

CICLO DE HISTÉRESIS DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

INTRODUCCIÓN

Es un hecho experimental que, al aplicar un campo magnético sobre un material, éste se perturba. Se dice que **el material se imana**. Si no existen interacciones magnéticas entre los momentos atómicos individuales, en ausencia de campo aplicado dichos momentos se encontrarán desordenados a temperaturas distintas de 0 K. En estas condiciones, el momento magnético total, promedio de los momentos individuales, será siempre nulo. Sin embargo, debido a la presencia de interacciones entre los momentos individuales (**interacción de canje**), algunos materiales presentan orden magnético a largo alcance por debajo de una cierta temperatura crítica. Si la naturaleza de la interacción es tal que los momentos individuales ordenados se suman unos a otros para dar lugar a un momento macroscópico no nulo, incluso en ausencia de campo magnético aplicado, se dice que el material es **ferromagnético**. A la densidad de momento magnético en ausencia de campo aplicado se le llama **imanación espontánea** y a la temperatura por encima de la cual la agitación térmica destruye el ordenamiento magnético se conoce como **temperatura de Curie** (consultar por ejemplo referencia 1).

A pesar de la existencia de una imanación espontánea *local*, un bloque de una sustancia ferromagnética se encuentra normalmente en un estado desimanado. La razón de esto es que el interior del bloque se divide en dominios magnéticos, cada uno de ellos imanados espontáneamente a lo largo de direcciones diferentes. De esta manera, la imanación total puede ser nula, de forma que se minimiza la energía magnetostática del sistema. Cuando se aplica un campo externo, la imanación macroscópica del bloque del material cambia, tal y como muestra la figura 1. Finalmente, cuando se aplica un campo lo suficientemente intenso, alcanza la **imanación de saturación** M_s , que es igual a la imanación espontánea.

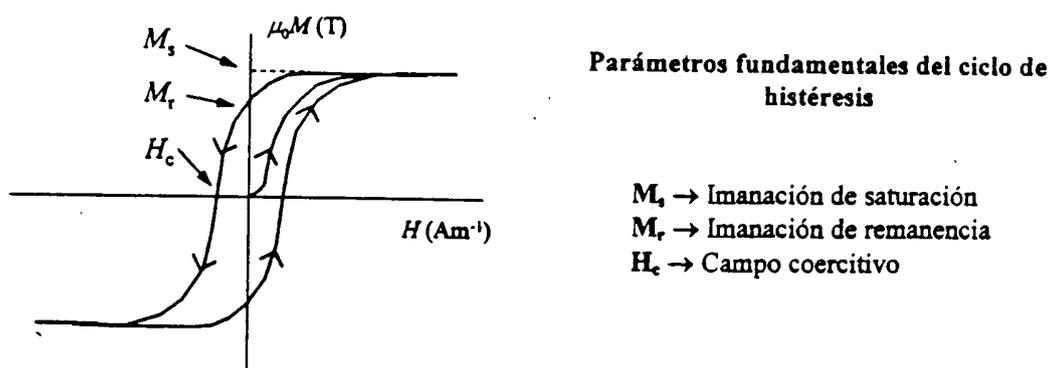


Figura 1. Representación esquemática del ciclo de histéresis de un material ferromagnético

Si en este punto se reduce el campo aplicado, la imanación macroscópica se reduce, pero en general no regresa por el camino original. Este comportamiento irreversible de la imanación se denomina **histéresis**. Supongamos que después de alcanzar el estado de saturación, se disminuye el campo aplicado hasta cero. La imanación disminuye pero no alcanza un valor nulo cuando $H=0$. La muestra queda con una imanación M_r , denominada **imanación remanente**. Si se aumenta el valor del campo magnético en sentido negativo, la imanación sigue disminuyendo hasta que se anula. El valor de campo necesario para anular la imanación es el **campo coercitivo intrínseco**, H_c . Si se sigue aumentando el campo en sentido negativo, se alcanza el estado de saturación en sentido contrario al inicial. Realizando la variación de H en sentido inverso se obtiene el llamado **ciclo de histéresis** del material. El área encerrada por el ciclo es la energía disipada por el material en forma de calor en el proceso cíclico de imanación al que se le ha sometido.

El ciclo de histéresis no es la única forma de caracterizar el proceso de imanación de un material ferromagnético. Si se parte de un estado desimanado y se va aplicando campo magnético al tiempo que se registra el valor de la imanación, se obtiene **la curva de primera saturación**. En esta curva, la derivada de la imanación respecto al campo es la susceptibilidad magnética (para distintas definiciones de susceptibilidad consultar por ejemplo referencia 2).

