

PRÀCTICA V

5. CICLE D'HISTÈRESI DE MATERIALS FERROMAGNÈTICS

5.1. Fonament

En resposta a l'aplicació d'un camp magnètic \mathbf{B} a un medi material, cada element de volum dv adquireix un moment magnètic $d\mathbf{m}$. Es diu que el cos s'ha imantat, i es defineix la *densitat d'imantació*, o simplement *imantació*, com la densitat de moment:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dv}. \quad (1)$$

El cos imantat produeix, a la vegada, un camp magnètic, de manera que el camp total té una contribució del camp que hi hauria en absència de medi i una contribució deguda al fet que el cos s'hagi imantat. Per abordar matemàticament el problema, es pot definir un camp \mathbf{H} de manera que el camp \mathbf{B} es pot escriure com:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}, \quad (2)$$

on el primer terme fa referència al camp que hi hauria si no hi hagués cap medi, és a dir, el camp creat per la presència de corrents elèctrics, i el segon terme és el degut a la imantació del medi.

El camp \mathbf{H} és un camp d'utilitat tecnològica, ja que a l'interior d'un solenoide recte, amb n espirals per unitat de longitud recorregudes per un corrent d'intensitat I , tenim: $H = nI$. Aquest camp sovint rep el nom de *camp imantador*.

Segons la manera d'imantar-se, els materials es poden classificar en diamagnètics, paramagnètics i ferromagnètics.

En els dos primers tipus, la imantació pren valors molt petits, negatius en el cas dels diamagnètics i positius en els paramagnètics, i és lineal amb el camp \mathbf{H} en tots dos casos. La constant de proporcionalitat és el que s'anomena *susceptibilitat magnètica*, χ_m . La relació entre el camp \mathbf{B} i el camp \mathbf{H} també és lineal i es pot expressar com:

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H}, \quad (2)$$

on μ_r és la permeabilitat magnètica relativa del medi.

En els materials ferromagnètics, la imantació és, per a valors idèntics del camp \mathbf{H} aplicat, alguns ordres de magnitud més gran que en els paramagnètics, i presenta, a més, un comportament no lineal i irreversible caracteritzat per un cicle d'histèresi. Això fa que també el comportament del camp \mathbf{B} en funció del camp \mathbf{H} segueixi un cicle d'histèresi com el de la figura 1. De fet, en el cas de materials ferromagnètics, el camp \mathbf{H} pot negligir-se enfront de la imantació, de manera que $\mathbf{B} \approx \mu_0 \mathbf{M}$ i, per tant, els cicles $M(H)$ i $B(H)$ tenen la mateixa forma.

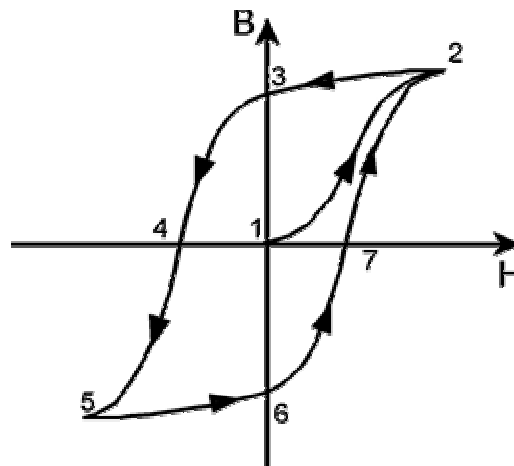


Figura 1. Corba de primera imantació i cicle d'histeresi d'un material ferromagnètic.

