El ensayo por partículas magnéticas es una combinación de los métodos de dos ensayos no destructivos:

- Ensayo de fuga de flujo magnético. Se sabe que, al acercar el extremo de un imán al de otro, dichos extremos se atraen unas veces y se repelen otras. Ello es consecuencia de que existen unas líneas de fuerzas magnéticas, asociadas a cada imán, que interactuan entre si. Estas líneas de fuerza magnéticas son cerradas, por lo que existen tanto en los extremos (polos) del imán como en su interior.

- Cuando una línea de fuerza magnética ubicada en el interior de un imán interacciona con una discontinuidad superficial o subsuperficial, se verá obligada a salir de interior del imán originándose, en la superficie donde se encuentra la discontinuidad, una fuga magnética.

- Ensayo visual. La fuga magnética citada puede asociarse a la existencia de un nuevo imán con dos nuevos polos, por lo que sí se espolvorean limaduras de hierro donde existe la fuga magnética, las limaduras quedarán retenidas encima de la discontinuidad, formando una indicación.

1.1. TEORÍA DEL MAGNETISMO

Existe en la naturaleza un mineral, la magnetita, de fórmula Fe_2O_3, que tiene la propiedad de crear a su alrededor un campo magnético. Si esta "piedra imán", con cuyo nombre se la conoce vulgarmente, se pone en contacto con un trozo de hierro dulce, éste crea también, mientras dura el contacto, un campo magnético a su alrededor.

Se dice que el hierro se ha convertido, por influencia, en un imán temporal. Si se ponen en contacto la magnetita y el acero, éste continúa poseyendo propiedades magnéticas después de separarlo de ella. Se ha convertido por influencia, en un imán permanente.

Las mismas propiedades que adquiere el hierro dulce al ponerlo en contacto con la magnetita, las alcanzan al ser dispuestos en el interior de un solenoide recorrido por una corriente. Así, sí se introduce una barra de hiero dulce dentro de una bobina o solenoide por la cual se hace pasar la corriente eléctrica, la barra de hierro se convierte en imán mientras pasa la corriente, pero, tan pronto deja de pasar, el hierro pierde sus propiedades magnéticas. Al conjunto barra de hierro dulce y bobina se le llama electroimán.

1.1.1. Principios fundamentales

Este método de ensayo está basado en el principio de que las líneas de fuerza existentes en un objeto magnetizado (por ejemplo un imán) es localmente distorsionado por la presencia de una discontinuidad. Esta distorsión obliga a que parte de las líneas de fuerza magnéticas salgan y vuelvan a entrar en el objeto que se ensaya, allí donde se encuentra la discontinuidad. Este fenómeno se llama fuga de flujo magnético. Esta fuga de flujo es capaz de atraer partículas de material ferromagnético finamente dividido, el cual forma una línea exterior o indicación de la discontinuidad.

Existe otro método de ensayo que también se basa en principio de flujo magnético, llamado método de fuga de flujo. Desde el punto de vista teórico sólo existe una diferencia entre el examen por fuga de flujo y el examen por partículas magnéticas: el uso de partículas de hierro como sensor. En el examen por fuga de flujo se emplean como sensores aparatos tales como: elementos Hall, magnetodiodos, sensores de bobina, etc.

La situación ideal a conseguir en el examen por partículas magnéticas es aquella que nos da la mayor sensibilidad para las discontinuidades más pequeñas. Ello se consigue combinando adecuadamente aspectos tales como: fuerza del campo magnético aplicado, densidad de flujo en el objeto a ensayar, tamaño de las partículas magnéticas y su método de aplicación y condiciones óptimas de observación visual, los cuales se estudiarán a lo largo de este libro.

1.1.1.1. Efectos de la magnetización

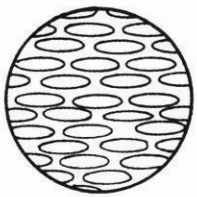
Para explicar el comportamiento de los imanes y de los electroimanes se parte de la base de que todos los cuerpos pueden considerarse constituidos por un gran numero de imanes infinitamente pequeños, llamados dominios magnéticos. Dichos imanes o dominios, están desordenados, distribuidos al azar (Figura 1.a), normalmente paralelos a los ejes cristalinos del material, de tal forma que su resultante magnética total es nula.

