



HISTORIA DEL MAGNETISMO

MAGNETISMO

Capítulo Segundo



Figura 2.1 -Thales de Mileto

Tales de Mileto, matemático, astrónomo y filósofo griego observó que al frotar el ámbar con seda se producían chispas y el ámbar adquiría la capacidad de atraer partículas de pelusa y de paja. La palabra griega para el ámbar es el electrón, de ella se derivan las palabras electricidad, electrón y electrónica. Notó la fuerza de atracción entre trozos de una roca magnética natural llamada piedra de imán que se encontró en un lugar llamado magnesita, de cuyo nombre se derivan las palabras magneto y magnetismo.

En el siglo XIII, el erudito francés Petrus Peregrinus realizó importantes investigaciones sobre los imanes. Tales de Mileto fue pionero en la electricidad y el magnetismo, pero su interés como el de otros contemporáneos era más filosófico que práctico. Sin embargo, el primer estudio científico de los fenómenos eléctricos no apareció hasta el 1600 d.C., cuando se publicaron las investigaciones del médico británico, William Gilbert de Inglaterra quien realizó los primeros experimentos sistemáticos acerca de los fenómenos eléctricos y magnéticos describiéndolo en su libro de magnetismo. Inventó el electroscopio para medir los efectos electrostáticos primero en reconocer que la tierra era un gigantesco imán, proporcionando una nueva visión dentro de los principios de la brújula y la aguja o brújula de inclinación.



Figura 2.2 - Otto von Guericke

La primera máquina para producir una carga eléctrica fue descrita en 1672 por el físico alemán Otto Von Guericke. Estaba formada por una esfera de azufre movida por una manivela, sobre la que se inducía una carga cuando se apoyaba la mano sobre ella. El científico francés Charles François de Cisternay Du Fay fue el primero en distinguir claramente los dos tipos diferentes de carga eléctrica: positiva y negativa. El condensador más antiguo, la botella de Leyden, fue desarrollado en 1745. Estaba formado por una botella de vidrio recubierta por dos láminas de papel de estaño, una en el interior y otra en el exterior. Si se cargaba una de las láminas con una máquina electrostática, se producía una descarga violenta si se tocaban ambas láminas a la vez.



Figura 2.3 - Benjamin Franklin

En 1750 Benjamín Franklin científico estadounidense, estableció la ley de la conservación de la carga en experimentos hechos con electricidad, que condujeron a su invención del pararrayos determinando que existían cargas positivas y negativas. Dedicó mucho tiempo a la investigación de la electricidad. Su famoso experimento con una cometa o papalote demostró que la electricidad atmosférica que provoca los fenómenos del relámpago y el trueno es de la misma naturaleza que la carga electrostática de una botella de Leyden. Franklin desarrolló una teoría según la cual la electricidad es un ‘fluido’ único que existe en toda la materia, y sus efectos pueden explicarse por el exceso o la escasez de ese fluido.

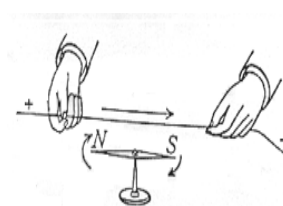
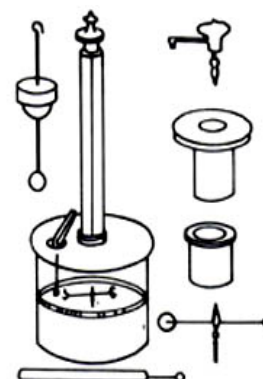


Figura 2.6 - Experimento de Oersted

La ley de que la fuerza entre cargas eléctricas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas fue demostrada experimentalmente por el químico británico Joseph Priestley alrededor de 1766. Priestley también demostró que una carga eléctrica se distribuye uniformemente sobre la superficie de una esfera metálica hueca, y que en el interior de una esfera así no existen cargas ni campos eléctricos.



La balanza de torsión que usó Coulomb



Figura 2.4 - Charles Agustin De Coulomb

En 1785 el francés Charles de Coulomb buscaba mejorar la brújula de los marinos y para ello experimentaba con cargas eléctricas. Colocó una pequeña esfera cargada en la barra de la balanza y luego, a diferentes distancias, otra esferita igualmente cargada. Entonces midió la fuerza entre ellas, fijándose en el ángulo en que la barra giraba. Así encontró la ley que rige la fuerza entre dos cargas eléctricas, ley que llamamos de Coulomb en su honor. Mas adelante invento la balanza de torsión, que es un aparatito muy simple. Consiste de una barra que cuelga de un hilo que puede torcerse. Si la barra gira, el hilo tiende a regresarla a su posición original. Cuando llegamos a conocer la fuerza de torsión que el alambre ejerce sobre la barra, tenemos un mecanismo muy sensible para medir fuerzas eléctricas y magnéticas. Durante este periodo Karl Friedrich Gauss, formulo el teorema de la divergencia relacionando un volumen y su superficie.



Figura 2.5 - Hans Christian Oersted haciendo su experimento

En 1813, Hans Christian Oersted predijo que se hallaría una conexión entre la electricidad y el magnetismo. En 1819 colocó una brújula cerca de un hilo recorrido por una corriente y observó que la aguja magnética se desviaba. Con ello demostró que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos.

Ander Marie Ampere amplió las observaciones de Oersted, inventando la bobina de solenoide para producir campos magnéticos. También formulando correctamente la teoría de que los átomos de un imán se magnetizan por medio de corrientes eléctricas muy pequeñas que circulan en ellos.

Alessandro Volta (italiano, a quien Napoleón nombró conde por su trabajo en el campo de la electricidad) es famoso por fabricar en 1800 la primera pila eléctrica, conocida como pila voltaica, conectando varias en serie, y observó que dichas baterías podían producir corrientes eléctricas. Volta, profesor de física y gran experimentador, realizó muchas otras contribuciones a la ciencia, como la invención del electróforo, un aparato para generar cargas estáticas. La unidad de potencial eléctrico, el voltio, recibe este nombre en su honor.

Los físicos italianos Luigi Galvani y Alessandro Volta llevaron a cabo los primeros experimentos importantes con corrientes eléctricas. Galvani produjo contracciones musculares en las patas de una rana aplicándoles una corriente eléctrica. En 1800, Volta presentó la primera fuente electroquímica artificial de diferencia de potencial, un tipo de pila eléctrica o batería. En esta misma época, el alemán George Simón Ohm formuló la ley que lleva su nombre relacionando la corriente, el voltaje y la resistencia; tuvo que pasar una década para que los científicos comenzaran a reconocer su verdad e importancia.

Michael Faraday realizó importantes contribuciones al estudio de la electricidad y el magnetismo. Descubrió que al mover un alambre en un campo magnético se genera una corriente (inducción electromagnética). Este descubrimiento contribuyó al desarrollo de las ecuaciones de Maxwell y llevó a la invención del generador eléctrico.

De todo esto surgió Michael Faraday demostrando que un campo magnético cambiante podía producir una corriente eléctrica. Mientras que Oersted encontró que la electricidad podía producir magnetismo, Faraday descubrió que el magnetismo podía producir electricidad.

Las investigaciones experimentales de Faraday, posibilitaron a James Clerk Maxwell, profesor de la universidad de Cambridge, Inglaterra, establecer la interdependencia de la electricidad y el magnetismo. En 1873 publicó la primera teoría unificada de electricidad y magnetismo. Postuló que la luz era de naturaleza electromagnética y que la radiación electromagnética de otras longitudes de onda debía ser posible. Aunque las ecuaciones de Maxwell son de gran importancia y, junto con condiciones en la frontera de continuidad y otras relaciones auxiliares son la base del electromagnetismo moderno, algunos científicos del tiempo de Maxwell fueron escépticos de su teoría, y en 1888 fueron reivindicadas por Heinrich Hertz, profesor de física en Karlsruhe, Alemania, quien generó y detectó ondas de radio, de cerca de 5 metros de longitud de onda, demostró que con un transmisor y receptor de chispa o señal, excepto por la diferencia en la longitud de onda, la polarización, la reflexión y la refracción de las ondas de radio eran idénticas a las de la luz. Hertz fue el padre de la radio, pero su invento permaneció como una curiosidad de laboratorio hasta que el italiano Guglielmo Marconi adaptó el sistema de chispa de Hertz para enviar mensajes a través del espacio. Marconi al agregar la sintonización, una antena grande, sistemas de tierra, y longitudes de onda más largas, pudo enviar señales a grandes distancias. En 1901 causó sensación al enviar señales de radio a través del océano atlántico. Marconi fue pionero en el desarrollo de la comunicación por radio para barcos. Antes de la radio o comunicación inalámbrica, como se le llamaba entonces, las naves Nikola Tesla estaban en alta mar en el más completo aislamiento. Podía ocurrir un desastre sin que nadie en tierra o en otras naves pudiera ser avisado de lo ocurrido. Marconi inició un cambio con su invento y la radio comenzó a desarrollar una gran importancia comercial. Más adelante Thomas Alva Edison dio a la electricidad y al magnetismo aplicaciones prácticas para la telegrafía, la telefonía, la iluminación y la generación de potencia. Mientras que Edison era partidario de la corriente continua, Nikola Tesla desarrolló la transmisión de potencia alterna e inventó el motor de inducción. Más adelante Einstein y otros trataron de relacionar las cinco fuerzas de la física en una gran teoría unificada en la que las ecuaciones de Maxwell serían un caso especial. Aunque tal unificación no ha sido lograda todavía, su realización es una de las grandes metas de la física moderna.

Los estudios posteriores sobre el magnetismo se centraron cada vez más en la comprensión del origen atómico y molecular de las propiedades magnéticas de la materia. En 1905, el físico francés Paul Langevin desarrolló una teoría sobre la variación con la temperatura de las propiedades magnéticas de las sustancias paramagnéticas, basada en la estructura atómica de la materia. Esta teoría es uno de los primeros ejemplos de la descripción de propiedades macroscópicas a partir de las propiedades de los electrones y los átomos.

