

MATERIALES MAGNETICOS

Los materiales magnéticos son importantes para el área de la ingeniería eléctrica. En general hay dos tipos principales: materiales magnéticos **blandos** y magnéticos **duros**. Los blandos se utilizan en aplicaciones en las cuales el material debe imanarse y desimanarse fácilmente, como en núcleos de transformadores para la distribución de energía eléctrica y como materiales para estatores y rotores de motores y generadores. Por otra parte, los materiales magnéticos duros se utilizan para aplicaciones que requieran imanes que no se desimanen fácilmente, como en los imanes permanentes de los altavoces, receptores telefónicos, motores síncronos sin escobillas y motores de arranque para automóviles.

1. BASES DE FÍSICA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

El magnetismo tiene una naturaleza **dipolar**, siempre hay dos polos magnéticos o centros del campo magnético, separados una distancia determinada, y este comportamiento dipolar se extiende hasta los pequeños dipolos magnéticos encontrados en algunos átomos.

El campo magnético se produce o bien por materiales imanados (metales como *hierro*, *cobalto* y *níquel* una vez imanados a temperatura ambiente pueden generar un fuerte campo magnético a su alrededor) o por conductores portadores del corriente eléctrica.

La presencia de un campo magnético rodeando una barra imanada de hierro puede observarse por la dispersión de pequeñas partículas de hierro espolvoreadas sobre una hoja de papel localizada encima de la barra de hierro (Fig. 1). La barra imanada posee dos polos magnéticos, y las líneas del campo magnético salen de un polo y entran en el otro.

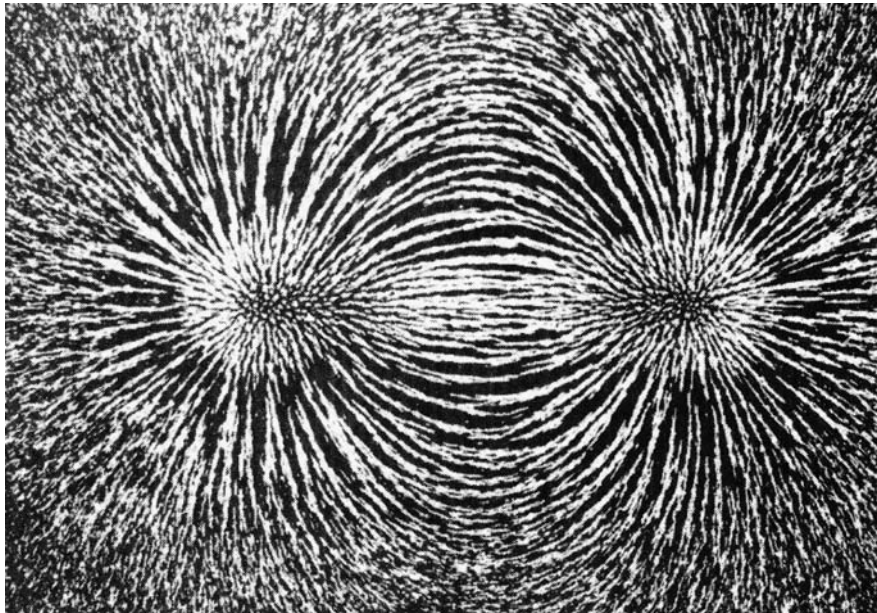


Figura 1. El campo magnético que rodea a una barra imanada puede observarse mediante la distribución de virutas de hierro sobre una hoja de papel situada encima del imán. La barra imanada es un dipolo y las líneas magnéticas de fuerza abandonan un extremo del imán y entran por el otro.

Los campos magnéticos también son producidos por conductores portadores de corriente. La Figura 2 ilustra la formación de un campo magnético alrededor de una larga bobina de hilo de cobre, llamada *solenoides*. Para un solenoide de n vueltas y longitud l , la intensidad del campo magnético H es

$$H = \frac{0.4\pi nI}{l} \quad (1)$$

donde I es la corriente.

