

7 ESTUDI DE MATERIALS FERROMAGNÈTICS

Resum. Els materials ferromagnètics admeten una imantació molt elevada. Una de les característiques singulars de la imantació dels materials ferromagnètics és que la seva dependència amb el camp aplicat té forma de cicle d'histèresi. En aquesta pràctica s'obté el cicle d'histèresi d'una vareta d'acer. Posteriorment, i analitzant el cicle obtingut, es mesuren el camp coercitiu, el romanent i el de saturació per al material estudiat.

7.1 Fonament

7.1.1 Imantació d'un medi material

Un material està imantat -o magnetitzat- quan els seus elements de volum, dV , es comporten com a petits imants, és a dir presenten un cert moment magnètic, dm . La magnitud física que dóna compte d'aquest comportament és la densitat volúmica de moment magnètic, M (també anomenada imantació o magnetització), que es defineix com:

$$M = \frac{d\mathbf{m}}{dV} \quad (1)$$

La imantació és de caràcter vectorial i les seves unitats, en el sistema internacional, són $[M] = A/m$. La causa més important, i habitual, que imanta un cos material és l'aplicació d'un camp magnètic, B_A .

7.1.2 Comportaments magnètics notables

Els comportaments més destacats en l'estudi del magnetisme dels medis materials són el *diamagnetisme*, el *paramagnetisme*, el *ferromagnetisme*, el *ferrimagnetisme* i l'*antiferromagnetisme*.

7.1.3 Característiques físiques del ferromagnetisme

Els materials ferromagnètics més coneguts són: el ferro, alguns acers, el cobalt, el níquel, i alguns aliatges metàl·lics que contenen metalls de terres rares. Les característiques d'aquest comportament són:

- Els valors de M són molt elevats (tot i que el camp, B_A , que s'aplica per imantar el medi material sigui poc intens).
- La dependència de M amb el camp imantador aplicat, B_A , no és lineal, sinó que presenta forma de cicle d'histèresi i pot presentar una imantació romanent (figura 1).
- El fenomen -valors elevats de M i cicle d'histèresi- es dóna per sota d'una certa temperatura, que és característica de cada material, i que rep el nom de temperatura de Curie, T_C . Per sobre T_C el comportament del medi és paramagnètic.

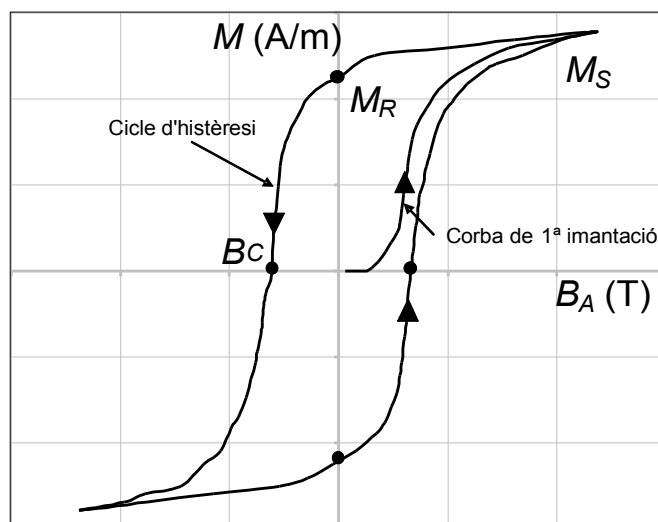


Figura 1. Cicle d'histèresi i corba de primera imantació.

7.1.4 Cicle d'histèresi

El cicle d'histèresi (figura 1) d'un material ferromagnètic mostra la dependència entre el camp B_A que li apliquem i la imantació, M , que adquireix. En la gràfica s'ha marcat, mitjançant unes fletxes, el sentit antihorari, que correspon a la seqüència en la que s'obtenen els diferents punts del cicle quan es varia B_A .

