

Medición de Susceptibilidad Magnética χ de Materiales

Marco Antonio Escobar y Mario Alatorre
Laboratorio de Propiedades Magnéticas de Materiales
Centro Nacional de Metrología

Contenido:

- El concepto de susceptibilidad magnética χ
- Clasificación Magnética de los Materiales
- Métodos de Medición de χ

El concepto de susceptibilidad magnética χ

- Magnetización y Polarización Magnética

El magnetismo en la materia equivale a una distribución de momentos magnéticos atómicos, cuya contribución al momento magnético total de un material dado, puede describirse, desde el punto de vista macroscópico, como una densidad volumétrica de momento magnético, o un momento magnético M por unidad de volumen, llamada *magnetización* \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = dM/dv \quad [\text{en A/m}]$$

la cual, puede expresarse también en términos de una cantidad vectorial llamada *polarización magnética* \mathbf{J} , dada por:

$$\mathbf{J} = \mu_0 dM/dv = \mu_0 \mathbf{M} \quad [\text{en tesla (T)} = \text{V.s/m}^2]$$

donde: $\mu_0 \equiv$ constante de campo magnético = $4\pi \times 10^{-7}$ [V.s/A.m]

Ambas magnitudes, \mathbf{M} y \mathbf{J} , determinan en cierta medida el grado de alineamiento de los momentos magnéticos elementales en el material.

- ¿Qué ocurre si sometemos al material bajo la acción de un campo magnético externo de intensidad \mathbf{H} ?

Trataremos de describir y analizar los diferentes fenómenos que se presentan, a fin de dar una respuesta a esta pregunta.

- Inducción Magnética en la Materia

En una primera aproximación, podemos decir que cuando se coloca un material en un campo magnético \mathbf{H} , el material bajo prueba puede ser atraído por la región intensa del campo ó bien repelido por éste. Esto significa que en el material se induce un campo magnético \mathbf{B} , llamado inducción magnética, el cual interacciona con el campo externo \mathbf{H} .

En el caso general, en el que se consideran todas las fuentes posibles de \mathbf{B} , es decir tanto las corrientes como la materia magnetizada, la relación entre la inducción magnética \mathbf{B} en la materia y la intensidad del campo magnético \mathbf{H} , esta dada por la siguiente ecuación:

$$\rightarrow \quad \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0\mathbf{H} + \mathbf{J} \quad [\text{en tesla, } T = \text{V}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$$

Esta es una de las relaciones más importantes en el magnetismo de los materiales. En el vacío, tanto \mathbf{M} como \mathbf{J} son cero y la expresión anterior se reduce a la relación que ya conocemos: $\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H}$.

- \mathbf{M} (en A/m) y \mathbf{J} (en T) representan, respectivamente, la magnetización y la polarización magnética total inducidas en el material, y son proporcionales al campo magnético \mathbf{H} .

En el caso de los materiales isotrópicos, en los cuales \mathbf{M} y \mathbf{J} son colineales, es decir paralelos, con el campo \mathbf{H} , podemos escribir las relaciones siguientes:

- $M = \chi H \rightarrow \chi = M / H$ (sin dimensiones)
- $J = \chi H \rightarrow \chi = J / H$ (en henry/m = V.s/A.m)

donde χ es un parámetro característico del material, llamado *susceptibilidad magnética*, la cual podemos definir como la razón entre la magnetización inducida en el material, o polarización magnética, y la intensidad del campo magnético H al cual esta sujeto dicho material.

La *susceptibilidad magnética* de un material puede verse como una medida de la facilidad que presenta un material ha ser magnetizado por un campo magnético H dado.

Las expresiones para χ , dadas anteriormente, son conocidas también como *susceptibilidad magnética relativa* y *susceptibilidad magnética absoluta*, respectivamente.

Sustituyendo ahora la expresión para \mathbf{M} , dada en la ecc. anterior, en la ecc. para \mathbf{B} , se obtiene la siguiente relación:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H}$$

$$\rightarrow \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad [\text{tesla, T}]$$

donde: $\mu = \mu_0(1 + \chi)$
 \equiv *permeabilidad magnética absoluta* [en V.s/A.m]

y $\mu/\mu_0 = (1+\chi) = \mu_r$
 \equiv *permeabilidad magnética relativa* [sin dimensiones]

Daremos ahora un paso hacia la comprensión de los distintos fenómenos magnéticos observados en los materiales, al introducir una clasificación magnética de éstos.