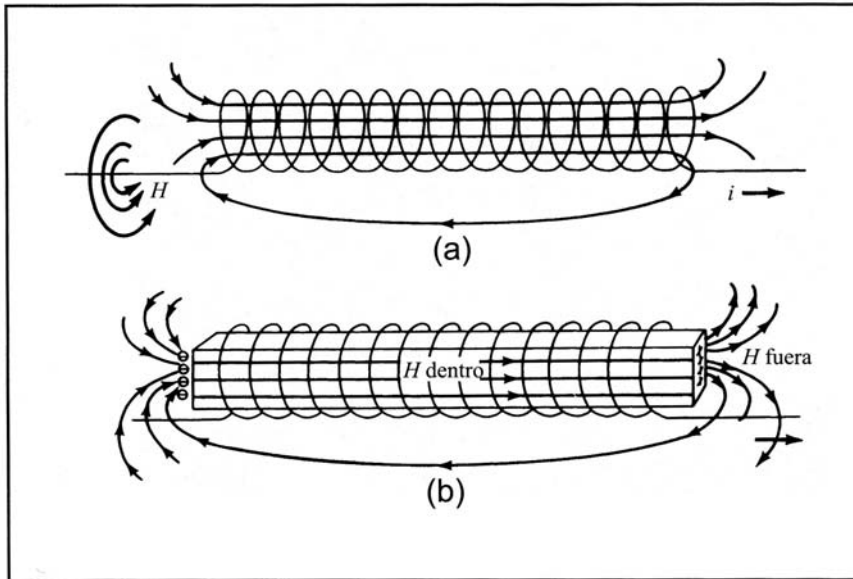


Figura 2 (a) Ilustración esquemática de un campo magnético creado alrededor de una bobina de hilo de cobre, llamada solenoide. debido al paso de comente eléctrica por el hilo, (b) Ilustración esquemática del aumento del campo magnetice alrededor del solenoide cuando se introduce una barra de hierro dentro del solenoide pasa una comente eléctrica por el hilo

El campo magnético exterior al solenoide con una barra de hierro situada en su interior es mayor que sin la barra (Fig.2b). El aumento del campo magnético fuera del solenoide es debido a la suma del campo generado por el solenoide y el campo magnético extemo a la barra imanada. El nuevo campo magnético resultante se denomina *inducción magnética*, o *densidad de flujo*, o simplemente *inducción* y se denota por el símbolo B . Se determina como

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2)$$

donde M la componente del campo debido a la barra y se denomina *intensidad de imanación* o simplemente *imanación*, y μ_0 es la *permeabilidad en el espacio libre* = $4\pi \cdot 10^{-7}$ Tesla-metro por amperio (T·m/A).

La unidad del SI para B es el Weber por metro cuadrado (Wb/m²), o el Tesla (T), y la unidad del SI para H y M es el Amperio por metro (A/m). La unidad CGS para B es el gauss (G) y para H el oersted (Oe).

Tabla 1. Resumen de las unidades de magnitudes magnéticas

Magnitud magnética	Unidades de SI	Unidades CGS
B (inducción magnética)	Weber/metro ² (Wb/m ²) o tesla (T)	Gauss (G)
H (campo aplicado)	Amperio/metro (A/m)	Orsted (Oe)
M (imanación)	Amperio/metro (A/m)	

Factores numéricos de conversión: $1 \text{ Wb/m}^2 = 1,0 \cdot 10^4 \text{ G}$; $1 \text{ A/m} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$

El incremento del campo magnético debido a la presencia de un material imanado se expresa utilizando *permeabilidad magnética* μ , definida como

$$\mu' = \frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r \quad (3)$$

donde μ_r es la *permeabilidad magnética relativo*, una característica adimensional.

En cierta forma, la permeabilidad magnética de los materiales magnéticos es análoga a la constante dieléctrica de los materiales dieléctricos. Sin embargo, la permeabilidad magnética de un material ferromagnético no es una constante sino que varía cuando el material es imanado, tal como se muestra en la Figura 3.

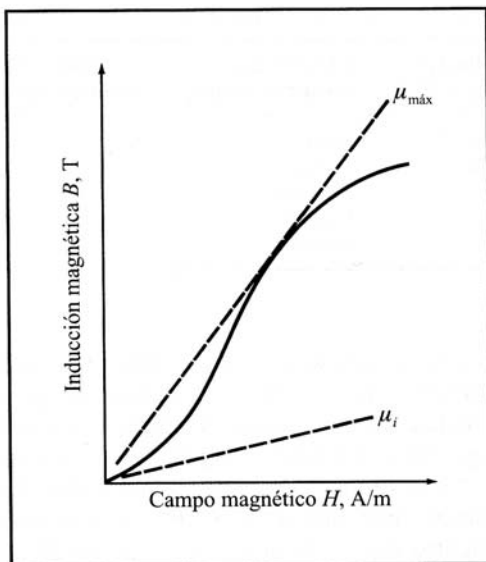


Figura 3. La curva de imanación B-H para un material ferromagnético tiene pendiente variable. Permeabilidades mínima y máxima corresponden a las recias indicadas

Dado que la imanación de un material magnético es proporcional al campo aplicado, el factor de proporcionalidad llamado *susceptibilidad magnética* χ_M se define como

$$\chi_M = \frac{M}{H} \quad (4)$$

que es una cantidad adimensional.

2. TIPOS DE MAGNETISMO EN MATERIALES

Cuando los electrones se mueven en un hilo conductor se genera un campo magnético alrededor del hilo (Fig.2) El magnetismo de los materiales también es debido al movimiento de los electrones, pero en este caso los campos y fuerzas magnéticas son causados por el espín de los electrones y su movimiento orbital alrededor del núcleo (Fig.4).

