

## ELS MODERNS MATERIALS MAGNETICS

**E**N qualsevol indústria elèctrica és necessari emprar sovint peces de ferro al voltant de les quals es col·loquen bobines formades de fil de coure per on passa el corrent elèctric, i, d'aquesta forma, produir un camp magnètic determinat. Hom sap que tot conductor travessat per un corrent elèctric adquireix la *virtut elèctrica*—com anomenà ARAGÓ<sup>1</sup> la propietat del corrent de crear un *camp magnètic* a l'entorn del conductor i en tota la seva longitud—i que aquesta virtut s'augmenta extraordinàriament “sumant” els efectes de diversos conductors elementals: d'això naixeren les *bobines*. El camp magnètic així obingut s'augmenta, encara, fent que el *flux* produït pel corrent tingui un camí fàcil o *permeable*, i, a tal efecte, hom empra el ferro, metall altament apte al fenomen d'imantació. Aquestes peces de ferro anomenades *nuclis* poden ésser d'una sola peça o de planxes primes apilades de forma convenient. El motiu de fer els nuclis de planxes primes, rarament de gruix superior a 0,5 mm, obeeix a la necessitat d'evitar en la massa la formació de corrents paràsits que gasten energia elèctrica sense profit.

No és cap secret per als electricistes que després d'un temps de passar un corrent elèctric per una bobina amb nucli de ferro, aquest s'escalfa de manera notable i, àdhuc, pot assolir temperatures perilloses per a les parts no metàl·liques de la màquina. Descartant l'*efecte Joule*<sup>2</sup>, comú a tot cos travessat pel corrent elèctric i que consisteix en la conversió de l'electricitat en calor, hom constata en el ferro una *resistència*—inèrcia— a deixar-se imantar amb la rapidesa del pas del corrent a través del conductor magnetitzant. En virtut d'aquest fenomen, anomenat *histèresi*, la quantitat de magnetisme induït és menor que el corresponent a la força magnetitzant; la diferència entre el magnetisme induït i l'inductor—treball en fi—es transforma en corrents elèctrics induïts en la massa metàl·lica, els quals provoquen l'escalfament del ferro per efecte Joule. Tota variació de corrent en un conductor determina instantàniament una variació del flux magnètic que l'envolta i aquesta variació de flux provoca corrents

<sup>1</sup> Domènec Francesc ARAGÓ, nat l'any 1786 prop de Perpinyà; erudit i home d'Estat, cèlebre, principalment, pels seus treballs en la física i, de manera remarcable, en la determinació del “metre”, base del nostre sistema de mesures “decimal”.

<sup>2</sup> Jacob JOULE, va néixer a Salford (Anglaterra) el 24 de desembre de l'any 1818. Ell establí la llei de la producció de calor pel pas d'un corrent elèctric.



elèctrics en totes les masses metàl·liques travessades pel flux magnètic. Els corrents així produïts es propaguen en sentit perpendicular al sentit del flux magnètic que els engendra; dit d'altra manera: els corrents d'inducció (puix a això és deguda l'aparició dels corrents paràsits) tenen sempre direcció oposada als corrents generadors, d'acord amb la *lleï de Lenz*<sup>3</sup>, ço que equival a dir que si el corrent de la bobina magnetitzant va en el sentit de les agulles del rellotge (= dextorsum), el corrent induït en el ferro tindrà direcció contrària (= sinixtorsum). No cal, de moment, entrar en altres consideracions.

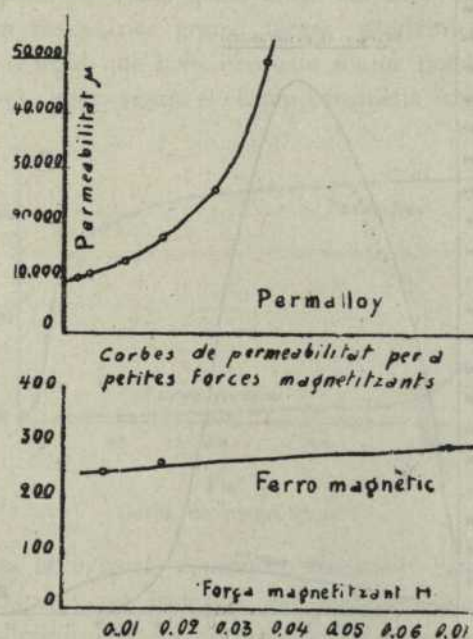


Fig. 1

Com que tot corrent elèctric necessàriament té de produir un treball equivalent al seu valor intrínsec, el corrent induït en un nucli es transformarà en calor, com ja deixem dit, o sigui en pura pèrdua; d'ací ve la necessitat de formar els nuclis de ferro—en el sentit de llur major dimensió, la llargada, que coincideix precisament amb la direcció del flux—de fulles primes recobertes de paper per una cara, o bé vernissades, i d'aquesta manera reduir la massa transversal a una reunió de porcions minses que intercepten el camí de propagació dels corrents paràsits. D'aquesta

