

Els líquids magnètics, què són i per a què serveixen

Xavier Bohigas* Departament de Física i Enginyeria Nuclear de la U.P.C.

Xi-Xiang Zhang† i Javier Tejada‡ Departament de Física Fonamental de la U.B.

Introducció

L'ús de materials magnètics està molt estès, tant en la indústria (transformadors, motors, components de circuits elèctrics i un llarg etcètera), com en ambients més casolans (imants de les portes de les neveres, ordinadors, cintes d'àudio i vídeo, altaveus, etc.). És a dir, els materials magnètics tenen una gran incidència tant en la ciència com en la tecnologia.

En la primera part d'aquest article veurem com el ferro i els seus compostos no són els únics que presenten propietats magnètiques. De fet, tots els materials en tenen, si bé en un grau molt menor.

La segona i tercera part, estan dedicades als líquids magnètics, materials que han despertat darrerament un gran interès, bé per ser estudiats des del punt de vista fonamental, com per les seves aplicacions. Dedicarem la quarta part d'aquest treball a parlar d'aquestes aplicacions.

Els materials magnètics

Per tal d'estudiar les propietats magnètiques d'un material l'introduïm en l'entreferro d'un electroimant, -tal com s'indica a la figura 1. Segons l'esquema de la figura, la intensitat del camp magnètic és més gran a la zona de la dreta, ja que les línies de camp estan més juntes. La força que exerceix el camp magnètic a la mostra serà diferent segons quina naturalesa tingui aquesta mostra. A la taula 1 podeu veure els resultats obtinguts per a diferents materials, on el signe + o - indica la direcció de la força: atracció o repulsió cap a la zona de camp magnètic més intens.

Les substàncies que són repel·lides de les regions de camp magnètic més intens s'anomenen *diamagnètiques*, les que són atretes, *paramagnètiques*. En tots dos casos la força augmenta en augmentar el camp i s'anulla quan el camp magnètic es fa zero. Es pot comprovar que la força augmenta amb la massa i en el cas de les substàncies paramagnètiques, depèn de la temperatura.

*Xavier Bohigas (Barcelona, 1953) és llicenciat en Física per la Universitat de Barcelona i actualment és professor titular a la Universitat Politècnica de Catalunya

†Xi-Xiang Zhang (Shandong, Xina, 1962) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (1992)

‡Javier Tejada (Castejón, 1948) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (1975) i actualment és catedràtic de Matèria Condensada a la Universitat de Barcelona

Vegem com podem interpretar aquests fenòmens. Podem considerar que els electrons estan girant al voltant del nucli i alhora estan girant sobre ells mateixos. Si sumem la contribució del moment angular corresponent a cada electró de l'àtom, obtindrem un moment angular atòmic a partir del qual podrem calcular el moment magnètic atòmic. Ens podem fer la imatge que cada àtom està constituït per un petit imant que representaria el seu moment magnètic.

Hi ha àtoms tals que el seu moment magnètic total és nul. Els moviments orbitals electrònics i els spins es compensen exactament. Si apliquem un camp magnètic, com en l'experiència presentada a la figura 1, a una substància constituïda per àtoms de moment magnètic nul, es generaran petits corrents induïts addicionals dins de l'àtom que, segons la llei de Lenz, s'oposaran a la causa que els ha produït. Així, els moments magnètics induïts seran oposats al camp magnètic aplicat. Això és justament el que s'observa en les substàncies diamagnètiques que, des del punt de vista magnètic, les hem de considerar com aquelles que estan constituïdes per àtoms que tenen moment magnètic nul. Això explica que el diamagnetisme estigui present en tots els materials, però els seus efectes són sempre molt més petits que els associats a altres formes de magnetisme.

Altres substàncies, com les paramagnètiques, tenen un moment magnètic no nul. Quan apliquem un camp magnètic a una d'aquestes substàncies, hi haurà una interacció entre el camp aplicat i els moments magnètics atòmics, de manera que aquests s'alinearan amb el camp, i es produirà un augment del camp magnètic dins del material. L'alineament dels moments magnètics atòmics amb el camp no és total, ja que ho impedeix l'energia d'agitació tèrmica. Per aquesta raó el paramagnetisme serà sensible a la temperatura. El moment magnètic per unitat de volum en substàncies paramagnètiques —que s'anomena magnetització o imantació, M ,— augmentarà en disminuir la temperatura, ja que l'alineament dels moments magnètics es veurà afavorit per la disminució de l'energia tèrmica. La llei que segueix la magnetització d'una mostra de material paramagnètic en funció de la temperatura es coneix com llei de Curie-Weiss i té la forma que s'indica al gràfic de la figura 2. La seva expressió analítica en termes de la

susceptibilitat magnètica, definida com $\chi = M/H$, és:

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - \Theta}$$

Quan retirem el camp magnètic aplicat a una substància paramagnètica, l'agitació tèrmica farà que els moments magnètics es desordenin a l'atzar, amb la qual cosa no hi haurà efectes magnètics permanents en substàncies d'aquest tipus.

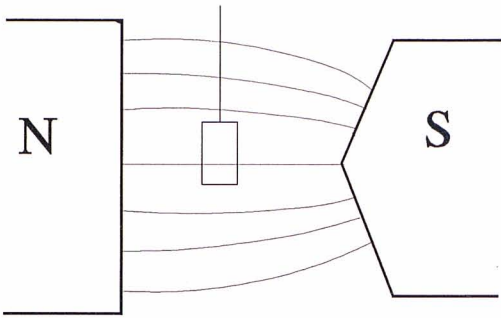


Figura 1: Classifiquem les substàncies en diamagnètiques o paramagnètiques segons la resposta davant d'un camp magnètic no uniforme aplicat

Substància	Fórmula	Força en dines
aigua	H ₂ O	-22
coure	Cu	-2.6
plom	Pb	-37
sal comuna	NaCl	-15
quars	SiO ₂	-16
sodi	Na	+20
alumini	Al	+17
sulfat de níquel	NiSO ₄	+830
ferro	Fe	+4 000 000
magnetita	Fe ₃ O ₄	+120 000

Taula 1: A aquesta taula es representa la força, en dines, exercida sobre un gram de la substància indicada quan se sotmet a l'acció d'un camp magnètic tal que $B_z = 18000 \text{ G}$ i $dB_z/dz = 1700 \text{ G/cm}$

Però, què passa amb aquelles substàncies sobre les quals la força que exerceix el nostre electroimant és molt més gran que la força que exerceix sobre les substàncies diamagnètiques i paramagnètiques? En aquestes substàncies anomenades *ferromagnètiques* existeix una interacció entre els moments magnètics atòmics de manera que es produeix una ordenació entre ells que provoca un augment molt gran de la magnetització. Aquesta ordenació apareix espontàniament quan el material està per sota d'una determinada temperatura anomenada temperatura de Curie. Així, per a temperatures inferiors

a la de Curie direm que el material està magnetitzat (com els imants permanents). En disminuir la temperatura augmentarà l'ordre magnètic intern i com a conseqüència, també la magnetització. Per sobre la temperatura de Curie la magnetització del material s'anulla, en absència de camp magnètic, i es comporta com un material paramagnètic. Vegeu la figura 2b.

Abans hem dit que per sota de la temperatura de Curie apareix espontàniament una magnetització en els materials ferromagnètics. Aleshores, com és possible tenir un tros de ferro (material ferromagnètic per excel·lència) a temperatura ambient amb magnetització nul·la, és a dir sense imantació, si la temperatura de Curie del ferro és aproximadament de 800°C? L'explicació es troba en la formació de dominis magnètics del material: dins de cada domini els moments magnètics estan perfectament alineats i donen lloc a una magnetització neta. Ara bé, la direcció de la magnetització canvia d'un domini a un altre, i es pot donar el cas que tinguem una magnetització total del material nul·la. La formació dels dominis magnètics és una conseqüència del principi de mínima energia. També es pot explicar per l'existència de dominis la dependència respecte al camp magnètic que presenta la magnetització d'un material. La seva representació gràfica s'anomena cicle d'histeresi.

Hem donat la interpretació qualitativa dels efectes magnètics dels materials, però cal tenir present que els efectes magnètics són fenòmens completament quàntics. No s'ha pogut donar una explicació satisfactòria del magnetisme fins que no s'ha interpretat quànticament.

A les figures 3a i 3b hi podeu veure una representació de com estan distribuïts els moments magnètics dins dels materials paramagnètics i ferromagnètics.

Què són els líquids magnètics?

