

Unidad 10

MATERIALES MAGNETICOS

1 PRESENTACION

Los materiales magnéticos forman parte fundamental de numerosos equipos y dispositivos industriales en los campos de la Ingeniería eléctrica y electrónica. Transformadores, motores y generadores eléctricos son ejemplos clásicos de máquinas cuyo buen funcionamiento depende de una adecuada selección de estos materiales.

El campo de aplicación abarca no sólo a las máquinas eléctricas clásicas. Así, por ejemplo, están en fase de experimentación sistemas de sustentación magnética para trenes de alta velocidad. Los grandes aceleradores de partículas para investigación en física fundamental emplean toneladas de imanes permanentes para controlar el camino de las partículas.

En el campo de la electrónica, los materiales magnéticos se utilizan en altavoces, micrófonos o auriculares. El desarrollo de materiales con propiedades magnéticas especiales ha sido la base para la aparición de nuevos sistemas de almacenamiento de información: discos de ordenador, cintas de audio y vídeo, así como las cabezas de grabación y reproducción, incorporan materiales magnéticos. También están en desarrollo sistemas de almacenamiento de información conocidos como "memorias de burbujas magnéticas", más estables y de acceso más rápido que los actuales sistemas de disco.

Como vemos, el campo de aplicaciones donde se exigen propiedades magnéticas a los materiales es enorme. También lo es el número de materiales que se han desarrollado para satisfacer estas necesidades. Dada la amplitud de aplicaciones, restringiremos nuestro estudio a los materiales de uso común en máquinas eléctricas y otros sistemas de amplia utilización: relés, electroimanes, sensores, etc.

Como hicimos al estudiar las propiedades mecánicas o eléctricas, el objetivo de esta unidad es el estudio de los materiales magnéticos, de sus propiedades, y de las relaciones

estructura - propiedades y propiedades - aplicaciones. De forma resumida, los **objetivos** que se persiguen son:

- ❑ Recordar y ampliar los fundamentos y causas del comportamiento ferromagnético.
- ❑ Conocer los ensayos y parámetros que permiten caracterizar el comportamiento magnético de los materiales.
- ❑ Analizar la influencia de la estructura del material sobre su comportamiento magnético, al igual que hicimos al analizar las propiedades mecánicas y eléctricas.
- ❑ Revisar sus aplicaciones y presentar los materiales magnéticos metálicos y cerámicos habitualmente utilizados, justificando los criterios de selección a seguir.

2 ANTECEDENTES. MAGNITUDES MAGNETICAS

Antes de adentrarnos en el tema es conveniente dar una revisión a algunos conceptos y ecuaciones fundamentales del magnetismo, necesarias para entender el comportamiento magnético de los materiales.

Como sabemos, cualquier carga eléctrica en movimiento genera un campo magnético. Industrialmente, un forma simple de generar campos magnéticos de intensidad controlada es haciendo pasar una corriente de intensidad I a lo largo de un solenoide de N espiras, como el mostrado en la figura 10.1. De acuerdo con la ley de Ampere, el paso de la corriente da lugar a una *excitación magnética* H en el interior del solenoide y en la dirección de su eje dada por la expresión:

$$H = N \cdot i / l \quad (10.1)$$

siendo l la longitud del solenoide. Dicha excitación da lugar a la aparición de un campo magnético inducido B , también conocido como *inducción magnética* o densidad de flujo, cuya intensidad, en el caso de que el solenoide se encuentre en el vacío, vale:

$$B_v = \mu_0 H \quad (10.2)$$

Si en vez del vacío colocamos ahora una barra de un material ferromagnético en el interior, tal como indica la figura 10.1, se observa que, para la misma excitación H , el valor de la inducción magnética B cambia, siendo su valor:

$$B = \mu H \quad (10.3)$$

siendo μ la permeabilidad magnética del material de la barra. A efectos comparativos resulta conveniente el empleo de una *permeabilidad relativa* μ_r , adimensional, cumpliéndose la ecuación:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (10.4)$$