Posteriormente, la teoría de Langevin fue ampliada por el físico francés Pierre Ernst Weiss, que postuló la existencia de un campo magnético interno, molecular, en los materiales como el hierro. Este concepto, combinado con la teoría de Langevin, sirvió para explicar las propiedades de los materiales fuertemente magnéticos como la piedra imán.

Después de que Weiss presentara su teoría, las propiedades magnéticas se estudiaron de forma cada vez más detallada. La teoría del físico danés Niels Bohr sobre la estructura atómica, por ejemplo, hizo que se comprendiera la tabla periódica y mostró por qué el magnetismo aparece en los elementos de transición, como el hierro, en los lantánidos o en compuestos que incluyen estos elementos. Los físicos estadounidenses Samuel Abraham Goudsmit y George Eugene Uhlenbeck demostraron en 1925 que los electrones tienen espín y se comportan como pequeños imanes con un 'momento magnético' definido. El momento magnético de un objeto es una magnitud vectorial que expresa la intensidad y orientación del campo magnético del objeto. El físico alemán Werner Heisenberg dio una explicación detallada del campo molecular de Weiss en 1927, basada en la recientemente desarrollada mecánica cuántica. Más tarde, otros científicos predijeron muchas estructuras atómicas del momento magnético más complejas, con diferentes propiedades magnéticas

EL MAGNETISMO Y EL ÁTOMO INTRODUCCIÓN

EL MAGNETISMO Y EL ÁTOMO INTRODUCCIÓN

Hubo un famoso intento de reformular la teoría electromagnética como una teoría microscópica partiendo de nuestro conocimiento de la existencia del electrón debida a Lorentz, llamada teoría del electrón. El modelo de Lorentz se topó con la necesidad de una teoría más completa. El electrón no es una partícula clásica y por tanto obedece las leyes de la física cuántica.

Actualmente sabemos que la materia está formada por átomos. Estos tienen su estructura propia, pero para nuestros propósitos bastará con que los consideremos como núcleos cargados positivamente, alrededor de los cuales giran electrones cargados negativamente, de tal manera que los átomos como un todo son neutros en su estado natural. Los electrones al girar en sus órbitas producen un campo magnético semejante al de un imán, como sabemos por la teoría electromagnética. Así, desde el punto de vista de sus propiedades magnéticas, los materiales están formados por pequeños imanes que, si el material no manifiesta magnetización, necesariamente están orientados al azar. Cuando se somete un material a la acción de un campo magnético, pueden darse dos mecanismos:

En el primero los imanes simplemente se alinean en la dirección del campo aplicado, como las brújulas en la Tierra. Este efecto se llama paramagnetismo y este alineamiento produce una resultante en la misma dirección del campo, dando como resultado que el material se comporte como un imán que es atraído en el sentido de ese campo. En el segundo mecanismo, llamado diamagnetismo, el material también se comporta como un imán, pero que se opone al campo que lo produce, siendo repelido por éste. Aquí el campo externo obliga a los imanes atómicos a procesar en la dirección del campo, generando un momento magnético. También podemos ahora entender el efecto de la temperatura en los fenómenos magnéticos, ya que los átomos están también sujetos a movimientos térmicos que se oponen a que se alineen en una cierta dirección.

Entender el ferromagnetismo es más difícil. Estos materiales presentan porciones que tienen magnetización completa y permanente y se llaman dominios ferromagnéticos. Fue Pierre Weiss en 1907 quien se dio cuenta de que los materiales ferromagnéticos están formados por estos dominios, los cuales pueden inclusive orientarse de tal manera que el material no exhiba propiedades magnéticas (Figura 2.7).

Con un campo magnético externo los dominios se pueden reorientar o crecer hasta formar un imán. Como ya lo hemos mencionado, este proceso de magnetización es irreversible. Para explicar la existencia de los dominios también se puede pensar en términos de pequeños imanes, pero que están formados por los propios electrones, los cuales poseen un movimiento magnético intrínseco llamado espín. La acción conjunta de los espines dentro de un dominio obedece a la fuerza de intercambio que es de naturaleza cuántica y no tiene análogo en la física clásica.

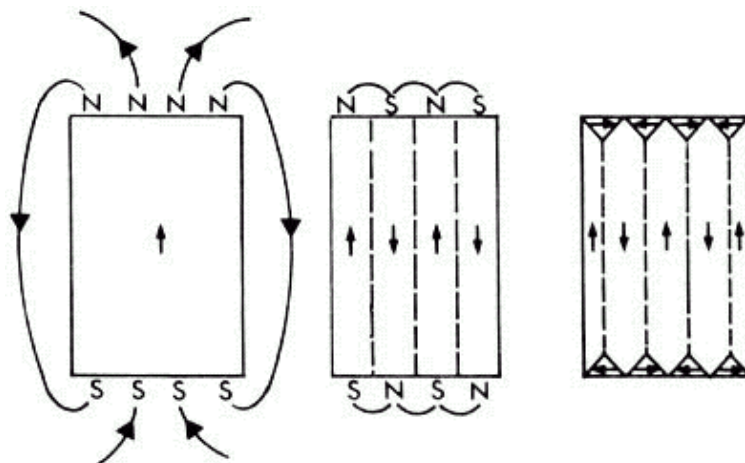


Figura 2.7 - Los dominios magnéticos pueden formar diferentes patrones, para minimizar la energía. Se pueden observar experimentalmente por ejemplo con un microscopio electrónico. Los dominios magnéticos se pueden mover por medio de campos externos.

El hecho de que el electrón se comporte como un pequeño imán nos lleva a suponer que todas las partículas elementales cargadas podrían tener momento magnético. De hecho así es y la teoría de las partículas elementales incluye el estudio de sus momentos magnéticos. Pero hay que recordar, la teoría electromagnética es una teoría macroscópica, basada en experimentos en la escala de nuestras proporciones y el reino de las partículas elementales puede deparar muchas sorpresas.

SUSTANCIAS MAGNÉTICAS

SUSTANCIAS MAGNÉTICAS

Las propiedades térmicas de las sustancias magnéticas fueron estudiadas por Pierre Curie, quien estableció que la susceptibilidad magnética de las sustancias paramagnéticas depende del inverso de la temperatura. En todos los ferromagnetos encontró un descenso de la magnetización hasta que la temperatura llegaba a un valor crítico, llamada temperatura de Curie (T_c), donde la magnetización se hace igual a cero; arriba de la temperatura de Curie, los ferromagnetos se comportan como sustancias paramagnéticas.

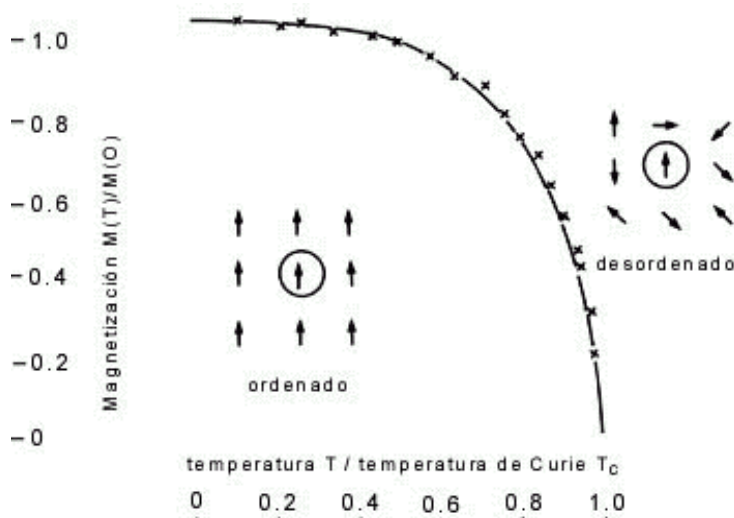


Figura 2.8 - El campo molecular de Weiss. Un espín escogido (en círculo) en un material magnético experimenta un campo debido a los otros espines. La magnetización se hace cero en temperatura de Curie T_c .

El diamagnetismo lo explicó Paul Langevin una década después de los experimentos de Curie. El fenómeno se puede explicar usando las leyes de Maxwell. Cuando se enciende un campo magnético, aparece un campo eléctrico. Este acelera a un electrón, produciéndose así una corriente, la cual crea una magnetización contraria al campo aplicado, según la ley de Lenz.

Esta explicación implica suponer que la ley de Lenz se cumple a escala atómica. Ya Coulomb sabía que las leyes ordinarias de electrostática y magnetoestática no podían ser válidas en la escala atómica. Con esa misma

filosofía, Pierre Weiss supuso que las interacciones entre las moléculas magnéticas se podrían descubrir empíricamente, por lo que introdujo el campo molecular sin intentar describir las leyes microscópicas. Este campo molecular actuaría sobre cada molécula como un campo externo y sería proporcional a la magnetización y al tipo de material. Su modelo llevó a la ley Curie-Weiss, que obedecen prácticamente todos los ferromagnetos. Esta coincidencia tan perfecta hizo difícil hacerle mejoras.

Existía en esa época de Curie, un enigma experimental: ¿por qué no es el hierro espontáneamente ferromagnético? Weiss propuso que su campo molecular tenía diferentes direcciones en algunos pedazos del sólido. Esto fue probado por Barkhausen en 1919, quien por medio de amplificadores electrónicos oyó los "clics" cuando un campo externo obliga a los dominios de Weiss a alinearse. Este es un comportamiento irreversible que explica el fenómeno de histéresis. Medidas de la razón giromagnética en ferromagnetos probaron además que éste no es magnetismo atómico o molecular, sino que sólo el espín electrónico participa de él.