Quan es parteix d'una situació inicial en què el material està desimantat (punt 1 de la figura 1), el tram de corba entre els punts 1 i 2 és el que es coneix com a *corba de primera imantació*. La imantació màxima que assolix el material és el que es coneix com a *imantació de saturació* (M_S), a la qual correspon el valor B_S del punt 2 de la figura. Arribats al punt 2, en disminuir el camp H , el camp B va minvant fins a un valor B_R (punt 3), corresponent al que s'anomena *imantació romanent* (M_R). En invertir el sentit del camp H aplicat, el valor necessari d'aquest camp per assolir una imantació nul·la (punt 4) és el que s'anomena *camp coercitiu* (H_C). En el punt 5 s'arriba novament a la saturació, i el cicle es completa seguint els punts 6 i 7 fins a arribar novament al punt 2. L'àrea tancada pel cicle és l'energia dissipada pel material en el procés cíclic d'imantació a què ha estat sotmès.

La forma del cicle d'histeresi depèn tant de la composició del material com de la seva estructura: fase cristal·lina, vacants, inclusions, tensions internes i altres imperfeccions. A partir de la forma del cicle i dels valors dels paràmetres característics es pot establir una classificació dels materials ferromagnètics en materials magnèticament durs i magnèticament tous.

Els materials durs presenten cicles d'histeresi amples, amb valors elevats del camp coercitiu, que són interessants per a aplicacions com ara imants permanents o en enregistrament d'informació.

Els materials tous presenten cicles molt estrets, camps coercitius molt febles i solen tenir permeabilitat inicial (pendent de la corba de primera imantació en l'origen) elevada. Aquests materials solen emprar-se en nuclis de màquines elèctriques i de transformadors o en nuclis de sensors i actuadors.

L'objectiu d'aquesta pràctica és l'observació directa del cicle d'histeresi $B(H)$ de diferents materials en forma de barnilla a la pantalla d'un oscil·loscopi, el càlcul dels paràmetres característics dels cicles i l'obtenció de les corbes de primera imantació dels materials.

En lloc d'obtenir el cicle mitjançant l'aplicació successiva de diferents valors estacionaris de camp H , el que farem serà aplicar un camp H variable amb el temps de forma sinusoidal per obtenir el que s'anomena *cicle d'histeresi dinàmic*. Amb aquest mètode, si anem variant l'amplitud del camp altern aplicat, des de valors molt petits fins a valors necessaris per assolir la saturació, podem determinar, mitjançant la unió dels punts extrems dels cicles concèntrics situats en el primer quadrant, el que s'anomena *corba de commutació*, que, a freqüències baixes, és molt semblant a la corba de primera imantació (figura 2).

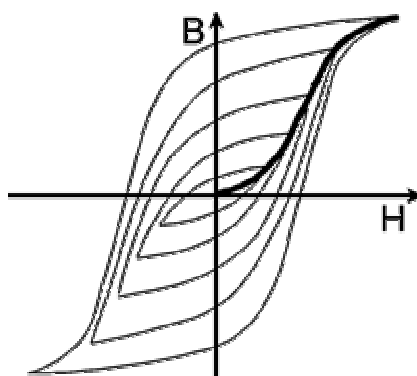


Figura 2. Determinació de la corba de commutació mitjançant l'aplicació de cicles d'histeresi amb camps aplicats creixents.

5.2. Material

- Oscil·loscopi digital de targeta Pico ADC200 connectat al port paral·lel LPT1 d'un ordinador.
- 2 solenoides de 30 cm de longitud i 1420 espises.
- 2 rodets petits idèntics de 1800 espises.
- Font de CA (0-24 V, 50 Hz), amb una resistència no inductiva en sèrie de $10\ \Omega$.
- Multímetre digital portàtil (caldrà emprar-lo com a amperímetre de corrent altern).
- Integrador format per un condensador i una resistència variables.
- 4 barnilles de 30 cm de llarg i d'1 mm de diàmetre de diferents materials, marcades amb osques en un dels extrems: ferro dolç (1), acer (2), metall μ (Ni 77/Fe 14/Cu 5/Mo 4) (3), níquel (4).