Cada electrón, que gira alrededor de su propio eje (Fig. 4), se comporta como un dipolo magnético y posee un momento dipolar denominado *magnetón de Bohr* μ_B . Este momento lo tiene el valor de

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi\sigma m} \quad (5)$$

En unidades del SI $\mu_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}$.

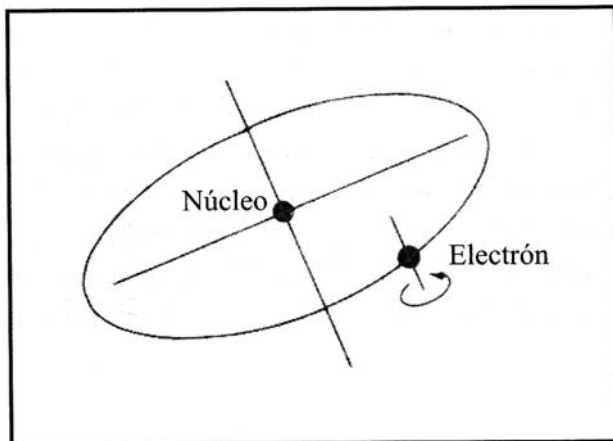


Fig.4. El espín del electrón sobre su eje y su movimiento orbital alrededor de su núcleo son los orígenes del magnetismo en los materiales.

Dependiendo de peculiaridades de estructura electrónica de materiales se distinguen diferentes tipos de materiales magnéticos.

2.1 Materiales diamagnéticos

Un campo magnético externo actuando sobre los átomos de un material desequilibra ligeramente los electrones de los orbitales y crea pequeños dipolos magnéticos en los átomos que se oponen al campo aplicado. Esta acción produce un efecto magnético negativo conocido como *diamagnetismo*. El diamagnetismo produce una susceptibilidad magnética negativa muy débil, del orden de $\chi_M = 10^{-6}$. El diamagnetismo ocurre en todos los materiales, pero en muchos el efecto magnético negativo queda cancelado por efectos magnéticos positivos.

2.2. Materiales paramagneticos

Los materiales que presentan una pequeña susceptibilidad magnética positiva por la presencia de un campo magnético se denominan *paramagneticos* y al efecto magnético se denomina *paramagnetismo*. Se produce por alineación individual de los momentos dipolares magnéticos de los átomos o moléculas bajo la acción de un campo magnético aplicado. El paramagnetismo produce susceptibilidades magnéticas en los materiales en un rango de 10^{-6} hasta 10^{-2} y se produce en muchos materiales.

El efecto paramagnético en los materiales desaparece cuando se elimina el campo magnético aplicado. Puesto que la agitación térmica distribuye aleatoriamente la dirección de los dipolos magnéticos, un incremento en la temperatura disminuye el efecto paramagnético.

Los átomos de algunos elementos de transición y tierras raras poseen capas internas parcialmente llenas con electrones desapareados. Estos electrones internos desapareados en los átomos, como no se están oponiendo a otros electrones ligados, causan fuertes efectos paramagneticos y, en algunos casos, producen efectos ferromagnéticos y ferrimagnéticos muy fuertes, que serán discutidos seguidamente.

2.3. Materiales ferromagneticos

El diamagnetismo y el paramagnetismo son inducidos por un campo magnético aplicado, y la imanación permanece sólo mientras se mantenga el campo. Un tercer tipo de magnetismo, denominado *ferromagnetismo*, es de gran importancia en ingeniería. Los materiales ferromagnéticos producen campos magnéticos que pueden mantenerse o eliminarse a voluntad.

Los elementos ferromagnéticos más importantes son el hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni). Las propiedades ferromagnéticas son debidas al modo en el que los espines de los electrones internos desapareados se alinean en la red cristalina. Las capas internas de átomos individuales se llenan con pares de electrones con espines opuestos, y de esta forma no queda ningún momento dipolar magnético debido a ellos. En los sólidos, los electrones externos de valencia se combinan unos con otros formando enlaces químicos de forma que no queda ningún momento magnético significativo debido a estos electrones. En el Fe, Co y Ni los electrones internos *3d* son los responsables del ferromagnetismo que presentan estos elementos. El átomo de hierro posee cuatro electrones *3d* desapareados, el átomo de cobalto tres y el átomo de níquel dos.

En una muestra sólida de Fe, Co o Ni a temperatura ambiente los espines de los electrones *3d* de átomos adyacentes se alinean en una dirección paralela por un fenómeno denominado *imanación espontánea*. Esta alineación paralela de dipolos magnéticos atómicos ocurre sólo en regiones microscópicas denominadas *dominios magnéticos*. Si los dominios están aleatoriamente orientados, entonces no se generará imanación neta en una muestra masiva. La alineación paralela de los dipolos magnéticos en los átomos de Fe, Co y Ni es debido a la formación de un intercambio positivo de energía entre ellos.