El ferro, el níquel i el cobalt són materials ferromagnètics. També mostren aquest caràcter ferromagnètic alguns dels seus òxids i aliatges. Aquests materials s'han utilitzat i s'utilitzen a bastament en multitud d'aplicacions tecnològiques. Però tots els materials ferromagnètics perden les propietats magnètiques per sobre de l'anomenada temperatura de Curie, que per al ferro és aproximadament de 800°C.

Tots els materials ferromagnètics esmentats més amunt són sòlids a temperatura ambient, i per tenir-los en fase líquida caldria augmentar-ne la temperatura. Resulta que la temperatura de líquidació (per al ferro és d'uns 1 500°C) és més gran que la corresponent temperatura de Curie. Això fa que aparentment no puguem tenir materials ferromagnètics en fase líquida. Ara com ara quan parlem de líquids magnètics o ferrofluids ens referim a suspensions col·loïdals de partícules d'un material ferromagnètic i no a materials ferromagnètics en fase líquida.

Els ferrofluids són suspensions col·loïdals de partí-

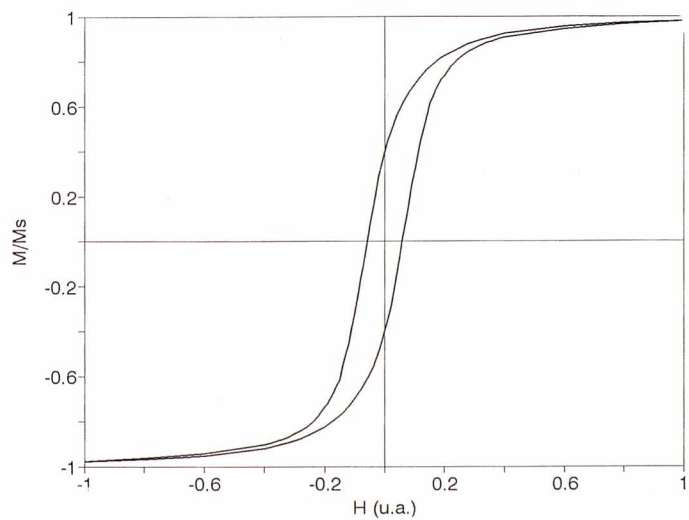
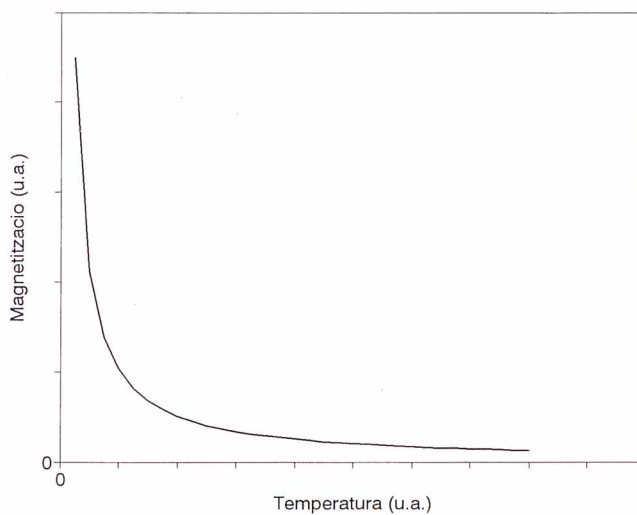
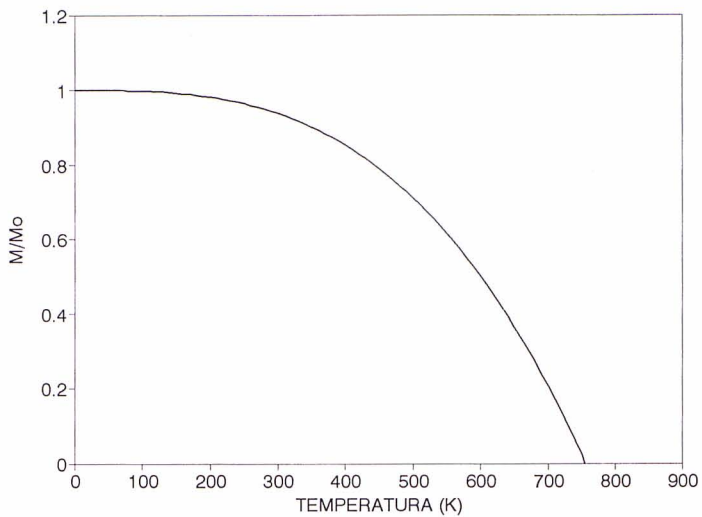


