

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE MATEMÁTICA, ASTRONOMÍA, FÍSICA Y COMPUTACION

---

SERIE “C”

## TRABAJOS DE FÍSICA

Nº 11/17

### DETECCIÓN DE PARA Y DIA-MAGNETISMO

Propuesta para medición de susceptibilidades magnéticas débiles en  
laboratorios de enseñanza.

Dr. Lorenzo Marcos Iparraguirre



Editor: Miguel A. Chesta

---

CIUDAD UNIVERSITARIA – 5000 CÓRDOBA

REPÚBLICA ARGENTINA

## DETECCIÓN DE PARA Y DIA-MAGNETISMO

### Propuesta para medición de susceptibilidades magnéticas débiles en laboratorios de enseñanza.

#### Resumen

Se diseña una experiencia elemental para explorar el comportamiento magnético de sustancias para y dia- magnéticas, y medir la correspondiente susceptibilidad magnética, con mínimo despliegue de elementos.

Se muestra que una balanza digital de 0,01 g de apreciación, de uso corriente en los laboratorios de enseñanza, resulta suficiente para obtener valores de las débiles fuerzas involucradas con una cifra significativa, y llegar a resultados muy satisfactorios.

#### Abstract

It is developed an experimental design to explore the magnetic behavior of para and dia magnetic materials, and to measure the corresponding magnetic susceptibility, with minimum deployment of instruments.

It is shown that an 0,01 g appreciation digital balance, of current use in teaching laboratories, is capable to obtain appropriate values of the weak related forces up to a one significant digit, and to reach satisfactory achievements.

**Palabras clave:** susceptibilidad magnética – diamagnetismo – paramagnetismo – imán – magnetización

**Keywords:** magnetic susceptibility – diamagnetism – paramagnetism – magnet - magnetization

#### 1.- Introducción

El problema práctico principal a solucionar para detectar para o diamagnetismo es la medición de fuerzas muy débiles.

Básicamente una muestra de volumen  $V$  y susceptibilidad magnética  $\chi$ , al estar inmersa en un campo de inducción magnética de  $B$  teslas, adquiere un momento dipolar magnético  $m = \chi VB/\mu_0$ , y debido a esto sufre una fuerza que se calcula aplicando las ideas correspondientes al efecto de un campo inhomogéneo sobre un dipolo.

En el caso que nos interesa, dado que las susceptibilidades  $\chi$  que nos interesan son muy pequeñas (orden  $10^{-5}$ ), debemos pensar en campos magnéticos muy intensos, que además deben tener una gran inhomogeneidad, ya que la fuerza de un campo sobre un dipolo no es proporcional a la intensidad del campo, sino a su gradiente (ver las expresiones siguientes). Y para lograr un esquema experimental manejable consideraremos básicamente dispositivos con simetría axial. Es decir, sea  $z$  el eje de simetría, y consideremos un campo magnético  $B(z)$  alineado con él, y con un gradiente  $dB/dz$ . Dado que no consideraremos muestras anisótropas, ellas se magnetizarán también en dirección  $z$ , en el mismo sentido que el campo  $\vec{B}$ , y experimentarán una fuerza magnética dada por:

$$F = m \frac{dB}{dz} \cong \frac{\chi V}{\mu_0} B \frac{dB}{dz}$$

En donde F, y B, indican las componentes z de los respectivos vectores, de manera que los valores positivos indican el sentido positivo de z, y viceversa.

A partir de esta expresión es posible hacer una primera estimación de los órdenes de magnitud de los valores intervinientes: pensemos en campos del orden de 1 T, con gradientes del orden de 0,1 T/cm = 10 T/m (ver el Apéndice para tener referencias sobre los valores), de manera que el volumen de la muestra no debería superar el orden del cm<sup>3</sup>, y entonces, con susceptibilidades del orden de 10<sup>-5</sup>, tenemos que pensar en detectar fuerzas del orden de 10<sup>-4</sup> N.