Un material capaz de ser magnetizado, al ser colocado cerca de un imán o de una corriente eléctrica, orienta sus dominios magnéticos poniéndose de manifiesto la existencia de un imán total (Figura 1.b)

El proceso a través del cual regiones submicroscópicas de un material (dominios magnéticos) se ordenan predominantemente en una dirección se llama magnetización.

Una vez que todos los dominios han sido orientados, el material ferromagnético se ha convertido en un imán, con un polo norte y un polo sur.

a) Materiales no magnetizados



b) Materiales magnetizados

Figura 1*. Orientación de Dominios Magnéticos

Con todos los dominios alineados, el material ferromagnético desarrolla una fuerza total, igual a la suma de la de todos los dominios.

Las líneas de fuerza tienen una dirección definida. Salen por el polo norte, entran por el polo sur y continúan su camino a través del imán, desde el polo sur al polo norte.

1.1.1.2. Campos de aplicación

El ensayo por partículas magnéticas es un método de detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales magnetizables tales como el hierro, níquel, cobalto, etc. Puede aplicarse a materias primas tales como palanquillas, barras, perfiles; durante procesos de conformación, mecanizado, tratamientos térmicos y electroerosión y en componentes terminados, para detectar discontinuidades relativas a materiales, procesos de fabricación y al servicio.

Los procedimientos de partículas magnéticas no puedan emplearse en materiales no magnetizables, tales como el aluminio o el cobre.

Uno de los objetivos del ensayo por partículas magnéticas es la detección, lo antes posible, de discontinuidades dentro de las distintas secuencias de los procesos de fabricación, ello permite que no se realicen trabajos sobre piezas que posteriormente serian rechazadas.

* Figura obtenida del Nondestructive Testing Handbook de la American Society for Nondestructive Testing.

Prácticamente todos los procesos, desde la producción del metal hasta la última operación de fabricación, pueden introducir discontinuidades. El ensayo por partículas magnéticas puede evidenciar muchas de estas discontinuidades, evitando que entren en servicio componentes con defectos. A pesar de que el ensayo por partículas magnéticas puede realizarse durante y entre operaciones de elaboración, generalmente se realiza un ensayo final para asegurar que el producto terminado no tiene discontinuidades perjudiciales.

Aunque existen varias formas de clasificar las aplicaciones de los ensayos por partículas magnéticas, el sistema de clasificación más extendido es aquel que considera el origen de las discontinuidades durante los procesos de fabricación y durante el servicio. Esta clasificación puede categorizarse como sigue:

- Producción y elaboración primaria. El ensayo se emplea para inspeccionar los estados de elaboración de procesos desde que se cuela el caldo en lingoteras hasta la obtención de formas físicas de materiales tales como chapas, barras, tubos, forjas y fundiciones. Estos ensayos se emplean básicamente para localizar discontinuidades inherentes (rechupes, inclusiones no metálicas, sopladuras, roturas en lingotes) y discontinuidades asociadas a procesos primarios (costuras, laminaciones, acoplamientos, roturas de enfriamiento, roturas internas, roturas de forja, pliegues de forja, uniones frías, rechupes y salpicaduras en fundiciones).
- Ensayos de fabricación y elaboración secundaria. Estos ensayos se emplean para inspeccionar el resultado de procesos tales como conformación, mecanizado, soldadura, tratamientos térmicos, que transforman la materia prima en productos acabados. Estos ensayos pueden detectar discontinuidades tales como: falta de fusión y penetración, grietas, cráteres en soldaduras, arrastres de material, roturas debidas a tratamientos térmicos, grietas de amolado y de enderezado, roturas debidas a ataques químicos.
- Ensayos en servicio: se emplean para detectar grietas de fatiga y de sobre tensión. El ensayo por partículas magnéticas no se emplea para detectar corrosión, deformaciones o desgaste.

1.1.2. Clasificación de los materiales por sus características magnéticas

Todos los materiales son afectados en algún grado por los campos magnéticos. Este hecho es consecuencia de que los átomos disponen de núcleos con carga eléctrica positiva los cuales están envueltos por un campo o nube de electrones cargados

negativamente. Los electrones están en continuo movimiento girando alrededor del núcleo. Cuando un material esta sujeto a un campo magnético la órbita del electrón es perturbada en alguna medida. El grado de distorsión (o el correspondiente cambio en las características magnéticas) que sufre un material cuando esta sujeto a un campo magnético externo, da un medio de clasificación de los materiales.