Así pues, a pesar de la elocuencia de los argumentos de Lorentz y Langevin para aplicar la teoría electromagnética a nivel microscópico, resultó inevitable reconocer que a escala atómica había algo nuevo y diferente y que hacía falta una nueva teoría para enfrentarse a este mundo. De hecho, con el teorema de Bohr-Van Leeuwen quedó claro que la mecánica estadística clásica de las partículas cargadas no es capaz de explicar el comportamiento de ninguna de las sustancias magnéticas descritas aquí.

TEORÍA CUÁNTICA

TEORÍA CUÁNTICA

De 1913 a 1925 se desarrolló la "vieja mecánica cuántica". Bohr cuantizó el átomo de Rutherford y se empezó a entender bien la estructura de la materia. En 1921, Compton propuso que el electrón posee un espín intrínseco (gira sobre sí mismo) y momento magnético, además de su momento angular orbital y su magnetización. Esto fue probado en 1925 por S. Goudsmit y G. E. Uhlenbeck, quienes demostraron que el espín del electrón es:

$$\frac{\hbar}{2}; \text{ Siendo: } \hbar = \frac{h}{2\pi}; h = \text{Constante de Planck}$$

al momento magnético le asignaran el doble del esperado para una partícula cargada girando. En 1896 Zeeman mostró que las líneas espectrales se podían descomponer en conjuntos, llamados multipletes, si los átomos emisores se sujetan a campos magnéticos intensos. La teoría del electrón de Lorentz dio una explicación razonable de este efecto. Sin embargo, el efecto Zeeman anómalo ya no pudo ser explicado de la misma manera. En él se observó que las líneas D del sodio, en presencia de un campo magnético fuerte, se partían en cuartetos y multipletes mayores. Landé, al estudiar el efecto Zeeman anómalo, introdujo el famoso factor g y Goudsmit y Uhlenbeck le asignaron un factor de $g = 2$ al espín del electrón para que concordaran los resultados. Este factor de dos sólo se entendió bien algunos años más tarde cuando Dirac unió la teoría de la relatividad con la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica se desarrolló muy rápidamente. En 1923 De Broglie introdujo la mecánica ondulatoria: el electrón no es simplemente una partícula, sino que también tiene características de onda. En 1926 aparece la ecuación de onda debida principalmente a E. Schrödinger y equivalente a la ecuación de movimiento de la mecánica clásica de Newton. Mientras tanto, W. Heisenberg y H. A. Kramers probaron que se podría escribir esta mecánica en forma matricial y Max Born y Norbert Wiener colaboraron en demostrar que a cada cantidad física le corresponde un operador. La conexión entre teoría cuántica y mecánica estadística surge desde la cuantización de la radiación hecha por Planck en 1900.

La mecánica cuántica incluye el llamado principio de incertidumbre de Heisenberg que limita nuestro poder de información. Cuando estamos en el mundo microscópico, donde la constante de Planck se vuelve importante, no podemos conocer exactamente la posición y la velocidad de una partícula en forma simultánea. Precisar una implica perder precisión en la otra. En 1927 Pauli inventó las matrices de espín y su principio de exclusión.

Simultáneamente al desarrollo de la mecánica cuántica, Hartree, Fock, Heiter, London, Slater y muchos otros hacían cálculos atómicos y moleculares como una de las aplicaciones de la nueva ciencia. Para 1930, fecha del famoso congreso de Solvay sobre magnetismo, ya se habían sentado las bases de la teoría moderna de la materia y sus propiedades.

EL ESPÍN

EL ESPÍN

En 1921 Arthur Compton, un joven físico estadounidense quien trabajaba con Rutherford en Cambridge, tuvo la idea de que el electrón debería poseer un momento angular intrínseco o espín y por lo tanto actuar como un imán. Este espín no se debe confundir con el momento magnético que se produce al orbitar un electrón alrededor de un núcleo, el cual, además, era conocido. Compton tenía una base para proponer el espín, pues diversos experimentos no podían ser explicados de manera satisfactoria. Uno de ellos, el llamado experimento de Einstein-de Hass (1915) mostró que el factor de Landé o razón giromagnética valía 2 en vez de 1 como la teoría predecía. Esta razón giromagnética mide la razón entre el momento magnético y la componente del momento angular en una dirección. Para medirlo, se suspende una barra magnética de una fibra de cuarzo y se magnetiza pasando corriente por un alambre enredado en ella. De esta forma la barra adquiere un momento magnético y un momento angular que se determina por medio de la rotación angular de la fibra de cuarzo.

Además de este experimento, existían otros, tales como el efecto Zeeman anómalo, que estaban en desacuerdo con la teoría en boga. En 1925, Wolfgang Pauli investigó el problema de por qué las líneas del espectro de los metales alcalinos no eran singuletes como lo predecía la teoría de Bohr sino un doblete, o sea, había dos líneas en vez de una. Esto podía ser explicado si se suponía que el electrón podía existir en dos estados. Sin embargo, el experimento crucial que mostró la existencia del espín fue realizado por Otto Stern y Walter Gerlach en 1921. En su clásico experimento, un haz de átomos monovalentes, como el hidrógeno, el litio o la plata, viajaban a lo largo de un eje atravesando un campo magnético perpendicular a dicho eje. Había gradientes muy grandes, ya que el campo era inhomogéneo. En sus experimentos, Stern y Gerlach estudiaron la división del haz de átomos en el estado base y en estados excitados. Se esperaba que en el estado base no hubiera división, pero se encontró que el haz se dividía en dos componentes. El análisis mostró que este efecto podía ser consecuencia del electrón en la parte más externa del átomo. La proyección del momento magnético del estado base podía tomar, pues, dos valores. Esto condujo a G. Uhlenbeck y S. Goudsmit a introducir la hipótesis que un electrón posee un momento angular intrínseco en adición a su momento angular orbital. Uhlenbeck y Goudsmit, quienes por cierto no recibieron el premio Nobel, mostraron que los multipletes espectrales podían ser explicados con esta hipótesis, introduciendo el espín s que podía tomar dos valores: $+1/2$ ó $-1/2$ de tal forma que el momento angular intrínseco del electrón era: $+\hbar/2$ ó $-\hbar/2$. Además, se podía explicar el valor de dos para el factor de Landé en el experimento de Einstein-de Hass.

El concepto de espín electrónico apareció al principio como una hipótesis extra que debía ser agregada al resto de la teoría cuántica. Se pensaba que el espín podía ser tratado en forma análoga a un trompo girando sobre su eje. Debe enfatizarse, sin embargo, que no existe una teoría clásica rigurosa del espín.

La culminación de estos estudios fue la formulación por Dirac de su famosa ecuación dinámica, la cual incluye el espín electrónico y la relatividad especial. En su teoría, las propiedades del espín se obtienen en forma natural de la misma y no se necesitan hipótesis adicionales.

No se puede subestimar la influencia del espín en la física moderna. Puede afirmarse que éste es uno de los conceptos centrales de esta ciencia, y tanto en la física cuántica como en los fenómenos cooperativos ha jugado un papel fundamental para entender una gran diversidad de fenómenos.

EL PROBLEMA DEL FERROMAGNETISMO

EL PROBLEMA DEL FERRO-MAGNETISMO

Retomemos el problema del ferromagnetismo, pero esta vez como un fenómeno colectivo. ¿Qué entendemos por un fenómeno colectivo? Supongamos que caminamos en una calle bastante transitada y que a dos cuadras adelante de nosotros ocurre un accidente. De inmediato esa información se transmite por medio de la gente en forma de un movimiento colectivo y por tanto nos enteramos de qué pasó bastante antes de verlo. Es claro que un fenómeno así involucra a muchas personas. Esto es lo que en física se llama un fenómeno de muchos cuerpos. Cabe adelantar que el estudio del magnetismo como un fenómeno cooperativo desempeñó un papel decisivo en la mecánica estadística cuántica y en la termodinámica de las transiciones de fase. Hoy, con la teoría del grupo de renormalización, el estudio de las transiciones de fase es uno de los campos más importantes en el estudio de la materia.

El problema para poder explicar el ferromagnetismo consiste en lo siguiente: ya sea que los pequeños imanes que forman la materia sean electrones en sus órbitas o espines de electrones, las fuerzas magnéticas entre ellos no son lo suficientemente intensas para producir un ferromagneto. La interacción magnética se puede despreciar comparándola a la fuerza electrostática entre electrones. Con una simultaneidad que se ha repetido muchas veces en la historia de la ciencia, Dirac y Heisenberg descubrieron la fuerza de intercambio. Este efecto es bastante misterioso, ya que es totalmente cuántico y no tiene análogo clásico; ¡el ferromagnetismo no existiría si la constante de Planck h fuera cero!



Figura 2.9 - Las flechas representan espines paralelos y antiparalelos

Cuando Pauli introdujo su notación matricial para el espín, quedó claro que el espín es una cantidad vectorial. Esto implica que podemos imaginárnoslo como una flechita. ¿Qué puede suceder si tenemos dos electrones cada uno con su flecha de espín asociados y alineados ambos en alguna dirección? Pues que los espines podían quedar paralelos o antiparalelos, lo que se ve claramente en la figura.

Cada electrón dentro de un átomo está caracterizado por un conjunto de números cuánticos que nos dicen sus propiedades físicas. El principio de exclusión de Pauli establece que no puede haber dos electrones en un átomo con el mismo conjunto de números cuánticos. Esto implica que en una misma órbita sólo puede haber dos electrones, ya que la órbita da una serie de características comunes y sólo queda la posibilidad de que los espines sean antiparalelos. Este principio de exclusión lo cumplen todas las partículas que tienen espín fraccionario, como es el caso del electrón.

