

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS PATRONES VIAJEROS DE LA COMPARACIÓN CLAVE CCM.M-K6

Luis Manuel Peña, Luis Omar Becerra, Julio López

Centro Nacional de Metrología (CENAM)

km 4,5 Carretera a Los Cués, Mpio. El Marqués, Querétaro

+52 (442) 211-05-00, +52 (442) 211-05-68, lpena@cenam.mx, lbecerra@cenam.mx, jlopez@cenam.mx

Resumen: En el presente trabajo se presenta el diseño, construcción y caracterización de un susceptómetro para determinar las propiedades magnéticas de pesas, con valores nominales de 2 kg hasta 50 kg desarrollado en el CENAM. Se presentan los resultados de la susceptibilidad magnética y la magnetización permanente de dos patrones viajeros de 50 kg clase E₁ que serán utilizados en la próxima comparación clave del Comité Consultivo para la Masa, CCM.M-K6 [1] en la cual el CENAM participará como laboratorio piloto.

1. INTRODUCCIÓN

En la 11a reunión del Comité Consultivo para Masa y Unidades Relacionadas (CCM) celebrada en el BIPM en abril de 2008, se planeó la comparación clave CCM.M-K6 [1] en la calibración de patrones de masa de acero inoxidable de 50 kg, clase E₁ de acuerdo con la OIML-R111 [2]. Las mediciones de esta comparación serán realizadas entre 2011 y 2012 y el CENAM fungirá como laboratorio piloto.

Para esta comparación, se circularán entre los países participantes, dos patrones de 50 kg de acero inoxidable los cuales están siendo medidos y caracterizados en los laboratorios de masa y densidad del CENAM, para determinar su densidad, sus propiedades magnéticas (susceptibilidad magnética y magnetización permanente, en adelante referida únicamente como magnetización) y su masa.

En lo que respecta a las propiedades magnéticas de las pesas, el CENAM cuenta con un equipo, mejor conocido como susceptómetro del BIPM, el cual fue desarrollado por el Dr. Richard Davis [3,4]. Este método es uno de los recomendados en [2] y tiene la gran ventaja, que el mismo dispositivo puede utilizarse para determinar tanto la susceptibilidad magnética, como la magnetización permanente. Sin embargo, el susceptómetro del BIPM que se tiene en el CENAM está limitado para pesas con valores nominales de 1 g hasta 1 kg.

Con base en el mismo principio de funcionamiento, se diseñó, fabricó y caracterizó en CENAM un susceptómetro para medir pesas con valores nominales de 2 kg y hasta 50 kg, con el objetivo principal de determinar las propiedades magnéticas de los patrones viajeros de la comparación clave CCM.M.K-6. En adelante este dispositivo será llamado susceptómetro de 50 kg.

2. DISEÑO DEL SUSCEPTÓMETRO DE 50 kg

2.1 Antecedentes al diseño.

En la Fig. 1 se muestra un esquema del susceptómetro del BIPM:

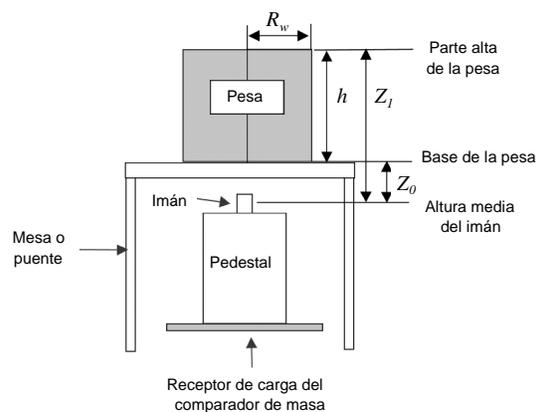


Fig. 1 Esquema del susceptómetro del BIPM.

El principio de funcionamiento del susceptómetro consiste en determinar tanto la susceptibilidad magnética, χ , como la magnetización, M , midiendo la fuerza magnética de atracción o repulsión que ejerce un imán permanente sobre la pesa, la cual se coloca a una cierta distancia sobre el imán, apoyada en un puente hecho de un material no magnético (aluminio).