Atendiendo al grado de distorsión y cambio de las características magnéticas que sufren los materiales cuando están sujetos a un campo magnético externo, los materiales se clasifican en tres grupos: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos.

Materiales diamagnéticos

- El termino diamagnético se refiere a una substancia cuya permeabilidad magnética (ver punto 1.1.8) es ligeramente inferior a la del vacío, el cual tiene un valor de permeabilidad magnética igual a la unidad.
- Cuando un material diamagnético se somete a un campo magnético fuerte, su magnetismo inducido tiene una dirección opuesta a la del campo magnético externo.

  Son elementos diamagnéticos: el mercurio, oro, bismuto y zinc, por ejemplo.

Materiales paramagnéticos

- El paramagnetismo denota una substancia cuya permeabilidad es ligeramente mayor que la del aire o uno. Cuando estos materiales son sometidos a un campo magnético fuerte, se produce una ligera alineación del giro de los electrones en dirección del flujo magnético. Esta alineación sólo se mantiene mientras el material esta sometido a un campo magnético externo.

  Son materiales paramagnéticos: el aluminio, platino y cobre, entre otros.

Materiales ferromagnéticos

- Estos materiales están constituidos por dominios magnéticos. Cada dominio se convierte en un pequeño imán. Antes de aplicar un campo magnético fuerte, tales dominios están distribuidos al azar y la componente magnética es nula (Figura 2.a). Al aplicar un campo magnético crecen los dominios que tienen la orientación del campo, gracias al movimiento de las paredes existentes entre ellos (Figura 2.b) y, a continuación, se produce la rotación de las direcciones de magnetización, que tienden a orientarse en la dirección del campo externo (Figura 2.c).

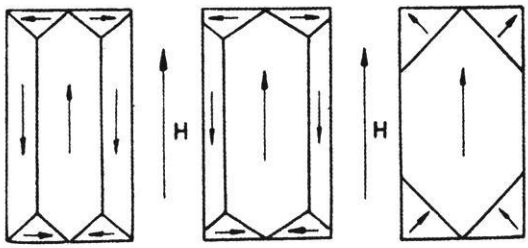


Figura 2*. Aplicación de un campo magnético:
a) Estado original del material.
b) Crecimiento de los dominios.
c) Rotación de los dominios.

Son ferromagnéticos, elementos como el hierro, níquel, cobalto y gadolinio, óxidos como la magnetita, y algunas aleaciones como Heusler (30% de Mn y 70% de Cu) y Permalloy (22% Fe, 78% Ni).

1.1.3. Imanes permanentes

Un imán permanente es un objeto que tiene la propiedad de retener durante un largo período de tiempo un campo magnético aplicado sobre él, después que éste haya cesado.

Los imanes permanentes se obtienen sometiendo una aleación de formulación especial, a un tratamiento térmico a la vez que está sometida a un campo magnético fuerte. Durante el proceso de tratamiento térmico, los dominios se alinean y permanecen alineados una vez se elimina el campo externo.

Ejemplos de materiales magnéticos permanentes son ciertas aleaciones de aluminio y cobalto (alnico); cobre, níquel y cobalto (único); cobre, níquel y hierro (cunife); y cobalto y molibdeno (comal).

Otro "imán permanente", aunque de origen natural, es la Tierra misma, con Polos Norte y Sur ligeramente desplazados con relación a su eje. Este desplazamiento conlleva una ligera desviación entre el Polo Norte magnético y el Polo Norte terrestre.

Como tal imán, la Tierra esta rodeada por líneas magnéticas de fuerza, tal como se indica en la Figura 3. Estas líneas de fuerza dan origen al llamado campo terrestre y

* Figura obtenida del libro Introducción a los métodos de Ensayos No Destructivos del INTA. (3ª edición)

pueden causar problemas en la magnetización y desmagnetización de los objetos. El campo terrestre es débil, del orden de 0,3 G (Gauss), o lo que es lo mismo, 3.10-5 T (Teslas). (Ver punto 1.2.2.4).

