

# O ciclo de histerese magnética no núcleo de um transformador <sup>(1)</sup>

J. P. MARQUES e V. A. ESTEVES

Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
Rua Ernesto de Vasconcelos, Ed. C1, 4.º Piso, 1700 Lisboa

*Analisa-se um método relativamente simples que permite obter no osciloscópio a imagem do ciclo de histerese magnética do material que constitui o núcleo de um transformador. A partir da curva de histerese obtida, calcula-se o campo coercivo do material, a sua indução remanescente, a magnetização de saturação, a permeabilidade relativa e a potência dissipada durante um ciclo completo.*

## 1. Introdução

Este trabalho pretende analisar o fenómeno da histerese magnética, através do estudo da indução magnética  $\mathbf{B}$  criada num sistema constituído por um transformador usual de dois enrolamentos e um núcleo ferromagnético, laminado, tomado como uma aproximação ao toróide. O fenómeno da magnetização de um meio ferromagnético reside na criação adicional de um campo de magnetização  $\mathbf{M}$ , sob a acção de um campo excitador  $\mathbf{H}$ . Para interpretar as leis da magnetostática devidas à presença do meio, é necessário recorrer à hipótese de Ampère [2, 3], que atribui aos domínios ferromagnéticos locais propriedades magnéticas idênticas às das correntes reais devidas aos electrões.

Neste caso, supondo que se trata de um meio magnético homogéneo, linear e isotrópico, a indução magnética  $\mathbf{B}$  deve escrever-se:  $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$ ; onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vazio,  $\mathbf{H}$  a intensidade do campo magnético e  $\mathbf{M}$  a magnetização. Para os meios lineares  $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$ , sendo a constante de proporcionalidade  $\chi_m$  designada por susceptibilidade magnética. Para estes materiais,  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ; sendo  $\mu = \mu_0 \mu_r$  com  $\mu_r = (1 + \chi_m)$ . Nos materiais ferromagnéticos, a relação entre  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  não é linear, deixando

de ser válidas as relações que acabámos de mencionar (Fig. 1).

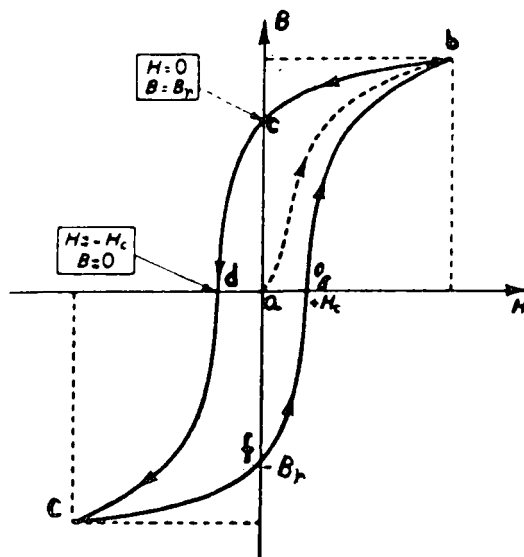


Fig. 1 — Curva típica de histerese magnética B-H.

<sup>(1)</sup> Trabalho de índole experimental, apresentado ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, como parte das provas académicas prestadas por J. P. Marques [1]. Esta experiência foi concebida para os cursos gerais de electromagnetismo do Departamento, e em particular para Fundamentos de Física II dos cursos de Química e Bioquímica, podendo igualmente servir de experiência de demonstração ao nível do Ensino Secundário.