Como se puede apreciar en la Fig. 1, se requiere de un instrumento para pesar (comparador de masa) con una división de escala d no mayor a 10 g de acuerdo con [2] y [3]. El susceptómetro del BIPM propiedad del CENAM (en adelante referido solamente como susceptómetro BIPM) se muestra en la Fig. 2.

Dicho susceptómetro se adquirió directamente con el BIPM y está diseñado para trabajar con un

comparador de masa marca Mettler Toledo, modelo MX5, el cual tiene un alcance máximo de 5.1 g y una división de escala de 1 g.



Fig. 2 Susceptómetro del BIPM propiedad del CENAM.

La trazabilidad de las mediciones con el susceptómetro es directamente hacia el BIPM a través de dos patrones de susceptibilidad magnética materializados en dos discos, uno de alacrita¹ y otro de titanio puro, ambos con un diámetro de 60 mm y una altura de 25 mm. Estos patrones fueron calibrados por el BIPM (Fig. 3).



Fig. 3 Patrones de alacrita y titanio e imán permanente (1).

¹ Aleación cuya composición nominal en masa es aproximadamente 20 % Cr, 15 % W, 10 % Ni, 0.1 % C y el resto de Co. [3]

Junto con los patrones de alacrita y titanio, el BIPM proporcionó como parte del kit del susceptómetro ofrecido al CENAM, tres imanes permanentes de forma cilíndrica con un diámetro de 5 mm y una altura de 4.35 mm aproximadamente, identificados como (1), (X) y (), cuyo momento magnético, m_d , fue determinado también por el BIPM.

En la Tabla 1 se presentan los valores de los patrones de susceptibilidad magnética y de los imanes permanentes con sus incertidumbres.

Tabla 1. Valores de los patrones de susceptibilidad magnética y del momento magnético de los imanes permanentes calibrados por el BIPM.

Patrones de susceptibilidad magnética		
Identificación		$U(), k=2$
Alacrita	0.001 28	0.000 12
Titanio	0.000 189	0.000 018
Imanes permanentes BIPM		
Identificación	m_d $A \cdot m^2$	$U(m_d), k=2$ $A \cdot m^2$
(1)	0.077 6	0.001 8
(X)	0.077 4	0.001 8
()	0.075 0	0.001 8

Con el susceptómetro BIPM y siguiendo el procedimiento recomendado en [4] y [5], se realizó la determinación del momento magnético de otros tres imanes permanentes cilíndricos de NdFeB con dimensiones aproximadas de 6 mm de diámetro por 5 mm de altura, adquiridos posteriormente por el CENAM.

La determinación del momento magnético m_d se obtiene midiendo la componente vertical de la fuerza magnética (de atracción o repulsión) entre dos imanes colocados a una distancia conocida d . Un imán se coloca en el pedestal que está sobre el platillo del comparador de masa y el otro sobre el puente de aluminio del susceptómetro BIPM. Una buena aproximación a la componente vertical de esta fuerza es:

$$F(1,2) = \frac{6\mu_0}{4\pi} \frac{m_d(1)m_d(2)}{d^4} \quad (1)$$

Si se introduce un tercer imán 3, y se miden las fuerzas magnéticas entre todas las combinaciones independientes de cada par de imanes se tiene la siguiente solución:

$$m_d(1) = \left[\frac{F(1,2) \cdot F(1,3)}{F(2,3)} \right]^{1/2} \left[\frac{6\mu_0}{4\pi d^4} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

La ecuación (1) se puede reescribir como:

$$\ln[F(1,2)] - \ln\left(\frac{6\mu_0}{4\pi d^4}\right) = \ln[m_d(1)] + \ln[m_d(2)] \quad (3)$$

La ecuación (3) tiene la forma $y_1 = x_1 + x_2$, y si se consideran las tres combinaciones independientes de las fuerzas entre cada par de imanes, las ecuaciones respectivas se pueden representar matricialmente como $Y = KX$, donde K es una matriz cuyos elementos son 0 y +1. Para tener más grados de libertad, se realizan dos mediciones por cada combinación de pares de imanes. La solución única mostrada en (2) se puede obtener resolviendo el sistema matricial por mínimos cuadrados ordinarios con $X = (K^T K)^{-1} K^T Y$ y considerando $m_d(1) = \exp(x_1)$. Los superíndices T y -1 denotan la traspuesta y la inversa de las matrices respectivamente. La mayor contribución a la incertidumbre de los valores de los momentos magnéticos de los imanes es la del proceso de medición (tipo A), cuya variabilidad depende de la alineación de los ejes axiales entre cada par de imanes que se están midiendo y del ajuste de mínimos cuadrados [5].

