

Imanes Permanentes

Adolfo RAIS*
Instituto Balseiro

I. INTRODUCCIÓN

Los imanes permanentes son una parte importante de nuestra tecnología moderna, y están siendo cada vez más utilizados.

Un imán es permanente (usualmente llamado duro) si por si solo soporta un flujo utilizable en el entrehierro de un dispositivo, y es blando si solo lo puede hacer con la ayuda de una excitación eléctrica externa. Un buen imán permanente debe producir un alto flujo magnético con baja masa, y debe ser estable frente a influencias externas que podrían desmagnetizarlos. Las propiedades que deseamos de un imán permanente son típicamente establecidas en términos de la remanencia y coercitividad de los materiales magnéticos.

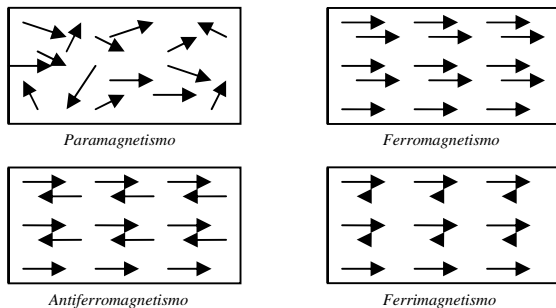
Diversas propiedades de los imanes permanentes son consideradas para su diseño, pero una característica muy importante es la curva de desmagnetización, que determina, en principio, su habilidad para una tarea específica. Su forma contiene información acerca de cómo el imán se comportará frente a condiciones de operación dinámicas y estáticas.

II. MAGNETISMO ATÓMICO Y ALINEACIÓN MAGNÉTICA

El momento magnético de un átomo se debe al espín y a los movimientos orbitales de los electrones desapareados. Para los metales Ferromagnéticos Fe, Co y Ni, en los cuales los electrones desapareados son los más externos (electrones 3d), la contribución del espín al momento magnético es la más importante.

Los intercambios de energía son los responsables de producir un ordenamiento magnético en el cristal para dar un momento magnético neto. Los momentos magnéticos atómicos elementales deben ser pensados como dipolos magnéticos. Intercambios de fuerzas son necesarios para alinear estos dipolos magnéticos para producir un comportamiento colectivo espontáneo de los átomos, lo que de esta manera el ferromagnetismo, ferrimagnetismo, y antiferromagnetismo.

Cuatro tipos de comportamientos magnéticos son ilustrados a continuación. Las flechas indican la dirección preferida de los dipolos magnéticos. La longitud de las flechas indican la magnitud del dipolo magnético.



En el paramagnetismo, la interacción entre los dipolos de los átomos es tan débil que los momentos magnéticos son esencialmente independientes unos de otros. Usualmente es imposible magnetizar completamente materiales paramagnéticos a temperatura ambiente (inducir un ordenamiento magnético) pues la agitación térmica de los átomos es tan grande que uno no puede aportar suficiente energía magnética como para vencer eso.

Cuando existe el ferromagnetismo, hay grandes fuerzas de interacción entre los dipolos atómicos. Estos materiales son relativamente fáciles de magnetizar, y tienen una alta permeabilidad magnética.

El antiferromagnetismo ocurre cuando hay interacción negativa entre dipolos magnéticos, y los momentos opuestos son de igual magnitud. Estos materiales son difíciles de magnetizar y tienen baja permeabilidad magnética.

El ferrimagnetismo cuando la interacción entre dipolos es negativa, pero los momentos opuestos tienen distinta magnitud, por lo que existe un momento magnético neto resultante. Estos materiales son relativamente fáciles de magnetizar y presentan propiedades muy similares a los materiales ferromagnéticos.

III. DOMINIOS MAGNÉTICOS

Aunque existe la alineación espontánea u ordenamiento de los momentos atómicos en los materiales ferro y ferrimagnéticos, estos materiales no presentan normalmente un momento magnético neto en ausencia de un campo magnético aplicado. Esto se debe a la existencia de dominios magnéticos en el material. Los dominios son pequeñas regiones en las cuales los dipolos magnéticos elementales o momentos atómicos son orientados por el intercambio de energía de modo que sean paralelos.

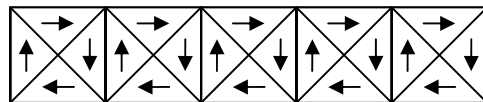


Ilustración esquemática de dominios magnéticos en una barra de Fe desmagnetizada. Cada área triangular representa un dominio magnético compuesto por muchos dipolos paralelos orientados

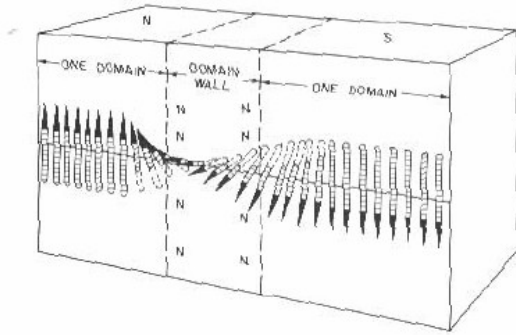
La figura muestra una vista esquemática de los dominios en una sección de una barra desmagnetizada. Esto sucede ya que los dominios están orientados de tal forma que sus momentos son cancelados y así se puede minimizar la energía magnética total.