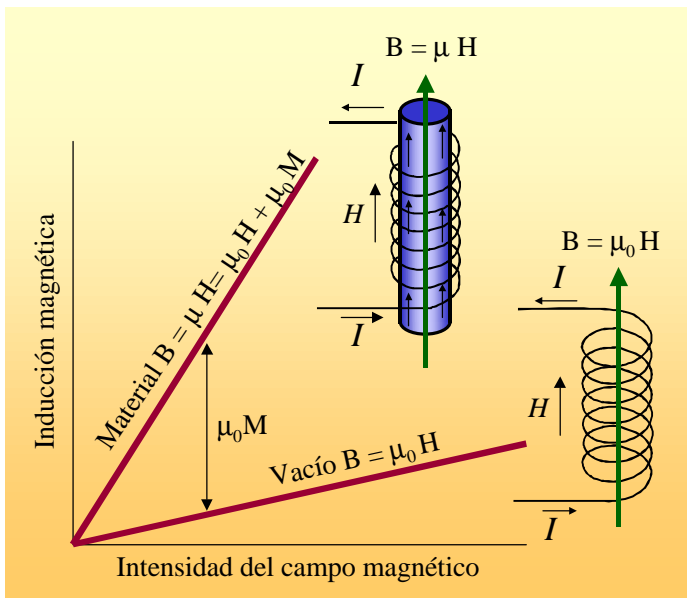


Figura 10.1. Campos magnéticos en el interior de un solenoide.

Tabla 10.1. Magnitudes magnéticas. Unidades C.G.S. y S.I.

Magnitud magnética	Sistema C.G.S.	Factor de conversión	Sistema S.I.
H Excitación. M Magnetización	Oersted (Oe)	$10^3/4\pi$	(A/m)
B Inducción o densidad de flujo	Gauss (G)	10^{-4}	Tesla (T) o Weber/m ²
Ø Flujo magnético	Maxwell (Mx) o G·cm ²	10^{-8}	Weber (Wb) o V.s
μ Permeabilidad magnética $\mu = B/H$	Adimensional	$4\pi \cdot 10^{-7}$	henrios/m o Wb/(A·m)
Permeabilidad relativa μ_r Susceptibilidad $\chi = M/H$	No definida		Adimensional

Hemos observado que la presencia de un material hace cambiar la intensidad del campo. El campo B de la expresión 10.3, puede considerarse como la suma del campo que existía en el vacío B_v y del campo generado por la presencia del material B_m. De este modo:

$$B = B_v + B_m = \mu_0 H + \mu_0 M \tag{10.5}$$

siendo **M la imantación o magnetización de la sustancia, que se define como el momento magnético que posee por unidad de volumen.** Esta magnetización que aparece en el material es también causada por la excitación magnética H. La relación entre ambas magnitudes se define como *susceptibilidad magnética* χ , que es una magnitud adimensional, cuyo valor viene dado por la expresión

$$\chi = M/H \tag{10.6}$$

o también, como fácilmente se obtiene de las ecuaciones 10.3 a 10.6 anteriores,

$$\chi = \mu_r - 1 \tag{10.7}$$

Las unidades habitualmente utilizadas se muestran en la tabla 10.1 anterior. Al igual que ocurre en un solenoide, **la magnetización M que aparece en los materiales es también consecuencia del movimiento de cargas eléctricas, en este caso, de los electrones, que giran alrededor del núcleo y a la vez rotan sobre sí mismos.** Dependiendo de como reacciona el material ante una excitación externa H, los materiales se clasifican en **diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos.**

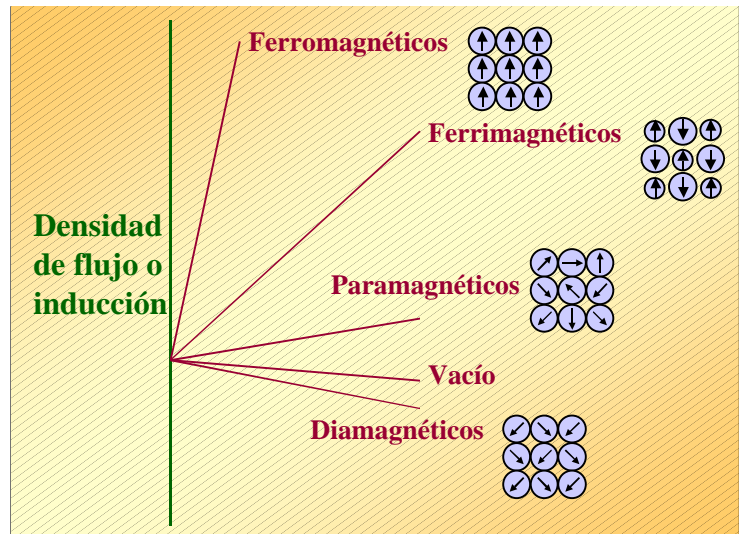


Figura 10.2. Permeabilidad magnética de los diferentes materiales en relación a la de vacío.