<sup>3</sup> Enric Frederic Emili LENZ, naixé a Depart (Alemanya) l'any 1804 i morí a Roma l'any 1865. Fou professor de física a la Universitat de Petrograd (avui Leningrad).

guisa, hom evita bastant la pèrdua d'energia per *corrents de Foucault*<sup>4</sup>— així denominats per haver estat aquest físic el primer a donar una explicació raonada del fenomen—. Val a dir ara que, en molts casos, és convenient de provocar, en lloc d'evitar, el fenomen de corrents de Foucault; tal és, per exemple, el cas dels frens que duen nombre d'aparells de mesura elèctrics, per evitar o esmorteir oscil·lacions mecàniques dels sistemes mòbils.

Hem parlat de la forma de reduir les pèrdues per corrents paràsits i

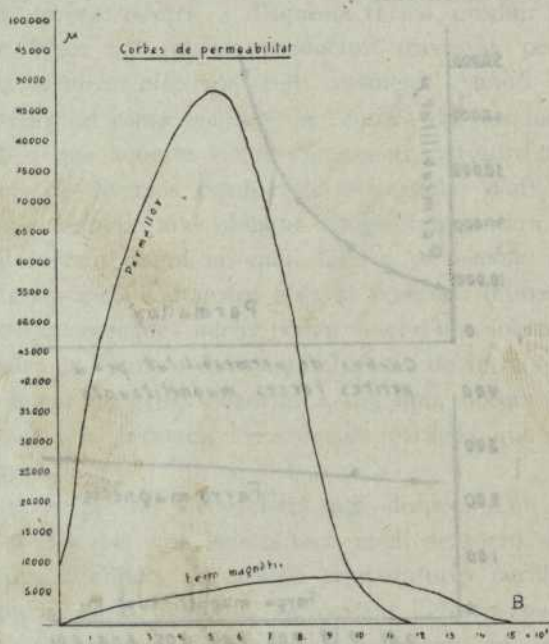


Fig. 2  
Corbes completes de permeabilitat

hem vist que la reducció és obtinguda per la simple formació dels nuclis amb fulles primes, puix que les pèrdues per corrents de FOUCAULT creixen amb el gruix de la planxa emprada. Ara ens cal veure la reducció de l'efecte d'histèresi.

Hom sap que per mantenir una inducció donada, caldrà produir una força magnetitzant determinada. Hi han ferros que requereixen major força magnetitzant que altres per a un camp d'igual intensitat. Aquesta

<sup>4</sup> LLEÓ FOUCAULT, metge i notable físic francès. Inventà, en 1850, el cèlebre pèndol amb el qual demostrà experimentalment la rotació de la terra; fou el primer a idear un mecanisme automàtic regulador de l'encesa dels "arcs voltaics" tan usats fins 1914.



diferència de força magnetitzant ve imposada per la *resistència magnètica* o *reluctància* dels ferros, la qual és inversament proporcional a llur permeabilitat  $\mu$ . Aquesta arriba a valors altes amb induccions baixes; però disminueix ràpidament a mesura que augmenta la inducció. De forma que hom arriba a un límit, passat el qual la inducció s'estaciona, enc que la força magnetitzant augmenti fortament. Aleshores hom diu que el ferro està *saturat*. Aquesta saturació és encalçada, amb bones planxes magnètiques, vers els 22000 gauss per cmq, però rarament hom depassa en la pràctica les induccions de 15000 gauss/cmq. Cal tenir en compte—com ha estat dit—que són necessàries grans forces magnetitzants per obtenir grans induccions, o sigui que hom necessita major nombre d'amper-voltes específics com més gran sigui el camp magnètic requerit. A mesura