En materiales ferromagnéticos, el fenómeno de "ordenamiento de largo rango" es el que crea dominios magnéticos. Este fenómeno nace de la interacción cuántica en los niveles atómicos. Esta interacción es notable pues "traba" los momentos magnéticos de átomos vecinos formando un orden rígido paralelo a lo largo de un gran número de átomos, a pesar de la agitación térmica. Cuando un flujo externo es aplicado, los dominios ya alineados en la dirección del campo crecen a expensas de sus vecinos.

La región de transición entre dominios se llama "borde" del dominio. Los bordes entre dominios cuyos momentos están orientados en direcciones opuestas, se deno-

* Electronic Address: raisa at ib.cnea.gov.ar

minan bordes 180° , y dominios con ángulos rectos están separados por bordes 90° .



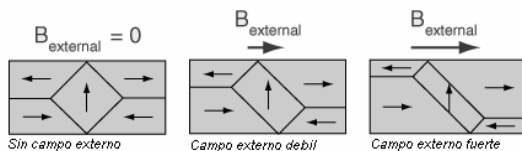
En la figura se muestra un borde 180° , que ilustra esquemáticamente como son los momentos magnéticos en esa región (que tiene un espesor muy pequeño comparado con el ancho de los dominios).

La estructura de los dominios, y el comportamiento de los dominios sus bordes frente a un campo magnético aplicado determinan muchas de las propiedades magnéticas en un material ferro y ferrimagnético.

En materiales que es fácil magnetizarlos y desmagnetizarlos (conocidos como materiales magnéticos blandos) como las aleaciones de Fe-Si, los dominios magnéticos son grandes. En general, si se aplica un campo magnético, se observará un cambio en la estructura de los dominios. En materiales que es difícil magnetizarlos y desmagnetizarlos (conocidos como materiales magnéticos duros), los dominios son muy chicos.

IV. MAGNETIZACIÓN

El proceso de magnetizar un material ferro o ferrimagnético, involucra el movimiento de los "bordes" y la rotación de los dipolos de los dominios



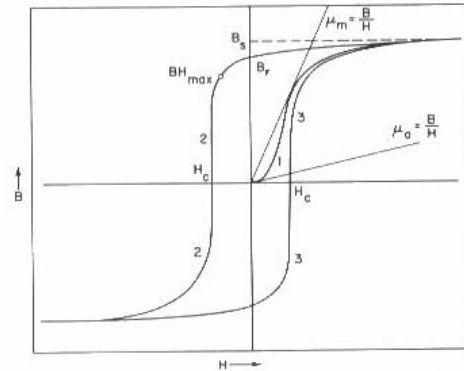
Por ejemplo, si uno magnetizara una barra delgada de hierro, se establece una magnetización $4\pi M$ gauss, que se debe a los movimientos de los bordes y a la reorientación de los vectores de los dominios. Además, está presente el campo magnetizante H en el volumen ocupado por el hierro. La suma de estos dos términos, $4\pi M + H$, se denomina densidad de flujo magnético B . Por lo tanto la ecuación es:

$$B = 4\pi M + H$$

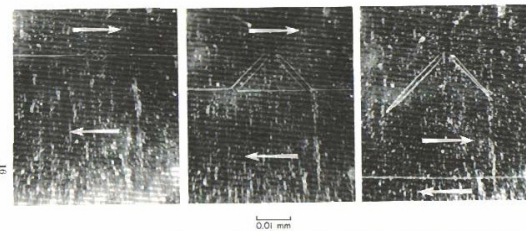
La figura ilustra esquemáticamente como la estructura del dominio de un material magnético cambia mientras es magnetizado hasta llegar a la saturación. Inicialmente hay cuatro dominios magnéticos triangulares (desmagnetizado, momento magnético neto nulo), el cual se convierte finalmente en un único dominio orientado en la dirección del campo magnético aplicado. Note que el movimiento del borde del dominio es el mecanismo predominante en el

proceso de magnetización para bajos campos magnéticos aplicados, mientras que la rotación de los momentos atómicos es el mecanismo predominante para altos campos magnéticos.

La histéresis magnética es una característica importante de los materiales ferro y ferrimagnéticos, y no la presentan los materiales paramagnéticos.