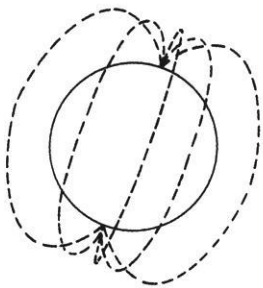


Figura 3*. Campo magnético terrestre

1.1.4. Polos magnéticos

Ya hemos visto que el imán natural llamado magnetita, atrae al hierro y al acero y actúa sobre las agujas magnéticas de manera parecida a como lo hace la corriente eléctrica.

Ahora bien, esta propiedad no es exclusiva de la magnetita, pues existen varios metales, en particular el hierro y el acero, que, al estar en contacto con la magnetita o colocado en las proximidades de la corriente eléctrica, adquieren esas misma propiedades magnéticas, en virtud de las cuales no sólo atraen al hierro y al acero, sino que ellos mismos se atraen o se repelen entre sí.

Utilizando los materiales citados, se construyen los imanes artificiales: piezas metálicas alargadas o en forma de herradura, que poseen las antedichas propiedades magnéticas.

Si cogemos limaduras de hierro finamente divididas y las colocamos encima de una hoja de papel, debajo del cual se ha colocado previamente un imán, podremos observar que dichas limaduras se disponen alrededor de ciertas regiones y forman una figura especial, equivalente a la de la Figura 4, llamada espectro, compuesta de líneas denominadas líneas de fuerza.

* Figura obtenida del Nondestructive Testing Handbook de la American Society for Nondestructive Testing.

Según puede deducirse del espectro, las partículas tienden a juntarse en determinadas zonas del imán, principalmente en los extremos. Esas zonas donde se juntan las líneas de fuerza se llaman polos magnéticos. Uno de ellos se denomina polo norte, y el otro, polo sur. Estos polos son atraídos hacia los polos magnéticos de la tierra.

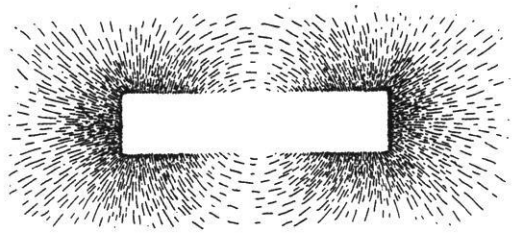


Figura 4*. Visualización de las líneas de fuerza de un imán

1.1.5. Fuerzas magnéticas

Si se acerca uno de los polos de un imán a los dos polos de otro imán o de una aguja imantada, notaremos que uno de estos es atraído y que el otro es repelido.

Sucede, por tanto, que entre los polos de los imanes se ejercen fuerzas parecidas a las que actúan entre las cargas eléctricas. A tales fuerzas las denominamos fuerzas magnéticas.

La disposición característica, citada en el punto 1.1.4 muestra el campo magnético del imán entrando y saliendo por los extremos de los polos del imán e ilustra el termino línea de fuerza que se emplea para describir el flujo del campo magnético.

Las líneas de fuerza tienen asignadas propiedades importantes tales como:

- Son líneas continuas y cerradas que nunca se rompen.
- No se cruzan unas con otras.
- Se les atribuye una dirección, salen del polo norte y, viajando a través del espacio, entran por el polo sur donde entran dentro del imán y vuelven al polo norte a través del imán.
- Su densidad decrece al aumentar la distancia entre los polos.
- Buscan el camino de menos resistencia o reluctancia magnética.

* Figura obtenida del Nondestructive Testing Handbook de la American Society for Nondestructive Testing.

Cuando un imán se rompe en dos o más trozos se forman nuevos polos magnéticos. Los polos opuestos se atraen uno al otro, tal como se observa en la Figura 5.

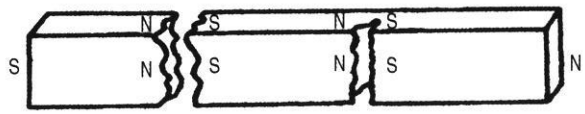


Figura 5*. Ilustración de la formación de nuevos polos magnéticos originados al romper un imán

Si el trozo central de la figura se gira de tal forma que los polos adyacentes sean iguales, las líneas de fuerza harán que los trozos de imán se repelan unos a otros. Si la parte central es lo suficientemente pequeña, las líneas de fuerza podrían causar su rotación de modo que los polos distintos estarían nuevamente uno al lado del otro.