Otra forma de caracterizar un material ferromagnético es, partiendo de un estado desimánado, realizar ciclos de histéresis con amplitudes crecientes. La representación del valor máximo de imanación frente al campo máximo de cada ciclo constituye la llamada **curva de conmutación**. Bajo ciertas circunstancias, especialmente a bajas frecuencias, suele coincidir con la curva de primera saturación.

Los elementos ferromagnéticos más comunes son el hierro, el cobalto, el níquel y sus aleaciones. La imanación de saturación de estos materiales toma generalmente valores alrededor de 1 T; el valor más alto de imanación de saturación a temperatura ambiente lo tiene una aleación de FeCo y es de 2.5 T aproximadamente. Sin embargo, se encuentran valores de campo coercitivo a lo largo de ocho órdenes de magnitud (desde 10^{-7} hasta 5 T a temperatura ambiente en unidades $\mu_0 H$). Esta propiedad no sólo depende de la composición del material sino también de su estructura, los tratamientos a los que ha sido sometido el espécimen, etc.

Generalmente, el valor del campo coercitivo condiciona el rango de aplicaciones tecnológicas del material. De esta forma se establece la siguiente clasificación de los materiales ferromagnéticos.

Materiales magnéticos blandos (bajo campo coercitivo, 10^{-4} - 10^{-7} T)

- *Aplicaciones como multiplicadores de flujo*
(núcleos de máquinas eléctricas y transformadores: FeSi, amorfos ferromagnéticos)
- *Aplicaciones como transductores de otras propiedades*
(núcleos de sensores y actuadores : FeNi)

Materiales magnéticos duros (alto campo coercitivo, 10^{-1} -10 T)

- *Aplicaciones en almacenamiento de energía*
(imanes permanentes: NdFeB, SmCo, imanes AlNiCo)
- *Aplicaciones en almacenamiento de información*
(medios de grabación magnética: CoCrPt, óxidos)

OBTENCIÓN DE CURVAS DE IMANACIÓN

El método que se va a utilizar para la medida del ciclo de histéresis de los materiales propuestos se basa en la medida del voltaje incluido en un circuito al variar temporalmente la imanación de un material. Supongamos que tenemos una muestra de material ferromagnético sobre la que se realiza un arrollamiento de N espiras. Mediante la aplicación de un campo magnético externo variable con el tiempo se hace variar la imanación de la muestra. El flujo magnético que atraviesa el arrollamiento viene dado por:

$$\Phi = NSB(t) \quad [1]$$

donde S es la sección transversal de la muestra. Puesto que el campo indicado varía con el tiempo, también lo hace la imanación de la muestra, de tal forma que en el flujo Φ dentro del circuito también varía temporalmente. Así, en virtud de la ley de inducción electromagnética de Faraday, se induce un voltaje en el circuito secundario V_s que será proporcional a la derivada temporal del flujo magnético.

$$V_s = - \frac{d\text{flujo}}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} \quad [2]$$

La integral de ese voltaje inducido será proporcional a la inducción magnética y a la sección transversal de la muestra.

$$\int V_s dt \propto SB \quad [3]$$

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

EQUIPO:

Bobinados secundarios

Solenoides para aplicación de campo magnético

Generador de funciones

Amplificador
Resistencia
Integrador
Osciloscopio
Ordenador con tarjeta de adquisición de datos

ESQUEMA:

Un esquema de una realización práctica del método descrito se muestra en la figura 2:

Circuito primario:

El campo magnético se aplica mediante un solenoide alimentado por un generador de funciones y un amplificador. El campo producido por el solenoide será proporcional a la intensidad que circula por el mismo. La intensidad se mide a través de la caída de potencial en una resistencia de valor conocido conectada en serie con este circuito primario.

Circuito secundario:

Consta fundamentalmente de una pequeña bobina en la que se introduce la muestra. La inducción magnética viene dada, en el sistema internacional, por la expresión siguiente:

$$B = \mu_0(H + M) \quad [4]$$

Por lo tanto, según la expresión [1], el flujo de B en el interior de la bobina secundaria tendrá dos contribuciones:

La debida a la imanación de la muestra: $\Phi_m = S_{\text{muestra}} \times \mu_0 M$

La debida al campo aplicado: $\Phi_n = S_{\text{bobina}} \times \mu_0 H$

Para la medida de curvas de imanación sólo estamos interesados en la contribución de Φ_m . Con el fin de eliminar Φ_n , se conecta en el circuito secundario una segunda bobina en serie y oposición con la medida. En esta segunda bobina (llamada de compensación) no se introduce la muestra y está diseñada de tal forma que recoge un flujo Φ_n . De esta forma, el voltaje inducido en el circuito secundario será proporcional a la imanación de la muestra.