La figura muestra una curva de magnetización y un ciclo de histéresis del hierro. Estas curvas nos permiten definir varios términos utilizados en magnetismo para caracterizar las propiedades magnéticas de un material. Frente a un campo magnético H , se establece una magnetización neta, y graficando el valor de B versus H , obtenemos la curva 1. El máximo valor de B posible es B_s . Si el campo aplicado es reducido a cero, el valor de B no vuelve a ser cero, sino que sigue la curva 2 hasta el punto B_r . Si ahora el campo H revierte su dirección y aumenta en dirección negativa, la curva continúa sobre 2 hasta que B sea $-B_s$. Si H vuelve otra vez a decrecer hasta cero, obtenemos la curva 3, y el ciclo de histéresis se completará.



El mecanismo de histéresis magnética se puede entender desde la fotografía del "patrón de polvo magnético" (magnetic powder pattern) de un cristal de hierro-silicio como se muestra en la figura. La presencia de pequeñas imperfecciones tiene un efecto importante en la histéresis o el comportamiento frente a la desmagnetización en materiales magnéticos. El motivo de esto es que una imperfección o defecto impide el movimiento de los bordes de los dominios y se desarrollan dominios con forma de aguja, disminuyendo la energía magnética total. En la figura anterior, cuando los bordes de dominios pasan a través de un defecto, estos dominios con forma de aguja se agarran de este, se estiran, y finalmente se desprenden, como se puede observar en la figura. Los defectos en un material, como impurezas sólidas, dislocaciones, bordes de grano y otras fases, son una fuente importante para la histéresis magnética.

El área encerrada por el ciclo de histéresis es una medida de la pérdida por histéresis, W_h . El valor B_s es conocido como la inducción de saturación y B_r como la inducción residual resultante de disminuir el campo externo

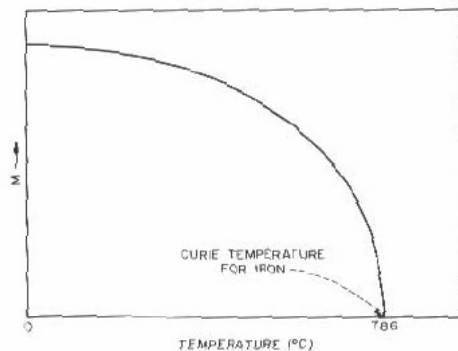
aplicado a cero. H_c es la fuerza coercitiva, es el campo en dirección contraria que hay que aplicar para reducir B a cero. Para imanes permanentes, es importante que este término sea suficientemente grande para resistir fuerzas desmagnetizantes externas que tienden a reducir el flujo a cero. A veces se utiliza el término de fuerza coercitiva intrínica MH_c , y define el campo necesario para reducir (B-H) a cero. Para imanes permanentes de tierras raras, MH_c es usualmente mucho más grande que H_c . El valor de $(BH)_{max}$ mostrado en el segundo cuadrante es conocido como la máxima producto de energía e indica el mérito para imanes permanentes. Este punto representa la condición óptima, en la cual una dada cantidad de flujo será soportado por la mínima cantidad de material.

La permeabilidad inicial μ_0 se determina por pendiente inicial de la curva de magnetización, y la permeabilidad máxima μ_m se determina por la máxima relación B/H de la curva de magnetización. Otro término muy relacionado a la permeabilidad es la susceptibilidad k , que es igual a la relación M/H , donde M es la magnetización.

V. VARIACIÓN TÉRMICA DE LA MAGNETIZACIÓN

Todos los materiales ferromagnéticos poseen una temperatura máxima para la cual la propiedad ferromagnética desaparece como resultado de agitación térmica. Esta temperatura es conocida como "temperatura de Curie".

Las curvas de magnetización versus temperatura revelan información importante sobre la naturaleza del acoplamiento entre dipolos atómicos.



La variación térmica de la magnetización se muestra en la figura. La forma de esta curva es típica de los materiales ferromagnéticos. Un aumento en la temperatura da como resultado un desordenamiento del "ordenamiento magnético de largo rango". En el caso del hierro, a 786°C , la alineación de largo rango de los dipolos magnéticos es destruido completamente debido al intercambio de energía. Por encima de esta temperatura (temperatura de Curie) el hierro es paramagnético.

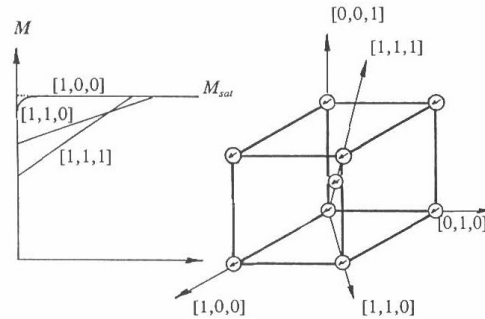
VI. ANISOTROPIAS MAGNÉTICAS

Altas anisotropías magnéticas son importantes para determinar las propiedades de los imanes permanentes. Los imanes permanentes de tierras raras poseen las más altas fuerzas coercitivas y también los más altos valores de anisotropías magnéticas.