Tenemos entonces que, por un lado, los electrones sufren una repulsión electrostática (ley de Coulomb) y, por otro, que tienen que cumplir el principio de exclusión. Por dicho principio los espines paralelos tienden a separarse y eso reduce su repulsión. Se llama "intercambio" a la diferencia de energía entre la configuración de espines paralelos y la configuración de espines antiparalelos. Esta energía de intercambio favorece al ferromagnetismo solamente si el aumento de energía cinética causado por la separación es mayor que el descenso en la energía potencial electrostática. Los detalles de esta interacción son complicados, pero lo importante es apreciar que las fuerzas involucradas son eléctricas y que son mucho más intensas que las magnéticas, entendiéndose así el llamado magnetismo fuerte.

Con este modelo, cuando la temperatura está abajo de la temperatura crítica, se producen las llamadas "ondas de espín". Se forma una onda magnética en el material, en la cual participan todos los espines o pequeños imanes. Como se observa es claramente un efecto cooperativo. Arriba de la temperatura crítica las vibraciones térmicas son demasiado importantes y desaparecen las ondas de espín. Además las ondas de espín están cuantizadas y esos cuantos se llaman magnones. Pero aquí vamos a dejar ya la historia microscópica del magnetismo.

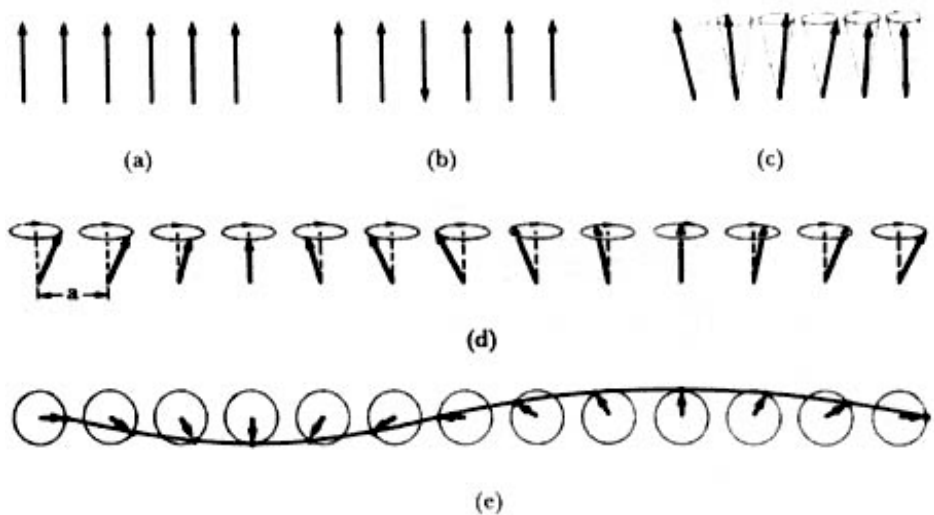


Figura 2.10 - (a) Estado base de un ferromagneto simple: todos los espines paralelos. (b) una excitación posible: un espín se invierte. (c) Se forma una onda de espín: el extremo del espín precesa formando conos. (d) Una onda de espín vista en perspectiva. (e) Espines vistos desde arriba. La onda se dibuja por la punta de los espines.

A pesar de que se ha investigado mucho sobre el intercambio no se ha logrado enunciar un postulado universal de primeros principios, como lo son las leyes de Maxwell o las de Newton en la mecánica clásica, De hecho, se tienen sólo descripciones semicuantitativas que aunque exitosas en algunos aspectos, pueden todavía ser mejoradas.

¿QUE ES UN IMÁN?

IMÁN

Según la real academia española, un imán es un mineral de hierro de color negruzco, opaco, casi tan duro como el vidrio, cinco veces más pesado que el agua, y que tiene la propiedad de atraer el hierro, el acero y en grado menor algunos otros cuerpos. Es combinación de dos óxidos de hierro, a veces cristalizada. Pero en un lenguaje coloquial suele llamarse imán a cualquier objeto que produce un campo magnético externo. Un imán permanente es un material que, cuando se lo coloca en un campo magnético suficientemente intenso, no sólo produce un campo magnético propio o inducido, sino que continúa produciendo campo inducido aún después de ser retirado del campo aplicado. Esta propiedad no se altera ni se debilita con el tiempo salvo cuando el imán se somete a cambios de temperatura, campos desmagnetizantes, tensiones mecánicas, etc. La habilidad del material para soportar sin cambios en sus propiedades magnéticas diversos tipos de ambientes y condiciones de trabajo define los tipos de aplicaciones en que se lo puede usar.

T Los materiales que pierden su magnetización cuando se retira el campo exterior que la produjo se llaman materiales magnéticos blandos. Estos materiales son útiles para transportar, concentrar o conformar campos magnéticos.

T Aquellos materiales que mantienen la magnetización al quitar el campo aplicado se denominan duros. Se utilizan para la fabricación de imanes permanentes. Los imanes (en general, los materiales magnetizados) se pueden modelar por corrientes equivalentes de magnetización.

LOS MATERIALES MAGNÉTICOS

Las corrientes eléctricas crean campo magnético. Además, existen materiales naturales o sintéticos que crean campo magnético. Los campos creados por los materiales magnéticos surgen de dos fuentes atómicas: los momentos angulares orbitales y de espín de los electrones, que al estar en movimiento continuo en el material experimentas fuerzas ante un campo magnético aplicado.

Por lo tanto, las características magnéticas de un material pueden cambiar por aleación con otros elementos, donde se modifican por las interacciones atómicas.

Por ejemplo, un material no magnético como el aluminio puede comportarse como un material magnético en materiales como alnico (aluminio-níquel-cobalto) o manganeso-aluminio-carbono. También puede adquirir estas propiedades mediante trabajo mecánico u otra fuente de tensiones que modifique la geometría de la red cristalina.

Todo material está compuesto por átomos que contienen electrones móviles. Un campo magnético aplicado actúa siempre sobre los electrones considerados individualmente. Esto da origen al efecto universal llamado diamagnetismo. Este es un efecto clásico y depende solamente del movimiento de los electrones.

A nivel atómico, la superposición de los momentos magnéticos (orbital, debido al movimiento del electrón alrededor del núcleo, e intrínseco o de espín) aportados por los electrones al átomo o molécula del cual forman parte de un momento magnético resultante o neto al átomo o molécula.



Figura 2.11 - Momentos magnéticos orientados al azar.

Cuando hay un momento neto atómico o molecular los momentos magnéticos tienden a alinearse con el campo aplicado (o con los campos creados por momentos magnéticos vecinos), dando lugar al efecto del paramagnetismo. Simultáneamente, la energía térmica omnipresente tiende a orientar al azar a los momentos magnéticos, de manera que la intensidad relativa de todos estos efectos determinará en definitiva el comportamiento del material. En la figura se esquematiza un material no magnetizado: los momentos magnéticos están orientados al azar.

Los materiales magnéticos se caracterizan por su permeabilidad μ , que es la relación entre el campo de inducción magnética y el campo magnético dentro del material:

$$B = \mu H$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 = \mu_0 (1 + \chi_m)$$

donde:

μ_r es la permeabilidad relativa

χ_m es la susceptibilidad magnética

EL DIAMAGNETISMO

El diamagnetismo es un efecto universal porque se basa en la interacción entre el campo aplicado y los electrones móviles del material. El diamagnetismo queda habitualmente enmascarado por el paramagnetismo, salvo en elementos formados por átomos o iones que se disponen en “capas” electrónicas cerradas, ya que en estos casos la contribución paramagnética se anula. Las características esenciales del diamagnetismo son:

- T Los materiales diamagnéticos se magnetizan débilmente en el sentido opuesto al del campo magnético aplicado. Resulta así que aparece una fuerza de repulsión sobre el cuerpo respecto del campo aplicado.
 - T La susceptibilidad magnética es negativa y pequeña y la permeabilidad relativa es entonces ligeramente menor que 1.
 - T La intensidad de la respuesta es muy pequeña.
- Ejemplos de materiales diamagnéticos son el cobre y el helio.

PARA-MAGNETISMO

Los materiales paramagnéticos se caracterizan por átomos con un momento magnético neto, que tienden a alinearse paralelo a un campo aplicado. Las características esenciales del paramagnetismo son:



Figura 2.12 - Los materiales paramagnéticos se magnetizan débilmente

- T Los materiales paramagnéticos se magnetizan débilmente en el mismo sentido que el campo magnético aplicado. Resulta así que aparece una fuerza de atracción sobre el cuerpo respecto del campo aplicado.
- T La susceptibilidad magnética es positiva y pequeña y la permeabilidad relativa es entonces ligeramente mayor que 1.
- T La intensidad de la respuesta es muy pequeña, y los efectos son prácticamente imposibles de detectar excepto a temperaturas extremadamente bajas o campos aplicados muy intensos.

Debido a la debilidad de la respuesta, a menudo los materiales paramagnéticos se asimilan al aire ($\mu = \mu_0$) en el diseño magnético. Ejemplos de materiales paramagnéticos son el aluminio y el sodio. Distintas variantes del paramagnetismo se dan en función de la estructura cristalina del material, que induce interacciones magnéticas entre átomos vecinos.

FERRO-MAGNETISMO

En los materiales ferromagnéticos los momentos magnéticos individuales de grandes grupos de átomos o moléculas se mantienen alineados entre sí debido a un fuerte acoplamiento, aún en ausencia de campo exterior. Estos grupos se denominan dominios, y actúan como un pequeño imán permanente. Los dominios tienen tamaños entre 10^{-12} y 10^{-8} m³ y contienen entre 10^{21} y 10^{27} átomos. Los dominios se forman para minimizar la energía magnética entre ellos. En ausencia de campo aplicado, los dominios tienen sus momentos magnéticos netos distribuidos al azar. Cuando se aplica un campo exterior, los dominios tienden a alinearse con el campo. Este alineamiento puede permanecer en algunos casos de muy fuerte acoplamiento cuando se retira el campo, creando un imán permanente. Las características esenciales del ferromagnetismo son:

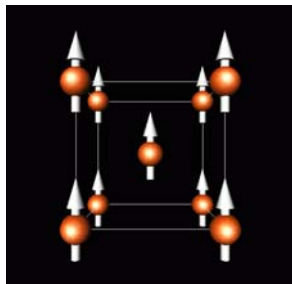


Figura 2.13 - Ejemplo de la alineación de los dominios en un cristal BCC de hierro

T Los materiales ferromagnéticos se magnetizan fuertemente en el mismo sentido que el campo magnético aplicado. Resulta así que aparece una fuerza de atracción sobre el cuerpo respecto del campo aplicado.