La integración temporal de la señal recogida por el circuito secundario se realiza electrónicamente mediante un dispositivo integrador. La representación en abcisas de la caída de potencial en la resistencia del primario (proporcional al campo magnético aplicado) y en ordenadas del voltaje de salida del integrador (proporcional a la imanación), nos da el ciclo de histéresis del material.

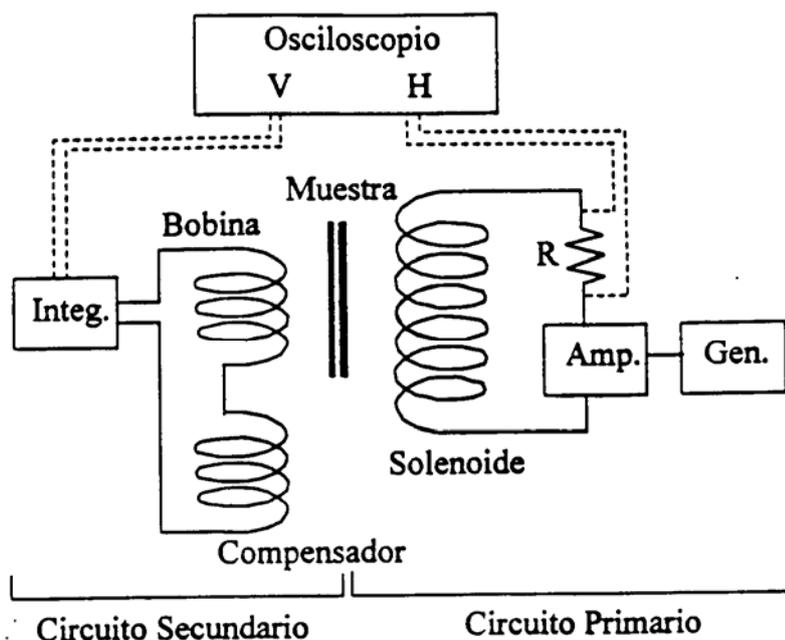


Figura 2. Esquema del sistema de medida ciclos de histéresis.

PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Antes de medir.

Tanto el circuito primario como el secundario se encuentran inicialmente instalados. Sin embargo, es conveniente antes del comienzo de las medidas repasar la instalación, así como identificar cada uno de los elementos del montaje.

Inserción de la muestra.

Para la inserción de la muestra en la bobina de medida se retira el soporte del interior del solenoide. A fin de obtener una buena compensación durante la medida, el soporte con la bobina debe estar perfectamente enrasado con el borde del solenoide.

Encendido y apagado de los equipos.

Antes de encender los diferentes equipos, comprobar que el volumen del amplificador está a cero. Al terminar de medir, bajar el volumen del amplificador a cero, apagarlo y apagar después el generador de señales.

Generador de señales.

La frecuencia de oscilación debe permanecer en el valor mínimo y el modo seleccionado debe ser el de oscilación sinusoidal. La amplitud no debe sobrepasar el nivel indicado sobre el aparato.

Amplificador.

La amplitud del campo aplicado se regula con el volumen del amplificador. La amplitud no debe sobrepasar el nivel indicado sobre el aparato.

Integrador.

Este equipo necesita unos minutos para alcanzar su rendimiento óptimo. El único control sobre el que se debe actuar es sobre el de deriva, con el fin de centrar la señal de imanación.

Visualización en el osciloscopio.

- Dada la baja frecuencia de la señal utilizada, es conveniente utilizar el osciloscopio en modo digital (para cambiar de modo pulsar durante un segundo el botón STOR.ON).
- Comprobar que ninguno de los dos canales está en posición AC ó GD (en pantalla debe aparecer el símbolo = al lado de la escala de cada canal).
- Para componer las señales de los dos canales, mantener pulsado DUAL durante un segundo.
- Ajustar la base de tiempos a fin de obtener una traza completa del ciclo.

Adquisición de datos en el ordenador.

Una vez obtenido una traza satisfactoria del ciclo en el osciloscopio, se procede a su grabado en el ordenador.

El programa de adquisición se llama **MEDIR.EXE** y se ha de ejecutar desde el directorio **C:\DAS800\STD**.