Los momentos magnéticos de estos imanes, identificados como 1(·), 2(·) y 3(·), se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de los momentos magnéticos de los imanes permanentes adquiridos por el CENAM

Imanes permanentes CENAM		
Identificación	m_d A·m ²	$U(m_d), k=2$ A·m ²
1(·)	0.117 2	0.002 1
2(·)	0.118 1	0.002 1
3(·)	0.121 0	0.002 1

Como se puede observar a partir de los datos de las Tablas 1 y 2, los momentos magnéticos de los imanes del CENAM 1(·), 2(·) y 3(·) son mayores a los imanes del BIPM (I), (X) y (). En el presente trabajo, se utilizaron los imanes 1(·) y 3(·) para asegurar el nivel de detección apropiado de la fuerza magnética en la balanza (mayores a 10 N)

para todas las muestras que se midieron tanto en el susceptómetro BIPM como en el susceptómetro de 50 kg (Fig. 4).



Fig. 4 Imanes permanentes 1(·) y 3(·).

2.2 Elementos del diseño del susceptómetro de 50 kg.

Con base en el mismo principio de funcionamiento y dado el alcance del puente del susceptómetro BIPM del CENAM, el cual está previsto para medir pesas con valores nominales de 1 g hasta 1 kg, se diseñó un prototipo capaz de soportar pesas con valores nominales de 2 kg hasta 50 kg.

Los requerimientos mínimos a satisfacer en el diseño del nuevo susceptómetro, cuyo esquema se muestra en la Fig. 5, fueron:

- a) Utilizar materiales no magnéticos.
- b) Estructura robusta con la deformación mínima del puente a la carga máxima (50 kg).
- c) Dimensiones adecuadas para adaptarse al mismo comparador de masa Mettler Toledo MX5 y para soportar cargas de hasta 250 mm de diámetro.
- d) Dispositivo de nivelación del puente.
- e) Facilidad para alinearlo al centro del imán.
- f) Ajuste de altura.

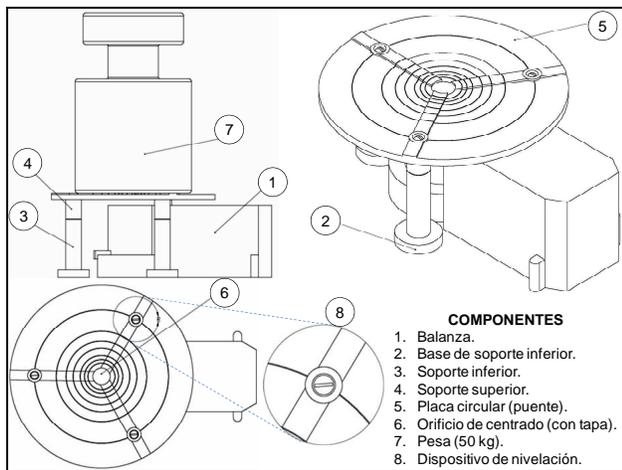
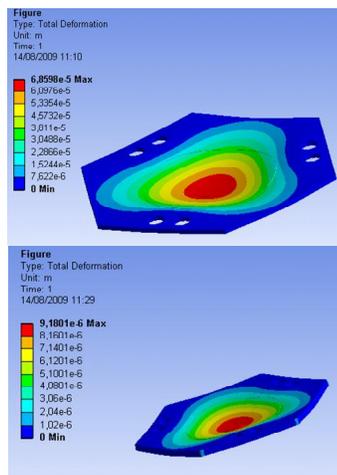


Fig. 5 Diseño prototipo del susceptómetro de 50 kg.

Los materiales utilizados para la construcción del puente fueron aluminio T6061, cobre-berilio CDA-172 y latón 360 ASTM B-16, todos con propiedades no ferromagnéticas.

El puente (5) fue fabricado con placa de aluminio de 12.25 mm (1/2 in) de espesor de forma circular, con un diámetro de 260 mm, el cual se apoya con tres soportes ubicados a un radio de 80 mm y separados 120° entre sí.

