magnetismo e Eletromagnetismo	pg. 2
II.1.1.	-Campo Magnético	pg. 2
II.1.2.	-Vetor indução Magnética B	pg. 2
II.1.3.	-Fluxo Magnético	pg. 2
II.1.4.	-Campo Magnético produzido por meio de um elemento de corrente.	pg. 3
II.1.5.	-Força Eletromotriz induzida.	pg. 5
II.1.5.1-	Força Eletromotriz de movimento.	pg. 5
II.1.6.	-Lei de Faraday e Lenz.	pg. 5
II.1.7.	-Medida do fluxo magnético pelo processo da bobina de prova.	pg. 5
II.1.8.	-Indutância.	pg. 6
II.1.8.1-	Indutância mútua.	pg. 6
II.1.8.2-	Auto indutância.	pg. 7
II.1.8.3-	Indutância em série.	pg. 8
II.2.	-Propriedades magnéticas da matéria.	pg. 9
II.2.1.	-Origem dos efeitos magnéticos.	pg. 9
II.2.2.	-Susceptibilidade magnética, permeabilidade e intensidade de um campo magnético.	pg. 10
II.2.3.	-Ferromagnetismo.	pg. 12
II.2.3.1-	Histerese.	pg. 12
II.2.3.2-	Teoria do domínio.	pg. 14
III-	-Medidas Magnéticas.	pg. 15
III.1.	-Descrição de alguns processos de medidas.	pg. 16
III.1.1.-	Medidas com fluxímetro.	pg. 16
III.1.2.-	Medidas com galvanômetro balístico.	pg. 17
III.1.3.-	Medidas com oscilógrafo.	pg. 18
III.1.4.-	Medidas com permeâmetro.	pg. 19
IV-	-O permeâmetro magnético e sua aplicação.	pg. 21
IV.1.	-Descrição geral do permeâmetro e circuitos complementares.	pg. 21
IV.2.	-Idéia inicial.	pg. 23
IV.3.	-Primeiras medidas.	pg. 23
IV.4.	-Novas modificações.	pg. 26
IV.5.	-Novas medidas.	pg. 26
IV.6.	-Crítica e sugestões.	pg. 30
IV.7.	-Observações.	pg. 31
V-	-Apêndice	pg. 34
	-Bibliografia.	pg. 39



I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho visou o planejamento, construção e calibração de um permeâmetro magnético pela Cátedra de Metalurgia, com a colaboração da Oficina Mecânica e da Cátedra de Eletrotécnica, contando com as inevitáveis dificuldades de uma tal empreitada, principalmente a falta de verbas, parcialmente atendida pelo Conselho Nacional de Pesquisas.

O Permeâmetro Magnético é um aparelho que permite realizar diversas medidas magnéticas, em materiais ferromagnéticos, visando:

- a) obter dados para traçar a curva de histérese;
- b) em especial, determinar a curva de desmagnetização;
- c) os valores de indução residual (B_r) e da força coercitiva (H_c);
- d) a permeabilidade magnética $\mu = \frac{B}{H}$
- e) a energia máxima externa $(H.B)_{\max}$, ou energia dissipada por ciclo.

Com adequado cuidado serve também para obter as propriedades paramagnéticas de outros materiais.

II. CONCEITOS FÍSICOS

II.1 - Magnetismo e eletromagnetismo

O ímã ou magneto natural é conhecido desde a antiguidade (bússola dos chineses). O estudo do magnetismo ficou restrito a este fato até princípios do século XIX, quando Oersted (1819), verificou que o movimento de cargas elétricas produz efeitos magnéticos. Mais tarde (1831) era Faraday quem concluía que o deslocamento de magnetos produzia correntes elétricas.

II.1.1 - Campo Magnético

Em uma dada região há um campo magnético quando, sobre uma carga que se move nessa região, atua uma força que não seja a de origem eletrostática.

Recorre-se à idéia de campo magnético, ao invés de forças magnéticas, devido a um melhor aproveitamento dos problemas magnéticos que podem ser resumidos em dois:

1. são conhecidas as características das cargas móveis e se deseja a intensidade, a direção e o sentido do campo magnético em um ponto qualquer;
2. busca-se a intensidade, direção e sentido da força que atua sobre uma carga em movimento em um dado campo.

II.1.2 - Vetor indução magnética - B

Para a representação de campo magnético usa-se o conceito de linhas de indução magnética que, em cada ponto, têm tangente a ele o vetor indução magnética. O valor do vetor indução magnética em um ponto qualquer pode ser expresso pelo número de linhas por unidade de área, por elas atravessada.

No sistema MKS a unidade de fluxo das linhas de indução magnética é o weber (w) e da indução magnética B é o weber por metro quadrado (w/m²).

Por conveniência, também são usadas as unidades do sistema CGS:

$$|\text{fluxo das linhas de indução magnética}| = \text{maxwell}$$

$$|B| = \text{Maxwell/cm}^2 = \text{Gauss}$$

$$1 \text{ weber} = 10^8 \text{ Maxwell}$$

II.1.3 - Fluxo magnético

Fluxo magnético através da superfície é a denominação dada ao número total de linhas de indução que atravessam uma superfície :

$$\Phi = \int_0^A B \cos \phi \cdot dA$$

Caso B seja uniforme e normal a uma superfície finita, de área A, podemos escrever:

$$\Phi = B \cdot A$$

Sua unidade no sistema MKS é o weber

$$|\Phi| = \text{weber}$$

II.1.4 - Campo magnético produzido por meio de um elemento de corrente.

Uma carga elétrica em movimento origina, no espaço circundante, um campo magnético. Outra carga, que se desloca neste, sofrerá a ação de uma força.

Suponhamos um elemento de condutor de comprimento $d\ell$, por onde circula uma corrente I. Ao produto $I \cdot d\ell$ damos o nome de elemento de corrente. Estes elementos de corrente originam um campo que existe em todos os pontos do espaço; o campo originado por um condutor completo é a resultante de todos os campos dos elementos que o compõem.

O vetor dB está contido no plano xz e é perpendicular ao plano que contém o ponto P, o eixo de $d\ell$. Conclui-se que as linhas de indução às quais os vetores dB são tangentes, são circunferências concêntricas ao eixo y e contidas em planos perpendiculares a este.

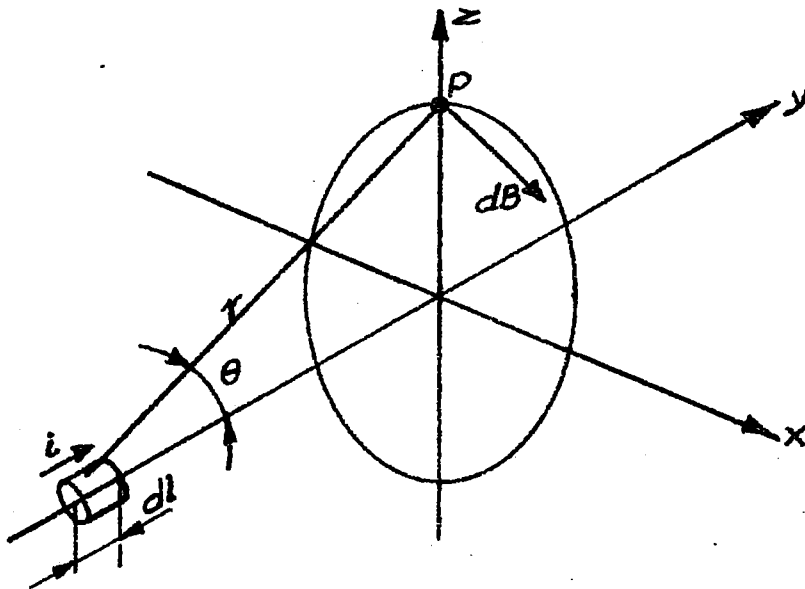


Figura 1

Sua intensidade é dada pela relação:

$$dB = k \frac{i \cdot dl \cdot \sin \theta}{r^2} \quad (\text{Lei de Biot ou de Ampere})$$

onde:

r é a distância entre P e dl

θ é o ângulo formado por e com o eixo y

k é uma constante cujo valor depende do sistema de unidades utilizado, para definir as outras grandezas. No sistema MKS:

$$k = 10^{-7} \frac{\text{weber}}{\text{ampere} \cdot \text{metro}}$$

Define-se também uma outra constante:

$$\mu_0 = 4\pi k = 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{\text{weber}}{\text{ampere} \cdot \text{metro}}$$

Portanto,

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \, dl \, \sin \theta}{r^2}$$

sendo que a integração deve ser estendida a todo o circuito que origina o campo e subentendendo-se que aquela se refere à soma vetorial das densidades infinitesimais de fluxo.

Aplicando esta lei para cada caso, pode-se determinar as densidades de fluxo, desde que as integrais sejam de fácil solução. Caso contrário, obtém-se por aproximação.

Por exemplo:

- a) Para um condutor retilíneo de comprimento l em um ponto distante a do eixo do condutor, para $l \gg a$ temos

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i}{a}$$

- b) Para uma espira circular de raio a , no seu centro:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i}{a}$$

em um ponto P sobre seu eixo (que passa pelo seu centro e perpendicular ao plano de espira)

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{i \cdot a^2}{(a^2 + b^2)^{3/2}}$$

- c) Para um solenoide longo de comprimento l , em seu interior

$$B = \mu_0 \frac{Ni}{l}$$

em uma extremidade do mesmo solenoide

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{Ni}{l}$$

II.1.5 - Fôrça eletromotriz induzida

II.1.5.1 - Fôrça eletromotriz de movimento

Segundo Faraday, em um condutor deslocando-se em um campo magnético, há um deslocamento de cargas elétricas. Um gerador de f.e.m. é um elemento no qual se induziu, em seu interior, uma fôrça eletromotriz de deslocamento. No caso de campo uniforme, sendo a direção da velocidade perpendicular ao campo e ao condutor:

$$\mathcal{E} = B \cdot l \cdot v \quad \text{onde}$$

- B é o campo onde se desloca o condutor
 l é seu comprimento
 v é sua velocidade de deslocamento.

No caso geral, teríamos:

$$d\mathcal{E} = B v dl \sin \theta \cos \phi \quad \text{onde}$$

- dl é um comprimento elementar do condutor móvel, animado de velocidade v em um campo cuja densidade de fluxo, na região onde se encontra dl , é B ;
 θ é o ângulo formado por B e dl e ϕ é o ângulo entre a direção v e a normal ao plano determinado por dl e B .

II.1.5.2 - Lei de Faraday e Lenz

Caso em que através de um circuito fechado haja variação do fluxo magnético em relação ao tempo, nele induz-se uma f.e.m. induzida:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\phi}{dt}$$

Lenz, a partir da expressão acima, formulou a lei "O sentido de uma f.e.m. induzida, é tal que se opõe à causa que a produz".