Una forma de medir fuerzas tan pequeñas es con balanzas de precisión. Otra forma puede ser con balanzas de torsión. Ahora bien, dado que se requiere medir en un campo inhomogéneo, es necesario que la posición de la muestra en el campo sea fija. Eso obliga a descartar las balanzas de torsión, y las balanzas de platillos con brazos oscilantes, porque tienen una movilidad que haría imposible definir la posición de la muestra en el campo. Debemos pensar en balanzas de precisión digitales, cuya parte sensible a la presión no tiene movilidad.

En los laboratorios de enseñanza (como es el caso de nuestra Facultad), en general se dispone de balanzas de este tipo con apreciación de 0,01 g, es decir precisamente 10<sup>-4</sup> N, que es el umbral de nuestra necesidad. En esta propuesta se muestra que con estas balanzas ya es posible detectar el comportamiento magnético de muchas sustancias, y obtener valores rudimentarios de  $\chi$ .

Es claro que balanzas más sensibles permitirían determinaciones más precisas, pero en principio para ellas podrían servir las mismas indicaciones de esta propuesta.

## 2.- Arreglo experimental

Básicamente se propone colocar la muestra sobre el platillo de la balanza, registrar su peso sin la existencia del campo magnético y luego aplicando el mismo, y calcular la diferencia, que será la fuerza magnética.

Ahora bien, para que el campo magnético no afecte el funcionamiento de la balanza, ni aplique fuerzas detectables a las partes de la misma, la muestra se debe alejar del platillo, colocándola encima de un soporte no magnético, con un peso suficientemente pequeño como para no comprometer la sensibilidad de la balanza.

Para el caso de campo magnético producido con imanes según lo descrito en el Apéndice, este soporte debe alejar la muestra unos 10 cm del platillo de la balanza. Con estas indicaciones el soporte puede construirse simplemente maquinando adecuadamente alguna barra de teflón o cualquier material plástico similar.

Es conveniente que el soporte pueda descomponerse en dos partes, ambas no magnéticas: la parte inferior, más grande, que debe imponer la distancia correspondiente entre la balanza y la zona de campo magnético, y la parte superior, más pequeña y con una cavidad capaz de contener la muestra siempre en la misma ubicación espacial, llenando el mismo volumen, ya sea sólida, líquida o pulverizada.

Es posible improvisar a partir de elementos no magnéticos que se obtengan. Por ejemplo, en nuestro caso para la parte inferior funcionó bien un simple jarro de aluminio colocado boca abajo sobre el platillo, y para la superior, la tapa del envase de un rollo fotográfico de 35 mm.

El material utilizado debe introducir la mínima fuerza magnética posible, la cual además se mide y se descuenta en cada determinación.

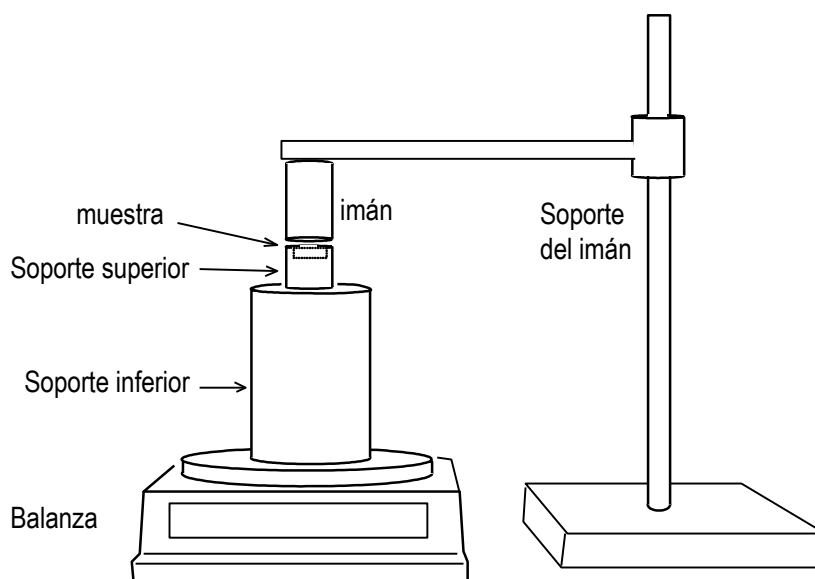
Para aplicar el campo magnético se ensayaron varias posibilidades, y la más simple que produjo buenos resultados, consistió en formar una pila cilíndrica de varios imanes de neodimio de gran potencia, y montarla verticalmente en un soporte que puede desplazarse horizontalmente para colocarlo sobre la muestra, o alejarlo del sistema, como se muestra en la figura.