El espesor de la placa de aluminio para el puente se eligió con base a un estudio, donde se simuló numéricamente la deformación de placas con diferentes espesores, donde el espesor de 12.7 mm (1/2 in) fue el más idóneo (Fig. 6). La simulación numérica se realizó en el software comercial Ansys Workbench®.



Resultados de la deformación esperada, aplicando una carga de 50 kg (500 N aprox.)

En las figuras se muestran la deformación esperada para un cierto espesor de la placa.

ESPESOR	DEFORMACIÓN MÁXIMA
6.35 mm	68.598 μm
9.53 mm	20.907 μm
12.7 mm	9.180 1 μm

Fig. 6 Estudio de la deformación de la placa.

Los soportes del puente están conformados cada uno por tres piezas: un soporte superior (4), un soporte inferior (3) y una base para el soporte inferior (2). El soporte inferior y su base son también de Al T6061, mientras que el soporte superior está fabricado en Cu-Be CDA-172 cuya forma permite introducirse en el puente de aluminio y a su vez, se conecta por la parte de abajo al soporte inferior. En su parte interna se colocaron tres tornillos de latón los cuales funcionan como dispositivo de nivelación, permitiendo elevar el puente una distancia máxima de 4 mm. El ajuste de altura y la nivelación se realiza moviendo los tornillos desde la parte superior del puente.

La ventaja que se tiene al utilizar latón y cobre en esta sección del soporte es la alta resistencia y dureza en las cuerdas de los tornillos de nivelación, capaces de soportar la carga máxima de 50 kg sin riesgo a trasroscarse, además de ser metales no ferromagnéticos y resistentes a la corrosión.

Para centrar el puente con el eje vertical del imán, se realizó un orificio circular en su centro con un diámetro de 15 mm con tapa de aluminio (6) que funciona como mirilla.

En la Fig. 7 se puede apreciar una fotografía del susceptómetro de 50 kg terminado y acoplado al comparador de masa.



Fig. 7 Susceptómetro de 50 kg instalado en el comparador Mettler MX5.

3. CARACTERIZACIÓN DEL SUSCEPTÓMETRO DE 50 kg.

3.1 Muestras.

Para la caracterización y el aseguramiento de la calidad de los resultados obtenidos con el nuevo susceptómetro, se procedió a realizar una serie de

mediciones con las muestras que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Muestras medidas para la caracterización del susceptómetro de 50 kg.

[¹] Pesas de la comparación CCM.M-K6.

[^{**}] Patrón de Verificación.

Muestra	Identificación	Medición en susceptómetro	
		BIPM	50 kg
Pesa de 1 kg	CIN	¿	¿
Pesa de 2 kg	LPM-09	X	¿
Pesa de 5 kg	LPM-09	X	¿
Pesa de 10 kg	LPM-09	X	¿
Pesa de 50 kg	K6-01 ^[1]	X	¿
Pesa de 50 kg	K6-02 ^[1]	X	¿
Disco de titanio	Titanio (BIPM) ^[**]	¿	¿

3.2 Metodología de medición.

La pesa de 1 kg CIN se midió con ambos susceptómetros. Las pesas de 2 kg a 50 kg fueron medidas solamente con el susceptómetro de 50 kg. Todas las muestras se midieron dos veces utilizando los imanes 1(·) y 3(·:). El patrón de titanio calibrado por el BIPM fue utilizado como patrón de verificación para las mediciones de todas las muestras, midiéndolo con los dos imanes y con ambos susceptómetros.

La determinación de la susceptibilidad magnética y magnetización permanente se realizó siguiendo el procedimiento descrito en [2], [3] y [5]. En pocas palabras, el proceso de medición consiste en realizar mediciones con la balanza MX5 de la fuerza magnética que ejerce el imán sobre la muestra cuando su polo norte apunta hacia arriba (identificada como F_1), y cuando su polo norte apunta hacia abajo, (identificada como F_2). Estas fuerzas se calculan con $F_1 = -\overline{\Delta m_1} \cdot g$ y $F_2 = -\overline{\Delta m_2} \cdot g$, donde g es la aceleración debida a la gravedad, $\overline{\Delta m_1}$ es el promedio de cuatro indicaciones de la balanza, expresada en miligramos, cuando el polo norte del imán apunta hacia arriba y colocando cuatro veces la muestra en el puente (girándola 90° sobre su eje axial). De manera similar $\overline{\Delta m_2}$ representa el promedio de cuatro indicaciones de la balanza, también en miligramos, correspondiente a la medición de la fuerza entre la muestra y el imán cuando su polo norte apunta hacia abajo. El signo menos es necesario para obtener la fuerza sobre la

muestra, ya que la balanza realmente mide la fuerza sobre el imán (Tercera ley de Newton).