Figura 2: a) Comportament de la magnetització en funció de la temperatura per a una substància paramagnètica. Llei de Curie-Weiss. b) Magnetització en funció de la temperatura per a una substància ferromagnètica. c) Un material ferromagnètic té histèresi a una temperatura inferior a la seva temperatura de Curie

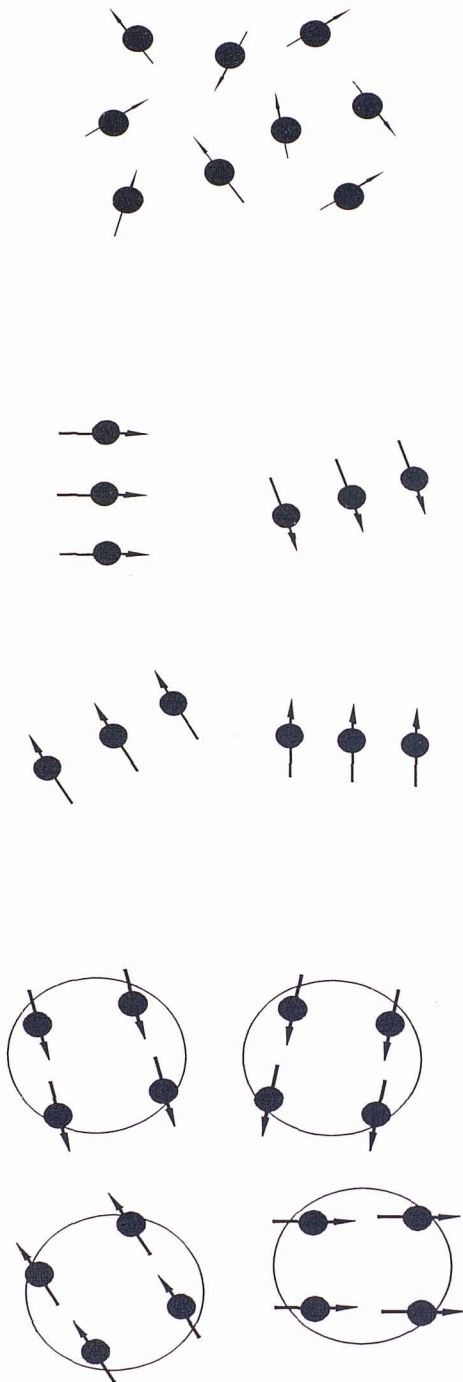


Figura 3: a) Els moments magnètics d'una substància paramagnètica són independents. b) Els materials ferromagnètics estan constituïts per dominis. Dins de cada domini els moments magnètics estan ordenats. c) Moments magnètics d'un material superparamagnètic constituït per partícules petites

cules magnètiques molt petites. El líquid portador sol ser un compost orgànic, però en ocasions pot ser aigua. Aquestes partícules petites són sistemes magnètics constituïts per partícules de dimensions menors que 1.000, i per tant es poden considerar des del punt de vista magnètic com monodominis magnètics.

Una partícula monodomini està constituïda per spins electrònics en una quantitat d'entre deu mil i un milió, que estan lligats gràcies a la interacció d'intercanvi entre spins d'electrons, sistema que es comporta dinàmicament com un sol spin quàntic. Aquesta interacció, proposada per primer cop per Heisenberg, pot entendre's de la manera següent: considerem una parella d'electrons que tinguin spins paral·lels, per tant estaran en el mateix estat quàntic de spin. Pel principi d'exclusió de Pauli estaran forçats a separar-se espacialment l'un de l'altre, i d'aquesta manera tindran una energia potencial de Coulomb menor que si la parella de spins s'orienten antiparal·lelament. Recordant que els sistemes tendeixen a la situació de mínima energia, podem entendre per què els spins d'una parella tendeixen a alinear-se paral·lels l'un respecte de l'altre.

Per causa de l'atracció entre partícules ferromagnètiques (es comporten com a petits imants) aquests nous materials presentaran una gran tendència a l'agregació i es perd d'aquesta manera l'estabilitat col·loidal.

Per estabilitzar el sistema es fa un recobriment de les partícules amb molècules superficials de manera que s'impedeix l'agregació produïda per les forces de Van der Waals de curt abast. D'altra banda, les forces d'interacció entre dipols magnètics de llarg abast queden reduïdes per raó de la petita grandària de les partícules. Per això és molt important poder disposar de líquids magnètics constituïts per partícules molt petites.