En el Apéndice están las dimensiones de los imanes que se utilizaron en este trabajo. Se consiguen fácilmente en las casas del ramo (casas de parlantes, algunas ferreterías, y muchas opciones en internet) pidiéndolos como “de neodimio”, y se consiguen de varias formas y tamaños: hay más grandes y más chicos. Los que se describen en el Apéndice, de neodimio, de 3 cm de diámetro, constituyen una muestra de lo mínimo recomendable. Si se consiguen de mayor diámetro y grosor se conseguirán mejores resultados, y lo mismo si se aumenta el número de ellos. En ningún caso deben tener el hueco central que suelen tener los imanes cerámicos para parlantes porque debilita mucho el campo.

Estos últimos, los cerámicos que se utilizan en parlantes, no sirven porque el material no alcanza la magnetización suficiente, además de tener el hueco. A primera vista es posible pensar que debería indicarse el valor de la magnetización o del campo magnético producido, pero en el ámbito de la distribución comercial de estos elementos esos datos no son muy útiles: hemos adquirido uno promocionado como de 12000 gauss, que al ser medido en el laboratorio no superó los 5000 gauss. En la práctica es suficiente con solicitar que sean de neodimio (condición indispensable), y fijar las dimensiones. Como puede verse en el Apéndice, los tres imanes de neodimio utilizados registraron campos muy similares entre sí, lo que sugiere que posiblemente todos los de neodimio de ese mismo diámetro y espesor generarán también campos muy similares a éstos que hemos registrado aquí.

No obstante si se dispone de instrumentos se podrá medir campo magnético, y saber si los imanes adquiridos poseen las características necesarias.

También puede determinarse el momento magnético de cada imán (en el caso en que sean como éstos: discos magnetizados a lo largo de su eje) midiendo la fuerza de atracción o repulsión entre dos de ellos. La forma más sencilla de hacerlo es utilizar este mismo montaje que se está describiendo, con la misma balanza, y realizar mediciones de fuerza en función de la distancia entre los discos, situándolos a distancias suficientemente grandes, ya que las fuerzas serán intensas y la balanza muy sensible. Con estas mediciones, aplicando la fórmula para la fuerza entre dos dipolos (alineados), se obtiene directamente el momento dipolar magnético de cada disco. Pero es importante tener en cuenta que, como veremos más adelante, con esta propuesta se obtienen buenos valores de susceptibilidad relativa con respecto a alguna sustancia que se toma de referencia, pero no se obtienen buenos valores absolutos, por lo cual no es importante conocer el valor del campo magnético con gran precisión.



La necesidad de aumentar la fuerza magnética lleva a utilizar muestras del máximo volumen posible, y eso obliga a resignar precisión, pues la inhomogeneidad del campo en toda la zona ocupada por la muestra hace imposible definir bien los valores del campo y de su gradiente que intervienen en el cálculo. Esta pérdida no es demasiado importante, porque la poca sensibilidad de la balanza ya determina que no se vaya a obtener más de una sola cifra significativa. De manera que se adopta el criterio de hacer las muestras de diferentes sustancias todas de exactamente iguales dimensiones para poder mejorar los valores relativos de susceptibilidad magnética de unas comparadas con otras, y obtener solamente el orden de magnitud del valor absoluto para cada una.

Se decidió entonces construir muestras con forma de disco de aproximadamente el mismo diámetro que los imanes, y 5 mm de grosor.

Para muestras líquidas o pulverizadas se debe construir un recipiente plástico del mismo diámetro y profundidad, y para minimizar errores, los discos de muestras sólidas también se colocan dentro del mismo recipiente para la correspondiente medición.

El imán (pila cilíndrica de tres discos de Nd) se ajusta en el soporte para que quede una luz de aproximadamente 1 mm entre él y la muestra. Esta luz garantiza que variaciones razonables de posición de alguna décima de mm, por ejemplo, no influyan demasiado en los resultados.