II.1.5.3 - Medida do fluxo magnético pelo processo da bobina de prova

Dispondo-se de uma pequena bobina curta, de enrolamento muito unido, ligada a um galvanômetro balístico, é possível determinar-se a densidade de fluxo.

Se a princípio, o eixo da bobina de prova é paralelo à direção do campo magnético de densidade de fluxo B , o fluxo através da bobina será $\phi = B \cdot A$ sendo A a área delimitada pela bobina. Girando-se rapidamente a bobina de 90° , de maneira que seu plano se torne paralelo ao campo, ou levando-

a rapidamente a uma região em que o campo seja nulo, o fluxo através dela decresce desde B.A até zero, rapidamente. Como existe uma variação de fluxo, induz-se na bobina uma f.e.m. de curta duração que transmite um impulso ao galvanômetro balístico.

Em um instante qualquer, sendo R a resistência combinada do galvanômetro e da bobina de prova, a corrente no galvanômetro será

$$i = \frac{e}{R}$$

onde e é a f.e.m. instantânea induzida.

$$\text{Sendo } e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad N - \text{número de espiras da bobina}$$

$$i = -\frac{N}{R} \frac{d\phi}{dt}$$

Portanto,

$$\int_0^t i dt = q = -\frac{N}{R} \int_{\phi}^0 d\phi = \frac{N}{R} \phi$$

onde q é a carga elétrica

$$\phi = \frac{R}{N} \cdot q$$

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{R}{NA} \cdot q$$

Como a deflexão máxima do galvanômetro balístico é proporcional à quantidade de carga que o atravessa, conhecendo-se a constante de proporcionalidade, pode-se calcular q , e, através desta ϕ e B. (Ver adiante Apêndice A).

II.1.8 - Indutância

II.1.8.1 - Indutância mútua

Se tivermos duas bobinas (de espiras muito unidas) e próximas, a corrente em uma delas origina um campo magnético e parte do fluxo originado atravessa a segunda. Sendo as linhas de indução fechadas sobre si mesmas, cada linha que atravessa o segundo circuito une-o ao primeiro. Se o circuito tiver N_2 espiras e ϕ linhas de fluxo o atravessam, a influência de uma bobina sobre a outra é expressa pelo produto $N_2\phi$.

Portanto, o fluxo que une o circuito 2 ao circuito 1 é proporcional à corrente no circuito 1.

$$\phi_{21} = K \cdot i_1$$

Se i_1 variar com o tempo, ϕ_{21} também variará, e no circuito 2 surge uma f.e.m.

$$\mathcal{E}_2 = - N_2 \frac{d\phi_{21}}{dt} = - N_2 K \frac{di_1}{dt} = - M \frac{di_1}{dt}$$

e, portanto,

$$M = - \frac{\mathcal{E}_2}{di_1/dt}$$

A este fator M dá-se o nome de coeficiente de indutância mútua, ou simplesmente indutância mútua. Sua unidade segundo MKS é um volt por ampère por segundo, ou simplesmente henry.

Outra expressão pode ser dada por:

$$\mathcal{E}_1 = - N_1 \frac{d\phi_{12}}{dt} = - M \frac{di_2}{dt}$$

ou

$$\mathcal{E}_1 = - N_1 \frac{d\phi_{12}}{dt} = - M \frac{di_2}{dt}$$

que após integrada e comparada com a expressão para \mathcal{E}_2 também integrada nos fornece a relação:

$$M = \frac{N_2 \phi_{21}}{i_1} = \frac{N_1 \phi_{12}}{i_2}$$

ou seja, indutância mútua é a relação de quociente entre o valor do produto $M \phi$ devido a um dos circuitos pela corrente no outro.

II.1.8.2 - Auto-indutância

Se considerarmos um só circuito e nêle em circulação uma corrente elétrica, origina-se um campo magnético cujo fluxo atravessa o próprio circuito, e que varia com a variação da corrente. Havendo variação de fluxo, induz-se uma força eletromotriz denominada força eletromotriz auto-induzida.

Qualquer que seja a forma do circuito, a densidade de fluxo em uma posição qualquer é diretamente proporcional à corrente que o produz. Portanto, o fluxo é proporcional à corrente:

$$\phi = K \cdot i$$

Se o circuito tem N espiras e o fluxo atravessa tôdas elas, tem-se:

$$\mathcal{E} = - N \frac{d\phi}{dt} = - NK \frac{di}{dt} = - L \frac{di}{dt}$$

A constante L dá-se o nome de auto-indutância do circuito. Sua unidade, no sistema MKS é o volt por ampère por segundo ou henry.

Como foi feito para a indutância mútua, também pode-se considerar a auto-indutância sob outro ponto de vista.

Tem-se:

$$N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

Após integrar nos limites de 0 a i para a corrente tem-se:

$$L = \frac{N\phi}{i}$$

Define-se auto-indutância de um circuito como o número de linhas de fluxo que o atravessa por unidade de corrente que o percorre.

11.1.8.3 - Indutância em série

As indutâncias, como qualquer outro elemento de um circuito, podem ser ligadas em série, em paralelo ou de outra maneira menos simples.

Vamos considerar o caso de duas bobinas, de auto indutância L_1 e L_2 e indutância mútua M , ligadas em série.

Se ligarmos as duas bobinas de maneira que o fluxo em uma delas, devido à corrente na outra, tenha o mesmo sentido que o fluxo devido à corrente na própria bobina, ao variarmos a corrente, teremos: f.e.m. na bobina 1 = f.e.m. auto induzida + f.e.m. de indução mútua.

$$\text{f.e.m. na bobina 1} = L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}$$

$$\text{f.e.m. na bobina 2} = L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}$$

$$\text{f.e.m. total} = (L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt}$$

e a auto-indutância equivalente será:

$$L = L_1 + L_2 + 2M$$

Invertendo uma das bobinas de maneira que os fluxos das duas passem a ter sentidos opostos, as f.e.m. auto-induzidas e de indução mútua, em cada bobina, terão sentidos opostos. Portanto,

$$\text{f.e.m. total} = (L_1 \frac{di}{dt}) + (L_2 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt})$$

$$L = L_1 + L_2 - 2M$$

Se a disposição das bobinas é tal que nenhuma das parcelas do fluxo de uma atravessa a outra, a indutância mútua é nula, e a auto-indutância equivalente é igual, simplesmente, à soma das auto-indutâncias das bobinas.

II.2 - Propriedades magnéticas da matéria

Neste capítulo passamos a considerar as propriedades magnéticas das substâncias ferromagnéticas. Contudo, não são características só das substâncias ferromagnéticas, pois todas as substâncias as possuem, em grau menor ou maior.

A existência de propriedades magnéticas em uma substância qualquer pode ser constatada suspendendo-se por um fio, pelo seu centro de gravidade, um espécime em forma de bastão no campo magnético de um forte eletro-ímã. Se se orientar segundo a direção do campo será uma substância ferromagnética ou paramagnética. Caso se oriente perpendicularmente ao campo será diamagnética. Todas as substâncias (sólidas, líquidas ou gasosas) pertencem a uma dessas classificações. A técnica de evidenciação usada para os líquidos e gases é outra.

II.2.1 - Origem dos efeitos magnéticos

Para verificar as propriedades magnéticas de uma substância, vamos fazer uso de um espécime de forma toroidal envolvido por um enrolamento magnetizante.

A densidade de fluxo magnético no interior de um enrolamento toroidal, no vácuo, é:

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot i}{l}$$

Se este enrolamento ligado a uma bateria, envolver o espécime anteriormente citado e sobre este existir um outro enrolamento ligado a um galvanômetro balístico, é possível determinar a densidade de fluxo (como foi visto em II.1.5.3) interrompendo-se a corrente magnetizante com o que o fluxo cai rapidamente a zero, induzindo uma f.e.m. no segundo enrolamento, indicado pela deflexão do galvanômetro balístico. Calculando-se a densidade de fluxo, verifica-se que é diferente da calculada pela equação vista acima. Se a substância do anel for ferromagnética, a densidade de fluxo medida será muito maior que a calculada; se for paramagnética, será maior, ligeiramente, e se for diamagnética, será menor.

Essa diferença provém de efeitos magnéticos, que diversas teorias procuram demonstrar por meio de movimentos dos elétrons em torno de si mesmo, ou em suas órbitas. Devido a isto a cada átomo está associado um campo magnético.

Apenas com as substâncias ferromagnéticas é possível construir ímãs permanentes, pois nenhuma outra apresenta propriedades magnéticas quando não se acha sob a ação de um campo magnético exterior.

II.2.2 - Suscetibilidade magnética, permeabilidade e intensidade de um campo magnético.

Em um ponto qualquer de um condutor, a densidade de fluxo magnético B é a resultante das densidades devidas à corrente nos condutores e das densidades devido às correntes superficiais em substâncias magnetizadas. Entende-se por corrente superficial a corrente eletrônica resultante que envolve uma seção do condutor; as correntes eletrônicas internas se anulam mutuamente, resultando apenas a corrente em circuito fechado na camada superficial. Pode-se supor a superfície de um corpo magnético como completamente envolvido por um fio enrolado, no qual haja, em cada ponto, uma corrente igual à corrente superficial equivalente.

Seja dl_s o comprimento de um elemento desse enrolamento fictício, e i_s a corrente superficial, a densidade de fluxo em um ponto qualquer será:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{i \, dl \, \sin \theta}{r^2} + \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{i_s \, dl_s \, \sin \theta}{r^2}$$

onde a primeira parcela representa a densidade devido à corrente nos condutores reais e a segunda, a densidade devido à corrente equivalente na superfície do corpo magnetizado.

Particularizando para o caso de um anel de Rowland envolvido por uma bobina de espiras muito unidas onde a corrente magnetizante e a corrente superficial equivalente têm a mesma forma, teremos:

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot i}{\lambda} + \mu_0 \left(\frac{N \cdot i}{\lambda} \right)_s$$

onde $N \cdot i/\lambda$ é o número de ampère-espiras por unidade de comprimento do enrolamento e $(N \cdot i/\lambda)_s$ é o número de ampère-espiras por unidade do enrolamento fictício. Os segundos termos dos segundos membros das equações anteriores são negativos caso a substância seja diamagnética.

Vamos introduzir agora o vetor H - intensidade de campo magnético - definido pela relação:

$$H = \frac{1}{4\pi} \int \frac{i \, dl \, \sin \theta}{r^2}$$

Como a indução magnética, B , pode ser representada por meio de li-

nas, as linhas de força magnética. Sua direção, em um ponto qualquer, é tangente à linha de força magnética que passa pelo ponto.