Propietats magnètiques dels ferrofluids

El comportament de la magnetització que presenten els sòlids ferromagnètics, com el ferro, quan se sotmeten a l'acció d'un camp magnètic ve representat pel cicle d'histeresi del material. El qual indica que en desaparèixer el camp magnètic aplicat, la magnetització no s'anulla, la qual cosa és aprofitada per utilitzar aquests materials com a imants permanents. Es diu que presenten romanència. Els líquids magnètics no presenten romanència a temperatura ambient, la magnetització varia amb el camp magnètic aplicat i es fa zero quan desapareix el camp magnètic, tenen un comportament semblant a un material paramagnètic. Per aquesta raó són descrits, des del punt de vista del seu comportament magnètic, com a *superparamagnètics*.

S'ha comprovat experimentalment que els líquids magnètics presenten romanència per sota d'una determinada temperatura que depèn del material, i es comporta des del punt de vista magnètic com un material ferromagnètic sòlid.

Finalment, igual que els materials sòlids, la magnetització de saturació dels líquids magnètics disminueix en augmentar la temperatura, i s'anulla per sobre de la temperatura de Curie.

A la figura 3c hi podeu veure una representació de com estan distribuïts els moments magnètics dins dels materials superparamagnètics.

L'estudi de les propietats magnètiques dels ferrofluids ha despertat un gran interès en els darrers anys motivat per les grans possibilitats de trobar noves aplicacions i millores de dispositius ja en ús, utilitzant líquids magnètics, com ho demostra la quantitat de publicacions i patents que s'han realitzat. Existeixen diversos dispositius que utilitzen líquids magnètics. N'hi ha molt pocs que siguin comercials i la majoria estan en fase experimental. Les primeres publicacions sobre l'estudi dels líquids magnètics es van fer cap als anys seixanta. A partir de la dècada dels setanta la quantitat comença a ser important, i augmenta any rere any. S'han publicat en els darrers anys més de 5 000 articles en revistes especialitzades que estudien diversos aspectes de les propietats i aplicacions dels líquids magnètics. A més s'han registrat més de 200 patents fins ara.

Aplicacions

Classificarem les aplicacions dels ferrofluids atenent a la propietat que s'utilitza principalment en cada aplicació específica. Així distingirem tres grups. En el primer grup o apartat comentem alguns dels dispositius que utilitzen l'efecte levitacional que un camp magnètic provoca sobre un cos situat dins d'un ferrofluid. La possibilitat de situar un líquid magnètic en un determinat lloc mitjançant un camp magnètic s'utilitza en els dispositius que comentem a l'apartat dos. I en el darrer apartat exposem aplicacions que es fonamenten en diverses propietats dels líquids magnètics.

1. En presència d'un gradient de camp, cada una de les partícules magnètiques en suspensió d'un ferrofluid experimentarà una força que la farà moure. Així, les propietats hidrodinàmiques dels líquids magnètics estaran determinades per l'equació de Bernoulli afegint-hi un terme magnètic, equació que podem escriure

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh - \mu_0 \int_0^H M dH = \text{constant},$$

on M representa la magnetització, H el camp magnètic aplicat i les altres lletres tenen el seu significat habitual.

Si ens fixem en el primer i darrer sumands de l'equació anterior, veiem que si el camp magnètic que actua sobre un líquid magnètic augmenta, la seva pressió també augmentarà. Per tant, qualsevol cos no magnètic que estigui dins d'un líquid magnètic, experimentarà una força determinada per la pressió (i per tant pel camp magnètic aplicat) i la seva superfície de contacte.

El que acabem de dir es pot il·lustrar de la següent

manera: Si posem dins d'una cubeta que contingui un líquid magnètic un cos de material no magnètic de densitat més gran que la del ferrofluid, el cos s'enfonsarà. Suposem situat a la part inferior del recipient un electroimant o un imant permanent, tal com es veu a la figura 4. Amb aquest dispositiu el camp magnètic creat per l'electroimant disminueix cap a la part superior del dibuix. És a dir, la pressió que el líquid magnètic exerceix sobre el cos serà més gran a la part inferior de la cubeta que a la part superior. D'aquesta manera, el camp magnètic creat per l'electroimant farà moure el cos cap a la regió on sigui menor el camp per disminuir la pressió que actua sobre ell, fins que s'assoleixi d'aquesta manera una posició d'equilibri entre la força produïda per la pressió que exerceix el líquid magnètic sobre el cos i el seu propi pes. Així, podrem fer surar un cos més dens que un líquid magnètic, o bé situar-lo en una determinada posició dins del líquid tot variant el camp magnètic creat per l'imant. Aquesta propietat