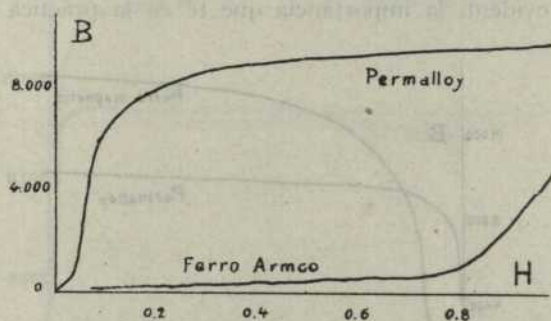


Fig. 3  
Corba de magnetització

que hom augmenta la inducció específica, augmenta també la pèrdua per corrents de FOUCAULT i per histèresi, car ambdues són directament proporcionals a la inducció, com es desprèn de les fórmules següents <sup>5</sup>:

*Pèrdua per histèresi*

$$E_h = \sigma_h \frac{f}{100} \left( \frac{B}{1000} \right)^{1.6} V \quad \text{watt}$$

$$\sigma_h = \frac{\eta}{0,0016} \approx 0,8 \text{ a } 1$$

$f$  = freqüència.

$\eta$  = coeficient de STEINMETZ <sup>6</sup> variable amb la qualitat del material

<sup>5</sup> HÜTTE. Vol. II, pàg. 1006.

<sup>6</sup> Carles Proteus STEINMETZ, nat a Breslau (Alemanya) el 9 d'abril de l'any 1865. Donà un gran impuls a l'electrotècnia contribuint eficaçment a la matematització de l'electricitat, principalment en l'estudi dels corrents alternatius i de les altes tensions.

magnètic i comprès entre 0,0015, per al ferro dolç, i 0,03 per al níquel.

$B$  = inducció específica.

$V$  = volum del material magnètic en  $\text{dm}^3$ .

*Pèrdua de FOUCAULT*

$$E_v = \sigma_v \left( \delta \frac{f}{100} \frac{B}{1000} \right)^2 V \quad \text{watt}$$

on  $\sigma_v = 1,0$  a  $1,5$

$\delta$  = gruix de la planxa en mm.

els símbols restants com a la fórmula anterior.

És, doncs, evident, la importància que té en la pràctica la reducció de

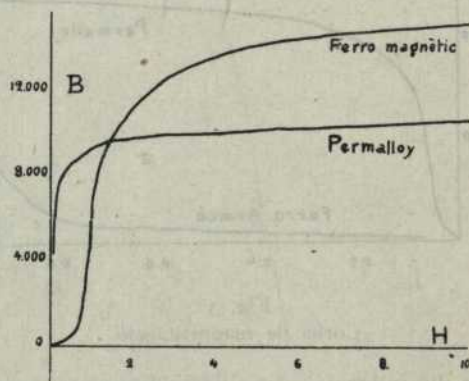


Fig. 4  
Corba de magnetització

les causes de la pèrdua i això justifica els esforços dels especialistes vers la descoberta de nous materials magnètics, que en acostar-se el més possible al material ideal de pèrdues nulles, millorin les condicions de treball de les màquines elèctriques i quedi reduït, per tant, el preu de fabricació i d'entreteniment, principalment tractant-se de màquines de corrent alternatiu i de dispositius i mecanismes sotmesos a fortes variacions de flux magnètic.

\* \* \*

Repetidament hem dit que la matèria preferentment emprada en la construcció de nuclis magnètics era el ferro i en les màquines de qualitat, el ferro suec. La causa d'usar preferentment el ferro suec resideix en la



major puresa d'aquest ferro, el qual assoleix alta permeabilitat—o sigui reducció de reluctància— que permet, no solament reduir les pèrdues per histèresi i corrents paràsits, sinó un notable estalvi de coure en la construcció dels debanats, per raó del menor nombre d'amper-voltes requerits per a una inducció determinada. Malgrat els nous procediments d'obtenció de ferros econòmics—Bessemer, Thomas i Siemens-Martin—ha calgut subjectar-se al caríssim procediment d'obtenció del ferro suec—que en fi de comptes és el procediment antigüíssim de "farga catalana"<sup>8</sup>—, car resultava *més econòmic* que la construcció de màquines amb ferro d'inferior qualitat. El ferro suec, però, no dóna, encara, satisfacció per a mol-

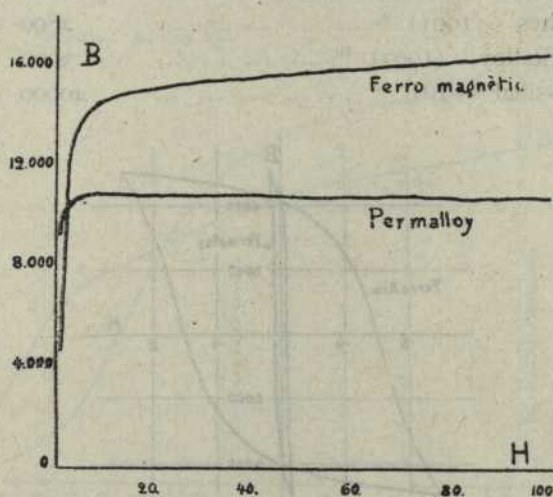


Fig. 5  
Corba de magnetització

tes aplicacions elèctriques—en telegrafia i corrent d'altíssima freqüència, per exemple—i ha calgut dirigir els treballs de recerca vers altres viarans per tal de resoldre tan important problema.