Susceptibilidad y Clasificación Magnética de Materiales

Los materiales pueden clasificarse magnéticamente, según el valor de su susceptibilidad magnética ($\chi = \mathbf{M} / \mathbf{H}$), en tres grupos principales:

- Materiales Diamagnéticos: $\chi < 0$
- Materiales Paramagnéticos: $\chi > 0$
- Materiales Ferromagnéticos: $\chi \rightarrow \infty$

A continuación daremos algunas ideas generales que nos permitirán entender el comportamiento y el mecanismo de los fenómenos que se presentan en estos materiales, basados en el hecho de que [las propiedades magnéticas de los materiales dependen de su estructura electrónica y de los movimientos propios de los electrones: movimiento orbital y de spin.](#)

- Materiales diamagnéticos ($\chi < 0$)

Este tipo de materiales se caracteriza por presentar una susceptibilidad negativa. El diamagnetismo es debido al movimiento orbital de los electrones.

→ Bajo la acción de un campo magnético externo \mathbf{H} , se induce en el material un cambio en el movimiento orbital de sus electrones, de tal manera que los momentos magnéticos asociados a las corrientes así inducidas, producen una magnetización $\neq 0$, muy pequeña. En virtud de la **ley de Lenz**, la magnetización inducida es opuesta al campo magnético \mathbf{H} que la produce, dando como resultado que la χ sea negativa (< 0).

→ Cuando el campo \mathbf{H} es nulo, el momento magnético resultante es nulo y por tanto la magnetización es igual a cero. Cuando $\mathbf{H} \neq 0$, entonces $\mathbf{M} \neq 0$, presentándose un comportamiento lineal entre estas dos magnitudes, el cual es representado en la siguiente figura:

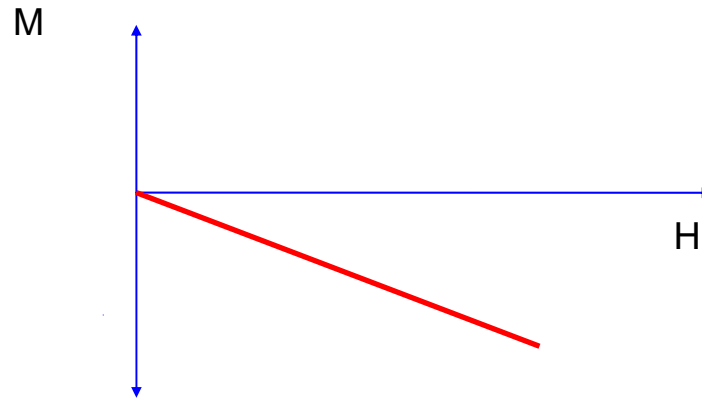


Fig. Representación esquemática del comportamiento magnético de los materiales diamagnéticos.

→ El diamagnetismo es notable principalmente en los materiales cuyos átomos tienen sus capas electrónicas completas, es decir, materiales en los cuales los momentos de spin y orbitales de los electrones, se compensan, dando como resultado un momento magnético nulo, en ausencia de un campo **H**.

En la Tabla 1, se reportan algunos valores de la *Susceptibilidad Específica*, χ_p de algunos materiales diamagnéticos (Praktische Physik, Vol. 3, 1996). Los materiales superconductores, como el Pb, pertenecen a esta familia de materiales.

$$\chi_p = \chi_v / d \text{ [en m}^3\text{/kg]}$$

donde: χ_v = susceptibilidad relativa o volumétrica, y
 d = densidad del material [en kg/m³].

Tabla 1. Susceptibilidad específica de algunos materiales diamagnéticos, a 20 °C [en 10^{-9} m³/kg]

Material	χ_p	Material	χ_p	Material	χ_p
Acetona	- 7.3	Ag	- 2.4	H	- 25
Alcohol etílico	- 9.2	Ar	- 6.1	Hg	- 2.1
Petróleo	- 11.0	Au	- 1.8	N	- 5.4
Tolueno	- 9.0	C (diamante)	- 6.2	Pb	- 1.4
HCl	- 7.2	Cl	-7.4	Si	- 1.4
H ₂ O	-9.054	Cu	- 1.09	Zn	- 1.8

- Materiales paramagnéticos ($\chi > 0$)

Los materiales paramagnéticos se caracterizan por tener una susceptibilidad positiva, relativamente pequeña .