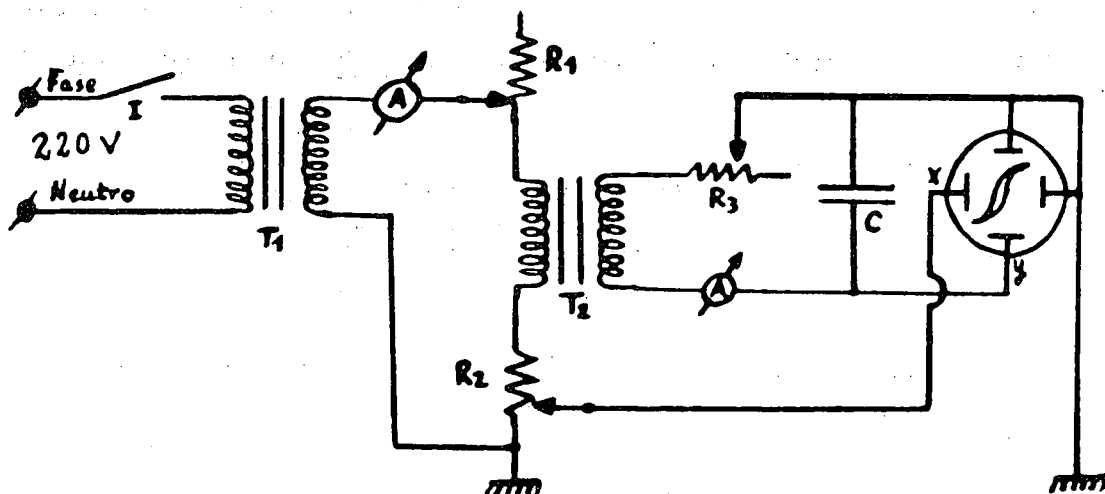


Fig. 2 — Diagrama do circuito eléctrico do dispositivo experimental para o traçado da curva B-H.

O método experimental utilizado para medir **B** em função de **H**, com base na obtenção da curva de histerese do núcleo do transformador encontra-se esquematizado na Fig. 2.

A corrente alternada do primário  $I_p(t)$  induz uma tensão alternada  $V_s(t)$  no secundário. Esta tensão é proporcional à taxa de variação temporal do fluxo  $\phi$ :  $V_s(t) \propto (d\phi/dt)$ , e portanto proporcional a  $dB/dt$ . Como se pretende introduzir nas placas de deflexão vertical do osciloscópio uma tensão  $V_c(t)$  proporcional à indução magnética **B**, torna-se assim necessário introduzir no secundário um circuito integrador RC [2, 4]. Por aplicação da lei de Kirchoff em regime sinusoidal ao circuito do secundário do transformador, pode demonstrar-se que, para valores do período  $T \ll R_s C$ , se tem:

$$B(t) = - \left( \frac{R_s C}{N_s S} \right) \cdot V_c(t). \quad (1)$$

fixando adequadamente os parâmetros experimentais  $\omega$ ,  $R_s$  e  $C$ , em que  $\omega$  é a frequência da tensão aplicada ao circuito,  $R_s$  a resistência do circuito secundário e  $C$  a capacidade do condensador.

Por outro lado, o campo **H** é proporcional à corrente  $I_p$  e, por uma questão de simplicidade, pode calcular-se aproximadamente usando o modelo do toróide:  $H = NI/l$  onde  $N$  é o número de espiras dos enrola-

mentos em causa e  $l$  o «perímetro médio», medido ao longo da secção recta do núcleo.

Podem ainda calcular-se a energia dissipada num ciclo de histerese [2]. Quando a corrente  $I_p(t)$  cresce, o fluxo no núcleo aumenta e a f.e.m. induzida no enrolamento do secundário,  $-N_p d\phi/dt$ , origina uma corrente cujo sentido é tal que tende a opor-se a este aumento, de acordo com a lei de Lenz. Esta situação corresponde ao troço g-b da Fig. 1. Quando a corrente varia de  $I_{max} \rightarrow 0$ , a indução passa de  $B_{max}$  ao valor remanescente  $B_r$ , e a energia restituída pela bobina ao circuito corresponde ao troço b-c da curva (Fig. 1). A energia fornecida pela fonte durante um ciclo completo efgbcde é dada por:

$$W = V \oint H \cdot dB \quad (2)$$

que corresponde à área encerrada pelo ciclo de histerese, multiplicada pelo volume  $V$  correspondente ao núcleo do transformador. **B** e **H** surgem como parâmetros conjugados.