T La susceptibilidad magnética es positiva y grande y la permeabilidad relativa es entonces mucho mayor que 1

En la figura se observa un esquema de la estructura del hierro (BCC - cúbica de cuerpo centrado). Los momentos magnéticos están alineados ya que existen fuertes interacciones entre ellos. La agitación térmica tiende a desalinear los dominios. A temperatura normal, la energía térmica no es en general suficiente para desmagnetizar un material magnetizado. Sin embargo, por encima de una cierta temperatura, llamada temperatura de Curie, el material se vuelve paramagnético, debido a que los efectos térmicos de desorden son mayores que los efectos de alineamiento de la interacción magnética entre dominios. Una forma de desmagnetizar un material ferromagnético es entonces calentarlo por encima de esta temperatura.

En la tabla se presentan las temperaturas de Curie de algunos materiales ferromagnéticos elementales y aleaciones. Se ve que estas temperaturas son en casos muy altas y cercanas a la temperaturas de fusión del elemento, por lo que en la práctica la desmagnetización por temperatura es en general un proceso parcial. Ejemplos de materiales ferromagnéticos son el hierro, el cobalto, el níquel y la mayoría de los aceros.

Material	T_C (K)	Material	T_C (K)
Fe	1043	Cu_2MnIn	500
Co	1388	EuO	77
Ni	627	EuS	16.5
Gd	293	MnAs	318
Dy	85	MnBi	670
$CrBr_3$	37	$GdCl_3$	2.2
Au_2MnAl	200	Fe_2B	1015
Cu_2MnAl	630	MnB	578

ANTI-FERRO-MAGNETISMO Los materiales antiferromagnéticos tienen un estado natural en el cual los espines atómicos de los átomos adyacentes son opuestos, de manera que el momento magnético neto es nulo. Este estado natural hace difícil que el material se magnetice, aunque de todas formas adopta una permeabilidad relativa ligeramente mayor que 1.

El fluoruro de manganeso (MnF), cuya estructura se esquematiza en la figura de la izquierda, es un ejemplo simple de explicar. Los momentos de los átomos de Mn en las esquinas del cubo apuntan en una dirección, y los que se hallan en el centro del cubo apuntan en la dirección opuesta. Dado que hay igual número de cada uno, cuando muchas de estas celdas unitarias se agrupan juntas, los momentos magnéticos se cancelan exactamente.

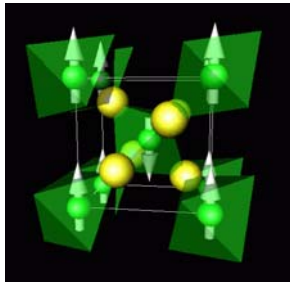


Figura 2.14 - Imantación del fluoruro de manganeso

Por encima de una temperatura crítica, llamada temperatura de Neel, un material antiferromagnético se vuelve paramagnético. La tabla muestra la temperatura de Neel de varios compuestos. Otro ejemplo de material antiferromagnético es el cromo.

Compuesto	T_N [K]	Compuesto	T_N [K]
CoCl ₂	25	MnO	122
CoF ₂	38	MnSe	173
CoO	291	MnTe	310-323
Cr	475	NiCl ₂	50
Cr ₂ O ₃	307	NiF ₂	78-83
FeCl ₂	70	NiFeO	180
FeF ₂	79-90	NiO	533-650
FeO	198	TiCl ₃	100
FeMn	490	UCu ₅	15
α -Fe ₂ O ₃	953	V ₂ O ₃	170
MnF ₂	72-75		

FERRI-MAGNETISMO

Los materiales ferrimagnéticos son similares a los antiferromagnéticos, salvo que las especies de átomos alternados son diferentes (por ejemplo, por la existencia de dos subredes cristalinas entrelazadas) y tienen momentos magnéticos diferentes. Existe entonces una magnetización neta, que puede ser en casos muy intensa. La magnetita se conoce como imán desde la antigüedad. Es uno de los óxidos más comunes del hierro (Fe₃O₄) y también es cúbico. La figura ilustra la estructura. La fórmula podría ser escrita en forma muy simplista como FeO·Fe₂O₃ con Fe⁺⁺ como FeO y Fe⁺⁺⁺ como Fe₂O₃. El Fe⁺⁺⁺ ocupa los huecos tetraédricos, y la mitad de los huecos octaédricos, y el Fe⁺⁺ ocupa la otra mitad. Los momentos magnéticos en los sitios octaédricos son antiferromagnéticos y se cancelan, mientras que en los sitios tetraédricos están ferromagnéticamente alineados. Otro ejemplo de materiales ferrimagnéticos son las ferritas.

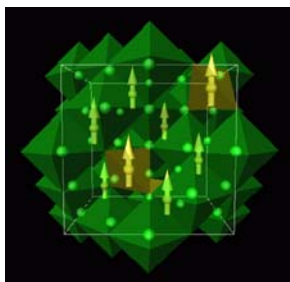


Figura 2.15 -Estructura de los dominios de la magnetita

En la siguiente tabla se muestran algunos valores de la susceptibilidad magnética de algunos materiales:

Tabla de susceptibilidades magnéticas			
Paramagnéticos +		Diamagnéticos -	
+ 10200.00	Neodimio (Nd ₂ O ₃)	- 248.00	Colesterol (C ₂₇ H ₄₆ O)
+ 7200.00	Oxido ferroso (FeO)	- 122.00	Zirconio (Zr)
+ 4900.00	Oxido de cobalto (CoO)	- 38.20	Carbonato de calcio(CaCO ₃)
+ 1860.00	Samario (Sm)	- 30.30	Cloruro de sodio (ClNa)
+ 660.00	Oxido de níquel (NiO)	- 24.10	Mercurio (Hg)
+ 529.00	Manganeso (Mn)	- 15.50	Azufre (S)
+ 395.00	Uranio (U)	- 6.70	Boro (B)
+ 13.00	Magnesio (Mg)	- 5.46	Cobre (Cu)
0.00	Lutecio (Lt)		

MATERIALES MAGNÉTICOS MODERNOS

En esta sección se presenta algunos materiales magnéticos de importancia tecnológica en la fabricación de imanes permanentes.

ALNICO

La aleación de aluminio, níquel, cobalto y hierro conocida como Alnico se desarrolló en la década de 1940 y representó el primer paso para crear imanes más potentes y de mejores propiedades metalúrgicas que el hierro y las variantes de aceros usadas hasta entonces. La proporción de sus elementos y el agregado de otros elementos para mejorar las propiedades magnéticas hacen que existan muchas variantes comerciales de Alnico. Los imanes de Alnico se fabrican habitualmente por conformado, con moldes desde la aleación fundida o por técnicas metalúrgicas cerámicas que parten de la aleación en polvo fino y construyen la pieza por conformado a presión y sinterizado. El producto de la energía para imanes de Alnico varía entre 1.5 y 7.5 MGOe.

El Alnico tiene la menor resistencia a la desmagnetización de todos los materiales que presentamos en esta sección, pero tiene la mejor respuesta a efectos térmicos, lo que hace que pueda usarse en ambientes hasta 550°C y en aplicaciones donde se requiere estabilidad de las propiedades magnéticas sobre un amplio rango de temperatura.

La figura presenta curvas de desmagnetización de distintas variantes de Alnico.

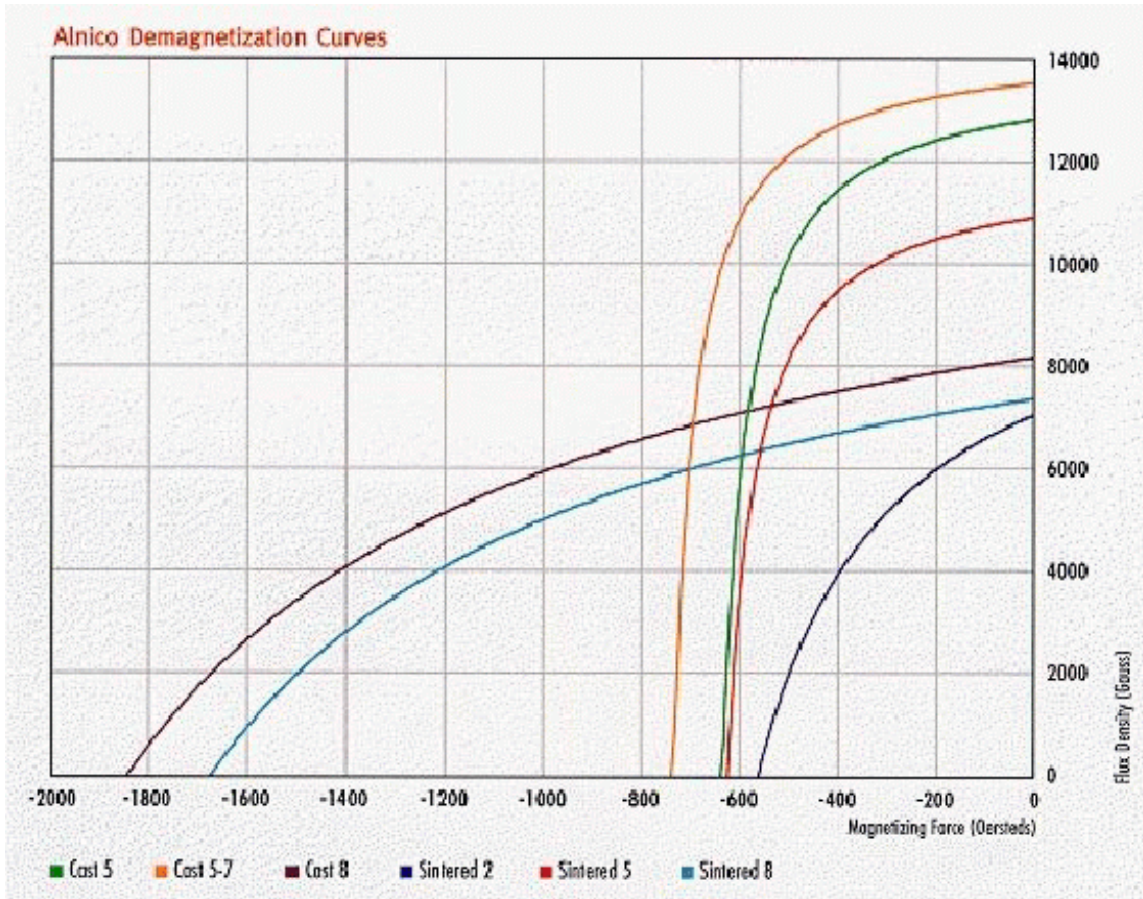


Figura 2.16 - Curvas de desmagnetización de distintas variantes de Alnico.