→ Son materiales cuyos átomos presentan dos características esenciales: (1) capas electrónicas parcialmente llenas, y como consecuencia de esto, (2) un momento magnético resultante distinto de cero, o permanente.

- En ausencia de campo, es decir a $\mathbf{H} = 0$, todos los momentos magnéticos de los átomos, el, momento angular orbital y de spin de los electrones no apareados, se encuentran orientados al azar, debido a que no existe un acoplamiento entre éstos, de tal manera que la magnetización resultante es nula, $\mathbf{M} = 0$.
- Bajo la acción de un campo magnético externo \mathbf{H} , los momentos magnéticos de los átomos tienden a alinearse en la dirección del campo (ver Fig.), resultando así una magnetización $\mathbf{M} \neq 0$.
- La alineación es favorecida ya que ésta, representa un estado de mínima energía para los electrones. La Fig. muestra el comportamiento magnético de estos materiales en presencia de un campo magnético de intensidad H .

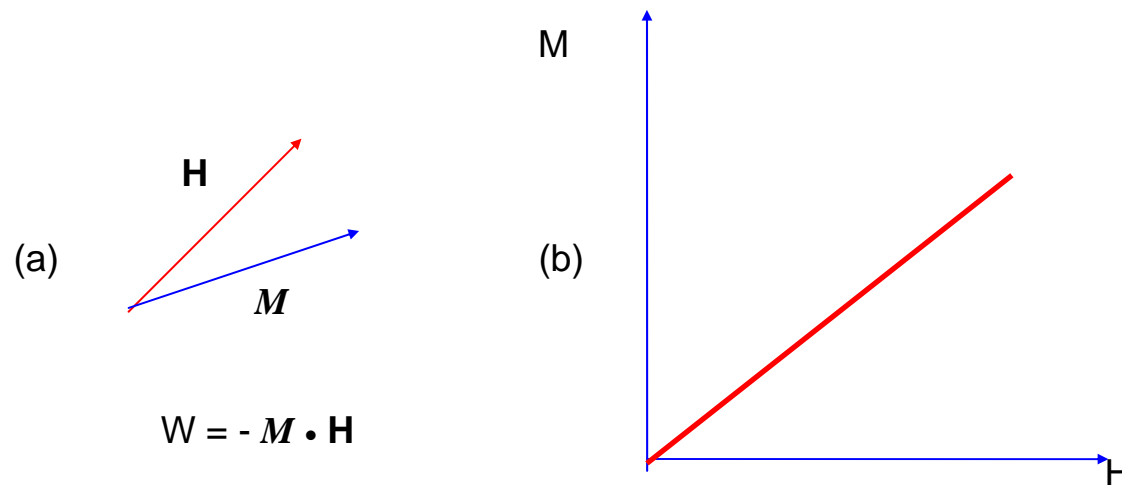


Fig. Representación esquemática del comportamiento magnético de los materiales paramagnéticos, bajo la acción de un campo H .

→ La energía (W) del sistema, representada en la figura anterior, esta dada por la siguiente expresión:

$$W = - \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} = - M.H \cos\theta$$

→ La susceptibilidad de los materiales paramagnéticos depende de la temperatura (T). A T ambiente y bajo la acción de un campo magnético H , la magnetización o polarización del material es relativamente pequeña, ya que existe en la estructura atómica de éste un efecto de agitación térmica que predomina, y que impide un alineamiento completo de los momentos magnéticos. A bajas temperaturas, los efectos de desorden debidos a las oscilaciones térmicas son menores, dándose así un mayor alineamiento de los momentos magnéticos y por tanto una mayor magnetización.

→ La susceptibilidad de los materiales paramagnéticos sigue la **ley de Curie**, es decir que varia inversamente con la temperatura absoluta T . La ecc. siguiente expresa el resultado clásico de la ley de Curie:

$$\chi = (NM^2) / (3\mu_0 k_B T) = C / T$$

donde: N = núm. de átomos por unidad de volumen, portadores cada uno de un momento magnético M .

k_B = constante de Boltzmann $\approx 1.38 \times 10^{-23}$ [JK⁻¹]

C = constante de Curie, que depende de cada material

En la Tabla 2, se reportan algunos valores de la *Susceptibilidad Específica* χ_p , de algunos materiales paramagnéticos (Praktische Physik, Vol. 3, 1996).

Tabla 2. Susceptibilidad específica de algunos materiales paramagnéticos, a 20 °C [en $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$]. ($T \rightarrow$ otra temperatura).