Em um toróide - anel de Rowland - seu módulo é:

$$H = \frac{N \cdot i}{l}$$

Consideremos ainda a definição:

Suscetibilidade magnética é a relação entre a densidade de fluxo devido às correntes superficiais e a intensidade de campo magnético H :

$$\chi = \frac{\mu_0 \left(\frac{N \cdot i}{l} \right)_s}{H}$$

Considerando um anel de Rowland:

$$\chi = \frac{\mu_0 \left(\frac{N \cdot i}{l} \right)_s}{\frac{N \cdot i}{l}}$$

A unidade de suscetibilidade magnética é a mesma de μ_0 , isto é, em W/Am ou henry/m.

A suscetibilidade magnética do vácuo é nula, pois as correntes superficiais equivalentes só podem existir em substâncias magnetizadas. E para as substâncias diamagnéticas, a suscetibilidade é negativa.

Substituindo na equação da densidade de fluxo para um anel de Rowland, tem-se:

$$B = \mu_0 H + \chi H$$

$$B = (\mu_0 + \chi) H$$

Fazendo:

$$\mu = \mu_0 + \chi$$

teremos $B = \mu H$

Ao fator μ dá-se o nome de permeabilidade de uma substância. Sua unidade é a mesma de μ_0 e χ , isto é, henry/metro. No vácuo onde $\chi = 0$, $\mu = \mu_0$, portanto, μ_0 pode ser considerada a permeabilidade do vácuo.

Vamos definir ainda outra grandeza - permeabilidade relativa de uma substância que é a relação entre a permeabilidade dessa substância e a do vácuo.

$$K_R = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Expressando-a em função da suscetibilidade magnética, teremos:

$$K_m = 1 + \frac{\chi}{\mu_0}$$

A permeabilidade relativa não tem unidade, pois é um número abstrato. Para o vácuo é igual à unidade, pois $\chi = 0$ e $\mu = \mu_0$. Para as substâncias paramagnéticas e ferromagnéticas é maior que a unidade e para as diamagnéticas é menor.

II.2.3 - Ferromagnetismo

Para uma substância ferromagnética, a densidade de fluxo pode ser centenas, ou mesmo milhares de vezes maior que a devida à corrente de magnetização. Verifica-se também que a densidade de fluxo B não é função linear da intensidade do campo magnético H ; o que leva à conclusão que a permeabilidade não é constante. Esta depende, também do "passado magnético" do material, ou seja, dos fenômenos de histerese - a existência de um fluxo mesmo na ausência de campo exterior. Quando tal se dá, temos os chamados ímãs permanentes.

O níquel, o cobalto e o ferro, além do gadolínio e outros à baixa temperatura, são os únicos elementos ferromagnéticos, mas existe um grande número de ligas, constituídas por elementos não ferromagnéticos, que têm propriedades ferromagnéticas como por exemplo, ligas de Heusler, ferritas com estrutura cristalina, com célula unitária análoga a do espinélio e composições por exemplo Fe_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , NiO , $Fe_2O_3.MnO$.

Se aquecermos uma substância ferromagnética, podemos verificar que sua permeabilidade relativa decresce enquanto a temperatura se eleva; tornando-se praticamente igual à unidade para uma dada temperatura, diferente para cada substância. Esta é a chamada temperatura Curie. Acima desta, a substância torna-se paramagnética.

II.2.3.1 - Histerese

Se aumentarmos, gradualmente, a corrente elétrica no bobinado que envolve um espécime inicialmente desmagnetizado, até uma intensidade de campo magnético H_1 , indicado na figura 2, pela abscissa H_1^a correspondente densidade de fluxo B , será indicada pela ordenada B_1 . Continuando a aumentar a corrente até a intensidade de campo atingir o valor indicado pela abscissa H_2 e diminuindo-a para H_1 a densidade de fluxo não será mais indicada pela ordenada B_1 mas sim por B_3 , isto é, o estado magnético percorreu a trajetória \overline{OABC} . Reduzindo a corrente magnetizante a zero, a curva cortará o eixo B no ponto B_4 .

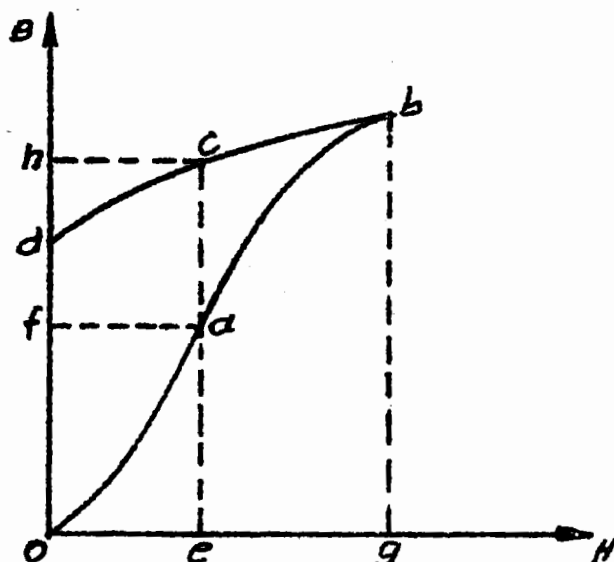


Figura 2

Ocorreu o fenômeno conhecido por histerese. Histerese significa, literalmente, o ato de se dar um atraso.

Isto se dá porque a densidade de fluxo depende não só da intensidade de campo magnético, mas também do "passado magnético" do espécime. Ao atingir o ponto B_4 o espécime se transformou em imã permanente.

Em diversos equipamentos elétricos, como transformadores e motores, massas de ferro acham-se situadas em campos magnéticos cujo sentido se inverte continuamente, com o que a intensidade B varia de um máximo positivo para um mínimo negativo e vice-versa, também continuamente, descrevendo um ciclo como o da figura seguinte (figura 3).

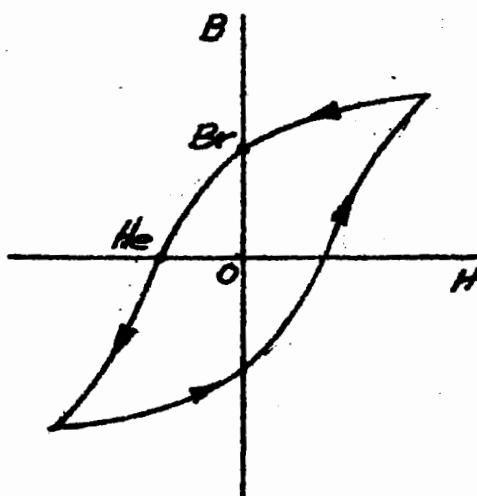


Figura 3

Os pontos onde a curva corta o eixo B indicam a densidade de fluxo residual e suas ordenadas dão o valor da retentividade ou remanência dos espécimes - representado pelo símbolo B_r . E as abscissas dos pontos onde a curva

corta o eixo H indicam a intensidade de campo magnético necessária para anular a densidade de fluxo depois do espécime ter sido magnetizado até a saturação em sentido oposto. Seu valor é conhecido por coercividade ou força coercitiva e cujo símbolo é H_c .

Pode-se desmagnetizar um espécime invertendo-se a corrente magnetizante várias vezes e reduzindo-se lentamente sua intensidade em cada inversão. O espécime descreve, então, uma curva de histerese, que vai se tornando cada vez menor.

A existência da histerese produz calor no interior das substâncias ferromagnéticas cada vez que estas percorrem o ciclo de histerese. Este calor é proveniente de uma espécie de dissipação interna de energia, que se verifica quando os domínios mudam de orientação. É possível demonstrar que o calor desenvolvido por unidade de volume, em cada ciclo, é proporcional à área limitada pelo ciclo de histerese.

II.2.3.2 - Teoria do domínio

Domínios, como foi demonstrado em estudos recentes, são pequenas regiões que existem no interior de substâncias ferromagnéticas. São microscópicas, mas suficientemente grandes para conterem de 10^{12} a 10^{14} átomos. Os momentos magnéticos de todos os elétrons girantes no interior de cada domínio são paralelos uns aos outros; o que significa que cada átomo está magnetizado até a saturação.

Em um espécime de substância ferromagnética, não magnetizado, o momento magnético resultante é nulo pois cada domínio tem a direção do momento magnético, orientada ao acaso. Supondo, para facilitar a explicação por meio de figuras, que a orientação se faz segundo os 3 eixos ortogonais de referência, podemos observar:

na figura (4-a) a orientação é ao acaso, segundo os eixos X, Y e Z, este perpendicular ao plano X, Y.

Se submetemos tal espécime a um campo magnético H crescente, (na figura paralelo ao eixo X), diversas modificações ocorrem com os domínios. Inicialmente os domínios em que a magnetização é paralela a um eixo do cristal com direção que realiza o menor ângulo com a direção X do campo exterior, aumentam de tamanho a custa dos domínios adjacentes, em que a magnetização faz ângulos maiores com a direção do campo exterior (figura 4 b).

Quando o campo se torna mais intenso, todos os domínios giram subitamente de 90° ou 180° , até o paralelismo com o eixo do cristal, citado no caso da figura 4 c.

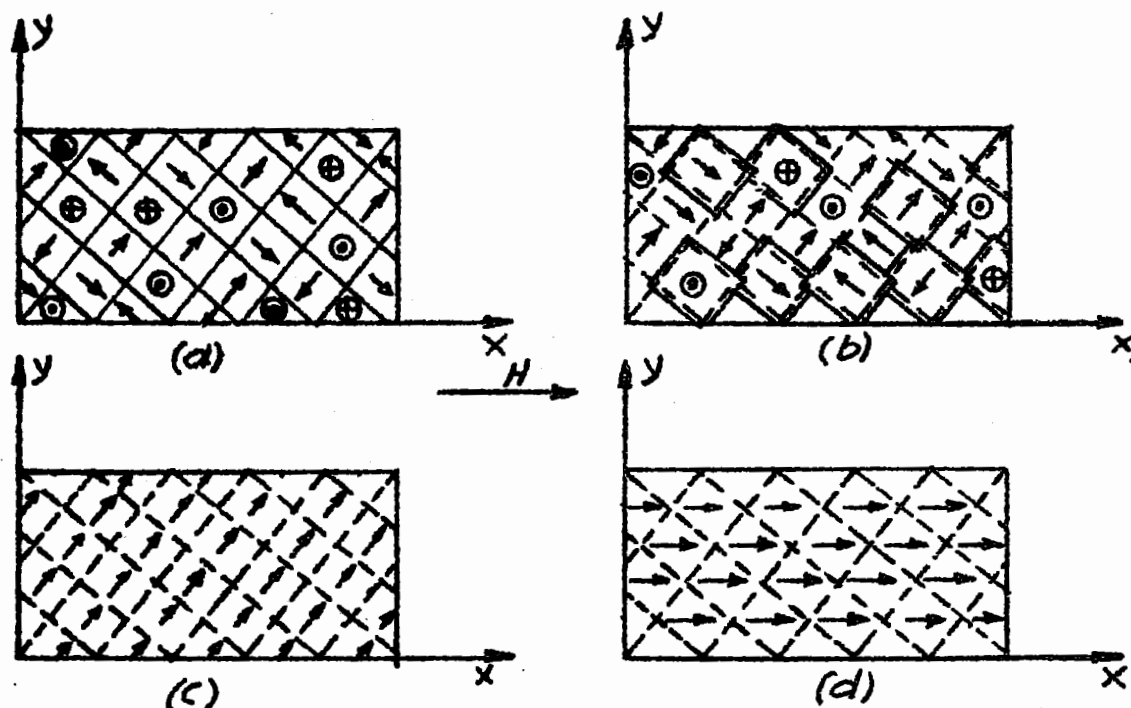


Figura 4

Finalmente, em campos muito intensos, a direção de magnetização em todos os domínios gira até se tornar paralela ao campo exterior e o espécime está saturado (figura 4 d).