Los polos distintos se atraen, mientras que los polos iguales se repelen.

1.1.6. Campos magnéticos

Por definición se considera un campo magnético como que el espacio en las proximidades de un imán o cerca de un conductor, por el que circula una corriente eléctrica, donde existen fuerzas magnéticas.

El estado de un campo magnético se manifiesta por dos efectos: la fuerza que ejerce sobre una carga eléctrica móvil o sobre un polo magnético que se encuentren en el mismo y el poder imanador del campo sobre el medio material que le rodea.

Cada uno de estos efectos se representa por un vector, es decir por una cantidad dotada de una magnitud y una dirección.

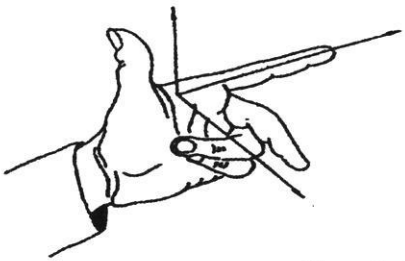
La fuerza que ejerce el campo magnético se denomina inducción magnética o densidad de flujo, B, y es el numero de líneas de fuerza magnéticas que atraviesan perpendicularmente una superficie.

El poder imanador se denomina intensidad de campo magnético, H.

Tal como veremos en el punto 1.1.8 ambas magnitudes se relacionan a través de un parámetro llamado permeabilidad magnética.

* Figura obtenida del Curso de Partículas Magnéticas de SGS Tecnos, S.A.

Cuando a través de un conductor de longitud "L" circula una corriente eléctrica de intensidad "I", se genera un campo magnético de fuerza "F" y densidad de flujo "B", siendo las direcciones de B, F, I las que define la regla de la mano izquierda "Figura 6".



Mano izquierda Pulgar - F
Índice - B
Medio - I

Figura 6*. Regla de la mano izquierda

1.1.6.1. Campos magnéticos uniformes

Son aquellos en que la magnitud de la inducción magnética, B, es la misma en todos los puntos y su sentido es también el mismo en todos ellos, para una misma dirección. Pueden ser estáticos o variables.

1.1.6.2. Campos magnéticos estáticos

Son aquellos en los que se mantiene constante la inducción magnética en magnitud, dirección y sentido en cualquiera de sus puntos a lo largo del tiempo.

1.1.6.3. Líneas de fuerza del campo magnético

Las líneas de fuerza de un campo magnético son los lugares geométricos de todos los puntos que tienen la misma inducción magnética. Estas líneas de fuerza coincidirán con la trayectoria que debería seguir una partícula cargada eléctricamente para que el campo magnético no ejerza fuerza alguna sobre ella en todo su recorrido.

1.1.7. Técnica de magnetización

Para llevar a cabo un examen por partículas magnéticas, debemos producir un campo magnético en la pieza objeto del examen, es decir, se debe magnetizar o imantar.

La magnetización o imantación en la pieza se puede llevar a cabo bien mediante imanes o bien mediante conductores en los cuales se hace pasar corriente eléctrica.

* Figura obtenida del Curso de Partículas Magnéticas de SGS Tecnos, S.A.

La magnetización "M" que creamos en un material magnético es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético "H" externo empleado. Esta proporcionalidad viene dada por una constante llamada susceptibilidad magnética, "X_m"

$$M= X_m H_{ex}$$

1.1.7.1. Magnetización por imanes

Tal como se ha indicado anteriormente, en un imán las líneas de fuerza magnéticas que circulan por el exterior del mismo salen del polo norte y a través del aire entran por su polo sur. Cuando situamos entre dichos polos un material ferromagnético, las líneas de fuerza citadas en vez de ubicarse en el aire se concentran en el material ferromagnético (Figura 7).

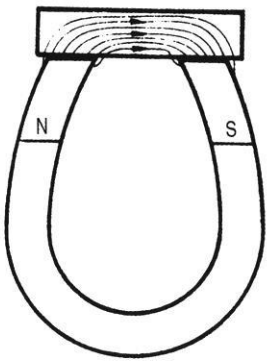


Figura 7*. Imanación de un objeto por medio de un imán

Por tanto dicho material se habrá magnetizado longitudinalmente, estando el campo magnético alineado con relación a los dos polos de imán. Cualquier discontinuidad que cruce las líneas de fuerza, y que forme un ángulo comprendido entre 90° y 45°, podrá producir un campo de fuga de flujo magnético, el cual podrá atraer las partículas magnéticas y formar una indicación.