Material	χ_p	Material	χ_p	Material	χ_p
Al	+ 7.6	Mo	+ 11.6	Sn / blanco	+ 0.3
Ir	+ 1.7	O	+ 1340	Ti	+ 40
K	+ 6.7	O (-183 °C)	+ 5000	V	+ 56.6
Li	+ 48	Pt	+ 12.2	W	+ 4.0
Mg	+ 3.1	Pt (1000 °C)	+ 9.1		

- Materiales ferromagnéticos ($\chi \rightarrow \infty$)

Los materiales ferromagnéticos se distinguen por presentar una susceptibilidad positiva, 10^3 a 10^{11} veces más grande que la de los otros materiales.

La propiedad por excelencia de estos materiales es el **alineamiento paralelo espontáneo**, que se da entre sus momentos magnéticos atómicos en ausencia de campo. Entre estos materiales se encuentran por ejemplo el hierro (Fe), el cobalto (Co) y el níquel (Ni), así como la aleación de éstos con otros elementos. Estos materiales son los precursores del magnetismo en la materia y de las aplicaciones potenciales de esta familia de materiales. La descripción de las propiedades de estos materiales requieren de un tratado especial y no serán vistas aquí.

- Métodos de Medición de χ

Una revisión en la literatura sobre los métodos de medición para la determinación de la *Susceptibilidad Magnética*, muestra que existe una gran variedad de éstos. El método de medición a utilizar dependen principalmente:

- del propósito de la medición que se persigue, por ejemplo: para la investigación, la calibración, el establecimiento de un material de referencia, pruebas de aceptación o control de calidad, ...,
- del tipo de material a caracterizar
- de las características de la muestra, tales como: estado físico, forma, tamaño y dimensiones, y
- de las magnitudes a ser medidas, como por ejemplo: susceptibilidad volumétrica, específica o molar.

A continuación se describen algunos de los principales métodos de medición de susceptibilidad magnética de materiales.

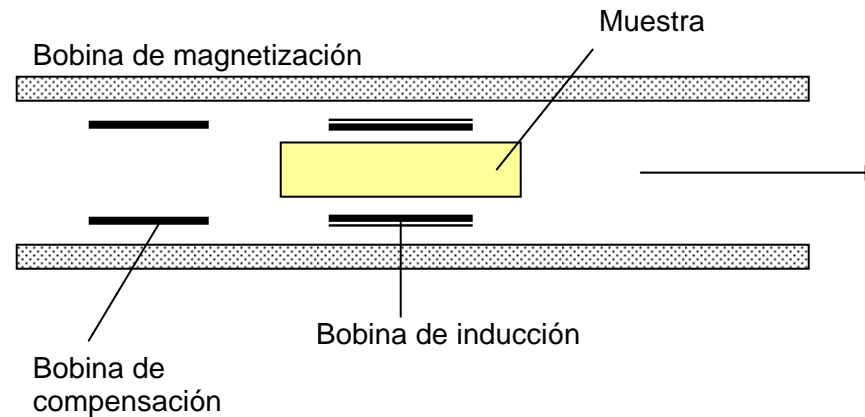
- Método de Inducción

Este método se basa en la medición del cambio de flujo magnético inducido en una bobina, en la cual se encuentra una muestra del material bajo estudio, en presencia de un campo magnético de intensidad H , generado por un solenoide de magnetización (ver figura anexa). La expresión siguiente muestra la relación a partir de la cual se determina el valor de la susceptibilidad volumétrica:

$$\chi_v = J/\mu_0 H$$

donde:

- μ_0 es una constante magnética,
- J es la polarización magnética inducida en el material bajo estudio, y esta relacionada con el cambio de flujo magnético a través de la siguiente relación: $\Delta\phi = J\pi r^2_{\text{muestra}} + \phi_{\text{flujo en el aire}}$
- $H = C_{\text{coil}} I$, es la intensidad del campo magnético, con C_{coil} la constante del solenoide de magnetización e I la intensidad de corriente que circula a través de éste.



Método de inducción empleado para la medición de la susceptibilidad magnética de materiales.

El método de inducción, es un método no destructivo y permite medir de manera directa la susceptibilidad magnética de masas patrón, adecuando el diámetro de la bobina de inducción al diámetro de la masa patrón a medir.