Devemos lembrar que certos fatores prejudicam este movimento de translação das paredes de separação dos domínios como impurezas, grau de encruamento, tratamento térmico de têmpera (quando é aço) e outros tipos para os diversos sólidos que possuem esta propriedade, defeitos cristalinos, temperatura, etc.

III - MEDIDAS MAGNÉTICAS

Para medir as características mais importantes de um material, pode-se empregar como instrumento básico, um fluxímetro, um galvanômetro balístico ou então um oscilógrafo, sempre levando em conta que cada um tem suas vantagens e limitações.

As medidas com fluxímetro são mais precisas que as com o oscilógrafo.

Este aparelho, essencialmente, é um galvanômetro de quadro móvel, no qual praticamente se anulou o par antagônico. Nestas condições, se a sua constante tem um valor razoavelmente elevado (da ordem de 10^4 maxwell por divisão), e a resistência elétrica total do circuito com a bobina de prova é pequena (inferior a 20Ω), os desvios angulares do aparelho são proporcionais à variação do fluxo:

$$\Delta \phi = \delta \cdot G$$

- $\Delta \phi$ - variação do fluxo magnético aplicado ao corpo de prova
- δ - é o desvio angular
- G - constante do galvanômetro.

O galvanômetro balístico é geralmente mais sensível que o fluxímetro. Somente os melhores fluxímetros de reflexão se aproximam de sua sensibilidade. Porém, diferenciando-o do fluxímetro, seu funcionamento não é independente do tempo que dura a perturbação ou impulso elétrico que o aciona, pois este deve cessar antes que se ponha em movimento o equipamento móvel. Tal condição, na prática, é conseguida dando ao quadro móvel um momento de inércia suficientemente elevado.

O oscilógrafo é talvez o aparelho com o qual se pode obter curvas completas de histerese com maior rapidez. Sua precisão é pequena; porém, se se dispõe de uma câmara fotográfica que permita ampliar os oscilogramas, as medidas alcançam apenas erro de 5 %, o que pode ser suficiente em muitos casos (por exemplo no ensaio de propriedades de produtos industriais).

III.1 - Descrição de alguns processos de medidas

III.1.1 - Medidas com fluxímetro

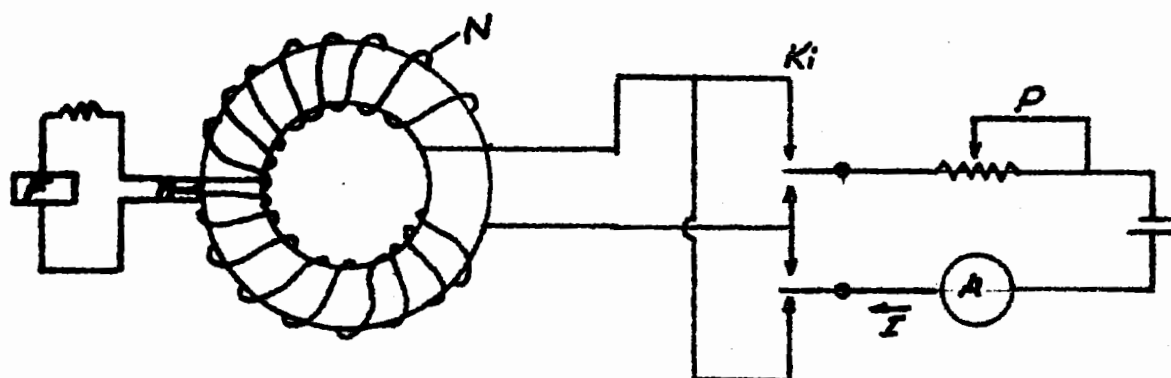


Figura 5

Por meio de um fluxímetro calibrado, a medida da indução pode ser feita como no circuito acima. O enrolamento magnetizante com N espiras, se

distribuí uniformemente sobre um núcleo toroidal de secção reta S do material em estudo, e sobre o qual se coloca a bobina exploradora de n espiras, ligada ao fluxímetro F . Ao circular pelo primeiro uma corrente I , cria um campo magnético de intensidade:

$$H = \frac{NI}{l}$$

I - corrente elétrica magnetizante
 l - circunferência do eixo toroidal.

Se, com um comutador-inversor K , se inverte o sentido da corrente, a variação de fluxo será:

$$G \cdot \delta = \Delta \phi = 2 n S B$$

donde

$$B = \frac{G \cdot \delta}{2 n S} = \mu \frac{NI}{l}$$

podendo também conhecer $\mu = \frac{G \cdot \delta \cdot l}{2 n S N I}$

III.1.2 - Medidas com galvanômetro balístico

Sabe-se que, para este instrumento, a primeira amplitude no desvio é proporcional à quantidade de carga induzida. Isto é, quando há uma indução eletromagnética numa bobina, gerando uma força eletromotriz, estando esta bobina ligada ao galvanômetro balístico, durante um certo tempo t , a quantidade de carga que passa por ele é $Q = \int_0^t i dt$ sendo, ($i = f(t)$). Se o período de oscilação deste galvanômetro é bem maior que o tempo t , isto é, se $t \ll T$, então é possível se mostrar que Q é proporcional à primeira amplitude máxima α_{\max} que atinge a bobina móvel do aparelho na sua torção. Então

$$Q = K \cdot \alpha_{\max}$$

onde: K é a constante do galvanômetro
 α_{\max} é o máximo ângulo de desvio.

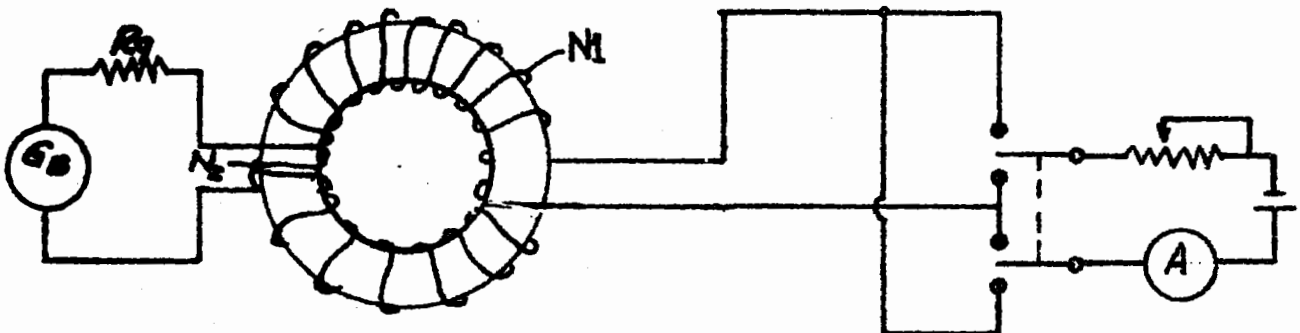


Figura 6

Se $\Delta \phi$ é a variação de fluxo produzida pelo primário de uma bobina toroidal, a quantidade de carga induzida no secundário de N_2 espiras será:

$$Q = \Delta \phi \frac{N_2}{R} = K \cdot \alpha_{\max}$$

onde R é a resistência elétrica total do circuito fechado contendo o galvanômetro.

Portanto:

$$\Delta \phi = \frac{K R}{N_2} \cdot \alpha_{\max}$$

então

$$B = \frac{K R}{N_2 S} \cdot \alpha_{\max}$$

onde S é a seção reta do núcleo toroidal.

Como a intensidade de campo no interior da bobina toroidal é

$$H = \frac{N_1 \dot{I}}{l}$$

podemos considerar a curva $B = f(H)$.

III.1.3 - Medidas com oscilógrafo

O fundamento das medidas com oscilógrafo é o seguinte:

Se ao secundário de um transformador (figura 7 a) se ligam em série uma resistência R e em paralelo um condensador C , a tensão elétrica V nos terminais deste último é proporcional à indução no núcleo do transformador sempre que a resistência do condensador seja pequena, à frequência de trabalho, comparada com o valor de R .

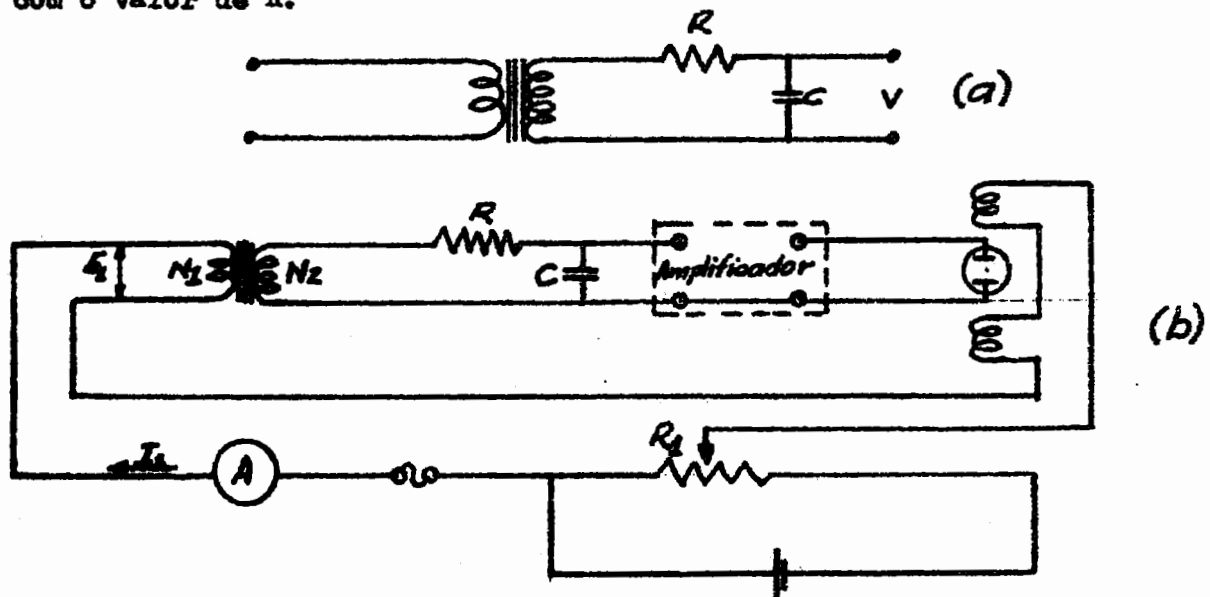


Figura 7

Como nestas condições, a tensão V pode tornar-se muito reduzida se o oscilógrafo tiver pequena sensibilidade, será preciso intercalar um amplificador entre \tilde{E}_1 e C (figura 7 b). O potenciômetro R_1 permite dar uma polarização ou componente contínuo, e também anular esta nos casos em que a tensão aplicada seja pulsatória.