En relació al cicle d'histèresi destaquem que:

- Com s'ha indicat, M depèn del camp aplicat, però també del valor anterior de la imantació (“història” magnètica de la mostra).
- Podem tenir la mostra imantada, $M \neq 0$, tot i que $B_A = 0$. Aquesta imantació, sense camp aplicat, rep el nom d'imantació romanent, M_R .
- La mostra desimantada, $M = 0$, s'obté quan se li aplica un camp B_C , anomenat camp coercitiu.
- Un paràmetre important d'un cicle d'histèresi és la seva amplada, donada pel valor de $|B_C|$. Si $|B_C|$ és gran, el cicle és ample i es diu que el material és *magnèticament dur*. Aquests materials costa de desimantar-los, i això els fa adequats per a la fabricació d'imants permanents. Contràriament, si $|B_C|$ és petit, es diu que el material és *magnèticament tou*. Aquests materials no queden imantats permanentment, i això els fa adequats per a la fabricació de motors elèctrics i de nuclis de transformadors i d'electroimants.
- El cicle presenta uns trams horitzontals, en els quals, tot i que augmentem B_A , el mòdul de la imantació ja és el màxim possible. Aquest valor rep el nom d'imantació de saturació, M_S .

7.1.5 Corba de primera imantació

També és possible començar amb una mostra que no té camp aplicat ($B_A = 0$) i que està desimantada ($M = 0$). Si, a partir d'aquest punt, s'augmenta B_A , s'obté el que es coneix com a *corba de primera imantació*.

7.1.6 Fonament del dispositiu experimental: aplicació del camp imantador, B_A

En els apartats anteriors hem suposat que B_A era conegut i amb el mateix valor en tots els punts de la mostra (camp uniforme). Això s'aconseguirà, en aquest estudi, fent servir un solenoide recte, amb n espires per unitat de longitud. Si per elles circula un corrent, I , el camp al seu interior val:

$$B_A = \mu_0 n I \quad (2)$$

on μ_0 és la permeabilitat magnètica del buit i val $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m en el SI.

7.1.7 Fonament del dispositiu experimental: procediment de mesura de la imantació

- La mostra que estudiarem té geometria de vareta recta i prima.
- El valor de M s'obté a partir de la mesura del camp magnètic que, en un cert punt de l'espai, crea la mostra imantada.
- Per a desenvolupar aquest procediment, cal saber quina relació analítica hi ha entre la imantació, M , que presenta la vareta i el camp, B_M , que crea.

7.1.8 Fonament del dispositiu experimental: camp que crea la vareta imantada

Les analogies que hi ha entre les equacions dels camps elèctrics estàtics i dels camps magnètics estàtics creats per imants permeten de calcular, de forma senzilla i a partir del formalisme de l'electrostàtica, el camp creat per la vareta imantada. En una primera etapa, es calcula el camp elèctric creat en un punt de coordenades $(d,0,0)$ per un sistema de dues càrregues puntuals ($+q$ situada al punt $(0,0,0)$ i $-q$ situada al punt $(0,0,L)$):

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{d^2} - \frac{qd}{(L^2+d^2)^{3/2}} \right) \\ E_z &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(0 + \frac{qL}{(L^2+d^2)^{3/2}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

on L és la distància entre les càrregues.

El camp magnètic s'obté quan, en aquestes expressions, es substitueix ϵ_0 per I/μ_0 i q pel producte $S \cdot M$, on S és la secció de la vareta i M la seva imantació (L és ara la longitud de la vareta):

$$\begin{aligned} (B_M)_x &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{SM}{d^2} - \frac{SMd}{(L^2+d^2)^{3/2}} \right) \\ (B_M)_z &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left(0 + \frac{SML}{(L^2+d^2)^{3/2}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Finalment, per la geometria donada i a partir de $(B_M)_x$ es determina el valor de la M que l'ha creat:

$$M = \frac{4\pi}{\mu_0} (B_M)_x \left(\frac{S}{d^2} - \frac{Sd}{(L^2+d^2)^{3/2}} \right)^{-1} \quad (5)$$