1.1.7.2. Magnetización por corriente eléctrica

Cuando una corriente eléctrica circula a través de un conductor, como puede ser una barra de cobre o la misma pieza ferromagnética a ensayar, se genera un campo magnético.

* Figura obtenida del libro Introducción a los métodos de Ensayos No Destructivos del INTA (3ª edición).

Al colocar sobre una mesa una pequeña aguja imantada, dispuesta de manera que pueda girar en un plano horizontal (una brújula), sí se sitúa un hilo conductor de la corriente en dirección paralela a la de la aguja, cuando se hace pasar por el conductor una corriente eléctrica se puede observar que la aguja imantada gira y tiende a colocarse en dirección perpendicular a la de cable.

Sí se cambia el sentido de la corriente conectando los extremos del conductor con el polo contrario al que antes estaba unido a ellos, el fenómeno se produce de manera análoga a como se realizó en el caso anterior, pero el giro de la aguja tiene sentido contrario.

Si se aumenta la intensidad de la corriente se observa que cuanto mayor es dicha intensidad, mayor es la desviación de la aguja.

Así mismo, cuando una corriente eléctrica recorre un solenoide, excita en su interior un campo magnético. Para medir cuantitativamente el valor de esta "excitación" podemos tomar una aguja magnética, susceptible de girar alrededor de un eje vertical, y provista de un resorte antagonista, tal como se indica en la Figura 8.

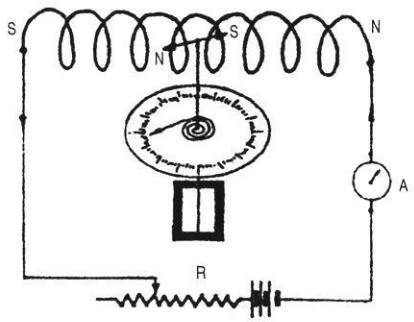


Figura 8*. Esquema de una bobina de prueba

Ello es debido a que la corriente eléctrica produce un fenómeno magnético, y que la magnitud y el sentido de él están relacionados con la intensidad y sentido de la corriente.

En función de la disposición del conductor, rectilíneo o formando una bobina, se creará un campo magnético circular o longitudinal.

* Figura obtenida del Curso de Partículas Magnéticas de SGS Tecnos, S.A.

En función de la orientación de la discontinuidad esperada, magnetizaremos el objeto a ensayar mediante un campo magnético circular o longitudinal.

1.1.7.2.1. Campo magnético generado por una corriente eléctrica rectilínea

Una corriente eléctrica rectilínea crea un campo magnético circular como el indicado en la figura, cuyas líneas de inducción magnética rodean al hilo conductor (Figura 9).

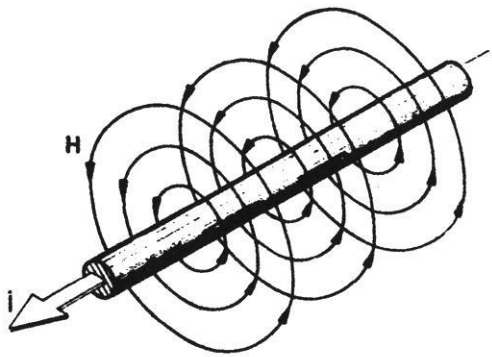


Figura 9*. Campo magnético creado por el paso de una corriente eléctrica a través de un conductor

1.1.7.2.2. Campo magnético generado por una espira circular o un solenoide

Una espira circular o un solenoide, por el que pasa una corriente eléctrica de intensidad "I", genera un campo magnético como el indicado en la figura siguiente, en cuyo interior las líneas de inducción magnética tienen la dirección del eje (Figura 10).