Des del començament del present segle, hom ha estudiat sistemàticament la manera d'obtenir materials magnètics quasi perfectes partint de la idea que aquests forçosament havien d'ésser fornits per aliatges a base de ferro, donat que cap dels cossos simples magnètics no és capaç, de bon tros, d'acomplir totes les condicions exigibles a un bon material aplicable a tots els usos de la moderna indústria elèctrica.

Hom havia observat, a les darreries de la dinovena centúria, que l'addició de níquel a un ferro magnètic augmentava extraordinàriament la permeabilitat i que aquesta variava amb la proporció del níquel. Això féu

<sup>8</sup> "Química General", per J. R. de LUANCO.

pensar, de seguida, en la possibilitat de trobar una proporció òptima que donés el grau adequat de permeabilitat al metall binari ferro-níquel. Abans, però, d'assajar les mescles de ferro i níquel, hom havia experimentat amb el grup silici-ferro arribant a fer molt diverses combinacions de les quals citem les següents:

MATERIAL	Permeabilitat màxima $\mu$	Histeresi en ergs per cm <sup>2</sup> /període $B = 10.000$
Ferro suec (terme de comparació) ... ..	2800	3400
Aliatge "Lowhys" (1901) <sup>9</sup> ... ..	2800	3400
Acer silícic "Stalloy" (1903) <sup>10</sup> ... ..	3600	2100
Aliatge ferro-silici (1916) <sup>11</sup> ... ..	40000	300

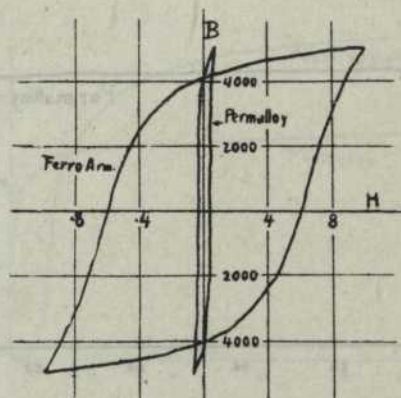


Fig. 6  
Corbes d'histerèsi

Els notables resultats obtinguts amb els aliatges esmentats, principalment amb l'últim, han estat encara superats amb la felicitat troballa dels aliatges ferro-níquel coneguts amb el nom de *Permax* <sup>12</sup>, a França, i *Permalloy* <sup>13</sup> a Anglaterra.

El Permalloy, o sigui "aliatge permeable", està compost de 78,5 % de níquel i 21,5 % de ferro i té la notabilíssima propietat de no perdre les seves qualitats magnètiques ni a temperatures superiors a 800°C i, per tant, queda suprimit el "mòdul d'envelliment" de les planxes magnèti-

<sup>9</sup> *The Electrical Journal*, març 1921.

<sup>10</sup> Patent Hadfield americana.

<sup>11</sup> Laboratori de Recerques Westinghouse.

<sup>12</sup> *Jour. de Phys.*, setembre 1925.

<sup>13</sup> *Electrical Communication*, abril 1924.



ques. Hom sap que el ferro deixa d'ésser magnètic a temperatura ca. 725°C i no reprèn la seva facultat magnètica fins refredat quasi a la temperatura ambient; i, encara aleshores, hom constata una notable pèrdua de la seva susceptibilitat magnètica o sigui que *ha envellit*.