En primer lugar el programa pregunta si estamos realizando una medida de calibración:

Si estamos calibrando, debemos introducir la sección transversal y la imanación de saturación de la muestra de calibración.

Si se trata de una medida normal, sólo será necesario introducir el dato de la sección de la muestra.

Si se desean grabar los datos, se debe hacer con un nombre sin extensión. El fichero se salvará en el directorio **C:\DATOS** con extensión **.DAT**. El formato del mismo es de dos columnas, en la primera de las cuales se archiva el campo magnético en Am^{-1} y en la segunda la imanación en Tesla.

MEDIDAS A REALIZAR

En primer lugar se ha de **calibrar el sistema**. Para ello se utiliza la **muestra de hierro**, cuya imanación de saturación a temperatura ambiente es aproximadamente $\mu_0 M_s = 2.1 \text{ T}$. Una vez calibrado el sistema, se medirá el ciclo de histéresis y la curva de conmutación de cada uno de los materiales que se proporcionan.

Ciclo de histéresis. La medida del ciclo de histéresis se realiza aplicando el campo máximo accesible. De los datos de esta medida se obtendrán los valores de la imanación de saturación, la imanación remanente y el campo coercitivo del material. La forma del ciclo de histéresis es consecuencia del tipo de proceso de imanación que se está produciendo en el material (un exhaustivo análisis de diferentes modos de imanación puede encontrarse en la parte 4 de la referencia 3).

Curva de conmutación. Una vez medido el ciclo de histéresis del material se reduce lentamente el campo aplicado (disminuyendo el volumen en el amplificador), con el fin de desimanar la muestra.

A partir del estado desimanado, se van midiendo ciclos aumentando progresivamente la amplitud del campo aplicado hasta el campo máximo accesible (aumentamos el volumen, visualizamos el ciclo en el osciloscopio, adquirimos los datos con el ordenador y repetimos con un nivel de volumen superior).

Una vez medidos ciclos a lo largo de todo el rango de campo accesible, se representarán los valores máximos de imanación de cada ciclo en función de los campos máximos correspondientes; ésta es la curva de conmutación.

Realizar la derivada numérica de la curva de conmutación para obtener la *curva de susceptibilidad* $\chi = dM/dH$ en función del campo. Determinar el valor a campo nulo

(susceptibilidad inicial de la curva de imanación) y el valor máximo (susceptibilidad máxima de la curva de conmutación).

Representar la curva de susceptibilidad en función de la imanación. La extrapolación de la curva de susceptibilidad hasta el corte con el eje de abscisas permitiría obtener una mejor aproximación a la imanación de saturación (Figura 3)

Nota: Expresar en unidades apropiadas la imanación y el campo magnético antes de calcular la curva de susceptibilidad.

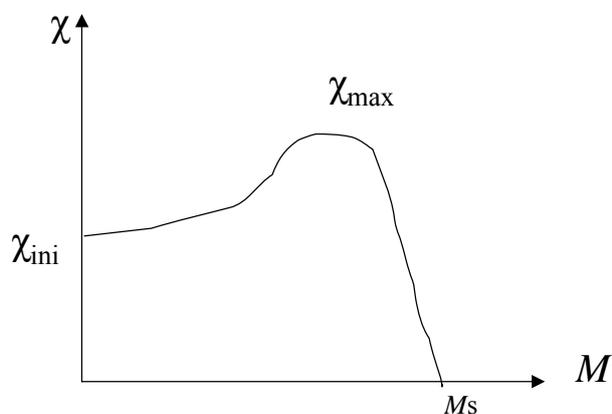


Figura 3. Curva de susceptibilidad frente a imanación

UNIDADES

En el sistema internacional, la inducción magnética B se expresa en Tesla (T) y el campo magnético H y la imanación M en Am^{-1} . La relación constitutiva se expresa como $B = \mu_0(H + M)$. Sin embargo, es muy común hablar de imanación y campo magnético en Tesla, en cuyo caso formalmente se están expresando los valores $\mu_0 M$ y $\mu_0 H$, respectivamente. La susceptibilidad magnética se expresa en unidades.

REFERENCIAS

- [1] Introduction to Solid State Physics, Ch. Kittel, John Wiley & Sons. Inc (1986).
- [2] Laboratorio de electricidad y magnetismo, F. Nuñez Ed. Urmo (1972).
- [3] Physics of Magnetism, S. Chikazumi y S. H. Charap, John Wiley & Sons. Inc (1964).