2.4. Antiferromagnetismo

Otro tipo de magnetismo que se presenta en algunos materiales es el antiferromagnetismo. En presencia de un campo magnético, los dipolos magnéticos de los átomos de los materiales anti-ferromagnéticos se alinean por sí mismos en direcciones opuestas (Fig.5).

Los elementos manganeso y cromo, en estado sólido y a temperatura ambiente, presentan anti-ferromagnetismo

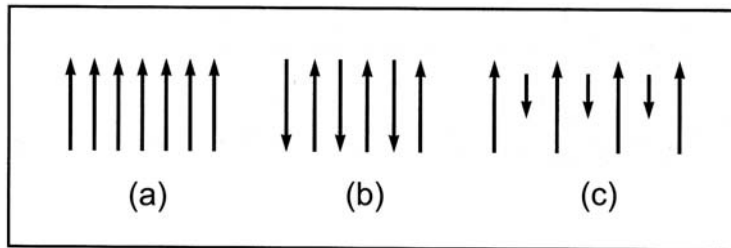


Figura 5 Alineamiento de los dipolos magnéticos para diferentes tipos de magnetismo: (a) ferromagnetismo, (b) antiferromagnetismo, y (c) ferrimagnetismo

2.5. Ferrimagnetismo

En algunos materiales cerámicos, iones diferentes poseen distinta magnitud para sus momentos magnéticos y cuando estos momentos magnéticos se alinean de forma antiparalela, se produce un momento magnético neto en una dirección (Fig. 5,c). Como grupo, los materiales ferrimagnéticos se denominan *ferritas*. Hay muchos tipos de ferritas. Un grupo se basa en la magnetita, Fe_3O_4 , que es la antiguamente conocida piedra magnética. Las ferritas poseen baja conductividad, que la hacen útil para muchas aplicaciones electrónicas.

3. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL FERROMAGNETISMO

La energía térmica hace que los dipolos magnéticos de un material ferromagnético se desvíen de su alineamiento. Al aumentar la temperatura, se alcanza una temperatura en la cual el ferromagnetismo de los materiales ferromagnéticos desaparece completamente, y el material se toma paramagnético. Esta temperatura se denomina *temperatura de Curie* (Fig. 6)

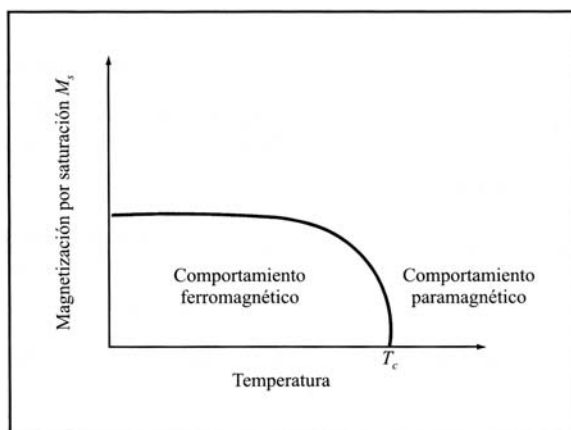


Figura 6. Efecto de la temperatura sobre la imanación de saturación en un material ferromagnético.

Cuando una muestra de material ferromagnético es enfriada por debajo de su temperatura de Curie, se vuelven a formar los dominios ferromagnéticos y el material se vuelve ferromagnético de nuevo. Las temperaturas de Curie del Fe, Co y Ni son 770, 1123 y 358 °C, respectivamente.

4. DOMINIOS FERROMAGNÉTICOS

Por debajo de la temperatura de Curie, los momentos dipolares magnéticos de los átomos de materiales ferromagnéticos tienden a alinearse por sí mismos en una dirección paralela en pequeñas regiones llamadas *dominios magnéticos*. Cuando un material ferromagnético es desmagnetizado por enfriamiento lento desde encima de su temperatura de Curie, los dominios magnéticos se alinean aleatoriamente de forma que no hay ningún momento magnético neto para una muestra masiva (Fig. 7).

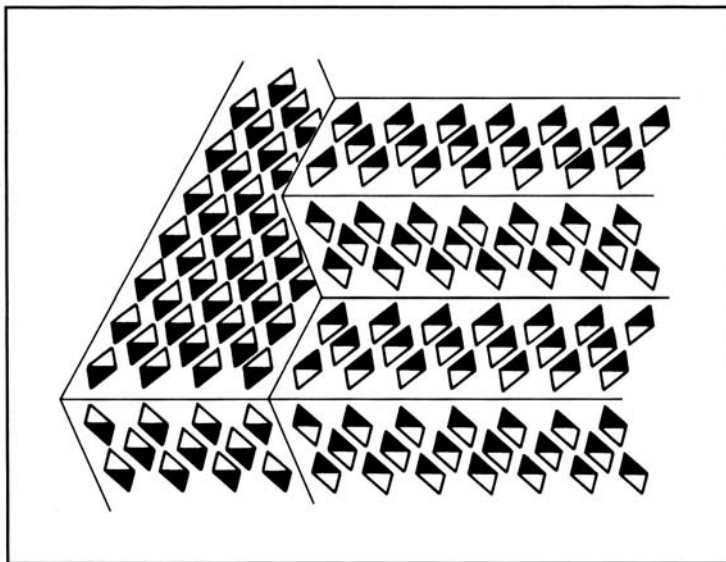


Figura 7. Dominios magnéticos en un metal ferromagnético. Todos los dipolos magnéticos en cada dominio están alineados, pero los dominios están alineados aleatoriamente de forma que no hay magnetización neta