5.3. Procediment experimental

L'observació dels cicles d'histeresi a l'oscil·loscopi requereix dues tensions: l'una proporcional al camp aplicat H , i l'altra proporcional al camp B , totes dues en fase, i introduir-les respectivament als canals X(A) i Y(B) de l'oscil·loscopi. Per obtenir-les identifiqueu tots els elements del dispositiu experimental i munteu el circuit de la figura 3. En l'annex trobareu la justificació de la proporcionalitat dels dos senyals mesurats als camps H i B .

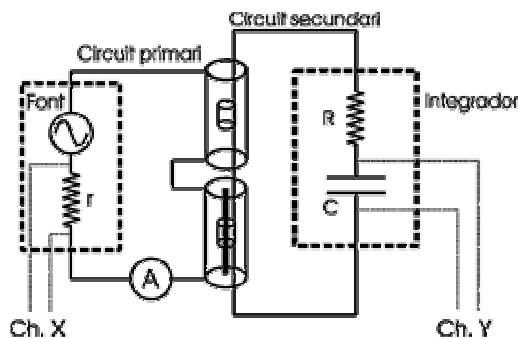


Figura 3. Esquema dels dos circuits, primari i secundari, necessaris per poder visualitzar a l'oscil·loscopi els cicles d'histeresi.

Engueu l'ordinador, alimenteu l'oscil·loscopi i obriu el programa PicoScope mitjançant la icona d'accés directe que trobareu a l'escriptori. Seleccioneu la vista en mode X-Y (menú *Ver*). Atès que la freqüència dels cicles d'histèresi serà de 50 Hz, caldrà triar una base de temps de 20 ms per tenir un sol cicle quan guardeu les dades.

Connecteu la tensió que cau a la resistència r a l'entrada A de l'oscil·loscopi (corresponent al canal X) i la tensió als extrems del condensador de l'integrador a l'entrada B (corresponent al canal Y). Seleccioneu el mode de treball DC per a tots dos canals.

Situeu un dels rodets a l'interior d'un dels solenoides i manteniu l'altre rodet fora de l'altre solenoide. Feu circular un corrent pel circuit primari inferior a 1 A. Amplificant al màxim el canal X de l'oscil·loscopi i seleccionant una amplificació adient per al canal Y, observeu la figura obtinguda a l'oscil·loscopi en mode X-Y.

Introduïu l'altre rodet a l'interior de l'altre solenoide i varieu-ne la posició. Observeu l'efecte sobre la representació a la pantalla de l'ordinador. Ajusteu la posició del rodet fins que obtingueu una recta horitzontal.

Introduïu una de les mostres al rodet situat a l'interior d'un dels solenoides. Optimitzeu els valors de C i R per tal d'obtenir una bona integració i poder observar el cicle d'histèresi a la pantalla de l'ordinador. Anoteu els valors emprats de C i R . Per gravar en un arxiu les dades, el més còmode és anar al menú *Edit* i seleccionar *Copiar como texto*. Obriu el programa Excel i en un full de càlcul nou seleccioneu *Pegar* dintre del menú *Editar*. Observareu tres columnes de dades: la primera és el temps; la segona, la lectura del canal A; i la tercera, la del canal B. Analitzeu els valors de les dades gravades per establir les unitats en què estan expressades. Posteriorment haureu de relacionar els valors d'aquestes tensions amb els dels camps magnètics H i B .

Varieu l'amplitud del camp H modificant la tensió subministrada per la font des de zero fins al valor necessari per assolir la saturació (vigileu que el corrent no superi 1 A) i obteniu diversos cicles concèntrics amb amplituds creixents. Per a cadascun dels cicles determineu els valors de les tensions corresponents als màxims de H i B mitjançant els cursors que podeu fer aparèixer a la pantalla amb el ratolí. A partir de les parelles de valors corresponents als extrems dels successius cicles podreu traçar la corba de commutació.

Repetiu el procediment anterior per a les altres mostres. Reajusteu, si cal, els valors de C i R per obtenir una bona integració.