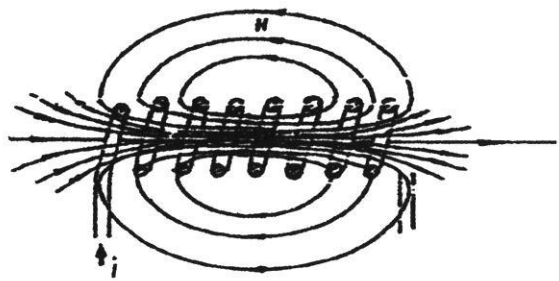


Figura 10*. Campo magnético generado por un solenoide

* Figura obtenida del libro Introducción a los métodos de Ensayos No Destructivos del INTA (3ª edición).

1.1.8. Permeabilidad magnética

Una de las propiedades más importantes de los materiales magnéticos es la permeabilidad. La permeabilidad es la facilidad con la cual un material se vuelve magnético. Más específicamente, la permeabilidad se define como el cociente de la densidad de flujo o inducción magnética (numero de líneas de fuerza por unidad de superficie) y la intensidad del campo magnetizante (intensidad del campo magnético aplicada a un material para que este se magnetice).

$$\mu = B/H$$

En la Figura 11 se refleja la relación existente entre el campo magnético que se aplica a un material y la densidad de flujo magnético que aquel produce sobre el material.

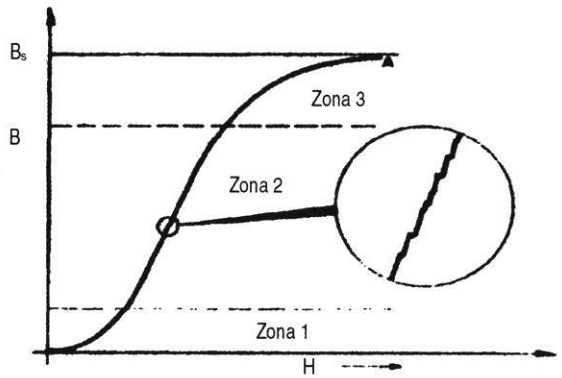


Figura 11*. Curva de imanación H-B

Un material sometido a un campo magnético tendrá una densidad de flujo mayor cuanto mayor sea su permeabilidad. $B = \mu H$

La forma de este tipo de curvas depende, entre otros factores, de la permeabilidad del material. Cuanto más permeable sea un material más pendiente tendrá la curva, es decir, que con igual intensidad de campo magnético, el material tendrá una densidad de flujo mayor. Otros factores que afectan la forma de la curva son la condición o estado de los materiales, microestructura, tamaño de grano, composición química, etc.

* Figura obtenida del libro Introducción a los métodos de Ensayos No Destructivos del INTA (3ª edición).

Al aplicar un campo magnético sobre un material ferromagnético, hay un crecimiento reversible de los dominios magnéticos (zona 1 de la curva). Sigue el crecimiento de forma irreversible al aumentar el campo (zona 2), debido a que comienzan a producirse rotaciones en las direcciones de intensidad del campo magnético exterior. En esta etapa el proceso de magnetización tiene variaciones súbitas y continuas". Por último se produce la rotación de los dominios para orientarse según el campo. Cuando ya todos los dominios están orientados, la densidad de flujo magnético alcanza un valor constante, llamada densidad de flujo magnético de saturación (punto Bs de la curva).

Los hierros y los aceros suaves con bajo contenido de carbono son sumamente fáciles de magnetizar y son altamente permeables. Estos materiales magnéticos conducen fácilmente las líneas de fuerza o flujo.

Los aceros duros, con alto contenido de carbono y la fundición gris, son difíciles de magnetizar y tienen baja permeabilidad.

La permeabilidad magnética esta relacionada con la reluctancia de forma inversa, es decir un material con alta permeabilidad magnética tendrá una reluctancia pequeña y viceversa.

La reluctancia se define como la resistencia del material a magnetizase bajo los efectos de un campo magnético.

Las propiedades magnéticas de un material tienen gran importancia debido al efecto que éstas tienen en el comportamiento de los materiales cuando se hallan bajo el efecto de un campo magnético externo (es decir bajo una excitación activa) o cuando el campo externo es desactivado (magnetismo residual).

1.1.9. Efectos diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos

Las propiedades magnéticas de los materiales están definidas a través de la interacción de campos magnéticos externos y el movimiento de cargas eléctricas en los átomos de los materiales. Tal como se ha indicado anteriormente, dentro del material se producen campos magnéticos a escala atómica consecuencia del movimiento de los electrones a través de sus órbitas. Las órbitas que describen los electrones producen un circuito cerrado de corriente que tiene un momento magnético, "m", perpendicular a la citada órbita, cuyo valor se define como el producto de la corriente y el área asociada al circuito por donde circula la corriente.

$$m = I\pi\ a^2$$

Donde "I" es la corriente equivalente y "$\pi\ a^2$" es el área de la órbita (circuito de corriente).