Cuando se aplica un campo magnético externo a un material ferromagnético desmagnetizado, los dominios magnéticos cuyos momentos están inicialmente paralelos al campo magnético aplicado crecen a expensas de los dominios menos favorablemente orientados (Fig. 8). El crecimiento del dominio tiene lugar por el movimiento de las paredes del dominio, como se indica en la Figura 8.

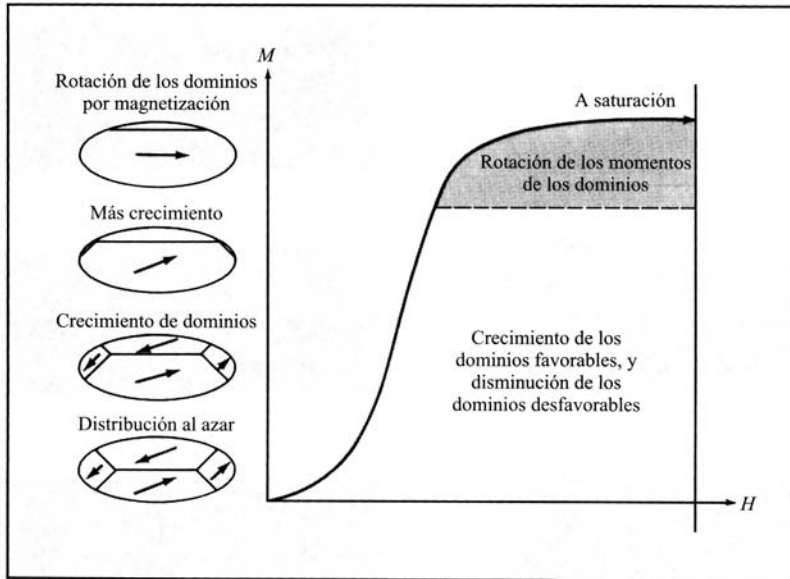


Figura 8. Crecimiento y rotación de los dominios magnéticos de un aplicado

Cuando el crecimiento del dominio termina, si el campo aplicado *material ferromagnético desimano* al imanarlo hasta la saturación mediante un campo magnético aumenta sustancialmente, ocurre la rotación del dominio. La rotación del dominio necesita considerablemente más energía que el crecimiento del dominio, y la pendiente de la curva B o M frente a H decrece para campos altos para la rotación del dominio (Fig.8). Cuando se elimina el campo aplicado, la muestra imanada permanece imanada, aunque se pierde algo de imanación debido a la tendencia de los dominios a rotar a su alineación original.

5. MAGNETIZACIÓN Y DESMAGNETIZACIÓN DE UN METAL FERROMAGNÉTICO

La figura 9 representa el efecto de un campo aplicado H sobre la inducción magnética B de un metal ferromagnético durante la imanación y desimanación (llamada curva de histeresis).

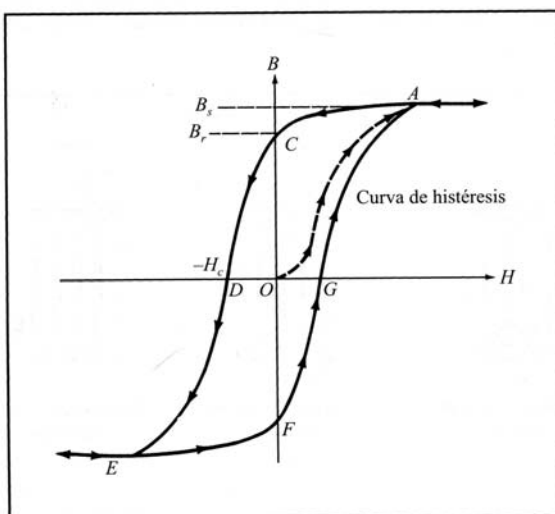


Figura 9. Ciclo de histeresis de la inducción magnética B respecto al campo H para un material ferromagnético.

Al aumentar el campo aplicado desde O, B aumenta desde cero hasta la *inducción de saturación* que se alcanza en el punto A. Al disminuir el campo aplicado a cero, la curva de imanación original no vuelve por sus pasos, y queda un flujo magnético denominado *inducción remanente* B_r (punto C en la Fig. 9).

