

# IMPLEMENTACIÓN EN METROLOGÍA DE MASA DE UN NUEVO MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN MAGNÉTICA DE PESAS

Agustina Viaggio - Fernando Kornblit  
INTI – Centro Física y Metrología – UT Masa  
[aviaggio@inti.gob.ar](mailto:aviaggio@inti.gob.ar)

## OBJETIVO

Debido a sus propiedades magnéticas, las pesas interactúan con el campo magnético terrestre y el generado por las balanzas electrónicas, provocando errores en los resultados de las pesadas. Es por ello, que la medición de susceptibilidad magnética,  $\chi$ , y de la componente vertical de la magnetización remanente,  $M_{rz}$ , de pesas es un requerimiento indispensable tanto para laboratorios de calibración de pesas, como para fabricantes. Hasta el año pasado, en la UT Masa del Centro Física y Metrología, la caracterización magnética se realizaba mediante un método (método atractivo)<sup>[1]</sup> que presenta tres grandes limitaciones: sólo mide  $\chi$ , magnetiza las pesas, y no hay un procedimiento de calibración reconocido internacionalmente que pueda asegurar la trazabilidad de los resultados. En las últimas dos décadas, los institutos de metrología de referencia han estudiado y validado un método alternativo que supera estas limitaciones, conocido como "susceptómetro de Davis". En el 2004 fue incorporado por la OIML a la R111-1 como método de referencia.

En los últimos años, La UT Masa se propuso montar un susceptómetro de Davis capaz de asegurar incertidumbres adecuadas y trazabilidad a patrones nacionales e internacionales, siendo necesario:

- confeccionar y caracterizar un dispositivo propio;
- caracterizar las fuentes de incertidumbre;
- calibrar patrones de susceptibilidad trazables a los patrones primarios de masa y longitud;
- validar los resultados.

## DESCRIPCIÓN

El susceptómetro de Davis se utiliza para medir  $\chi$  y  $M_{rz}$  de pesas con simetría de revolución débilmente magnetizadas y con  $\chi < 1$ , midiendo la fuerza vertical de interacción entre ésta y un potente imán. Dicha fuerza se compone por:

**F1=** la pesa con susceptibilidad se magnetiza en presencia del imán, atrayéndose;

**F2=** por un lado, el imán interactúa con la magnetización remanente de la pesa. Y además, con la magnetización inducida en la pesa por el campo magnético terrestre,  $H_{ez}$ .

Cumplíndose las hipótesis de la tabla 1, la fuerza vertical de interacción magnética queda:

$$F_z = \frac{3\mu_0\chi m^2}{64\pi Z_0^4} I_a + \frac{\mu_0 m}{4\pi Z_0} (\chi H_{ez} + M_{rz}) I_b = F_1 + F_2 \quad (1)$$

donde  $I_a$  e  $I_b$  son factores de forma dependientes de  $Z_0$ ,  $h_p$  y  $R_p$ <sup>[1]</sup>,  $m$  es el momento magnético de imán, y  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío. Luego, si se logra medir  $Z_0$ , y por separado a  $F_1$  y  $F_2$ , tomando como parámetros a  $\mu_0$ ,  $m$ ,  $R_p$ ,  $h_p$  y  $H_{ez}$ , se puede despejar  $\chi$  y  $M_{rz}$ .

Tabla 1: Hipótesis del modelo de la medición

1	$\chi$ es lineal, homogéneo e isótropo
2	$M_{rz}$ es constante en módulo
3	el CM del imán es el de un dipolo puntual sobre el volumen de la pesa
4	la pesa es colineal con el imán
5	el CM de la balanza es despreciable

El dispositivo está constituido por una micro balanza, un puente –donde se apoya la pesa- y un pedestal –donde se apoya el imán-, ambos no magnéticos, y un imán cilíndrico, dispuestos como muestra la figura 1.

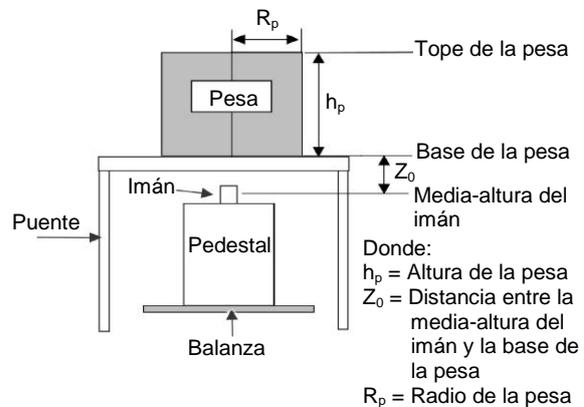


Figura 1: Esquema del susceptómetro de Davis

Para confeccionar el dispositivo se compró al BIPM un pedestal y puente de aluminio, y un juego de tres imanes cilíndricos calibrados de Nd-Fe-B de 6.0 mm de diámetro y 5.0 mm de altura. Se utilizó una balanza Sartorius de 6 g con resolución de 0.1  $\mu\text{g}$ .

Debido a que  $m$ ,  $H_{ez}$  y  $M_{rz}$  son magnitudes vectoriales,  $F_2$  invertirá su signo al invertir la orientación del imán. A diferencia,  $F_1$  es siempre una fuerza atractiva, pues las pesas son de un material paramagnético. Por lo tanto, si se mide la fuerza magnética de interacción entre la pesa y el imán en ambas orientaciones de éste (norte hacia arriba y norte hacia abajo)

y se promedian los resultados, se obtiene la componente  $F_1$ . Si se calcula la semi-diferencia, se obtiene  $F_2$ .