Muchos de estos momentos magnéticos o circuitos de corriente existen a nivel atómico y el volumen del material contiene por tanto una cierta densidad de momento magnético.

Si existen "N" momentos magnéticos por unidad de volumen y estos momentos están alineados en la misma dirección, se genera una magnetización total "M" la cual viene dada por la expresión.

$$H_{in} = M = N.m$$

La densidad de flujo magnético de un material viene dada por:

$$B^{in} = \mu M$$

Los términos "B", "m" y "M" son vectores, es decir tienen direcciones, lo que conlleva que solamente podrá existir un campo magnético o una densidad de flujo neto en el caso que dichos vectores estén alineados de una forma tal que el vector resultante "M" exista. Si los momentos magnéticos individuales "m" están orientados al azar, como es el caso habitual, la magnetización "M" será igual a cero.

La magnetización "M" de un material es proporcional al campo magnético externo, a través de una constante llamada susceptibilidad magnética "X_m"

$$M= X_m H_{ex}$$

La acción de un campo magnético externo en la materia origina un fenómeno en esta denominado imanación o magnetización, debido a los momentos magnéticos de los átomos cuando se orientan en la dirección del campo magnético externo.

Esta orientación origina una variación de la inducción magnética en el medio material respecto a la inducción magnética en el vacío, siendo su valor en este medio:

$$B = \mu_0 (H_{ext} + M)$$

Dada la relación existente entre el campo magnético externo y la magnetización deducimos que:

$$B = \mu_0 (1 + X_m) H_{ext}$$

y podemos escribir:

$$\mu = \mu_0 (1+ X_m)$$

Esta ecuación nos permite establecer un nuevo concepto, el permeabilidad magnética relativa "μr".

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = 1+X_m$$

Cuyo interés fundamental es su independencia del sistema de unidades empleado. Los valores de "μ_r" y "X_m" para diversos materiales, son:

MATERIALES	VACIO	PARAMAGNÉTICO	DIAMAGNÉTICO	FERROMAG.
Xm	0	1>>Xm > 0	-1 <<Xm <0	>> 0
mr	1	>1	<1	>>1

Tal como se ha indicado anteriormente cuando se somete un material ferromagnético a la acción de un campo magnético externo, la densidad de flujo magnético en el material va incrementándose hasta que se alcanza un valor B_s de saturación.

Ello es debido a que los momentos magnéticos atómicos están alineados en ciertas direcciones dentro de pequeñas regiones llamadas dominios magnéticos, los cuales al estar bajo el efecto de un campo magnético externo, sufren un crecimiento o una disminución de tamaño en función de si están o no, respectivamente, alineados con relación al campo magnético externo. Al ir aumentado el campo magnético externo el número de dominios que se orientan en la misma dirección que el campo magnético aumenta. Una vez todos los dominios están alineados aunque aumentemos la intensidad del campo magnético no se puede aumentar la magnetización neta.

Si analizamos las posibles valores "X_m" y "μ_r" que pueden presentar los materiales, según sean paramagnéticos, diamagnéticos o ferromagnéticos, se evidencia lo siguiente:

- Materiales ferromagnéticos: al ser "Xm" y "mr" valores positivos y "grandes" dichos materiales, bajo la influencia de un campo magnético externo originan un campo magnético interno, consecuencia de la orientación de sus dominios magnéticos, que tiene el mismo sentido que el campo magnético exterior (mr > 0), son fácilmente magnetizables (Xm >> 0) y las líneas de flujo magnético se ubicarán dentro del material.
- Materiales paramagnéticos: al tener valores de "Xm" muy próximos a cero implica que son poco susceptibles a la magnetización, por lo que las líneas de fuerza de un campo magnético exterior penetraran sólo parcialmente dentro del material. Como los valores de "mr" son positivos, el campo interno que se genera en el material consecuencia de la orientación de los dominios magnéticos, tiene la misma dirección que el campo magnético exterior.