Para disminuir la inducción magnética a cero, debe aplicarse un campo en inversa (negativo) de valor H_i denominado *campo coercitivo* (punto D en la Fig.9). Si el campo aplicado negativo aumenta todavía más, el material alcanzará la inducción de saturación con el campo inverso en el punto E de la Figura 9. Al eliminar el campo inverso, la inducción magnética volverá a la inducción remanente dada por el punto F en la Figura 9, y al aplicar un campo positivo, la curva $B-H$ seguirá el camino FGA hasta completar una vuelta. Volviendo a aplicar campos negativos y positivos hasta la inducción de saturación producirá vueltas sucesivas ACDEFGA. Este bucle de imanación se denomina ciclo de histéresis, y su área interna es una medida de la pérdida de energía o trabajo realizado por el ciclo imanador y desimanador.

6. MATERIALES MAGNÉTICAMENTE BLANDOS

Un *material magnético blando* es aquel que es fácil de imanar y desimanar, a diferencia de *material magnético duro* difícil de imanar y desimanar. La dureza física de un material magnético no necesariamente indica que sea magnéticamente blando o duro.

Materiales blandos, tal como aleaciones de hierro con 3-4 % de silicio utilizados en núcleos para transformadores, motores y generadores, poseen ciclos de histéresis estrechos con pequeñas fuerzas coercitivas (Fig.10,a). Por otra parte, los materiales magnéticos duros utilizados para imanes permanentes presentan ciclos de histéresis anchos con altas fuerzas coercitivas (Fig. 10,b)

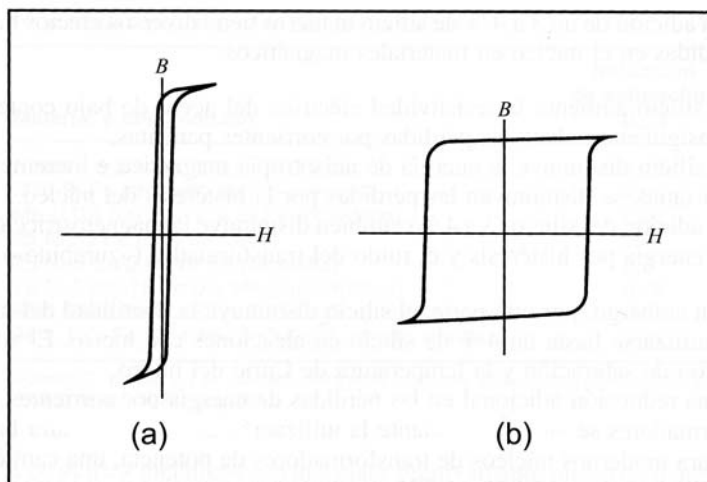


Figura 10. Ciclos de histéresis para (a) un material magnético blando y (b) un material magnético duro. El material magnético blando tiene un ciclo de histéresis estrecho lo que hace fácil su imanación y desimanación, mientras que el material magnético duro tiene un ciclo de histéresis ancho, que hace difícil su imanación y desimanación.

Para que un material ferromagnético sea blando, su ciclo de histéresis debería tener una fuerza coercitiva tan pequeña como sea posible. Esto significa que su ciclo de histéresis debería ser tan delgado como fuera posible para que el material se imane fácilmente y tenga

una alta permeabilidad magnética. Para la mayoría de las aplicaciones, una inducción de saturación alta significa además una importante propiedad de los materiales magnéticos blandos. Por tanto, para la mayoría de los materiales blandos se desean ciclos de histéresis muy estrechos y altos (Fig. 10a).

En los núcleos magnéticos de un transformador de corriente eléctrica alterna a 50 Hz la corriente eléctrica recorre el ciclo de histéresis completo 50 veces por segundo, y en cada ciclo hay cierta pérdida de energía debida al movimiento de las paredes de dominio del material magnético del núcleo del transformador. El aumento de la frecuencia de la señal eléctrica alterna en los dispositivos electromagnéticos aumenta las pérdidas de energía por histéresis.

Un campo magnético fluctuante provocado por una señal eléctrica alterna en un núcleo magnético conductor produce corrientes eléctricas inducidas (*corrientes parásitas*). Son una fuente de pérdidas de energía. Se pueden reducirse utilizando una estructura en láminas en el núcleo magnético. Una capa de aislante entre el material magnético conductor evita que las corrientes parásitas vayan de una lámina a otra. Otra forma de reducir las pérdidas por corrientes parásitas, particularmente para altas frecuencias, es utilizar un material magnético blando que sea aislante. Se utilizan óxidos ferrimagnéticos y otros tipos similares de materiales.

Una reducción adicional en las pérdidas de energía por corrientes parásitas en núcleos de transformadores se alcanza mediante la utilización de una estructura laminada (láminas apiladas). Para modernos núcleos de transformadores de potencia, una cantidad de finas láminas de hierro-silicio de unos 0,025 a 0,035 cm de grosor se apilan unas encima de otras con una fina capa de aislante entre ellas. Se recubre el material aislante por ambos lados de láminas de hierro-silicio y así se evitan las corrientes parásitas de flujo perpendicular a las láminas.