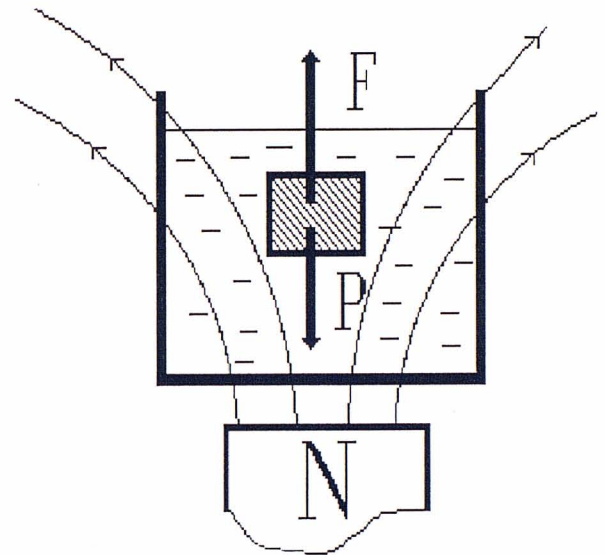


Figura 4: Levitació magnètica d'un cos no magnètic

ha estat utilitzada en diversos dispositius experimentals. Vegem-ne algun.

Una de les primeres aplicacions que es va desenvolupar fou la utilització dels líquids magnètics com a *esmorteïdors*. Actualment ja són comercials els esmorteïdors inercials.

S'usen líquids magnètics en altaveus com a esmorteïdors mecànics; el líquid magnètic omple l'espai de la bobina i n'estabilitza el moviment. S'ha comprovat experimentalment que un altaveu que utilitza un líquid magnètic augmenta la potència acústica. Té l'avantatge afegit que la calor generada a la bobina és dissipa més fàcilment.

El mateix principi es pot utilitzar per evitar vibracions no desitjades en parts mòbils com per exemple traçadors, calibradors, capçals de lectura de disquets, taules aïlladores de vibracions, etc.

Al Japó s'ha desenvolupat un nou *seient d'eix* hidrodinàmic amb la utilització d'un líquid magnètic ajudat d'un imant permanent. La grandària és similar a la dels seients d'eix tradicionals i la precisió és major.

També al Japó, país capdavanter ara com ara en l'aplicació tecnològica dels líquids magnètics, s'ha desenvolupat un *separador* basat en l'efecte levitacional que un camp magnètic no uniforme provoca sobre cossos no magnètics al si d'un líquid magnètic. A la figura 5 podeu veure un esquema d'aquest sistema. Per l'extrem A es deixa caure el material que volem separar, els imants B estan situats de manera que la força de levitació tingui direcció gairebé horitzontal. D'aquesta manera, el desplaçament de les distintes partícules dependrà de la massa, i es poden separar, segons la massa, en dos recipients, C_1 i C_2 , en partícules pesants i lleugeres respectivament. Amb aquest sistema es poden separar partícules de metalls (Al, Zn, Cu, Pb) i aliatges de diàmetres menors que 30 mm.

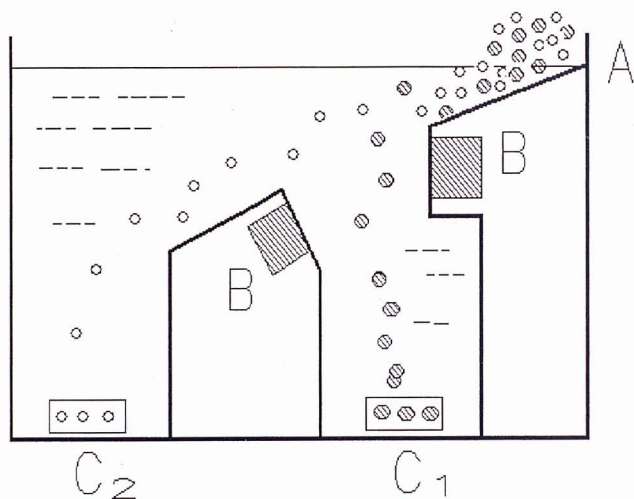


Figura 5: Esquema d'un separador gravimètric amb líquid magnètic

L'efecte levitacional s'aplica també per a l'*acabament de superfícies* mitjançant grans abrasius que estan surant en un líquid magnètic. La força magnètica sobre els grans es transmet a la peça que es treballa. Amb aquest mètode s'han aconseguit superfícies planes amb una discrepància de només $0,5 \mu\text{m}$.