Los materiales **diamagnéticos** presentan susceptibilidades magnéticas negativas muy pequeñas, del orden de $\chi = - 10^{-6}$, como se indica en la tabla 10.2 para diversos elementos.

Los materiales **paramagnéticos**, en cambio, presentan susceptibilidades positivas, pero también de muy pequeño valor, entre 10^{-6} y 10^{-2} . En ambos casos, el cambio respecto al observado en el vacío es despreciable. Es decir, la permeabilidad magnética de los materiales dia y paramagnéticos es prácticamente igual a la del vacío por lo que carecen de interés industrial.

Tabla 10.2. Susceptibilidad $\chi \cdot 10^6$ de materiales diamagnéticos y paramagnéticos

DIAMAGNETICOS	Cobre	- 0,085
	Plata	- 0,200
	Estaño	- 0,250
	Cinc	- 0,157
PARAMAGNETICOS	Aluminio	+ 0,651
	Platino	+ 1,100
	Titanio	+ 1,250

Los materiales **ferromagnéticos**, sin embargo, se caracterizan por presentar susceptibilidades muy altas y, por lo tanto, son capaces de adquirir una fuerte magnetización, lo que se aprovecha industrialmente para generar campos magnéticos de alta intensidad.

3 EXPERIENCIAS SOBRE MATERIALES MAGNETICOS

3.1 OBTENCION DE INDICADORES DEL COMPORTAMIENTO MAGNETICO

El equipo habitualmente empleado para determinar las características magnéticas se conoce con el nombre de **magnetómetro de Kopsel**. En la figura 10.3 se representa un esquema del equipo. La muestra P a ensayar se coloca en los alojamientos Q del yugo magnético Y. Al cerrar el conmutador K, la batería B suministra una corriente I (regulada por el reostato R) que, al circular por las bobinas H y C, genera un flujo magnético que recorre el circuito formado por el yugo y la muestra.

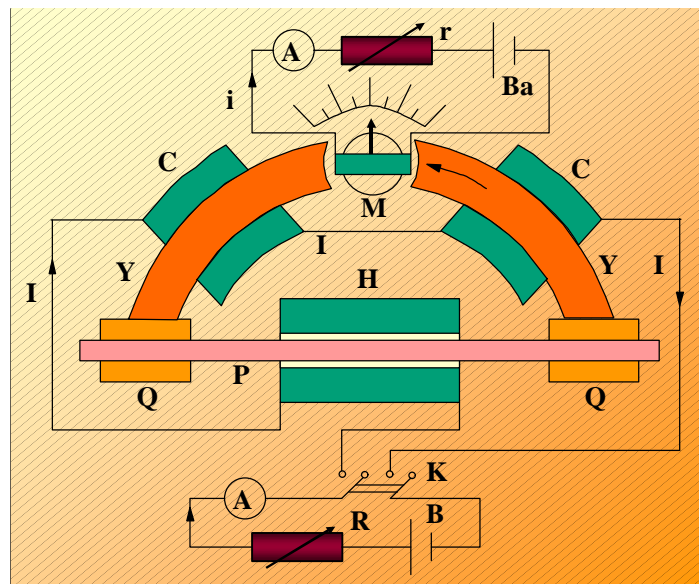


Figura 10.3. Esquema del magnetómetro de Kopsel.

En el entrehierro del yugo, se sitúa una pequeña bobina móvil M, sobre la que va montada una aguja indicadora del desplazamiento angular de la bobina, por la que circula una corriente i, regulable mediante el reostato r. La corriente es suministrada por la batería Ba.

Según sea el valor del flujo, ϕ se producirá un mayor o menor desplazamiento de la aguja indicadora de la bobina M. En efecto, sobre la bobina se genera un momento de giro:

$$M_e = K_e i B_e \quad (10.8)$$

siendo K_e una característica que depende de la geometría, tamaño y número de espiras de la bobina M, y B_e la inducción en el entrehierro.

Al giro provocado por el momento magnético, M_e , se opone el momento antagonista de un muelle elástico espiral que restringe el libre giro de la bobina, cuyo valor será:

$$M_m = K_m \alpha \tag{10.9}$$

siendo K_m la constante elástica del muelle y α el ángulo de giro.