Para obter as escalas de intensidade de campo, observam-se os desvios horizontais, já que estes são proporcionais às intensidades de corrente do primário, e correspondem aos valores de campo:

$$H = \frac{4,44 \tilde{N}_1 I}{10 \lambda}$$

Em relação às escalas de indução, se obteriam do mesmo modo, com os desvios verticais, tendo em conta a relação:

$$E_1 = 4,44 N_1 f S B \cdot 10^{-8}$$

N_1 - número de espiras no primário

f - frequência da corrente alternada

S - seção reta do núcleo

B - valor da indução magnética

e medindo E_1 com voltímetro de valor eficaz.

Para melhor ilustração ver (L'Oscillographe au travail, pg. 38)(8).

III.1.4 - Medidas com permeâmetro

Devido à dificuldade de se executar corpos de prova toroidais para os dois primeiros métodos de medidas é interessante recorrer-se aos aparelhos denominados permeâmetros. Vamos dar alguns dados sobre os principais:

No permeâmetro de Babbitt o campo é medido com um galvanômetro balístico ligado a uma bobina de várias espiras internas à bobina de magnetização próxima ao meio do espécime mas não o envolvendo, ao mesmo tempo que o núcleo é magnetizado com a corrente que passa através da bobina de magnetização (figura 8).

As bobinas no núcleo são ajustadas para sobrepujar a relutância do núcleo e do ar que existe, de cada lado do espécime, apesar dos cuidados para se obter uma boa junção nêstes pontos. A bobina de provas usada para determinar B envolve o meio do espécime.

O permeâmetro de Burrows é um pouco mais preciso. Este tipo requer duas amostras presas entre dois núcleos interligados, de material de alta permeabilidade, que completa o circuito magnético de forma quadrada. Em adição

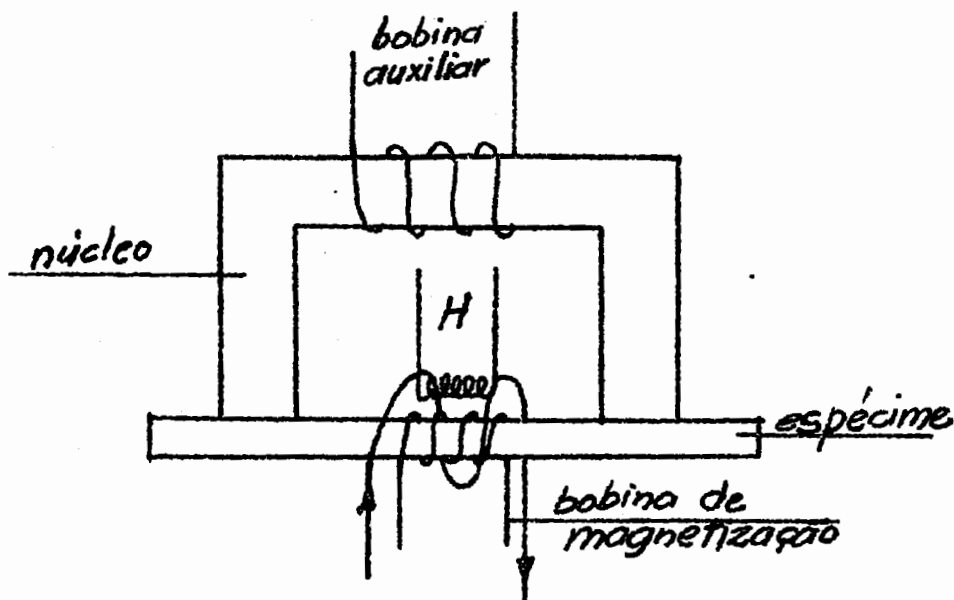


Figura 8

às bobinas magnetizantes envolvendo os espécimes, existe bobinas compensadoras envolvendo cada extremidade das amostras para dar correções mais adequadas aos efeitos dos intervalos de ar nas juntas. As bobinas B envolvem o meio de cada espécime, e duas bobinas de prova são colocadas ao lado de cada bobina B. Com ajustamentos adequados às condições do teste, as unidades se aproximam muito ao do ensaio com amostra toroidal (ver III.1.2).

Um outro esquema para ajustar a compensação num núcleo foi usado por Niwa e é baseado no potenciômetro magnético descrito por Chattock (7). Uma haste de material não magnético ou material no qual a histerese é negligenciável, é uniformemente envolvida ao longo de seu comprimento, por espiras de fio fino, e suas extremidades são colocadas sobre dois pontos da amostra. Se um galvanômetro balístico ligado a esta bobina mostra não mudar o fluxo quando a corrente de magnetização é invertida, isto indica que a magnetização na barra é uniforme, e que H pode ser calculado, a partir da corrente na bobina magnetizante que envolve o espécime.

O permeâmetro de saturação é muito semelhante ao de Babbitt, exceto a bobina de magnetização que é maior e artificialmente refrigerada, não se usando bobinas de compensação no núcleo.

No permeâmetro de Newman, núcleos maciços são envolvidos por várias espiras de fio grosso e quando energizados, criam um alto campo no espaço entre as faces polares N e S. O espécime P é fixado entre as peças polares como indicado na figura 9, e é envolvido por uma bobina de prova ligada a um galvanômetro balístico, para determinar B.

A intensidade do campo H é determinada pela medida da mudança de fluxo no ar em uma bobina colocada próxima ao espécime (H_1) e depois na mesma bo-

bina colocada um pouco mais afastada (H_2). O campo nessa região varia de maneira aproximadamente linear com a distância a partir da superfície do espécime, e seu valor na superfície é obtido por extrapolação dos valores de H_1 e H_2 supondo uma variação contínua e linear com a distância. Fazendo o núcleo do eletromagneto de material laminado, o campo magnético pode ser mudado rapidamente no tempo suficiente para se conseguir medidas balísticas satisfatórias, supondo o período do galvanômetro longo.

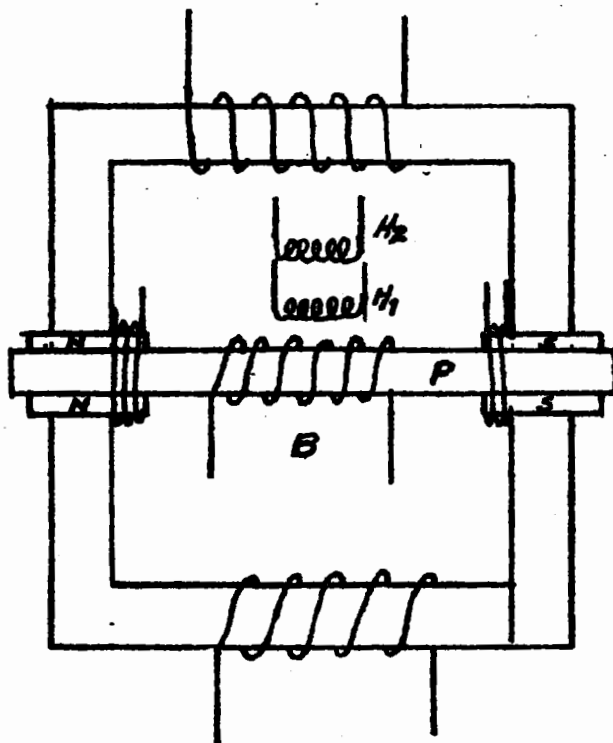


Figura 9

O permeâmetro utilizado neste trabalho é semelhante ao tipo descrito acima, com pequenas modificações, como se verificará no capítulo seguinte.

IV - O PERMEÂMETRO MAGNÉTICO E SUA CALIBRAÇÃO

Neste capítulo, daremos uma descrição geral do aparelho bem como de todas as modificações introduzidas e atividades, objetivo deste trabalho.