2. Una de les aplicacions més desenvolupades es basa en el fet de poder situar un líquid magnètic en un lloc desitjat mitjançant l'aplicació d'un camp magnètic. Així, mitjançant un líquid magnètic podem segellar regions que estiguin a diferents pressions. S'usen *segells* de líquid magnètic en eixos giratoris. Imants permanents proporcionen el camp magnètic necessari per situar el líquid magnètic, de manera que es forma una anella de líquid magnètic al voltant de l'eix. Pot suportar una diferència de pressió d'uns $0,2 \text{ kg/cm}^2$ en un dispositiu d'una sola etapa. S'augmenten molt les prestacions

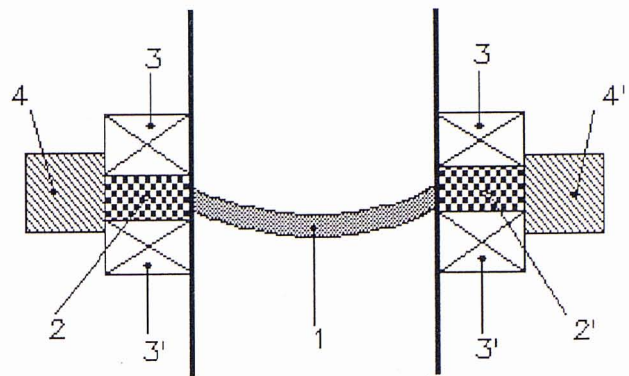


Figura 6: Esquema d'un sensor de pressió. (1) membra de ferrofluid, (2) bobina central, (3) i (3') bobines detectores en oposició i (4) imant permanent anul·lar

multiplicant el nombre d'etapes.

Els segells de líquid magnètic tenen l'avantatge que aquest no es perd, tenen llarga vida (aproximadament uns deu anys) i la superfície de contacte eix-segell és flexible perquè s'adapta a les possibles rugositats de l'eix.

Són comercials segells d'eixos rotatius a 10 000 r.p.m. Actualment s'utilitzen en discos durs d'ordinadors per prevenir l'entrada de contaminants com ara partícules de pols o fum que podrien afectar el suport de l'eix del capçal magnètic.

Es pot mesurar la pressió detectant el nivell de ferrofluid en un tub. Encara que és un dispositiu eficaç, no és gaire sensible. Existeix un prototipus de *sensor de pressió* en què en lloc de determinar l'alçada assolida pel líquid magnètic es mesura la curvatura del menisc d'una membra prima de líquid magnètic que tapi completament la secció del tub. En podeu veure un esquema a la figura 6. S'aconsegueixen mesures molt precises de la diferència de pressió entre les dues superfícies de la membra del ferrofluid. En els prototipus dissenyats s'obté una sensibilitat de 10^{-2} Pa . La membra se situa en el lloc de treball amb un conjunt d'imants. La curvatura de la membra es mesura indirectament mitjançant les variacions de flux magnètic detectades per una bobina captadora.

3. Actualment hi ha un gran interès per desenvolupar les *impressores* en què s'utilitza tinta magnètica. El procés d'impressió consisteix a dirigir mitjançant un camp magnètic un raig polvoritzat de tinta magnètica, constituïda per un líquid magnètic, cap al paper d'impressió. Un dels avantatges d'imprimir documents amb tinta magnètica és la possibilitat de llegir documents magnèticament de la mateixa manera que les cintes d'àudio o vídeo.

També s'està treballant en *fotocopiadores* en què la tinta és un líquid magnètic. Aquesta nova tècnica de reproducció s'anomena "magnetografia". Es basa en el mateix principi que el de la gravació d'una cinta d'àudio

o vídeo. S'han realitzat impressions amb una densitat de 17,9 punt/mm i una velocitat de 100 fulls/min. Amb aquest mètode es poden obtenir gran quantitat de còpies, uns mil fulls, amb una sola gravació magnètica. La resolució obtinguda depèn fonamentalment de les característiques de la tinta utilitzada. Com que els líquids magnètics estan constituïts per partícules petites, són molt adients.