**FERRITAS
CERÁMICAS**

Muchos imanes permanentes está hechos mediante técnicas metalúrgicas que muelen el material hasta convertirlo en un polvo de pequeñas partículas. Para maximizar la magnetización de saturación M_{sat} del conjunto del material es conveniente que los momentos magnéticos en cada partícula estén alineados y que los momentos magnéticos de las partículas mismas también lo estén. Esto último se consigue aplicando un campo orientador durante el proceso de consolidar el polvo en un aglomerado sólido.

Los momentos dentro de cada partícula se alinearán espontáneamente como se muestra en el diagrama (a) siempre que el polvo sea molido hasta un tamaño cercano al de un único dominio magnético.

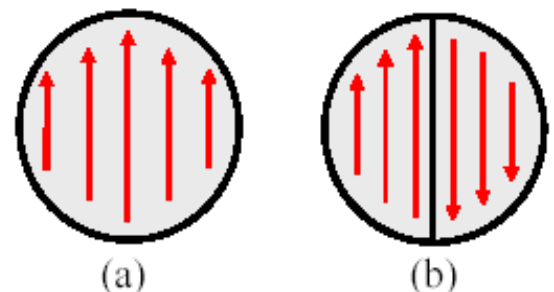


Figura 2.17 - Alineación de los momentos magnéticos

Si el tamaño de la partícula es mucho mayor, será energéticamente más favorable la existencia de una frontera de dominio como se muestra en el diagrama (b), llevando a una magnetización nula para la partícula. Estos dominios se generan espontáneamente en el material. Se puede calcular por consideraciones energéticas el tamaño máximo de las partículas a obtener para lograr partículas mono-dominio. Este tamaño es alrededor de $1\mu\text{m}$ para ferritas cerámicas.

Las ferritas cerámicas se fabrican usando polvo de óxido de hierro, al que se agrega bario o estroncio para mejorar el alineamiento de la estructura cristalina. La fórmula es $X_n(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ donde $X = \text{Ba}$ ó Sr y $5.8 < n < 6.0$. Después del molido, el polvo se comprime en una matriz, con un campo magnético aplicado si así se desea. Si no se aplica campo en este proceso, se obtendrá un imán isotrópico con iguales propiedades magnéticas en todas direcciones, mientras que si se aplica un campo exterior, se obtiene un imán anisótropo con propiedades magnéticas preferenciales sobre un cierto eje. El polvo compactado entonces se sinteriza a una temperatura de 1100°C - 1300°C (de donde el nombre de cerámico) para obtener un material compacto y se maquina hasta su forma y tamaño finales.

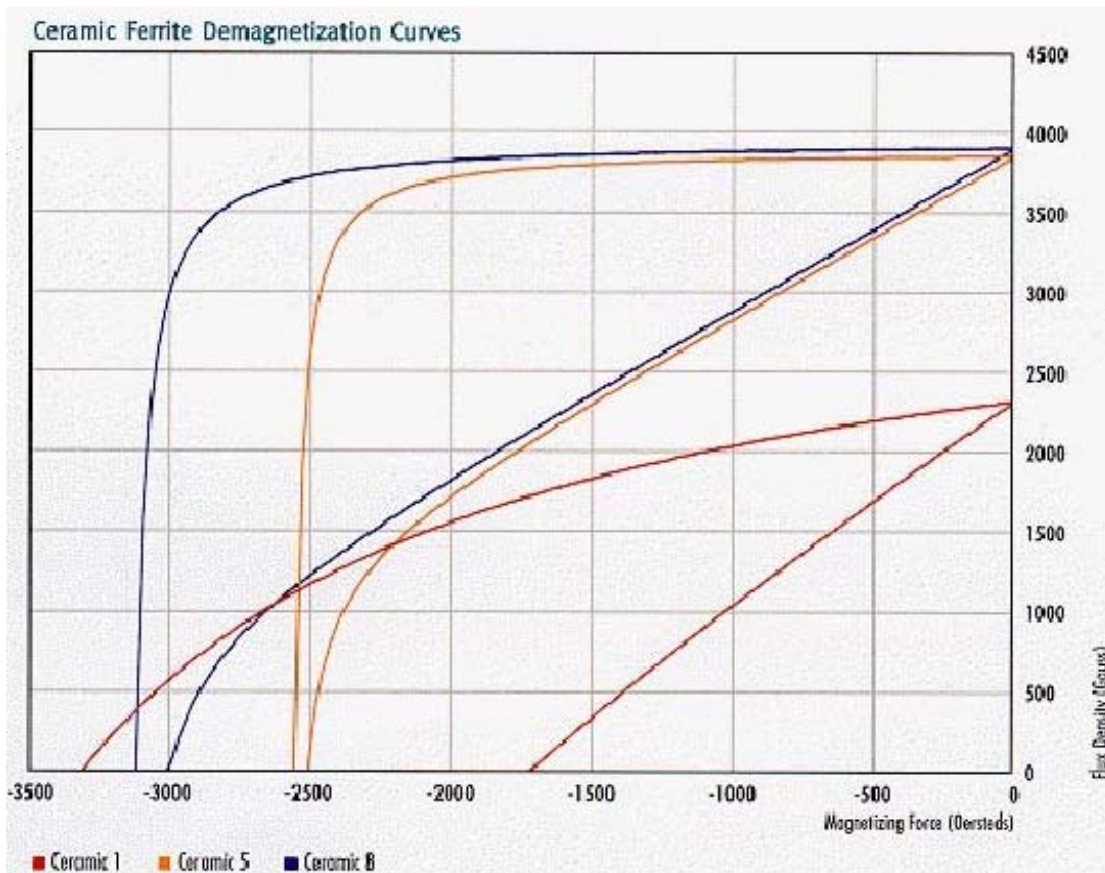


Figura 2.18 - Curvas de desmagnetización de la ferrita cerámica

Alternativamente, el polvo puede mezclarse con un aglutinante de polímeros y luego se extrusiona o conforma en una matriz por compresión o moldeo por inyección, produciendo un imán de ferrita moldeada (*bonded ferrite*) de forma cualquiera. Pueden obtenerse propiedades anisótropas aplicando un campo de orientación durante el moldeo.

Como las ferritas cerámicas usan partículas mono-dominio, su magnetismo permanente se basa en la anisotropía magnetocristalina. En la página anterior se muestra el diagrama las curvas características de desmagnetización de varios compuestos de ferrita cerámica.

SAMARIO-COBALTO Los átomos de los elementos llamados tierras raras tienden a formar compuestos intermetálicos con metales de transición como Fe, Ni o Co, y en la primera época del desarrollo de los imanes de estos materiales la teoría predecía que los elementos más livianos – en particular el samario – se combinaría de la forma más favorable con el cobalto para producir una alta anisotropía cristalina. La experiencia confirmó la factibilidad de varios compuestos intermetálicos, y el primer imán práctico se construyó con el compuesto SmCo_5 , seguido más tarde por $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

Los imanes de samario-cobalto se fabrican según las mismas líneas que las ferritas. Dado que tanto el samario como el cobalto son elementos relativamente caros, se fabrican imanes anisótropos con propiedades preferenciales a lo largo de un eje.

Los imanes de tierras raras tienen un mecanismo de fronteras de dominio mucho más complicado que el derivado de la pura anisotropía magnetocristalina, lo que lleva a que las mejores propiedades magnéticas se obtienen con un tamaño de grano mayor que el correspondiente a partículas mono-dominio. Esto significa que no sólo las fronteras de dominio pueden existir, sino que se mueven con relativa facilidad dentro del grano. Mientras que esta característica permite que se alcance la

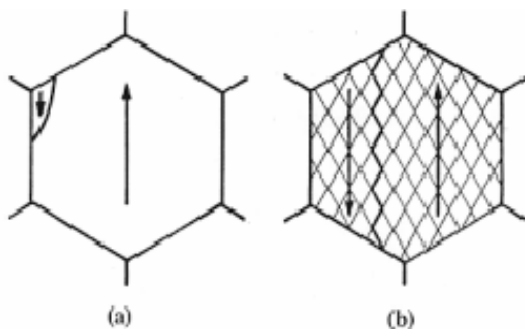


Figura 2.19 - Un grano en proceso de nucleación

magnetización de saturación aún con un modesto campo aplicado, una alta coercividad intrínseca, dependerá de la habilidad del grano para resistir la formación de un dominio invertido cuando se aplica un campo de desmagnetización. Esta propiedad vital se controla por las fronteras de grano, que están compuestas de desviaciones de la composición primaria del material que proveen una fuerte fijación de las fronteras de dominios en estos lugares. Este mecanismo, conocido como nucleación, se da en imanes de SmCo_5 . Un grano en proceso de nucleación se muestra en el diagrama (a).