En resumen, tanto para el patrón de susceptibilidad p como para la muestra x , el subíndice $\%_{\text{or}}$ representa las fuerzas obtenidas con el polo norte del imán apuntando hacia arriba mientras que el subíndice $\%_{\text{ab}}$ representa las fuerzas obtenidas con el polo norte del imán apuntando hacia abajo.

En todos los casos se utilizó el patrón de alacrita para determinar el valor de Z_0 , que es la distancia desde la altura media del imán hasta la base de la pesa (ver Fig. 1), midiendo las fuerzas F_{1p} y F_{2p} sobre dicho material, de acuerdo al procedimiento descrito en [3] y [5] y que se menciona brevemente en la sección 3.3.

3.3 Análisis de resultados.

El modelo matemático para determinar la susceptibilidad magnética χ_x , es [3]:

$$\chi_x = \frac{F_{ax} \cdot 64\pi \cdot Z_0^4}{3\mu_0 \cdot m_d^2 \cdot I_{ax}} \tag{4}$$

Con:

$$F_{ax} = \frac{F_{1x} + F_{2x}}{2} \tag{5}$$

Y la magnetización M_x , expresada en términos de la polarización magnética ${}_0M_x$ se determina con:

$$\mu_0 M_x = \frac{F_{bx}}{m_d \cdot \frac{1}{Z_0} \cdot 4\pi \cdot I_{bx}} - \chi_x B_{EZ} \tag{6}$$

Con:

$$F_{bx} = \frac{F_{2x} - F_{1x}}{2} \tag{7}$$

Donde:

F_{1x} es la fuerza magnética que experimenta la muestra con el polo norte del imán hacia arriba [N].

F_{2x} es la fuerza magnética que experimenta la muestra con el polo norte del imán hacia abajo [N].

m_d es el momento magnético del imán [$A \cdot m^2$].

Z_0 es la distancia desde la altura media del imán hasta la base de la muestra [m].

μ_0 es la constante de campo magnético y es igual a $4 \times 10^{-7} N \cdot A^{-2}$.

I_{ax} es el factor geométrico de la muestra para la susceptibilidad magnética [adimensional].

I_{bx} es el factor geométrico de la muestra para la magnetización [adimensional].

B_{Ez} es la componente vertical de la inducción magnética del laboratorio² 1 31.15 T.

Los factores geométricos I_a e I_b tanto para las muestras x como para el patrón p se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$I_a = 1 - \left[\frac{Z_0}{Z_1} \right]^4 - \frac{1 + \frac{(R_w/Z_0)^2}{3}}{\left[1 + \left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2 \right]^3} + \left[\frac{Z_0}{Z_1} \right]^4 \cdot \frac{1 + \frac{(R_w/Z_1)^2}{3}}{\left[1 + \left(\frac{R_w}{Z_1} \right)^2 \right]^3} \quad (8)$$

$$I_b = 2\pi \left[\frac{\left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2}{\left(1 + \left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2 \right)^{3/2}} - \frac{\left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2 / \left(\frac{Z_1}{Z_0} \right)^3}{\left(1 + \left(\frac{R_w}{Z_1/Z_0} \right)^2 \right)^{3/2}} \right] \quad (9)$$

En el caso de las pesas, se realizó la aproximación a cilindros internos y externos tal y como se explica a mayor profundidad en [3] para obtener los valores de I_{ax} e I_{bx} . En las ecuaciones (5) y (6), R_w es el radio del cilindro y Z_1 la altura h del cilindro más la distancia Z_0 , es decir, $Z_1 = Z_0 + h$ (ver Fig. 1).