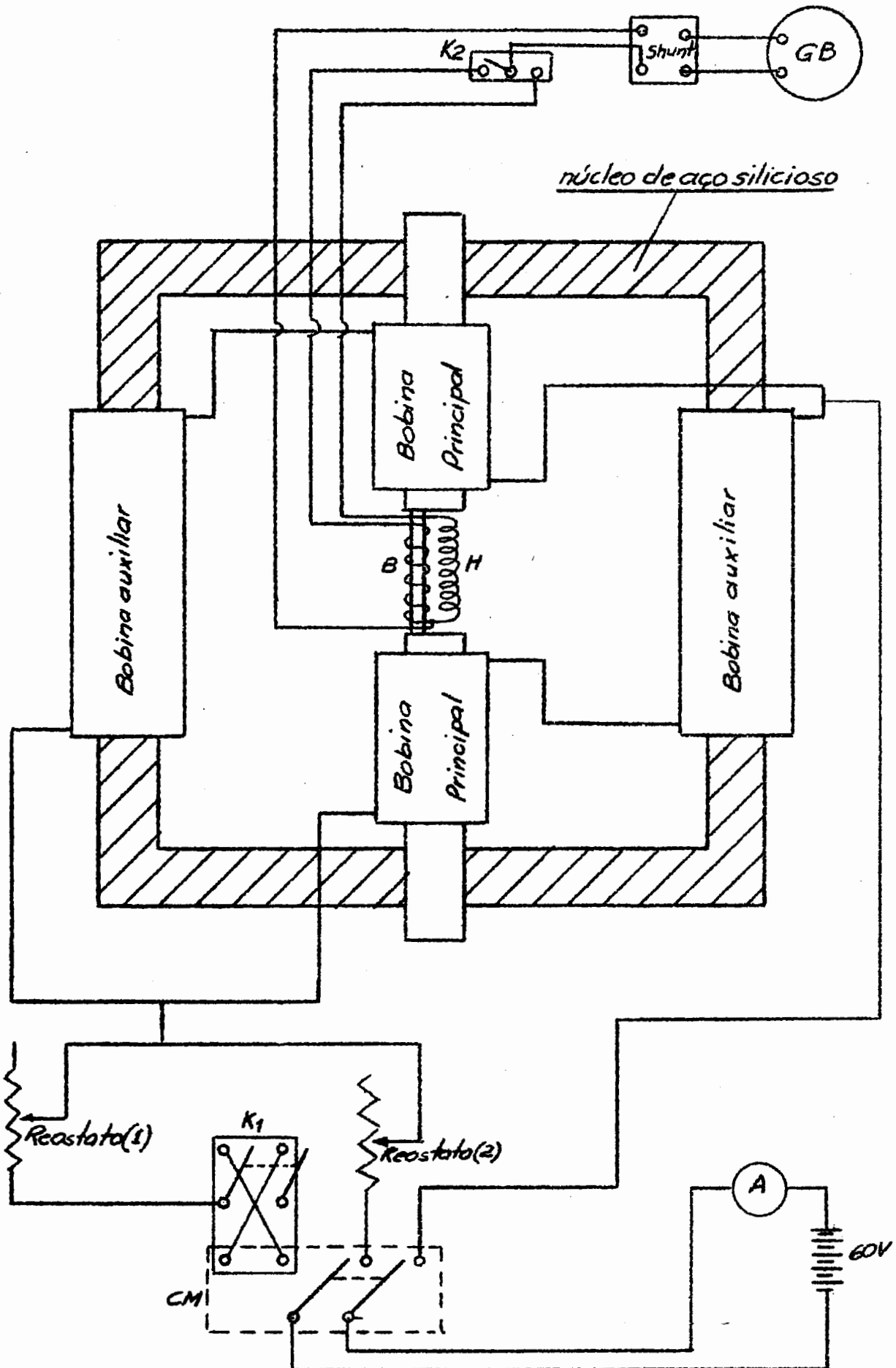
IV.1 - Descrição geral do permeâmetro e circuitos complementares.

Figura 10.

O permeâmetro consta de um núcleo de lâminas de aço silicioso de grão orientado, dividido em quatro partes móveis, envolvido por duas bobinas principais e duas bobinas auxiliares ligadas a uma bateria de chumbo de 60 V, segundo o esquema na página seguinte. As bobinas são executadas com fio de cobre 14 AWG sendo que cada uma das primárias têm 2690 espiras e cada uma

Figura 10

ESQUEMA DO CIRCUITO DO PERMEÂMETRO



das auxiliares 1600 espiras.

Dois bobinas de prova exatamente iguais entre si, ligadas em série, são colocadas no campo magnético do permeâmetro e ligadas a um galvanômetro balístico. Uma das bobinas de prova envolve o corpo de prova preso entre os núcleos das bobinas principais, que são móveis; e a outra lhe é paralela mas ligada de tal maneira que sua corrente induzida seja oposta a da bobina que envolve o corpo de prova. Na ausência deste, as correntes devem se anular.

A bateria de chumbo fornece a corrente para as bobinas magnetizantes devidamente regulada pelos reostatos (1) ou (2). A chave K_1 permite inverter a corrente no reostato (1) e a chave magnética CM torna possível mudar, rapidamente, a corrente do reostato (1) para a do (2) e vice-versa ou simplesmente desligar a que estiver ligada.

IV.2 - Idéia inicial

Inicialmente, executamos as duas bobinas de prova exatamente iguais, sobre carretéis de fibra de vidro embebida em plástico poliéster, com 20 espiras cada, de fio de cobre número 26 AWG.

As bobinas, sem o corpo de prova, eram montadas em um suporte que se prendia à estrutura de sustentação do permeâmetro.

A calibração das bobinas foi conseguida da seguinte maneira:

As bobinas foram ligadas em série, de tal maneira a ter as correntes induzidas em cada uma com sentidos opostos. Desligando-se rapidamente a corrente magnetizante por meio da chave magnética, procedia-se à leitura de deflexão do galvanômetro balístico e em seguida, aumentando-se ou diminuindo-se o enrolamento de uma das bobinas, procurava-se conseguir deflexão nula do galvanômetro, o que garantiria a igualdade das correntes induzidas nas bobinas e, portanto, a equivalência destas.

Devido à impossibilidade prática de se conseguir sucesso com tal procedimento, visto que bastava a mudança de posição dos fios terminais das bobinas para afetar o resultado, optou-se por um segundo processo. As bobinas tiveram seus terminais soldados a hastes de latão, fixas, e em paralelo a uma delas, à que apresentou maior corrente induzida, ligou-se um potenciômetro de 10 K Ω , conseguindo-se assim o equilíbrio das duas bobinas (ver figura 11).

IV.3 - Primeiras medidas

Levando em conta o comprimento das bobinas de prova (20 mm) mais seus suportes e hastes; usamos dois corpos de prova cilíndricos com 30 mm de comprimento e diâmetro máximo de 15 mm (diâmetro do furo do carretel).

As bobinas de magnetização (principais e secundárias), para essas pri

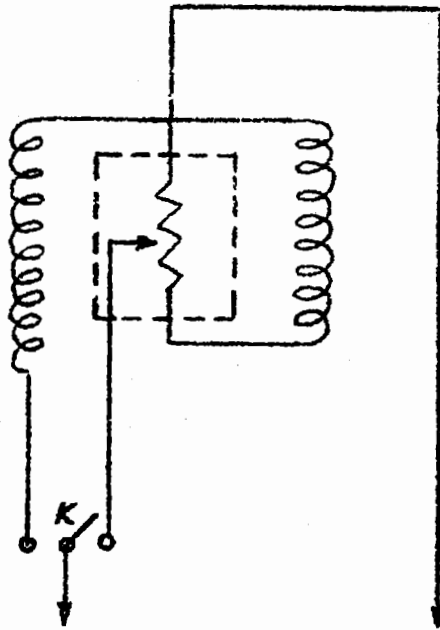


Fig.11
MONTAGEM DO POTENCIÔMETRO

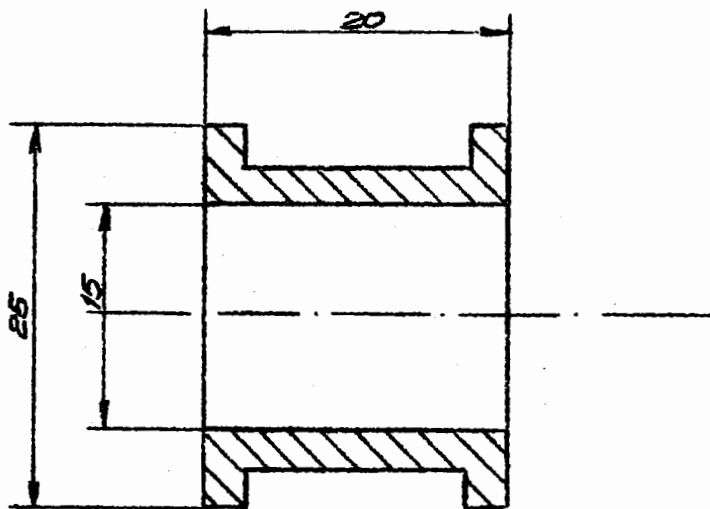


Fig.12
ESQUENA DA BOBINA

meiras medidas estavam ligadas em série e a corrente máxima era de 1,5 A e a mínima de 0,8 A.

Existindo no Departamento de Metalurgia, diversos corpos de prova, (acompanhados dos resultados), que haviam sido submetidos a testes no permeâmetro da firma Eriez-Produtos Magnéticos Metalúrgicos, em São Paulo, resolvemos usar um destes, com 30 mm de comprimento e diâmetro de 8,7 mm, para os primeiros ensaios.

Após as primeiras tentativas se evidenciou a necessidade de introduzir modificações várias:

- a) A ligação das bobinas de magnetização passou a ser feita em paralelo pela associação de uma principal com a outra auxiliar, como no esquema do item IV.1, para se conseguir uma corrente maior que levasse à saturação o espécime em teste. Com isso, a corrente máxima elevou-se para 3,0 A e a mínima para 1,0 A.
- b) Os reostatos (1) e (2) eram eletrolíticos (cuba de alumínio com solução de NaCl). Para se conseguir correntes bem pequenas, que possibilitassem a obtenção da curva de desmagnetização, colocamos em série com o reostato (1) outros reostatos e resistências fixas totalizando 100 K. Passou-se a ter então uma possibilidade de variação de corrente, desde 0,65 mA até 3,0 A.
- c) A dificuldade de se efetuar a leitura das diferentes correntes no amperímetro A, e por só se dispor deste, levou-nos a mudar sua posição no circuito. A corrente de saturação era regulada pelo reostato (2) com o amperímetro na posição indicada no esquema e a seguir este era mudado para uma posição que ficasse em série com o reostato (1) para poder medir as correntes que na mudança brusca da chave magnética tornavam o campo H menor.

Estávamos, então, em condições de efetuar as primeiras medidas, da seguinte maneira:

O corpo de prova introduzido na bobina era prêso pelos núcleos da bobina principal. Por meio do reostato (2) calibrava-se a corrente de saturação nas bobinas magnetizantes e através do reostato (1), uma corrente de sentido oposto e de pequeno valor que, de medida para medida, crescia a partir do valor zero. Estando circulando nas bobinas de magnetização a corrente de saturação, passava-se à corrente do reostato (1) através da chave magnética CM que desligava uma e ligava a outra imediatamente. A diferença de condições de magnetização traduzia-se em deflexão no galvanômetro balístico. Através da chave K_2 , efetuava-se a medida da variação da intensidade de campo na bobina H ou da densidade de fluxo no corpo de prova (bobina B).

A seguir, elevava-se a corrente no reostato (1) e procedia-se a novas leituras. E assim por diante.

Contudo, não foi possível conseguir resultado satisfatório; isso, ao que supomos, devido a:

- a) espécie apresentar valores de retentividade B_r e coercitividade H_c muito pequenos e nessa aparelhagem não permitir atingi-los.
- b) Diferença pronunciada de diâmetro entre a bobina ($\phi = 21,0$ mm) e corpo de prova ($\phi = 8,7$ mm) impedindo a medida efetiva da variação da densidade de fluxo.

IV.4 - Novas modificações

Devido à segunda das causas apontadas acima e, principalmente, utilizando uma peça de Alnico V* com 25,3 mm de diâmetro e 16,45 mm de comprimento, cujas dimensões haviam impedido que fôsse testado pelo sistema das bobinas fixas, levou ao abandono desta e à adoção de outro. Consistiu em fazer o enrolamento da bobina B, com 4 espiras de fio 26 AWG, diretamente sobre o corpo de prova (Alnico V) e o da bobina H, também com 4 espiras do mesmo fio, sobre o cilindro de acrílico de iguais dimensões às do corpo de prova.