7.1.9 Fonament del dispositiu experimental: disposició geomètrica i obtenció de M

El dispositiu experimental es basa en superposar el camp B_M a un camp magnètic conegut, que no és altre que la component horitzontal del camp magnètic de la Terra, B_{0h} , i obtenir, amb una

brúixola, la direcció de la resultant d'aquesta superposició (figura 2). Cal tenir present que:

- La vareta es situa verticalment (direcció z)
- La brúixola solament gira en el pla horitzontal, motiu pel qual s'orienta segons: $\mathbf{B}_{Mh} + \mathbf{B}_{oh}$.
- La disposició geomètrica es fixa de forma que \mathbf{B}_{Mh} i \mathbf{B}_{oh} tinguin, respectivament, la direcció de l'eix x i la de l'eix y . Això farà que, si θ és l'angle que es forma entre la direcció que assenyalava la brúixola i la direcció de \mathbf{B}_{oh} , llavors:

$$(B_M)_x = |\mathbf{B}_{Mh}| = |\mathbf{B}_{oh}| \tan \theta \quad (6)$$

- Quan aquest valor de $(B_M)_x$ s'introdueix en l'expressió (5) s'obté la M de la vareta en funció de l'angle indicat per la brúixola:

$$M = \frac{4\pi}{\mu_0} |\mathbf{B}_{oh}| \left(\frac{S}{d^2} - \frac{Sd}{(L^2 + d^2)^{3/2}} \right)^{-1} \tan \theta \quad (7)$$

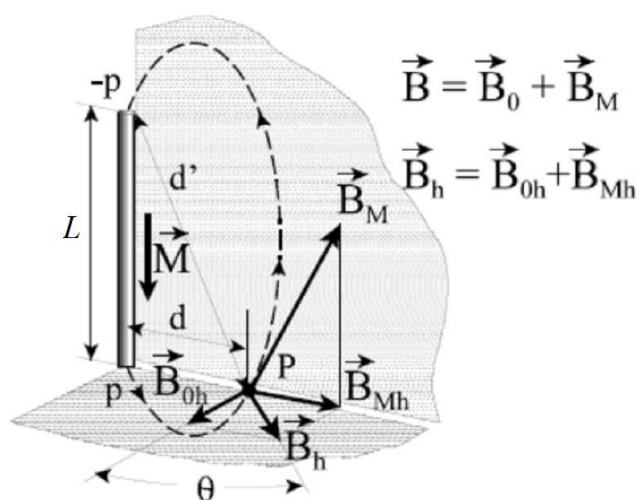


Figura 2. Camps magnètics presents en el punt P. Els pols magnètics (MS) es representen mitjançant la lletra p.

7.2 Dispositiu experimental

- Font d'alimentació de corrent continu, de fins a 2 A, regulable en intensitat, i que incorpora un amperímetre digital.
- Un magnetòmetre que conté els següents elements:
 - Un solenoide recte, Σ_1 , d'eix vertical i amb $n = 2200$ espires/metre, que està obert per la part superior per poder-hi introduir les mostres ferromagnètiques,.
 - Una brúixola muntada sobre un carril que permet variar la distància que la separa del solenoide vertical. Aquest carril incorpora un índex que assenyalava, sobre un regle, quina és la distància solenoide/brúixola.
 - Un segon solenoide, Σ_2 (etiquetat C), d'eix horitzontal, connectat en sèrie amb Σ_1 .
- Mostra ferromagnètica a estudiar, que és d'acer i té forma de vareta prima, de longitud $L = 0.30$ m i secció $S = 1.13 \cdot 10^{-6}$ m².

- El sistema de mesura aprofita l'acció que fa la component horitzontal del camp magnètic de la Terra, que en el laboratori val $|\mathbf{B}_{0H}| = 2,5 \cdot 10^{-5}$ T

7.3 Procediment experimental

7.3.1 Preparació

Durant tota la pràctica procureu mantenir allunyats del sistema tots els objectes que continguin materials ferromagnètics.