A permeabilidade relativa  $\mu_r$  em qualquer ponto da curva de magnetização é dada por:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} = 7,9 \times 10^5 \frac{B}{H} \quad (3)$$

onde **B** representa a ordenada do ponto (em Tesla) e **H** a sua abcissa (em  $A m^{-1}$ ).

O fenômeno da histerese torna o estudo da magnetização difícil na medida em que esta propriedade depende da história magnética do material. Este problema pode contornar-se por aplicação de um campo excitador  $H$ , variável no tempo, e oscilando entre dois valores extremos:  $\pm H_{\max}$ . A curva  $B-H$ , é então fechada, simétrica em relação à origem e designa-se tradicionalmente por *ciclo de histerese*.

Quando se obriga o material a descrever sucessivos ciclos, a potência total dissipada por este efeito é dada por:

$$P_t = f W = f V \oint H \cdot dB \quad (4)$$

em que  $f$  representa a frequência cíclica e  $W$  a área encerrada pela curva de histerese. Para o cálculo desta área pode recorrer-se ao método simples da determinação directa desta, ou procedendo a um ajuste da curva de histerese por via computacional. De referir, que aqui se ignoram correntes de Foucault.

## 2. Resultados experimentais

Na Fig. 3 pode observar-se a histerese obtida, depois de devidamente calibrada de

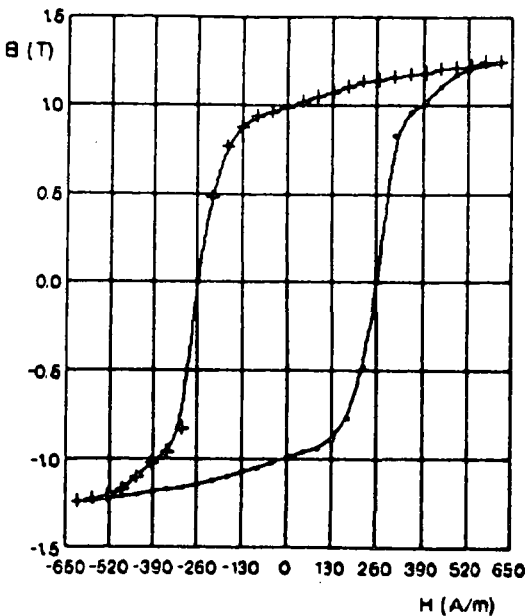


Fig. 3

acordo com as expressões anteriormente referidas.

A partir da curva calibrada, obtém-se que o campo coercivo  $H_c = H(B=0) \approx 270 \text{ A.m}^{-1}$ , a indução remanescente  $B_r = B(H=0) \approx 1 \text{ T}$  e a indução de saturação  $B_{\text{sat}} \approx 1,24 \text{ T}$ . Como  $B_{\text{sat}} = \mu_0 (H + M_{\text{sat}})$ , vem que:

$$M_{\text{sat}} = \frac{B_{\text{sat}}}{\mu_0} - H \approx \frac{B_{\text{sat}}}{\mu_0} \approx 10^6 \text{ A.m}^{-1},$$

onde se conclui que o campo  $H$  contribui muito pouco para a magnetização, sendo no entanto muito eficaz a alinhar os domínios ferromagnéticos.

Usando a relação (3) obtém-se a variação de  $\mu_r$  em função de  $H$  (Fig. 4). No gráfico, vê-se claramente que a permeabilidade relativa tem um comportamento altamente não-linear. Para  $H = 0$  torna-se evidente que  $\mu_r$  se torna infinita. Por outro lado, para  $B = 0$ ,  $\mu_r = 0$ . Em tais condições,  $\mu_r$  deixa de ter interesse prático. Sendo assim, o uso da permeabilidade relativa deve limitar-se a situações de interesse prático, por exemplo, no estudo da curva de primeira magnetização (não observável na nossa curva).