A igualdade indutiva entre as duas bobinas, foi conseguida da seguinte maneira:

Uma terceira bobina, chamada bobina de comparação, foi enrolada no corpo de prova. Sendo também executada sobre o corpo de prova, não foi difícil conseguir seu equilíbrio com a bobina B (erro de 1 %, aproximadamente). Isto é, foi possível estabelecer uma identidade de condições de funcionamento para as 2 bobinas enroladas no corpo de prova. Esta bobina de comparação foi, a seguir, cuidadosamente colocada envolvendo o cilindro de acrílico, ao lado da bobina H, conseguindo-se equilibrá-las através do potenciômetro de 10 K Ω , com a passagem do fluxo de B. Conseguindo isto, a bobina de comparação foi desligada do circuito e em seu lugar ligada a bobina B.

IV.5 - Novas medidas

Com a nova montagem das bobinas de prova e com o corpo de prova de Alnico V, executaram-se outras medidas como descrito em IV.3. Os resultados vão na tabela II, no final deste item.

Os valores de B foram calculados a partir da equação dada em II.1.5.

3.

* Fabricada e ensaiada no permeâmetro da ERIEZ-PRODUTOS MAGNETICOS E METALURGICOS LTDA. - SÃO PAULO.

$$B = \frac{R}{NA} \cdot q$$

onde:

R é a resistência combinada do galvanômetro e da bobina.

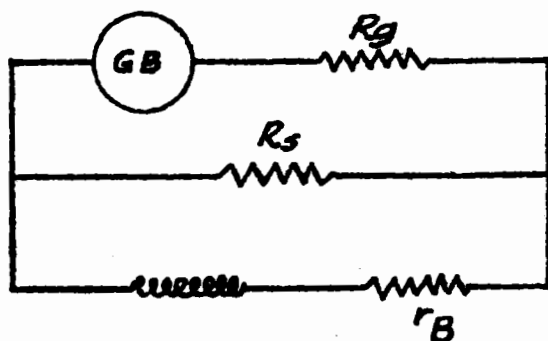
N é o número de espiras da bobina B.

A é a área da seção reta do corpo de prova.

q é a carga elétrica total indicada pela deflexão do galvanômetro.

CALCULO DE R

Tínhamos o seguinte circuito, onde



GB = galvanômetro balístico

$R_G = 257 \Omega$ - resistência interna do GB.

$R_S = 100.000 \Omega$ - resistência do shunt.

Figura 13

$R_B = 1.000 \Omega$ - resistência da bobina B mais potenciômetro.

Temos:

$$R' = \frac{R_S \times R_G}{R_S + R_G} = \frac{100.000 \times 257}{100.000 + 257} = 256,3 \Omega$$

$$R = R' + R_B = 256,3 + 1.000 = 1256,3 \Omega$$

Levando em conta que:

$$N = 4 \text{ espiras} \quad e \quad A = 5,032 \text{ cm}^2$$

segue-se:

$$B = \frac{R}{N \cdot A} \cdot q = \frac{1256,3}{4 \cdot 5,032 \cdot 10^{-4}} \cdot q = 62,42 \cdot 10^4 q$$

A carga q, indicada pela deflexão D_B do galvanômetro é:

$$q = K \cdot D_B \quad \text{onde:}$$

K é a constante do aparelho que, na calibração descrita no apêndice 1 indicou $K = 0,383 \cdot 10^{-8} \text{ C/mm}$;

D_H é a deflexão máxima dada pelo galvanômetro em milímetros.

$$D_B = D_{BS} - 2 \text{ dB}$$

D_{BS} = deflexão do galvanômetro ao se inverter a corrente de saturação de seu valor positivo para o negativo.

dB = deflexão do galvanômetro ao passar da saturação para um ponto de curva de desmagnetização.

CALCULO DE H

Podemos considerar proporcional à intensidade de campo e a deflexão do galvanômetro balístico, isto é, a corrente induzida. Sabendo que para o Alnico V a intensidade de campo na saturação é de 3.000 Oersted, podemos estabelecer a relação:

$$H = H_S \cdot \frac{DH}{DH_0}$$

onde:

H_S = 3.000 Oersted - intensidade de campo de saturação.

DH_0 = deflexão do galvanômetro balístico quando se anula a corrente de saturação.

$DH = dH - DH_0$ - deflexão correspondente ao valor da intensidade de campo no segundo quadrante.

dH = deflexão do galvanômetro balístico ao se passar da saturação no primeiro quadrante para um ponto da curva de desmagnetização.

Temos então:

$$H = \frac{3.000}{132} \cdot DH$$

Corrente de saturação

Sua determinação foi feita experimentalmente, acompanhando a curva de magnetização, interessando-nos apenas os valores de deflexão dB referentes à densidade de fluxo, segundo a tabela II, por onde se conclui que $I_S = 2,0 \text{ A}$.

T A B E L A I

I	dB	dH	DB = D _{BS} - 2dB	dH = dH - DH _o	q x 10 ⁸	B	H
A	mm	mm	mm	mm	C	Gauss	Oersted
2,000	590,0	--	--	--	--	--	--
0	30,0	132,0	530,0	--	202,990	12671	--
0,0022	31,5	136,5	527,0	4,5	201,841	12599	102,3
0,0117	38,0	138,0	514,0	6,0	196,862	12288	136,4
0,020	38,5	139,0	513,0	7,0	196,479	12264	159,1
0,050	44,5	141,0	501,0	9,0	191,883	11977	204,6
0,075	52,5	143,0	485,0	11,0	185,755	11595	250,0
0,100	65,0	145,5	460,0	13,5	176,180	10997	306,9
0,125	86,5	148,0	417,0	16,0	159,711	9969	363,7
0,150	128,0	150,5	334,0	18,5	127,922	7985	420,5
0,175	169,0	152,0	262,0	20,0	100,346	6264	454,6
0,200	259,0	153,0	72,0	21,0	27,576	1721	477,3
0,205	278,5	155,0	33,0	23,0	12,639	789	522,8

NOTA - Os valores acima são valores médios de diversas medidas.

TABELA II

I A	dB mm
0,050	9,0
0,100	15,5
0,500	17,0
1,000	22,5
1,500	24,5
2,000	25,0
2,250	25,0

IV.6 - Crítica e sugestões

Com os valores obtidos traçamos a curva de desmagnetização $B \times H$ (ver gráfico anexo), obtendo os seguintes valores:

$$H_c = 493 \text{ Oersted}$$

$$B_r = 12900 \text{ Gauss}$$

$$B_r/H_c = 26,1 \text{ (coeficiente de desmagnetização)}$$

$$(B \times H)_{\text{máx}} = 3,65 \cdot 10^6$$

Comparando a curva traçada e os valores acima com os mesmo obtidos para a mesma peça de Alnico V, na firma Eriez, ou com a existente na página 375 do livro Materiales Magnéticos, de Ramon de Luccas (1), para o mesmo material notamos o seguinte:

- a) o valor de B_r pode ser considerado bom;
- b) o valor de H_c devia ser maior;
- c) devido ser H_c menor, o coeficiente de desmagnetização foi mais elevado;
- d) $(B \times H)_{\text{máx}}$ devia ser maior;
- e) o ramo superior da curva devia ser menos inclinado.

A curva completa de histerese não foi obtida, mas o procedimento é o mesmo que para se obter a curva de desmagnetização, estendendo-se o processo aos quatro quadrantes.

Pudemos anotar diversas causas perturbadoras das medidas que abaixo relacionamos:

1. Pequeno deslocamento do galvanômetro balístico, por isolamento defeituoso da chave K_2 e chave magnética CM;
2. A posição 3 do shunt é aproximadamente 1/3 da medida da posição 1.

3. Dificuldade para desmagnetização completa do corpo de prova;
4. Dificuldade para calibrar as bobinas de prova, considerando a adição de um potenciômetro como solução provisória;
5. Impossibilidade de controlar a corrente através do reostato (2).

Os erros de medida cometidos, e, aqui, não evidenciados, também auxiliaram para se ter um resultado aproximado.

Sugerimos o abandono do sistema das duas bobinas de prova perfeitamente iguais, por dificuldade de construção e por nos parecer desnecessário. Em seu lugar, pode-se adotar o segundo procedimento anteriormente descrito.

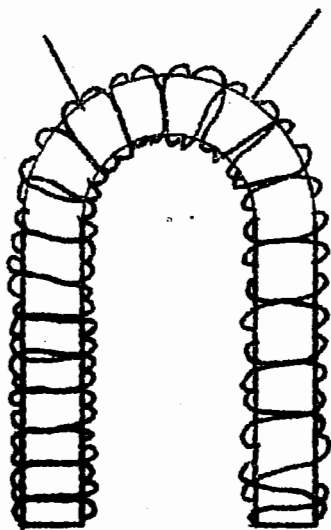
Constrói-se uma bobina de pequeno diâmetro (cerca de 8 mm) com 20 espiras de fio de cobre envernizado 30 AWG, que depois de estar devidamente calibrada servirá de bobina padrão para medir a intensidade de campo H entre os núcleos do permeâmetro. A Bobina B será executada sobre o próprio corpo de prova, como já havíamos feito. Ambas as bobinas são presas entre os núcleos em posição mais central possível onde H e B são uniformes (ver figura 15).

IV.7 - Observações

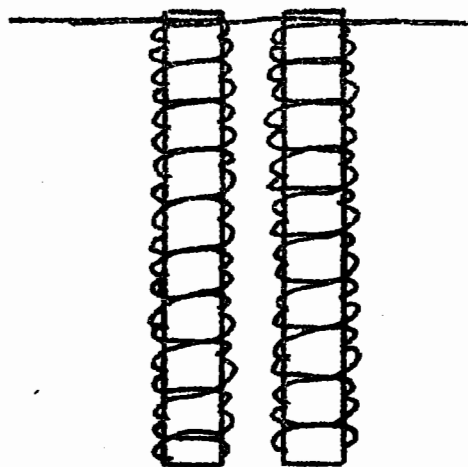
1ª - A homogeneidade da densidade de fluxo entre os núcleos principais foi verificada por meio de um fluxímetro, junto a um dos núcleos e a meia distância entre os dois para uma distância fixa entre eles de 30 mm e para diversas correntes. Como exemplo seguem-se dois casos, podendo-se verificar a homogeneidade da densidade de fluxo na parte central do núcleo ($60 \times 45 \text{ mm}^2$), sendo que as dimensões da secção reta do núcleo são $91,7 \times 74,9 \text{ mm}^2$.