El $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ difiere de SmCo_5 en que sus granos contienen una estructura de pequeñas celdas como se ilustra en el diagrama (b). El tratamiento térmico de este compuesto promueve la formación de estas celdas de $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, separadas por delgadas paredes de SmCo_5 que son las que proveen la fijación de las paredes de dominio.

La fijación, en lugar de la nucleación, es entonces el mecanismo de control en imanes de $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, y mientras que este mecanismo provee una mayor coercividad intrínseca, debe aplicarse un campo mucho mayor para llevar inicialmente este material a su magnetización de saturación.

Ya sea un imán de tipo-nucleación SmCo_5 o de tipo-fijación $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, es decir, ya sea que las paredes de dominio estén fijas a las fronteras de grano o de celda, se moverán bastante libremente una vez superadas estas fuerzas de fijación, y M_{sat} se invertirá en forma abrupta al alcanzar el campo aplicado el valor $-H_{\text{ci}}$, en una forma similar al comportamiento teórico derivado de la anisotropía magnetocristalina.

En la figura siguiente se muestran curvas de desmagnetización para diversos compuestos de SmCo. Los imanes de SmCo son generalmente muy caros para aplicaciones masivas. Se suelen utilizar en instrumental de laboratorio o especiales debido a sus excelentes propiedades de directividad.

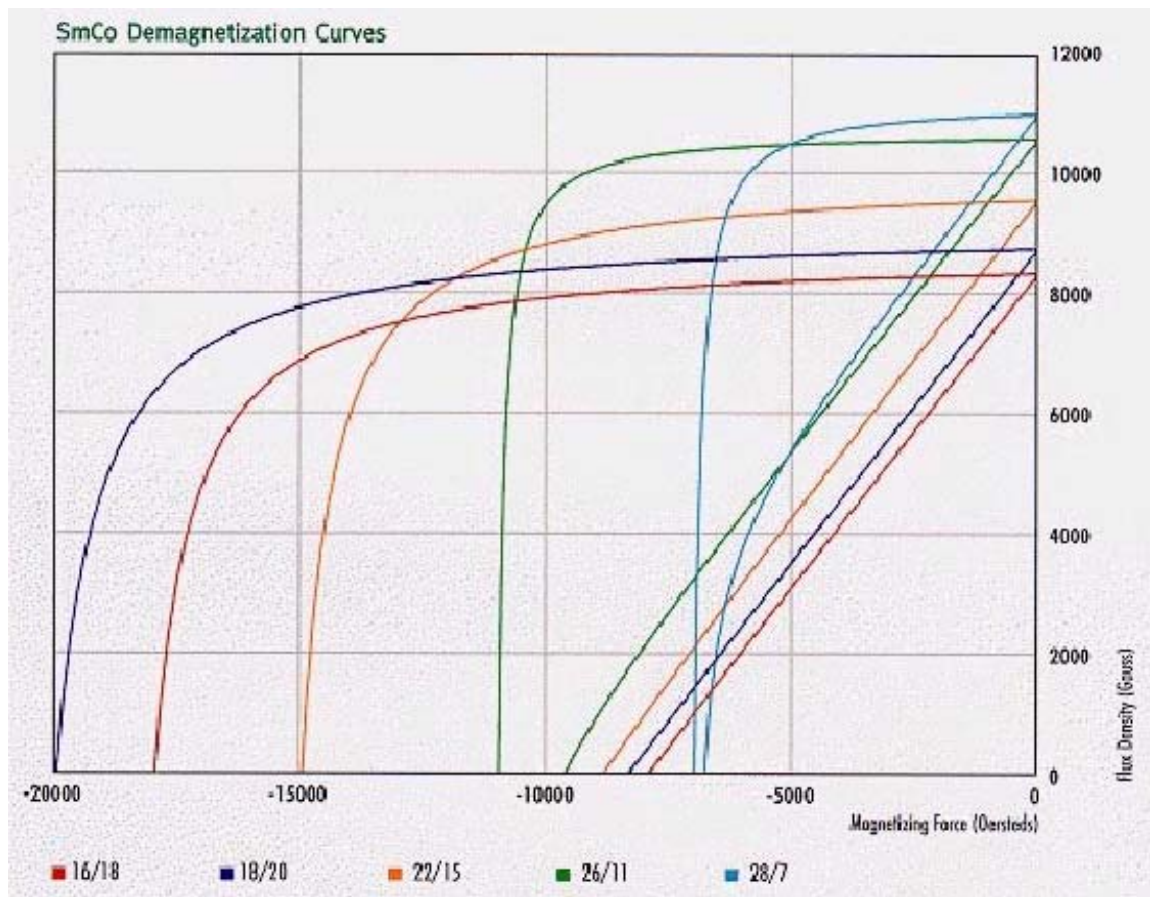


Figura 2.20 - Curvas de desmagnetización de los compuestos de SmCo

**NEODIMIO-
HIERRO-
BORO**

Luego del exitoso desarrollo de imanes de samario-cobalto, se trató de desarrollar imanes de tierras raras de menor costo. El hierro es un metal de transición mucho más barato que el cobalto, y el neodimio es una tierra rara liviana mucho más abundante que el samario. Diversas tierras raras X se combinaron con hierro en compuestos X_2Fe_{17} , pero todos presentaron temperaturas de operación muy bajas para propósitos prácticos. Una mejora significativa ocurrió con el descubrimiento de que el agregado de boro formaba un compuesto ternario con fuerte anisotropía magnetocristalina uniaxial, y una mayor temperatura de operación.

Un compuesto de neodimio-hierro-boro de fórmula aproximada a $Nd_2Fe_{14}B$ presentó la mejor combinación de propiedades magnéticas y térmicas. La estructura de la celda unitaria de este material se muestra en la figura siguiente y consiste de 68 átomos. 56 son de Fe, que ocupan sitios cristalográficamente no equivalentes denominados 16k1, 16k2, 8j1, 8j2, 4e y 4c.

Los imanes comerciales de Nd-Fe-B vienen en muchas combinaciones de proporciones de Nd y Fe, lo que produce un amplio rango de propiedades disponibles. Hay diferentes métodos de producción de imanes de Nd-Fe-B. El sinterizado es similar a los ya vistos. El polvo se moldea en una estructura compacta anisótropa mediante compactación y sinterizado en un campo orientador.

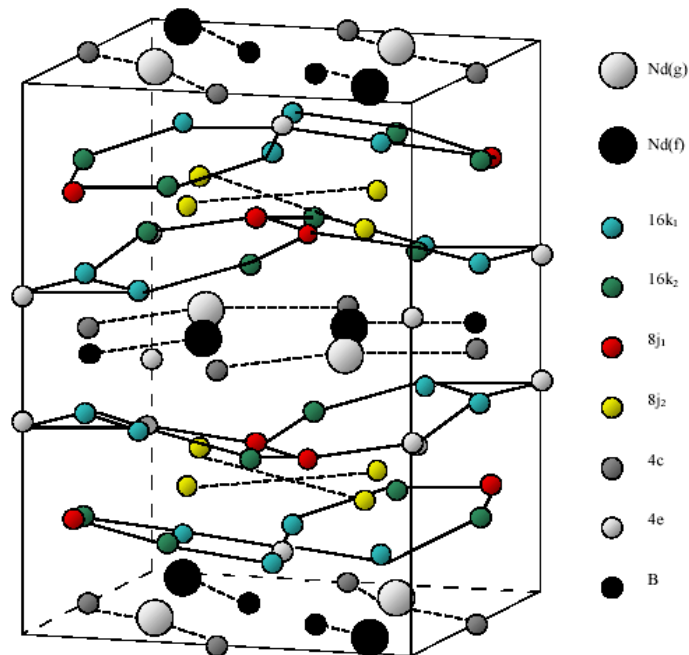


Figura 2.21 - Estructura de la celda unitaria $Nd_2Fe_{14}B$
(NEODIMIO-HIERRO-BORO)

Este proceso produce un imán de tipo nucleación en el que las fronteras de grano se componen de desviaciones ricas en Nd de la composición primaria $Nd_2Fe_{14}B$, proveyendo la fijación de las fronteras de dominio. Uno de los problemas de este método es que los granos de Nd-Fe-B son muy susceptibles de oxidarse en su superficie, lo que limita seriamente el tamaño de grano que puede obtenerse y hace muy difícil obtener en la práctica imanes útiles.

La oxidación de un material comienza en su superficie, y si no se usa ningún recubrimiento de protección, el oxígeno del ambiente se difundirá hacia dentro del material produciendo reacciones químicas y alterando sus propiedades magnéticas. Este proceso de difusión aumenta fuertemente con la temperatura. Otros fenómenos de corrosión involucran otros agentes que se difunden y producen reacciones químicas destructivas dentro del material.

Desde el comienzo de la utilización técnica de los imanes, cuando el hierro era el material fundamental, se ha utilizado la pintura como recubrimiento protector. Se ha encontrado en los compuestos de Sa-Co que el cobalto dificulta el proceso de difusión del oxígeno y que el producto fundamental del proceso de oxidación es Sm_3O_3 . Por lo tanto se suele agregar cobalto en exceso de la cantidad estequiométrica del compuesto para mejorar el comportamiento frente a la oxidación. En el caso de los imanes de Nd-Fe-B la oxidación progresa selectivamente a lo largo de las fronteras de grano ricas en Nd. El compuesto más importante de este proceso es Nd_2O_3 . Se ha hallado que el agregado de Co al compuesto mejora la situación ya que el Co migra a las fronteras de grano y reduce la proporción de Nd pasible de oxidación.