En el equilibrio, se cumplirá:

$$\sum M_i = 0 \tag{10.10}$$

luego,

$$K_e \cdot i \cdot B_e = K_m \cdot a \tag{10.11}$$

Por otro lado, considerando que las espiras de M abarcan todas las líneas de flujo en el entrehierro, la continuidad del flujo magnético hace que:

$$B_e \cdot S_e = B_p \cdot S_p \tag{10.12}$$

siendo: S_e , la sección en el entrehierro de la bobina M.

S_p , la sección transversal de la probeta P.

B_p , la inducción en la probeta.

De las ecuaciones 10.11 y 10.12, se tiene que:

$$B_p = \frac{K_m \cdot S_e \cdot a}{K_e \cdot S_p \cdot i} = \frac{C \cdot a}{S_p \cdot i} \tag{10.13}$$

siendo, $C = K_m \times S_e$, una característica del equipo.

Si en los ensayos se selecciona una intensidad, i , de forma que $i = C/S_p$, la aguja indicadora señala directamente en el dial el valor de B_p .

Para el trazado de la curva B-H de imantación se parte inicialmente de una probeta desimantada del material a ensayar que se coloca en el magnetómetro. Una vez montada se aplican excitaciones H crecientes mediante el incremento de la intensidad I, para lo cual se actúa sobre el reostato R. Para cada valor de I, el valor de la excitación H viene dado por la ecuación fundamental dada en la 10.1.

En un equipo estándar, $N = 1000$ vueltas y $l = 12,6$ cm, de donde el valor de la excitación vale:

$$H = 8000 \times I \text{ (A/m)}$$

La intensidad I que recorre la bobina móvil M debe permanecer constante durante toda la prueba. Tomando valores de B_p o de α para cada valor de H, se construye una tabla cuyos datos pueden representarse gráficamente en ejes coordenados B-H como se muestra en la figura 10.4.

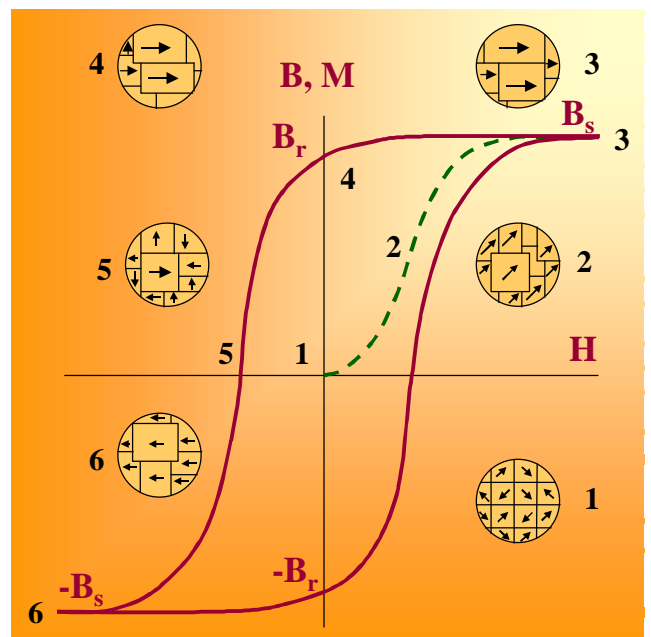


Figura 10.4. Densidad de flujo magnético en función de la excitación magnética aplicada.

Del trazado de la curva de histéresis se obtiene el comportamiento de un imán, que se clasifica en blando o duro, dependiendo del campo

H necesario para su desmagnetización, de tal forma que para una similar imanación de saturación el imán es más duro cuanto mayor es el campo H que la anula.

3.1.1 Objetivo de la experiencia

Conocer los fundamentos del magnetómetro de Kopsel para la determinación de la curva de histéresis magnética. Definición de variables y magnitudes características. Observación de un vídeo explicativo de la determinación de la curva de histéresis.

3.1.2 Material empleado

3.1.3 Descripción del proceso y equipos utilizados

Ajuste del fluxómetro

- a) Conectar los terminales de la bobina del equipo y conectar éste a la red.
- b) PWR ON.
- c) Seleccionar el modo de medida NORM.
- d) Reseteo el integrador: Apretar RESET.

Al soltar, el equipo marca 0.000 y aparece una barra horizontal centrada a la izquierda del display. El display comienza mostrar una deriva desde cero.

- e) Esperar a que el equipo se caliente durante, al menos, 10 minutos.
- f) Apretar de nuevo y soltar RESET, observando las derivas del display:

Si aparece una barra en la parte superior, la deriva es positiva.

Si aparece una barra en la parte inferior, la deriva es negativa.