El imán se coloca y retira fácilmente de su posición, y antes y después de cada medición se chequea la lectura con el recipiente vacío, para luego efectuar la resta.

### 3.- Procedimiento

Se dispone la balanza con el soporte de la muestra sobre el platillo de ésta.

Luego se monta el imán en el soporte y se ajusta hasta lograr la posición correcta, controlando la luz de aproximadamente 1 mm sobre el soporte de plástico de la muestra.

Se tara la balanza en cero con el imán sobre el soporte vacío.

Con el imán retirado se coloca la muestra a medir, y se registra su peso.

Luego se registra la lectura al acercar el imán.

Se verifica varias veces (al menos una) retirando el imán, y luego retirando la muestra.

Se repite el procedimiento con otra sustancia que se utilice para comparación.

También se puede tarar la balanza en cero con la muestra colocada, para leer directamente el valor de la fuerza magnética. Pero lo mismo se requerirá registrar el peso de la muestra, y la fuerza sobre el soporte vacío.

#### 4.- Valores obtenidos

Se han registrado muestras de plomo, cobre, aluminio, agua, y sal de mesa en polvo. En cada caso la muestra fue un disco de  $(28,6 \pm 0,1)$  mm de diámetro, y  $(5,0 \pm 0,1)$  mm de grosor.

El volumen de cada muestra resulta así  $(3,2 \pm 0,1)$  cm<sup>3</sup>, aunque las diferencias constructivas han sido registradas y tenidas en cuenta, y en la tabla se presentan los volúmenes con algo más de precisión, junto con los demás datos experimentales. Los signos positivos de fuerza y susceptibilidad corresponden a sustancias paramagnéticas, y los negativos a las diamagnéticas.

Para llegar a los valores de la tabla se ha adoptado el valor de  $B \cdot dB/dz \cong 8,2$  T<sup>2</sup>/m, que se obtiene de las mediciones de campo magnético presentadas en el Apéndice. Los valores de tabla se tomaron de varias fuentes, principalmente (1) y (2).

**Tabla:** datos de las muestras, valores medidos, y susceptibilidades magnéticas

Sustancia	Volumen ( cm <sup>3</sup> )	masa ( g )	F ( 10 <sup>-2</sup> g )	$\chi$ ( $\times 10^{-5}$ )	$\chi/\chi_{Al}$	$\chi \times 10^{-5}$ según tablas	$\chi/\chi_{Al}$ según tablas
Al	3,14	8,46	+ 8	3,8	1,00	2,1	1,00
Cu	3,08	27,17	- 4	- 1,9	- 0,50	- 1,0	- 0,48
Pb	3,18	35,68	- 7	- 3,3	- 0,87	- 1,8	- 0,86
Agua	3,34	3,34	- 5	- 2,2	- 0,58	- 0,9	- 0,43
Sal fina	3,34	4,16 (58%)	- 4	$-\frac{1,8}{0,58} = -3,1$	-0,82	- 1,4	- 0,67

Para la muestra de sal de mesa, dado que estaba pulverizada, se determinó el factor de llenado a partir de la densidad global, que resultó un 58 % del valor de la densidad de la sal sólida compacta. Este factor se utilizó luego como se indica en la columna correspondiente para obtener un valor de susceptibilidad comparable con los valores de tabla.

Por otra parte vemos que los valores absolutos de las susceptibilidades obtenidos están un 100% por encima de los valores de tablas. Eso es un poco decepcionante al contrastarlo con el buen acuerdo que se obtiene para las susceptibilidades relativas, pero no es injustificado, ya que en un campo inhomogéneo como el que se considera en este caso, es esperable que la fuerza axial en las partes de la muestra lejos del eje sea mayor que cerca del mismo, y dado que las muestras ocupan un volumen que se aleja mucho del eje, es razonable encontrar que la fuerza medida sea superior a la esperada en función del campo conocido sobre el eje.

Pero el efecto es muy difícil de cuantificar, y por eso se pone empeño en lograr que todas las muestras ocupen el mismo volumen espacial: de esta manera se tiene que para todas ellas la configuración del campo es igual, y la relación entre las fuerzas netas, y las susceptibilidades,

que resultan para dos cualquiera de ellas, no se ve afectada más que por la baja sensibilidad de la balanza.