Tabla 2. Propiedades magnéticas de materiales blandos

Material y composición	Inducción de saturación, B_s, T	Campo coercivo, $H_j, A/cm$	Permeabilidad relativa inicial μ_i
Hierro magnético, chapa de 0,2 cm	2,15	0,8	250
M36 Si-Fe laminado en frío (aleatorio)	2,04	0,36	500
M6 (110) [001], 3,2% Si-Fe (orientado)	2,03	0,06	1.500
45 Ni-55 Fe (45 Permalloy)	1,6	0,024	2.700
75 Ni-5 Cu-2 Cr-18 Fe (Mumetal)	0,8	0,012	30.000
+79 Ni-5 Mo-15 Fe-0,5 Mn (Supermalloy)	0,78	0,004	100.000
48% MnO- Fe ₂ O ₃ , 52% ZnO- Fe ₂ O ₃ (ferrita suave)	0,36		1.000
36% NiO-Fe ₂ O ₃ , 64% ZnO-Fe ₂ O ₃ (ferrita suave)	0,29		650

8. MATERIALES MAGNÉTICAMENTE DUROS

Los materiales magnéticamente duros o permanentes se caracterizan por un alto campo coercitivo H_c , y una alta inducción magnética remanente B_r , como se indica esquemáticamente en la Figura 10,b. Por ello los ciclos de histéresis de los materiales magnéticamente duros son anchos y altos. Estos materiales se imanar en presencia de un campo magnético lo suficientemente intenso como para orientar sus dominios magnéticos en la dirección del campo aplicado. Los materiales magnéticamente duros son difíciles de desimanar una vez han sido imanados.

La Tabla 3 lista algunas propiedades magnéticas de varias aleaciones de alnico y otras aleaciones magnéticas permanentes.

Tabla 3. Propiedades magnéticas seleccionadas de materiales magnéticos duros

Material y composición	Inducción remanente. B_r, T	Campo coercido $H_c, kA/m$
Alnico 1, 12 Al, 21 Ni, 5 Co, 2 Cu, bal Fe	0,72	37
Alnico 5, 8 Al, 14 Ni, 25 Co, 3 Cu, bal Fe	1,28	51
Alnico 8, 7 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, bal Fe	0,72	150
Tierra rara-Co, 35 Sm, 65 Co	0,90	675-1200
Tierra rara-Co, 25,5 Sm, 8 Cu, 15 Fe, 1,5Zr, 50 Co	1,10	510-520
Fe-Cr-Co, 30 Cr, 10 Co, 1 Si, 59 Fe	1,17	46
MO-Fe ₂ O ₃ (M = Ba, Sr) (fernta dura)	0,38	235-240

Aleaciones ALNICO Las aleaciones de alnico (aluminio-mquel-cobalto) son los materiales magnéticamente duros comercialmente más importantes y cuentan con el 35 % del mercado de imanes duros. Las aleaciones de alnico son quebradizas y por ello se producen mediante fundido o en procesos de metalurgia de polvo. Los polvos de alnico se utilizan principalmente para producir grandes cantidades de pequeños artículos de formas complejas.

Aleaciones de tierras raras Los imanes de aleaciones de tierras raras se producen a larga escala y tienen propiedades magnéticas superiores a cualquier otro material magnético comercial. Tienen las mayores coercitividads de 3200 kA/m (40 kOe). El origen del magnetismo en los elementos de transición de las tierras raras se debe, casi completamente, a los electrones $4f$ desapareados de la misma forma que el magnetismo en Fe, Co y Ni se debe a sus electrones $3d$ desapareados.

Hay dos grupos principales de materiales magnéticos comerciales de tierras raras: uno basado en la monofase SmCo₅ y otro basado en las aleaciones endurecidas por precipitación de composición aproximada Sm (Co,Cu)_{7.5}

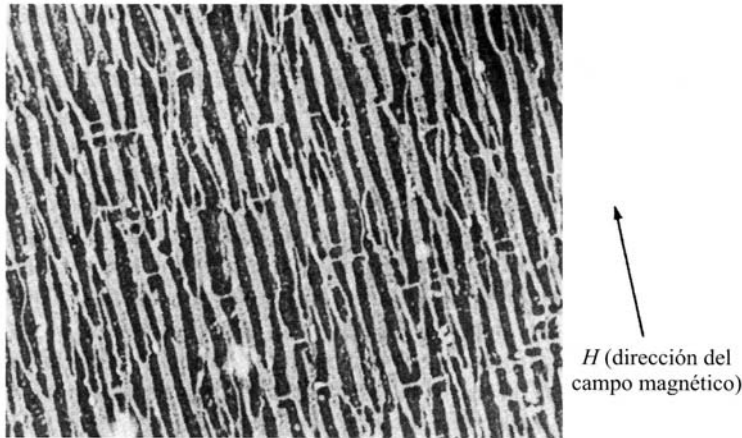


Figura 11. La estructura del alnico 8 (Al-Ni-Co-Fe-Ti) después de un tratamiento térmico a 800°C de 9 minutos inmerso en un campo magnético aplicado. Las líneas claras son la fase rica en Ni-Al que es altamente ferromagnética. por lo que se alarga en la dirección del campo aplicado, creando una anisotropía del campo coercitivo.