- g) Girar levemente el compensador de deriva NULL en sentido contrario a la deriva observada.
- h) Repetir las etapas f) y g) sucesivamente hasta que la deriva sea nula.

El fluxómetro está listo para medir en este momento.

Selección de rango y modo de medida

- Seleccionar el modo de medida PEAK (Válido cuando se hace pasar el imán a través de la bobina).
- Seleccionar el rango de medida: En nuestro caso será 1 kMaxwell, Multiplicador 100. Las medidas, expresadas en Maxwell×vuelta serán las indicadas por el display x10.000.

Mediciones de B_r

- Resetear el integrador antes de cada medida: RESET y soltar.
- Pasar el imán (con el eje coincidiendo con el de la bobina) a través de la bobina.
- Cálculo de la imantación mediante la expresión:

$$B_r = M \times \text{vueltas} \times C / \text{Vol (cm}^3) = \text{Gauss}$$

siendo: Flujo: $M \times \text{vueltas}$ = Indicación LED x 10000
 C: Constante de la bobina = 0,0143
 Vol: Volumen del imán (cm³)

3.1.4 Comentarios a la observación del vídeo y manejo del fluxómetro**3.2 EFECTO DE LA COMPOSICION SOBRE LAS PROPIEDADES MAGNETICAS****3.2.1 Objetivo de la experiencia**

Analizar el comportamiento magnético de los materiales. Conocer la influencia de la naturaleza y composición del material sobre la facilidad para rotar los dominios magnéticos en materiales ferromagnéticos.

3.2.2 Materiales empleados

Acero F1110 normalizado (0.10% C), acero F5318 (0.4% C, 5% Cr, 1.5% Mo), aluminio de pureza, bronce comercial, aleaciones base níquel.

3.2.3 Descripción del proceso y equipos

3.2.4 Resultados obtenidos

3.3 EFECTO DE LA ESTRUCTURA DEL MATERIAL SOBRE LAS PROPIEDADES MAGNETICAS

3.3.1 Objetivo de la experiencia

Conocer la influencia de la microestructura del material sobre la facilidad para rotar los dominios magnéticos en materiales ferromagnéticos.

3.3.2 Materiales empleados

Acero F1140 (0.45%) y acero F5318 (0.4% C, 5% Cr, 1.5% Mo), en diferentes estados de tratamiento térmico: normalizado, temple y revenido.

3.3.3 Descripción del proceso y equipos

3.3.4 Resultados obtenidos

3.4 | SOBRE LOS PROCESOS DE DESMAGNETIZACION

3.4.1 Objetivo de la experiencia

Determinar los efectos de la temperatura en el comportamiento magnético: Definir la temperatura de Curie. Efecto del alejamiento del campo magnético alterno.

3.4.2 Materiales empleados

Acero F5318 en estado de temple y revenido

3.4.3 Describe el proceso de ensayo y equipos utilizados

3.4.4 Resultados obtenidos

4

CUESTIONES PROPUESTAS POR LAS EXPERIENCIAS

1. ¿Qué variables obtenidas del ciclo de histéresis permiten calificar la calidad de un imán blando para núcleos magnéticos?
2. ¿Qué variables permiten calificar la calidad de un imán permanente?
3. ¿Cual de los materiales ensayados presenta mejores características para la construcción de núcleos magnéticos de máquinas eléctricas?
4. Justifica la desimantación de un imán duro mediante el procedimiento de alejarlo de una bobina por la que circula una corriente alterna. ¿Se desimantaría el imán si la corriente fuera continua?
5. ¿Queda desmagnetizado un imán permanente si se le somete a un campo de sentido contrario de valor H_c , al eliminar el campo?
6. Justifica por qué el hierro presenta mayor valor de saturación magnética que el níquel.
7. La inspección mediante partículas magnéticas es una técnica no destructiva que permite detectar defectos superficiales o subsuperficiales en algunos tipos de piezas. Indica la condición que debe reunir la pieza para que pueda ser inspeccionada.
8. Justifica la disposición en forma de finas láminas que se emplea usualmente para construir núcleos magnéticos.
9. Justifica la necesidad de emplear la laminación en frío y recocido de recristalización como medio idóneo para obtener chapas de acero al silicio para núcleos magnéticos.

ALUMNO

APELLIDOS:

NOMBRE:

GRUPO DE PRÁCTICAS:

FECHA DE ENTREGA:

RESPUESTAS DE LAS CUESTIONES A RESOLVER