2ª - Estava nos planos deste trabalho, verificar a possibilidade de se usar como bobina de prova uma bobina de Chattock. Esta pode ser rígida ou flexível segundo o esquema. (Figura 14).

Além da dificuldade de confecção de qualquer uma delas, existe também a imprecisão de resultados devido ao encurvamento da parte superior na primeira, e na segunda a necessidade de se usar hastes longas para se evitar a influência do campo de permeâmetro o que faz com que as pequenas correntes induzidas se dissipem, em grande parte, no enrolamento.



a) flexível



b) rígida

Figura 14

DENSIDADE DE FLUXO ENTRE OS NÚCLEOS PRINCIPAIS DO PERMEÂMETRO
(em centenas de Gauss)

$I = 1,6 \text{ A}$

$x = 0$

56	51	57
44	44	
49	44	50
44	44	
56	46	55

$x = 15 \text{ mm}$

34	34	33
43	43	
41	43	39
43	44	
33	40	34

I = 1,0 A

x = 0

40	32	39
	29	29
32	29	32
	29	29
39	32	40

x = 15 mm

25	25	25
	29	28
27	29	26
	29	29
25	27	26

Figura 15

7 -- APÊNDICE

Apêndice A -- O galvanômetro balístico e sua calibração

O galvanômetro balístico é um aparelho destinado à medida da quantidade de carga deslocada por uma corrente de pequena duração de tempo. Na verdade não mede a corrente i , mas sim $\int_0^t i dt$.

O galvanômetro balístico tem a bobina móvel com grande momento de inércia, e o fio de suspensão com pequena constante de torção.

Uma corrente transitória exerce uma impulsão angular sobre a bobina do galvanômetro, produzindo uma quantidade de movimento igual à da bobina. Pode-se demonstrar que a deflexão máxima é proporcional à quantidade de carga que atravessou a bobina.

Temos:

I - momento de inércia da bobina do galvanômetro

A - sua área

N - número de espiras da mesma

B - densidade de fluxo do campo em que a bobina se move

τ - conjugado que atua sobre a bobina quando nela a corrente é i
tem-se:

$$\tau = N i B A$$

A impulsão angular transmitida à bobina durante o tempo de duração da corrente é:

$$\int_0^t \tau dt = NBA \int_0^t i dt = NBA q$$

Sabemos que a impulsão angular é igual à variação de momento angular

$$I \omega_0 = NBA q$$

onde ω_0 é a velocidade angular transmitida à bobina.

A energia cinética inicial da bobina é:

$$E_0 = 1/2 I \omega_0^2$$

A energia potencial da suspensão, na posição de ângulo com deflexão máxima θ_m , é:

$$E_p = 1/2 K \theta_m^2$$

onde K é a constante do conjugado da suspensão (conjugado restaurador $\tau = -K \theta$).

Igualando a energia cinética à potencial e fazendo as devidas substituições, obtém-se:

$$q = \left(\frac{\sqrt{I K}}{NBA} \right) \theta_m = K \theta_m$$

onde K é a constante do aparelho.

O aparelho por nós utilizado na calibração do permeâmetro magnético foi um galvanômetro balístico marca Cambridge com as características:

resistência interna - 257Ω .

resistência externa crítica de amortecimento = 5300Ω

distância da escala ao galvanômetro $L = 1000 \text{ mm}$

sensibilidade do galvanômetro: $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ A/mm}$

período de oscilação livre: $T = 23,2 \text{ s}$.

Para a determinação de sua constante K , usamos o sistema RC, adiante esquematizado:

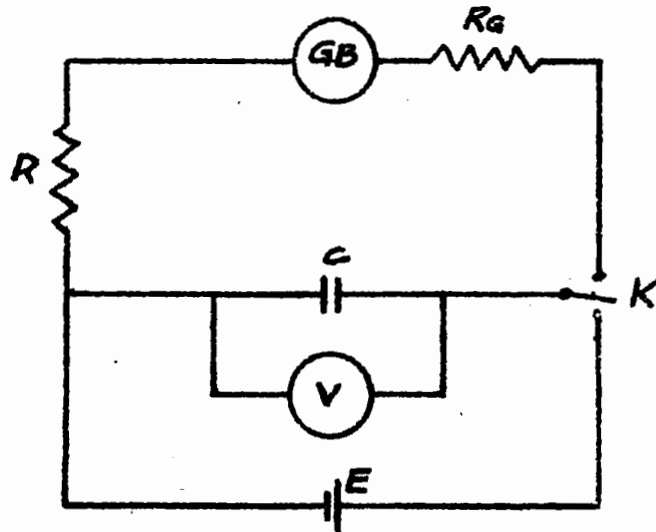


Figura 16

Ligando-se, através da chave K , o capacitor C com a bateria E , este se carrega. Invertendo-se a chave K ele descarrega através da resistência R e do galvanômetro balístico, assinalando a carga deslocada.

Em um instante t , após iniciar-se a descarga do condensador, a carga residual em suas placas é:

$$q = Q \cdot e^{-t/RC}$$

onde Q é a carga inicial.

Para a escolha dos valores de R e C , fizemos duas restrições:

- a) desejávamos medir até uma carga residual de 1/10 da carga inicial;
 b) o tempo de medida deveria ser menor que o período do aparelho ($T = 23,2$ s).

Assim, tivemos:

$$\frac{q}{Q} = e^{-t/RC} = \frac{1}{10} \quad \text{daí}$$

$$\frac{t}{RC} = \log e 10 = 2,302$$

$$RC = \frac{t}{2,302} < \frac{T}{2,302} = \frac{23,2}{2,302} \approx 10 \text{ s}$$

Portanto, $RC < 10 \text{ s}$.

Inicialmente, adotamos:

$$R = 1 \text{ M } \Omega = 10^6 \Omega$$

$$C = 8 \text{ } \mu\text{F} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Portanto, $RC = 10^6 \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 8 \text{ s}$.

Contudo, só pudemos efetuar medidas com o shunt nas posições 18000, 3000 e 1000, que evidenciou uma não linearidade do valor de K para as diversas escalas do shunt.

Escolhemos, então, novos valores para R e C.

$$R' = 480 \text{ M } \Omega = 480 \cdot 10^6$$

$$C' = 0,02 \text{ } \mu\text{F} = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Portanto, $R'C' = 480 \cdot 10^6 \cdot 0,02 \cdot 10^{-6} = 9,6 \text{ s}$

Com estes valores, pudemos efetuar as medidas com o shunt na posição 1, escala por nós utilizada nas medidas com o permeâmetro, o que trouxe o valor de $K = 0,383 \cdot 10^{-8} \text{ C/mm}$.

Os resultados estão na tabela da página 44.

Apêndice B - Medida da indutância mútua das bobinas de prova.

Esta prova pode ser conseguida com o circuito esquematizado na página seguinte:

A resistência R é ajustada até se anular a corrente no galvanômetro. Quando tal se der, pode-se demonstrar que:

TABELA DE MEDIDAS PARA CALIBRAÇÃO DO GALVANÔMETRO BALÍSTICO

V	D_B	t/RC	$e^{-t/RC}$	Q	q	Q - q	K
Volt	mm	-	-	C	C	C	C/mm
2,15	5,0	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,39740 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,5	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,36127 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,0	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,39740 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,5	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,36127 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,5	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,36127 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,0	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,39740 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,5	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,36127 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,0	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,39740 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,0	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,39740 \cdot 10^{-8}$
2,15	5,0	0,621	0,538	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,313 \cdot 10^{-8}$	$1,987 \cdot 10^{-8}$	$0,39740 \cdot 10^{-8}$

Usamos D_B (desvio na escala milimetrada) em lugar do ângulo θ de desvio, porque na substituição de K na expressão $q = K D_B$ (fôlha 27), o fator L (distante do galvanômetro à escala) seria cancelado.

O valor médio de K será: $K = 0,383 \cdot 10^{-8} \frac{C}{mm}$.

$$M = r \cdot R \cdot C$$

r e R - resistores elétricos

C - capacitor elétrico

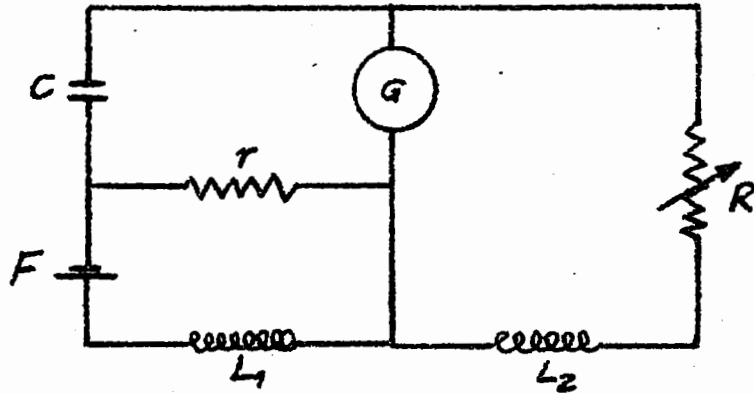


Figura 17

Em nossa medida , tínhamos os seguintes valores:

$$r = 1050 \Omega$$

$$R = 1,73 \Omega$$

$$C = 25 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Portanto, o valor de M é:

$$M = 1050 \cdot 1,73 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \text{ henry}$$

$$M = 4,54 \cdot 10^{-2} \text{ henry .}$$

-oOo-

BIBLIOGRAFIA

- BOZORTH, R.M. - Measurement of Magnetic quantities-Common Methods. In: Ferromagnetism, Princeton, New Jersey, D. Van Nostrand Company, Inc., p. 843-855.
- CHATTOCK, A.P. - Philos. Mag., 24 (5): 1887, 94-96.
- GOLDING, E.W. - Calibration of the Galvanometer, In: Electrical Measurements and Measuring Instruments, London, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd., 1957, p. 360-365.
- HAAS, F. - Tracé du Cycle D'Hystérésis. In: L'Oscillographe au Travail, Paris, Société des éditions Radio, 1955, p. 37-39.
- LUCAS, RAMON DE - Materiales Magnéticas, Madrid, Instituto de "Leonardo Torres Quevedo", Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1955.
- SEARS, F.W. - De "Campo Magnético" a "Ferromagnetismo", In: Magnetismo, Eletricidade, 1ª edição, Trad. por Capitão Nelson França Furtado, Rio de Janeiro, Ed. Gertum Carneiro, 1947, p. 277-434. (Princípios de Física, V.2).
- WATSON, W. - "Medida de la autoinducción y de la inducción mútua." In: Prácticas de Física, 2ª reimpressão, 1ª edição, Trad. por D. José Manãa y Donvi, Barcelona, Ed. Editorial Labor, S.A., 1950, p. 586-603.