En cambio el cálculo necesario para obtener un valor razonable de cada susceptibilidad absoluta excedería las pretensiones de este trabajo.

## **5.- Conclusiones**

La experiencia se considera muy satisfactoria. Es claro que permite detectar y discriminar el comportamiento magnético de muchas sustancias, y pese a lo rudimentario de los valores absolutos que arroja, permite obtener valores relativos razonablemente buenos.

Además es claro que se puede mejorar fácilmente consiguiendo mayor cantidad de imanes, o también imanes más grandes del mismo tipo. De cualquiera de las dos formas el costo es pequeño.

Si se tiene la posibilidad de utilizar una balanza de mayor precisión, con los mismos procedimientos se podrán mejorar radicalmente los valores obtenidos de susceptibilidades relativas, pero para mejorar los valores absolutos será necesario limitar el volumen de la muestra a un volumen dentro del cual pueda determinarse bien el valor del campo.

Por último vale decir que se ensayaron varias propuestas para generar el campo con electroimanes, pero son desventajosas frente a los imanes de neodimio, a menos que se desee construir un equipo con un diseño elaborado y costoso, que al igual que la adquisición de una balanza de más precisión, solamente se justificaría si hubiera un plan de trabajo que lo requiriera.

## **6.- Referencias Bibliográficas.**

- 1) Young, Hugh D. University Physics. 7ª Ed. Addison Wesley. 1992.
- 2) Edward M. Purcell. Electricidad y Magnetismo. 2º Ed. Berkeley Physics Course. Harvard University

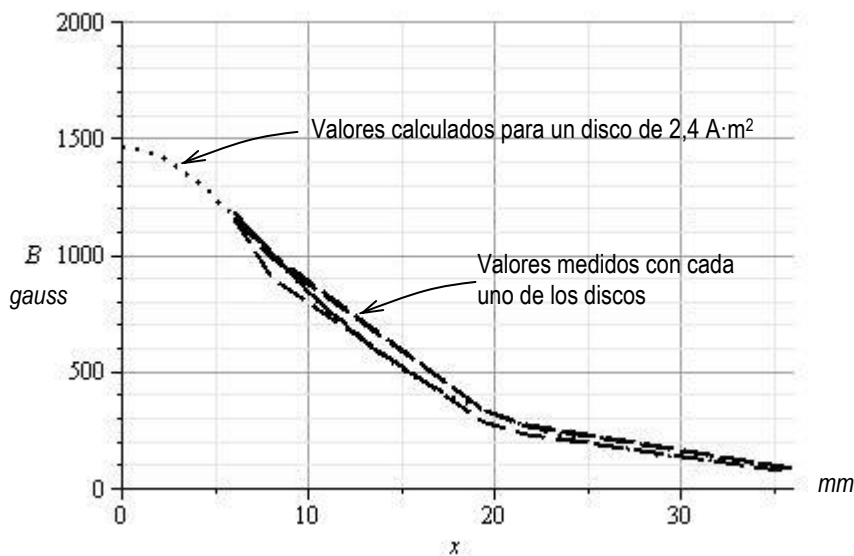
## APÉNDICE

### Determinación del campo magnético aplicado.

El campo magnético se aplicó inicialmente con una pila de tres discos de neodimio de 30,0 mm de diámetro y 4,0 mm de grosor.

Los sensores de campo magnético de que disponemos alcanzan hasta un máximo de 1200 gauss, y tienen un espacio muerto de unos 4 mm que rodea al dispositivo sensible, lo cual hace difícil definir el campo en función de la posición en espacios muy reducidos.

Comenzamos con lecturas de campo sobre el eje de cada una de las pastillas, para obtener valores y verificar que fueran todas equivalentes entre sí. En la siguiente gráfica se muestran los valores obtenidos de campo en gauss sobre el eje, en función de la distancia  $x$  (en mm) al centro de cada pastilla, en línea de trazos.