- Método de la Balanza de Gouy

El principio de este método de medición se basa en la fuerza que ejerce un campo magnético, producido por un electroimán, sobre una muestra del material del cual se requiere medir su susceptibilidad. La fuerza ejercida por el campo magnético H sobre la muestra, se puede expresar como:

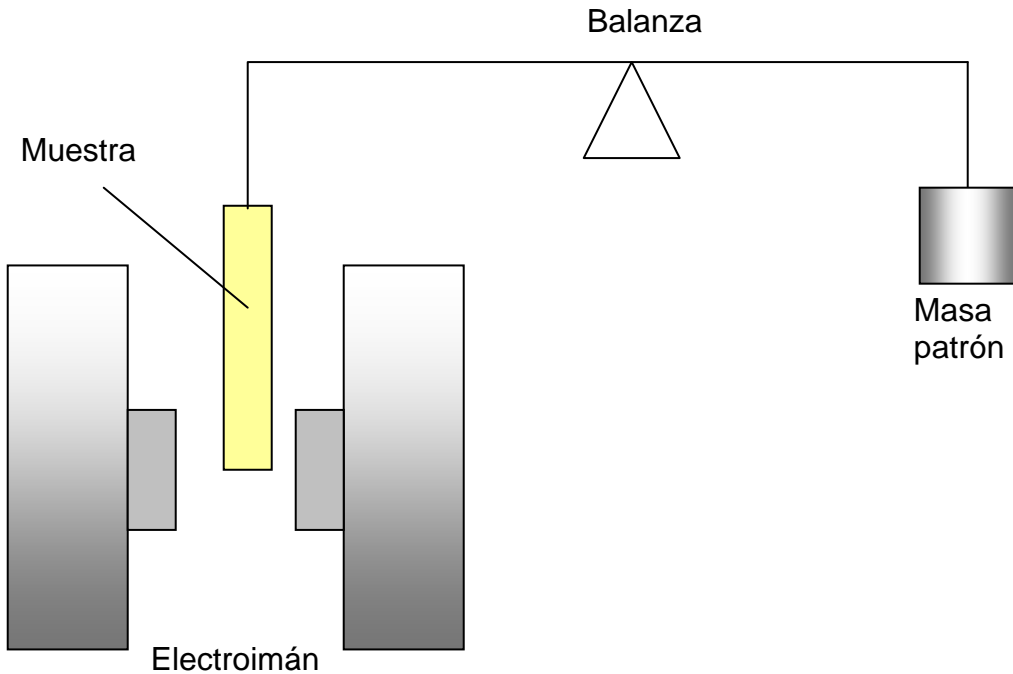
$$F = (\mu_0/2) \chi_v A (H_1^2 - H_2^2)$$

De donde:

$$\chi_v = 2F / [(\mu_0 A (H_1^2 - H_2^2))]$$

Siendo: F = la fuerza, en N,
 χ_v = la susceptibilidad volumétrica,
 A = área de la sección transversal de la muestra, en m^2 ,
 H_1 = intensidad del campo magnético en la parte inferior de la muestra, en A/m,
 H_2 = intensidad del campo magnético en la parte superior de la muestra, en A/m.

La fuerza F se determina con ayuda de una balanza, compensando ésta fuerza con masas patrón y midiendo la masa total de éstas, como se muestra en la figura. Este método permite medir la susceptibilidad de materiales diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos, en forma líquida y sólida.



Sistema de medición de susceptibilidad magnética por el método de la balanza de Gouy.

Balanza de susceptibilidad magnética, tipo Evans.

El principio de medición de la balanza de susceptibilidad magnética tipo Evans, se basa en el principio de medición de la balanza de Gouy, con la diferencia que en la balanza tipo Evans, la

muestra permanece fija y son los polos magnéticos de esta balanza los que se mueven para generar un gradiente de campo H.

Uno de los principales problemas que se presentan en el uso adecuado de la balanza tipo Evans, para que proporcione mediciones confiables, es su calibración. Para ello se requieren de materiales de referencia certificados, que garanticen la trazabilidad de las mediciones hacia patrones nacionales. Lo cual en la práctica no es fácil conseguir.

Trazabilidad de las mediciones de Susceptibilidad Magnética:

- Depende del método de medición utilizado.
- Trazabilidad a valores del patrón de flujo magnético
- Trazabilidad a valores del patrón de intensidad de corriente eléctrica
- Trazabilidad a valores del patrón de longitud
- Trazabilidad a valores del patrón nacional de densidad de flujo magnético