Un problema de les tintes magnètiques és la dificultat d'obtenir imatges en color, ja que la majoria dels líquids magnètics són de color negre. Darrerament l'empresa americana Xerox ha sintetitzat uns líquids magnètics gairebé transparents a temperatura ambient amb la qual cosa es podran obtenir còpies en color simplement acolorint els ferrofluids que s'usen per a la reproducció.

Els líquids magnètics constituïts per partícules magnètiques molt petites dins de matrius de material no magnètic són molt interessants pels seus *efectes magnetocalòrics*. Actualment són operatius a baixa temperatura, però estem fent grans esforços per aconseguir l'ús dels líquids magnètics, constituïts per partícules de dimensions nanomètriques, com a refrigerants a temperatura ambient. Això possibilitarà la substitució dels clorofluorocarburs que s'usen en aparells de refrigeració, per refrigerants magnètics amb importants conseqüències ecològiques.

En els líquids magnètics transparents no conductors s'ha observat una forta birefringència i dicroisme lineal. A causa d'aquestes característiques els líquids magnètics poden ser utilitzats com a *obturadors òptics*. Si una cel·la òptica de ferrofluid es col·loca entre dos polaritzadors creuats, l'aplicació d'un camp magnètic sobre el líquid el fa birefringent, de manera que la transmissió del dispositiu augmenta milers de vegades.

El fet que la magnetització d'un líquid magnètic variï amb la temperatura permet d'obtenir energia mecànica o elèctrica d'una font de calor, és a dir, utilitzar un ferrofluid com a *bescanviador d'energia*. Imaginem un circuit tancat ple d'un líquid magnètic. En aplicar un camp magnètic no uniforme en una regió del tub,

les partícules del líquid magnètic es mouran i proporcionaran un moviment al líquid. Quan les partícules arribin a una zona més calenta, amb una temperatura per sobre de la temperatura de Curie del líquid magnètic, les seves partícules esdevindran insensibles al camp magnètic, amb la qual cosa podran fluir i tancar el cicle.

Els líquids magnètics també poden ser usats com a *lubrificants*, amb l'avantatge afegit que poden ser situats exactament al lloc de treball amb gran precisió.

En algunes publicacions s'ha suggerit d'utilitzar líquids magnètics en *aplicacions mèdiques*. Així, injectant una petita quantitat d'un líquid magnètic seria possible de taponar perforacions produïdes en venes, artèries, o en altres conductes amb l'ajuda d'un camp magnètic extern. De tota manera, encara no es coneixen els possibles efectes tòxics per a l'organisme dels líquids magnètics i caldrà investigar la tècnica per conduir el líquid magnètic dins l'organisme, i localitzar-lo a la zona predeterminada.

La *viscositat* d'un líquid depèn de la temperatura, però la viscositat d'un líquid magnètic depèn de la temperatura i del camp magnètic aplicat, amb la qual cosa podem dissenyar un dispositiu que permeti variar la viscositat d'un líquid a voluntat segons les necessitats de funcionament del dispositiu.

Per acabar

Hem vist que els ferrofluids o líquids magnètics són uns materials nous amb unes característiques força interessants. El fet que siguin líquids i alhora tinguin propietats magnètiques els fa molt atractius des del punt de vista tecnològic, perquè és possible disposar d'un material magnètic que pugui fluir. Malgrat que siguin uns materials nous, ja se n'ha trobat gran quantitat d'aplicacions, moltes operatives i algunes ja comercials. De tota manera, encara no hem vist les aplicacions més revolucionàries. L'aprofitament de les propietats d'aquests materials només dependrà de la imaginació dels físics i tècnics.

Bibliografia

- JILES, D., *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman and Hill, (1991).
MORRISH, A., *The Physical Principles of Magnetism*, Malabar, (Florida, 1983).
Proceedings of the sixth International Conference on Magnetic Fluids, North Holland, (1993).
DORMANN, J.L., *Rev. Phys. Appl.*, **16**, 275, (1981).
ANTON, I. et al, *J. Magn. Magn. Mat.*, **85**, 219, (1990).
ZIOLO, R.F. et al, *Science*, **257**, 219, (1992).