A partir dels fitxers de dades corresponents a les tensions mesurades als dos canals de l'oscil·loscopi, efectueu les transformacions adients per obtenir dues columnes amb els valors de H i B (vegeu l'annex).

5.4. Elaboració de l'informe

1. Escriviu una introducció d'aproximadament mitja pàgina en què s'expliqui l'objectiu de la pràctica i es descrigui el mètode emprat.
2. Representeu gràficament els cicles d'histèresi corresponents a la màxima amplitud del camp aplicat observats a l'oscil·loscopi. Indiqueu clarament les escales i les unitats corresponents als eixos B i H .
3. A partir de les mesures dels cicles concèntrics amb camps creixents representeu a les gràfiques anteriors les corbes de commutació de les quatre barnilles. Feu una estimació del pendent d'aquestes corbes a l'origen i discutiu-ne el significat.
4. Presenteu en una taula els valors dels paràmetres característics dels cicles dels quatre materials.
5. Discutiu breument les propietats magnètiques dels materials estudiats i les possibles aplicacions de cadascun d'ells.

5.5. Qüestions

5.1. A partir dels resultats obtinguts, justifiqueu numèricament que l'aproximació $B \approx \mu_0 M$ és força acurada. Expliqueu quina diferència hi ha entre la forma dels cicles $M(H)$ i $B(H)$.

5.2. Demostreu que l'àrea tancada per un cicle d'histeresi (dimensionalment correspon a un producte $B \cdot H$) té dimensions d'energia per unitat de volum. Feu una estimació de l'energia dissipada en un cicle per a cadascun dels materials.

ANNEX. Fonament del mètode de mesura

Com ja s'ha dit anteriorment, l'observació del cicle d'histèresi a l'oscil·loscopi requereix l'obtenció de dues tensions: l'una proporcional al camp aplicat H , i l'altra proporcional al camp B a l'interior del medi.

La tensió proporcional al camp aplicat H s'obté fàcilment intercalant una resistència coneguda al circuit primari (en el nostre cas $r = 10 \Omega$) i mesurant-ne la caiguda de tensió, que és proporcional al corrent que circula pels solenoides del circuit primari ($V_r = rI$). Utilitzant l'aproximació d'un solenoide indefinit, el camp creat a l'interior del solenoide en circular-hi un corrent d'intensitat I és $H = nI$, on n és el nombre d'espises per unitat de longitud del solenoide. Així, la tensió que cau en la resistència r pot relacionar-se amb el camp aplicat segons:

$$V_r(t) = \frac{r}{n} H(t). \quad (\text{A1})$$

El mètode per a l'obtenció de la tensió proporcional a la inducció magnètica es basa en la mesura de la tensió induïda en un circuit en variar amb el temps la imantació del material. En el circuit secundari emprat, la tensió entre els extrems de l'integrador és:

$$V_{RC} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (\text{A2})$$

on Φ és el flux magnètic induït en el circuit. Aquest flux val:

$$\Phi(t) = B(t) S N, \quad (\text{A3})$$

en què S és la secció de la barnilla; N , el nombre d'espises del rodet, i $B(t)$, el camp magnètic en la barnilla.

Per tant, la tensió que apareix entre els extrems de l'integrador és:

$$V_{RC} = -N S \frac{dB(t)}{dt}. \quad (\text{A4})$$

Aquesta tensió també la podem escriure com:

$$V_{RC} = R I(t) + \frac{Q(t)}{C}. \quad (\text{A5})$$

Per a valors prou grans de C i R , tindrem que:

$$V_{RC} = R I(t). \quad (\text{A6})$$

En aquestes condicions, la tensió entre les armadures del condensador del circuit integrador és:

$$V_C(t) = \frac{Q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt \approx \frac{1}{RC} \int_0^t V_{RC}(t) dt. \quad (\text{A7})$$

Si substituïm V_{RC} per la seva expressió en termes de B , finalment s'obté:

$$V_C(t) = \frac{N S}{RC} B(t). \quad (\text{A8})$$