- Situeu la brúixola a una distància d (no gaire gran) de l'eix del solenoide.
- Anoteu la distància d .
- Amb la font d'alimentació desconnectada, orienteu la plataforma de tal manera que l'agulla llarga apunti a l'eix del solenoide i gireu l'escala graduada fins que l'agulla assenyali el zero.
- Connecteu la font d'alimentació i feu passar per Σ_1 un corrent $I = 2$ A.
- Desplaceu el solenoide Σ_2 fins que l'agulla de la brúixola torni a marcar zero. Anul·leu la intensitat del solenoide amb el limitador d'intensitat.
- Introduïu la vareta dins el solenoide Σ_1 .

7.3.2 Procés de desimantació de la mostra

- Variant la intensitat del solenoide (partint sempre de valors baixos) i variant si cal el sentit del corrent, procureu que $M(B_A)$ de la mostra se situï en el punt B_C (figura 1) (sabem que $M = 0$ quan l'agulla de la brúixola assenyala el zero). Llavors, retireu la mostra.
- Anul·leu la intensitat del solenoide amb el limitador d'intensitat.
- Comproveu que la mostra està desimantada introduint-la novament a l'interior del solenoide i observant que l'agulla no es desvia. Si es desvia, torneu a desimantar la mostra.

7.3.3 Obtenció de la corba de primera imantació

Torneu a introduir la mostra en el solenoide. Augmenteu el corrent del solenoide en petits intervals fins a $I = 2$ A (els intervals corresponents a les intensitats més altes en la regió de saturació de la imantació poden ser més espaiats) i anoteu la desviació corresponent $\theta(I)$ de l'agulla de la brúixola. La intensitat sempre ha d'anar augmentant.

7.3.4 Obtenció del cicle d'histèresi

Variant la intensitat del corrent i també el sentit anoteu la col·lecció de valors $\theta(I)$ corresponents a un cicle d'histèresi complet. La seqüència que heu de seguir, a partir de $I = 2$ A, és doncs: disminució de I fins a $I = 0$, canvi del sentit de corrent, augment de I fins a $I = 2$ A, disminució fins a $I = 0$, canvi del sentit del corrent, i augment fins a $I = 2$ A.

Cal que tingueu present que prop del camp coercitiu (B_C) la variació que experimenta la imantació (i, per tant, també l'angle θ que mesurem) és molt ràpida. Per tant, caldrà que els intervals d'intensitat siguin petits en aquesta regió. La millor manera d'assegurar que ho estem fent

correctament és variar molt acuradament la intensitat del solenoide tot observant l'agulla, i anotant el corresponent punt $\theta(I)$ si l'angle ha variat prou (són suficients un parell o tres de graus).

7.4 Realització de l'informe

En el full del laboratori:

- (a) Per al valor de d utilitzat per vosaltres, calculeu numèricament el valor de:

$$\frac{4\pi}{\mu_0} |B_{oh}| \left(\frac{S}{d^2} - \frac{Sd}{(L^2 + d^2)^{3/2}} \right)^{-1} \quad \text{que apareix a l'expressió (7).}$$

- (b) Dibuixeu la corba de primera imantació i el cicle d'histèresi de la vareta analitzada en una gràfica $M(B_A)$.

Contesteu en un full apart:

- (c) Compareu la gràfica obtinguda amb la que ja està dibuixada en el full d'informe. Quina és magnèticament més dura?
- (d) Perquè l'imant de la brúixola és tant curt?
- (e) Se sap que dins dels materials imantats, el valor del camp magnètic és aproximadament $B = \mu_0 M$. Calculeu el camp B dins del material imantat (per exemple per a la imantació de saturació) i compareu-los amb altres valors de camp magnètic obtinguts en pràctiques anteriors.
- (f) A partir de l'experiència quotidiana indiqueu si l'acer inoxidable és ferromagnètic. Quin experiment senzill podríeu fer per saber-ho?