De la diversitat de mostres fetes per tal de determinar la proporció millor del Permalloy, sembla que és l'emprada en la construcció d'aparells telefònics i cables telegràfics i és la que correspon a l'anàlisi de la mostra

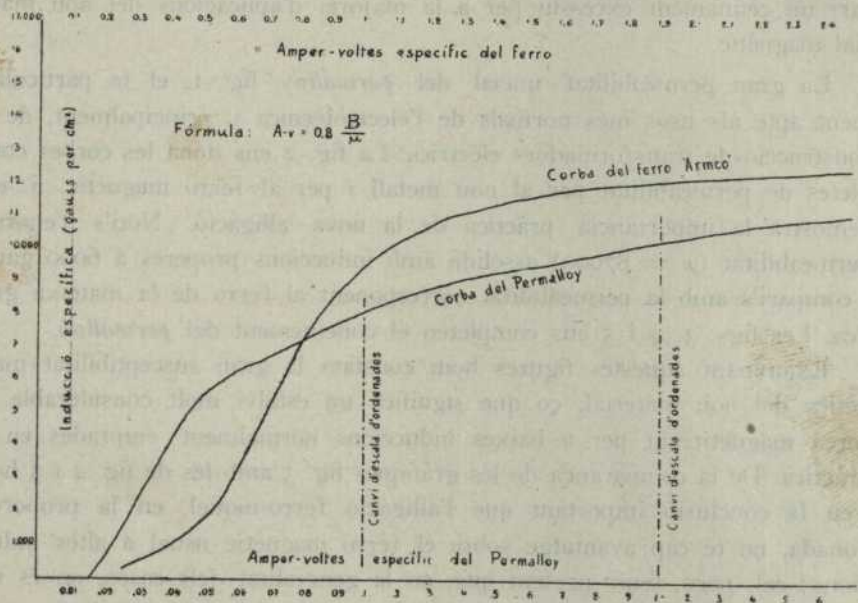


Fig. 7  
Corbes obtingudes amb les dades de la fig. 2

següent, obtinguda per la mescla de níquel comercial i ferro de dinamos fosos íntimament en el forn d'inducció "Northrup": :

Níquel	Ni	78,23
Ferro	Fe	21,35
Carbó	C	0,04
Silici	Si	0,03
Plom	P	traces
Sofre	S	0,035
Manganès	Mn	0,22
Cobalt	Co	0,37
Coure	Cu	0,10



Els altres components diferents del ferro i del níquel han estat trobats, naturalment, després de la preparació. D'aquestes impureses, és principalment perjudicial el carboni i hom cerca d'eliminar-ne tot vestigi per mitjà de tractaments especials ja emprats habitualment en la preparació del ferro magnètic. Hom ha constatat, però, que el tractament tèrmic perllongat, que sempre resulta car, no surt tan a compte com la presència d'aquestes petites impureses dins l'aliatge, donat que no és necessari un refinament excessiu per a la majoria d'aplicacions del nou material magnètic.

La gran permeabilitat inicial del *permalloy*, fig. 1, el fa particularment apte als usos més normals de l'electrotècnica i, principalment, de la construcció de transformadors elèctrics. La fig. 2 ens dóna les corbes completes de permeabilitat per al nou metall i per al ferro magnètic, i ens demostra la importància pràctica de la nova al·ligació. Noti's l'enorme permeabilitat ( $\mu = 87000$ ) assolida amb induccions properes a 6000 gauss i compari's amb la permeabilitat corresponent al ferro de la mateixa gràfica. Les figs. 3, 4 i 5 ens completen el coneixement del *permalloy*.

Examinant aquestes figures hom constata la gran susceptibilitat magnètica del nou material, ço que significa un estalvi molt considerable de força magnetitzant per a baixes induccions normalment emprades en la pràctica. De la comparança de les gràfiques fig. 3 amb les de fig. 4 i 5 hom treu la conclusió important que l'al·ligació ferro-níquel, en la proporció donada, no té cap avantatge sobre el ferro magnètic usual a altes induccions; cal, però, tenir present que, en la generalitat dels casos, no és necessari forçar les seccions de nucli amb el nou aliatge, com cal fer amb el ferro per raó d'economia en la fabricació, pel motiu que, amb el *permalloy*, hom guanya amb escreix el major cost d'aquest amb l'economia important de coure que significa el petit valor d'amper-voltes requerit per a una mateixa inducció (fig. 7), sempre que aquesta es trobi, per al *permalloy*, en la regió òptima de permeabilitat; hom guanya, també, el major cost dels nuclis de *permalloy*, amb el major rendiment elèctric de la màquina construïda amb la nova al·ligació, per motiu de la disminució de la importància del treball del cicle d'histeresi, fig. 6, i, per tant, del calor perdut per aquesta causa. La pèrdua per histeresi, deduïda d'aquesta gràfica, és 30 vegades menor per al *permalloy* que la corresponent al ferro de la mateixa gràfica; i en igual relació es troben el nombre d'amper-voltes requerides per produir la inducció màx. de 5000 gauss/cm que marca el punt de retrocés del cicle d'histeresi.

Pel que acabem de veure, les al·ligacions magnètiques al ferro-níquel