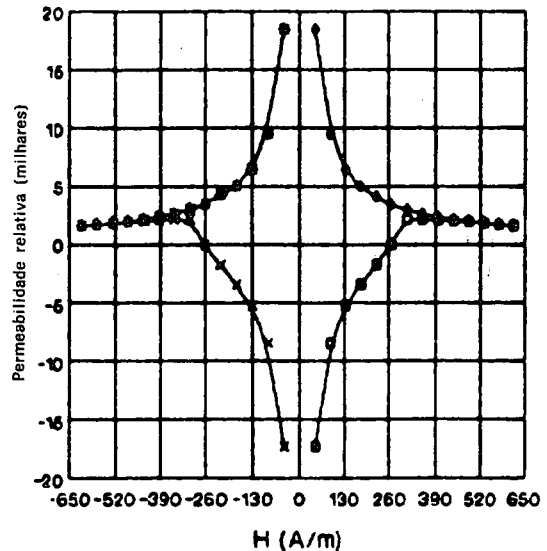


Fig. 4

A histerese observada encerra uma área de  $\sim 1100 \text{ J.m}^{-3}$ , que corresponde ao integral

$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}$ . Como no nosso caso,  $V = 770 \text{ cm}^3$ , obtém-se que  $W = V \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} = 0,8 \text{ J}$ . Como o núcleo se magnetiza e desmagnetiza 50 vezes por segundo ( $f = 50 \text{ Hz}$ ), a potência perdida por histerese é dada por

$$P = fW = 0,8 \times 50 W \approx 40 W.$$

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Doutor Noémio Marques toda a ajuda prestada.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] J. P. MARQUES — O magnetismo na matéria. Observação do ciclo de histerese no núcleo de um transformador (Relatório de aula teórico-prática realizada no âmbito das «Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica», na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Dep. Física, Abril 1990).
- [2] M. A. PLOMUS — Applied Electromagnetics, McGraw-Hill, Int. Stud. Ed., 1984.
- [3] A. F. KIPP — Electricity and Magnetism, McGraw-Hill, Int. Stud. Ed., 1969.
- [4] P. HOROWITZ, W. HILL — The art of electronics, Cambridge University Press, 1980.

## Educação Científica e Educação Tecnológica (\*) (\*\*)

(Autonomia e interdisciplinaridade)

JOÃO BAPTISTA

Departamento de Física da Universidade do Minho

### Cultura Tecnológica, conceito-chave

O título do artigo de Anabela Martins, «Inovações na Educação Científica e Tecnológica» parece-nos alimentar um equívoco dado sugerir uma identidade metodológica entre as duas educações, científica e tecnológica, embora seja dito depois (p. 19) que o ensino da tecnologia necessita de ser feito numa disciplina independente. Refere-se (p. 15) que «pelo facto de a tecnologia estar ligada àqueles que produzem trabalho manual, enquanto que a educação é controlada por aqueles que não o fazem, tende-se a dar à tecnologia um estatuto menor do que o da Ciência». A referência especial àquela ligação, sugere que ela é directa, como o era geralmente há três séculos. Ora entre Tecnologia e «mãos ao trabalho» há um mundo de teorização e experimentação técnica, cuja exigência e riqueza escapa, agora sim, à atenção dos planeadores educacionais. Veremos depois que tal não se deve especialmente a preconceitos.

Ao afirmar (início da p. 16) que é possível «fazer coisas» sem ser necessário «explicá-las», a Autora pensará na explicação científica, isto é, no princípio de funcionamento das coisas; há, no entanto, outras explicações (técnicas ou tecnológicas) a dar que contribuem tão essencialmente para a compreensão, como a parte «científica» e que são indispensáveis, de resto, a uma manipulação segura e bem sucedida.

Seguidamente (p. 16) afirma-se que as áreas educacionais, científica e tecnológica são facetas uma da outra. A Autora vê como razão única da delimitação clara entre Edu-

---

(\*) Partes deste artigo contêm comentários ou referências ao artigo «Inovações na Educação Científica e Tecnológica — Parte I», de Anabela Martins, publicada na Gazeta de Física, vol. 14, pág. 14 (1991); Vide a secção «Cartas dos Leitores», neste número da Gazeta de Física.

(\*\*) Chama-se a atenção para a parte II do artigo de Anabela Martins, Gaz. Física, vol. 14, pág. 46 (1991), contendo explicações e complementos importantes no contexto de algumas questões levantadas no presente artigo.