Los imanes de monofase de SmCo_5 son los más comúnmente utilizados. El mecanismo de coercitividad en estos materiales se basa en la nucleación y/o fijación de las paredes de dominio en las superficies y fronteras de grano. Estos materiales se fabrican mediante técnicas de metalurgia de polvo utilizando partículas finas (1 a 10 μm). Durante la compactación las partículas se alinean con el campo magnético. Los artículos prensados son cuidadosamente sinterizados para evitar el crecimiento de las partículas.

RESUMEN

Los materiales magnéticos son importantes materiales industriales utilizados para muchas aplicaciones de ingeniería. La mayoría de los materiales magnéticos industriales *son ferro- y ferri-magnéticos* y presentan grandes imanaciones. Los materiales ferromagnéticos más importantes están basadas en aleaciones de Fe, Co y Ni. Más recientemente se han realizado aleaciones ferromagnéticas con tierras raras como el Sm.

En los materiales ferromagnéticos, como el Fe, existen regiones llamadas *dominios magnéticos* en los cuales los momentos dipolares magnéticos de los átomos están alineados paralelamente entre sí. Cuando los dominios ferromagnéticos en una muestra tienen orientaciones aleatorias la muestra está desimánada. Cuando se aplica un campo magnético a una muestra de material ferrimagnético se alinean los dominios en la muestra y el material se imana y se mantiene imanado cuando se elimina el campo. El comportamiento magnético de un material ferromagnético es observado en la gráfica de la inducción magnética respecto al campo aplicado, denominada *ciclo de histéresis*.

Cuando un material ferromagnético es desimánado mediante la aplicación de un campo H , su inducción magnética alcanzará un nivel de saturación denominado *inducción de saturación* B_s . Cuando se elimina el campo aplicado, la inducción magnética disminuye hasta un valor llamado *inducción remanente* B_r . El campo desimánador necesario para reducir a cero la inducción magnética de una muestra ferromagnética se denomina *campo coercitivo* H_i .

Un material *magnéticamente blando* es aquel que es fácilmente imanado y desimanado. Las propiedades magnéticas más importantes de un material blando son su alta permeabilidad, alta inducción de saturación y bajo campo coercitivo. Cuando un material ferromagnético blando es imanado y desimanado repetidas veces se producen pérdidas de energía debido a *corrientes parásitas*. Ejemplos de materiales ferromagnéticos blandos incluyen aleaciones de Si con Fe-3 a 4 % utilizados en motores y transformadores de potencia y aleaciones de hierro Ni-20 a 50 % utilizadas principalmente para equipamiento de comunicaciones de alta sensibilidad.

Un *material magnéticamente duro* es aquel que es difícil de imanar y que permanece imantado después de eliminar el campo magnético. Las propiedades más importantes de un material duro son su alto campo coercitivo y su alta inducción de saturación. Ejemplos de materiales magnéticos duros son los alnicos que se utilizan como imanes permanentes para muchas aplicaciones eléctricas y algunas aleaciones de tierras raras que se basan en composiciones como SmCo_5 y el $\text{Sm}(\text{Co,Cu})_{7.5}$. Las aleaciones de tierras raras se utilizan para pequeños motores y otras aplicaciones que requieran materiales magnéticos con una magnetización alta.

Las *ferritas*, que son compuestos cerámicos, son otro tipo de materiales magnéticos industrialmente importantes. Estos materiales son ferrimagnéticos debido a un momento magnético neto generado por su estructura iónica.

La mayoría de las ferritas blandas tienen la composición básica de $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{C}_3$, donde M es un ion bivalente como el Fe^{2+} , Mn^{2+} y Ni^{2+} . Estos materiales tienen una *estructura de espinela inversa* y se utilizan para aplicaciones de baja señal, núcleos de memoria, audiovisuales y cabezas grabadoras, como ejemplos. Puesto que estos materiales son aislantes, pueden utilizarse para aplicaciones de alta frecuencia donde las corrientes parásitas son un problema con campos alternos.

Las ferritas duras, con la fórmula general de $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, donde M es usualmente un ion de Ba o Sr, son utilizadas para aplicaciones que requieran materiales magnéticos permanentes de bajo costo y baja densidad. Estos materiales se utilizan en altavoces, avisadores y receptores telefónicos.