### Método 1: usando patrón de susceptibilidad

Midiendo  $F_1$  usando una pesa con  $\chi$  conocida, puede despejarse de (1) la altura  $Z_0$ . Como el centro magnético de un imán no se halla necesariamente en su centro geométrico, la medición de  $Z_0$  no puede realizarse por medios dimensionales. Por este motivo, se compraron al BIPM dos patrones de susceptibilidad calibrados,  $\chi_s$ , uno de Titanio (T40) y otro de Alacrite XHS. Por último, con las mediciones de  $F_1$ ,  $F_2$  y  $Z_0$  puede despejarse de (1)  $\chi$  y  $m_{rz}$ . Estos resultados quedan referidos a los valores de  $m$  y  $\chi_s$ , certificados por el BIPM, y a las realizaciones nacionales del metro y el kilogramo.

### Método 2: sin referencia de susceptibilidad

Es posible obtener  $\chi$  y  $m$  sin un patrón de susceptibilidad.

a) Primero, se mide  $F_1(Z_i)$  en distintas alturas tales que  $Z_i = Z_0 + Z_{bi}$ , donde  $Z_{bi}$  son alturas conocidas realizadas con bloques patrones. Reacomodando (1) se obtiene

$$\left[ \frac{F_1(Z_i)}{F_1(Z_0)} \right]^{1/4} = \frac{Z_{bi}}{Z_0} \left[ \frac{64\pi}{3\mu_0\chi m^2} \right]^{1/4} + \left[ \frac{64\pi}{3\mu_0\chi m^2} \right]^{1/4} \quad (2)$$

Realizando un ajuste lineal, se halla  $\chi m^2$  y  $Z_0$ .

b) Con auxilio de otros dos imanes, midiendo en el susceptómetro la interacción entre ellos, y tomando el valor de  $Z_0$  hallado en a), se calculan los  $m$  de los tres imanes.

c) Finalmente, se despeja  $\chi$ . Este resultado será trazable solamente a las realizaciones nacionales del metro y el kilogramo, sin necesidad de una referencia externa. Este procedimiento le brinda trazabilidad al anterior. Todos los procedimientos se detallan en [2].

Mediante el procedimiento 2, se midió  $\chi$  del patrón de Alacrite XHS y  $m$  del juego de tres imanes. Se tomaron  $Z_b=10, 15, 20$  y  $25$  mm, y un  $Z_0$  aproximado de  $9$  mm. Para la determinación de  $m$ , se agregó  $Z_b=85$  mm. Los cálculos se realizaron mediante Monte Carlo. A todas las fuerzas medidas con la balanza, se les adjudicó incertidumbre estadística. Para la evaluación de la incertidumbre se consideró que:

- La pesa de Alacrite es lineal, isotrópica y homogénea.
- Diversos estudios<sup>[2]</sup> muestran que el campo magnético de un imán con proporción altura-diámetro de  $0.87$ , se puede aproximar a un dipolo puntual cuando se miden pesas de densidad  $8000 \text{ kg/m}^3$  entre  $1 \text{ g}$  y  $1 \text{ kg}$  a  $Z_0=16$

mm. Se supuso que al aumentar  $Z_0$  sigue valiendo.

- Se incluyó en el procedimiento una etapa de alineación imán-pesa e imán-imán<sup>[2]</sup>.
- Se supuso que el campo magnético de la balanza es del mismo orden que el de otras balanzas similares, del orden del terrestre.

## RESULTADOS

En la primera etapa, se montó el dispositivo e implementó el método 1.

En una segunda instancia, se implementó el método 2 y fue utilizado para medir  $\chi$  del Alacrite y el  $m$  de los imanes. Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores certificados por el BIPM, obteniéndose:

Tabla 2: Comparación de resultados

	BIPM	INTI	$E_n(k=2)$
$\chi_{Alac}$	0.00123	0.00118	0.46
$U(\chi_{Alac})$	0.00005	0.00002	
$m_1$	0.1208	0.1202	0.14
$m_2$	0.1233	0.1227	0.14
$m_3$	0.1222	0.1216	0.14
$u(m)$	0.0016	0.0015	

Desde el 2012 se viene desarrollando una intercomparación del SIM de la medición de  $\chi$  en cinco pesas usando el susceptómetro de Davis. Los resultados de la intercomparación servirán de insumo para evaluar la validación de los procedimientos y para la publicación de CMCs. Para tal fin, El INTI realizó las mediciones correspondientes y actualmente se está a la espera de la culminación y publicación de los resultados.

## CONCLUSIONES

Los primeros resultados de la medición de  $\chi$  del Alacrite y el Titanio, y el  $m$  de los imanes, permiten pensar que el susceptómetro ya es operable para ser incorporado a las tareas de calibración de pesas. No obstante, se considera necesario profundizar en la caracterización de las incertidumbres, a fin de reevaluar el balance de incertidumbres.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Recomendación Internacional de la OIML R 111-1 "Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1-2, M2, M2-3 and M3 Edition 2004 (E).
- [2] Davis, R.S., Determining the magnetic properties of 1kg mass standards, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, **100** (1995) 209-225. Erratum **109**, 3 (2004).
- [3] Chung, J.W. et al., Uncertainty analysis of the BIPM susceptometer, *Metrologia*, **38** (2001), 535-541.