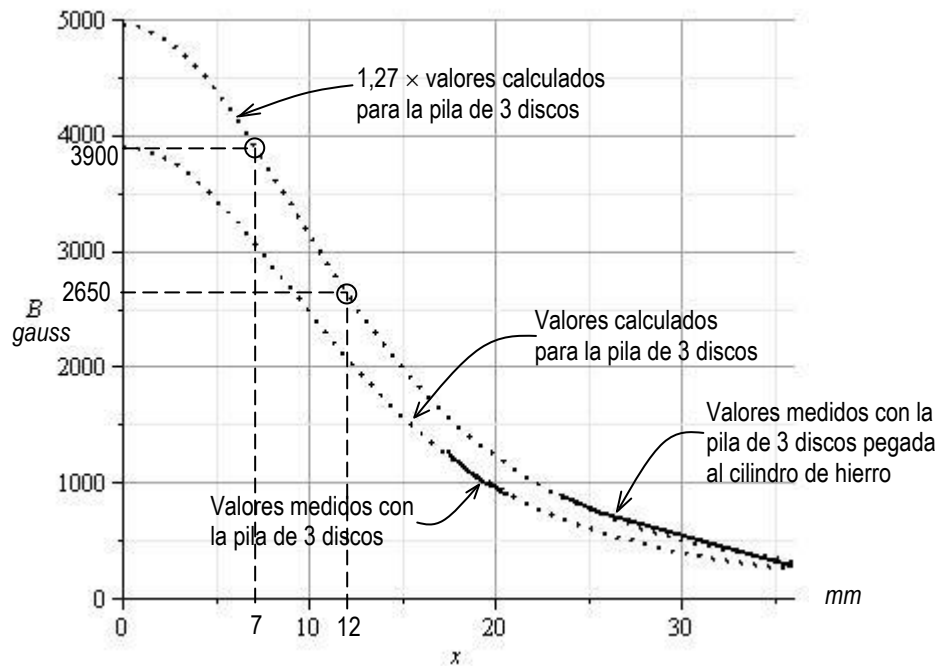
Estas gráficas por una parte muestran que las pastillas son suficientemente equivalentes, y por otra parte, por comparación con el campo calculado para discos uniformemente magnetizados a lo largo del eje  $x$ , muestran excelente acuerdo con la gráfica que se muestra en línea de puntos, que corresponde a un momento magnético total  $m = 2,4 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ , valor que podemos adoptar para nuestras pastillas.

Este valor equivale a una magnetización de aproximadamente 8500 A/m, o a una espira circular de 30 mm de diámetro recorrida por una corriente de unos 3400 A.

Seguidamente se ha medido el campo sobre el eje debido a las tres pastillas apiladas, que se muestra en la siguiente figura, superpuesto con la gráfica calculada teóricamente en línea de puntos (suponiendo los valores de magnetización encontrados antes), y mostrando total coincidencia. El origen del eje  $x$  se ubica en el centro del cilindro de 12 mm de longitud, de manera que la superficie de la cara polar está en  $x = 6$  mm.

Por último se consiguió aumentar un poco el campo colocando la pila de las tres pastillas de Nd a continuación de un cilindro de hierro del mismo diámetro, y en la misma figura se muestran los valores medidos, que superan en un 27 % a los calculados para los tres discos. De manera que en la misma figura se muestra en línea de puntos la gráfica calculada para la pila de tres discos multiplicada por un factor 1,27, la cual se considera una buena referencia para obtener el campo en la zona de utilización, que es desde  $x = 7$  mm, hasta  $x = 12$  mm.





Suponiendo que los valores mostrados en la línea de puntos en última figura constituyen una buena aproximación, vemos que (sobre el eje), desde los 7 hasta los 12 mm del centro de la pila de imanes, que es donde situaremos la muestra, hay un gradiente de campo bastante constante, y podemos estimar los siguientes valores para nuestro cálculo:

$$\text{Campo medio: } \frac{0,39 + 0,265}{2} \cong 0,328 \text{ T}$$

$$\text{Gradiente de campo: } \frac{0,39 - 0,265}{0,005} \cong 25 \text{ T/m}$$

$$B \frac{dB}{dz} \cong 8,2 \text{ T}^2/\text{m}$$