Las anisotropías se pueden clasificar en magneto-cristalinas y de forma.

Las anisotropías magneto-cristalinas son el resultado de la existencia de ejes cristalinos preferenciales para la magnetización (la dirección preferida para los dipolos magnéticos); la cual es una propiedad intrínica del mate-

rial. La energía que se requiere para rotar el vector magnetización es una medida de la anisotropía magneto-cristalina.



La anisotropía de forma es la alineación preferencial de los momentos magnéticos atómicos en una dirección dada debido a la forma de la partícula magnética. Por ejemplo la relación entre el largo y el ancho de la partícula es una medida de la anisotropía de forma, puesto que será más fácil magnetizar una partícula estirada en la dirección longitudinal y muy difícil magnetizar en la dirección transversal.

VII. MATERIALES PARA IMANES PERMANENTES

Es un hecho experimental que para ciertos rangos de tamaños de partículas, la fuerza coercitiva intrínica crece cuando disminuye el tamaño de partícula (eventualmente si el tamaño de la partícula disminuye demasiado, la fuerza coercitiva disminuye debido a la presencia de un fenómeno llamado superparamagnetismo^{*}. Esta teoría simplemente propone que cuando una partícula es tan pequeña, la existencia de bordes es energéticamente desfavorable, por lo que habrá solo un dominio presente en la partícula y el cambio de magnetización se producirá únicamente por el mecanismo de rotación.

Ferrita Cerámica

El material para imanes permanentes más utilizado ampliamente es la clase conocida como ferritas. Estos son imanes con finas partículas producidos por métodos de pulvimetalurgia, por lo que también son conocidos como ferritas cerámicas. Durante su producción, el polvo debe ser refinado hasta obtener partículas de aproximadamente el tamaño de un dominio, lo que significa que las ferritas cerámicas basan su magnetismo permanente en la anisotropía magneto-cristalina. Este mecanismo produce un imán con una coercitividad muy grande y una forma lineal en la curva de B vs H en el segundo cuadrante, lo cual es muy deseable para la mayoría de las aplicaciones incluyendo motores eléctricos.

Alnico

Como hemos mencionado anteriormente, una partícula estirada exhibiría un aumento en la coercitividad en su eje mayor, fenómeno conocido como anisotropía de forma. Este es el mecanismo predominante en imanes permanentes de Alnico, en el cual partículas magnéticas estiradas precipitan en la matriz de una aleación de Al-Ni-Fe-Co. Son producidos por métodos de fundición y de pulvimeta-

^{*} Nesbitt, E. A and Wernick, J. H. *Rare Earth Permanent Magnets* -
Página 24

lurgia, dependiendo de la aplicación. Por lo general estos imanes resultan ser duros y frágiles

Tierras Raras

El término tierras raras es usualmente aplicado a aquellos elementos que tienen número atómico desde 58 hasta 71. Estos materiales son muy utilizados para la fabricación de imanes permanentes metálicos.

El comportamiento metálico de estos materiales se debe en gran parte a los electrones desapareados en el nivel 4f.

La tabla de abajo contiene datos acerca de algunos materiales utilizados como imanes permanentes. La coercitividad y la remanencia son medidos en Tesla. Además de estos dos términos, un factor de calidad para imanes permanentes es $(BB_0/\mu_0)_{max}$. Un valor alto de esta cantidad implica que un flujo magnético requerido puede obtenerse con un pequeño volumen del material, haciendo el dispositivo más liviano y compacto.

Material	Coercitividad (Oe)	Remanencia (G)	$(BB_0/\mu_0)_{max}$ (G.Oe x 10 ⁵)
BaFe ₁₂ O ₁₉	1800	2000	1
Alnico IV	730	5500	1.3
Alnico V	630	12500	5.5
Remalloy	250	9700	1
Cunife	550	5400	1.7
Vicalloy	250	7500	0.8
Pt-Co	4000	6000	7
Mn Bi	3650	4800	5.3
Silmanal	550	550	0.08

Las aleaciones de las cuales los imanes permanentes están hechos son frecuentemente muy difíciles de tratar metalúrgicamente. Son mecánicamente duros y frágiles. Deben ser fundidos en el molde con la forma requerida, o bien, si son producidos por métodos de pulvimetalurgia, los distintos polvos son mezclados y compactados en un molde con la forma.

REFERENCIAS

1. Campbell, Peter. *Permanent Magnet Materials and their Application*, (1994)
2. Nesbitt, E. A and Wernick, J. H. *Rare Earth Permanent Magnets*, (1973)
3. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>