Figura 2.22 - Microestructura del NdFeB

Un proceso completamente diferente involucra el templado rápido de la aleación fundida de Nd-Fe-B, usando una técnica de “*melt-spinning*” para producir una cinta que luego es convertida en polvo. Mientras que una cinta obtenida por conformación mecánica produce partículas de polvo en forma de grandes placas, el templado rápido lleva a una microestructura extremadamente fina como la que se ilustra en la Figura 2.22, nuevamente con fronteras de grano que se desvían de la composición primaria $Nd_2Fe_{14}B$, aunque en mucha menor medida, que en el proceso de sinterizado. Sin embargo, este no es un imán de tipo-nucleación, porque el polvo tiene una microestructura muy pequeña que se adecua al modelo de dominio único de las ferritas cerámicas. Este proceso de fabricación produce imanes cuyo magnetismo permanente se basa en la anisotropía magnetocristalina, y requieren un fuerte campo aplicado para llevar inicialmente los granos del material a la magnetización de saturación.

No es práctico moler el material a tamaño de mono-dominio, de forma que el polvo es inherentemente isótropo. Sin embargo, puede consolidarse en un imán compacto y anisótropo por la deformación plástica que ocurre en la compactación en caliente. La protección natural que esta la microestructura aporta a las fronteras de grano por la disminución de la cantidad no estequiométrica de Nd hace que el polvo sea muy estable respecto de la oxidación, de manera que es fácil fabricar imanes de cualquier forma por moldeo.

Hemos mencionado el problema de la oxidación en la preparación de polvo de Nd-Fe-B, de modo que también puede predecirse que absorbe hidrógeno con facilidad, lo que convierte al material en un polvo muy frágil y quebradizo. Esta característica facilita la conversión del material en polvo, y se ha convertido en la base del proceso llamado HDDR (por Hidrogenación, Desproporciónación, Desorción y Recombinación).

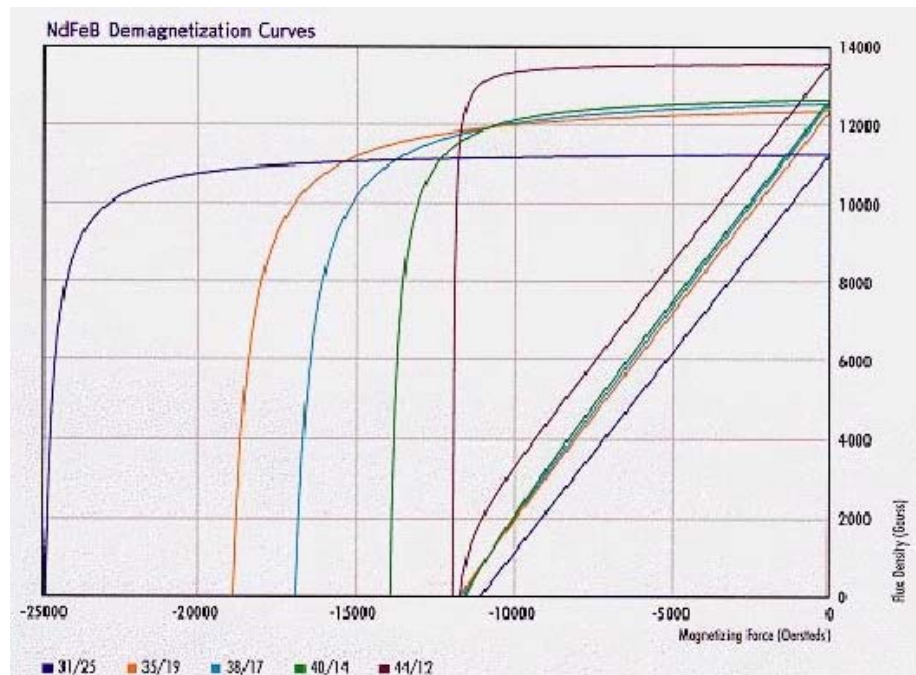


Figura 2.23 - Curvas de desmagnetización del NdFeB correspondiente a imanes obtenidos por el método de sinterizado.

Este proceso también da al polvo de Nd-Fe-B una estructura ultrafina con granos de tamaño cercano al mono-dominio, y pueden obtenerse partículas de polvo de este tamaño. El polvo de Nd-Fe-B preparado con la técnica HDDR es inherentemente isótropo, pero los imanes fabricados por compactación en caliente o moldeo son generalmente anisótropos debido a las condiciones de procesamiento y el agregado de aditivos que inducen un mayor grado de textura en la aleación.

Los imanes de Nd-Fe-B fabricados con el proceso HDDR exhiben curvas características de desmagnetización con codos bien definidos de inversión de la magnetización. En la figura anterior se muestra curvas de desmagnetización para imanes compuestos de Nd-Fe-B obtenidos por el método de sinterizado, mientras que el que se muestra a continuación corresponde a imanes NeoForm obtenidos por moldeo cerámico.

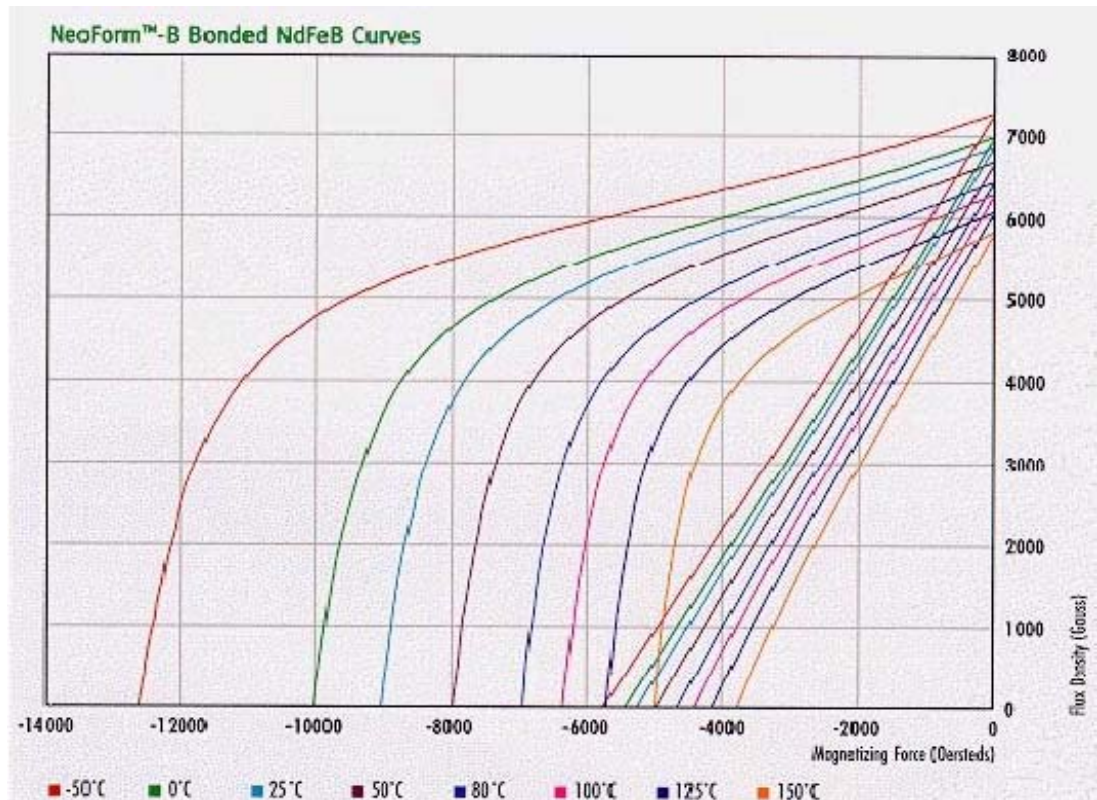


Figura 2.24 - Curvas de desmagnetización del NeoForm obtenidas por el método de moldeo cerámico.

Y poniendolo en forma de resumen, tenemos esta tabla en donde se ponen las propiedades de cada material

Material	Temperatura Máxima de Operación	Máxima Energía Magnética	Costo Relativo	Resistencia a la Desmagnetización
NdFeB	150° C	48 MGOe	Alto	Alta
SmCo	300° C	32 MGOe	Muy Alto	Muy Alta
NeoForm-B NdFeB moldeado	150° C	10 MGOe	Alto	Alta
Alnico	550° C	7.5 MGOe	Moderado	Baja
Ferrita Cerámica	300° C	4 MGOe	Muy Bajo	Moderada

REFERENCIAS

- [1] HISTORIA DEL ELECTROMAGNETISMO. http://alipso.com/monografias/historia_electromagnetismo/
- [2] Biografía de Tales de Mileto. <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/t/tales.htm>
- [3] Wikipedia, the free encyclopedia, Otto von Guericke http://en.wikipedia.org/wiki/Otto_von_Guericke
- [4] Biografías- Benjamín Franklin. <http://orbita.starmedia.com/~aquimequedo/BenjaminF.htm>
- [5] LA BALANZA DE TORSIÓN. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/11/htm/sec12.html>
- [6] Charles Agustin de Coulomb, <http://www.tecnociencia.es/ventana/salas/magnetismo/biografias/coulomb.htm>
- [7] Magnetic Fields -- History. <http://www-spod.gsfc.nasa.gov/Education/whmfield.html>
- [8] El Magnetismo y el Átomo: Descripción microscópica. http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/056/htm/sec_5.htm
- [9] Chester L. Dawes, Tratado De Electricidad, Tomo Primero: Corriente Continua. Ediciones G.Gili S.A. de C.V.
- [10] M. Hewat, Magnets and GMR Materials. Solid State Physics. <http://whisky.ill.fr/dif/3D-crystals/magnets.html>
- [11] Juan C. Fernández, Electromagnetismo 2004, Materiales Magnéticos. Departamento de Física – Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. www.fi.uba.ar