El valor de Z_0 se obtiene con la medición de la fuerza magnética promedio F_{ap} que experimenta algún material de susceptibilidad magnética conocida (patrón de alacrita) con un imán colocado sobre el platillo de la balanza con su polo norte orientado hacia arriba y hacia abajo [3,5]. Despejando Z_0 en la ecuación (1) para el patrón de susceptibilidad p se obtiene:

$$Z_0 = \left(\frac{3\mu_0 \cdot m_d^2 \cdot I_{ap} \cdot \chi_p}{F_{ap} \cdot 64\pi} \right)^{1/4} \quad (10)$$

Dada la alta dependencia que existe entre Z_0 y el factor geométrico I_{ap} , se debe realizar un proceso iterativo ajustando el valor de Z_0 en la ecuación (10)

² El valor de B_{Ez} se obtuvo con el World Magnetic Model Calculator 2010 desarrollado por la National Geophysical Data Center y la British Geological Survey [8]. Los datos de entrada para este modelo son las coordenadas geográficas de localización del CENAM: N 20° 34.246q W 100° 15.320qy altitud de 1 934 m. La aproximación de B_{Ez} con el WMM2010 es suficiente para fines de cálculo de la magnetización de las muestras mediante la ecuación (6).

hasta que el valor de la fuerza F_{ap} converja al valor obtenido con las mediciones de las fuerzas F_{1p} y F_{2p} .

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de las propiedades magnéticas para todas las muestras de la tabla 3. Los valores de magnetización están expresados en términos de polarización magnética cuya unidad en el SI es el Tesla (T). En todas las gráficas donde se presentan los resultados de la polarización magnética de las muestras, se incluyen los valores límites especificados en [2] para las pesas clase de exactitud E_1 , que es 2.5 T. En las tablas de resultados se da como referencia el imán utilizado y el valor aproximado de Z_0 obtenido con el patrón de alacrita. Los valores de susceptibilidad magnética son adimensionales.

Los errores normalizados se calcularon con la siguiente ecuación [6]:

$$E_n = \frac{|y_1 - y_2|}{\sqrt{U^2(y_1) + U^2(y_2)}} \quad (11)$$

Donde y_1, y_2 son los resultados de las mediciones a comparar y $U(y_1), U(y_2)$ son sus incertidumbres expandidas. La forma en que se emplea la ecuación (11) se explica en cada una de las secciones posteriores.

4.1. Resultados de la pesa de 1 kg CIN

La tabla 4 resume los resultados de las propiedades magnéticas para la pesa de 1 kg CIN medida tanto con el susceptómetro BIPM (S. BIPM) como con el susceptómetro de 50 kg (S. 50 kg). Los valores de E_n de la tabla 4 se calcularon con la ecuación (11) y están relacionados con los resultados de susceptibilidad magnética, comparando cada resultado con el valor de la primera medición hecha con el susceptómetro del BIPM y el imán 1(.). En las Fig. 8 y Fig. 9 se presentan de manera gráfica estos resultados.

4.2 Resultados de las pesas identificadas como LPM-09 de 2 kg, 5 kg y 10 kg.

En la tabla 5 se resumen los resultados de las propiedades magnéticas para las pesas de 2 kg, 5 kg y 10 kg identificadas como LPM-09 las cuales fueron medidas sólo con el susceptómetro de 50 kg. Similarmente, en las figuras 10 y 11 se ilustran los resultados para la susceptibilidad magnética y polarización magnética de las pesas en cuestión. Los errores normalizados de la tabla 5 se obtuvieron con la ecuación (11) comparando los dos resultados

de susceptibilidad magnética de cada pesa obtenidos con cada uno de los imanes 1(·) y 3(·).

Tabla 4. Resultados de la pesa de 1 kg CIN.

Medición	Susceptibilidad magnética			Polarización magnética	
	$U(\cdot)$ $k=2$	E_n	$\mu_0 M$ μT	$U(\mu_0 M)$ $k=2, \mu T$	
S. BIPM imán 1(·) Z_0^1 20.9 mm	0.004 13	0.000 44	0.00	-0.009 7	0.001 9
S. BIPM imán 3(·) Z_0^1 20.9 mm	0.004 23	0.000 46	0.16	0.031 0	0.006 2
S. 50 kg imán 1(·) Z_0^1 21.9 mm	0.004 15	0.000 45	0.03	-0.051	0.010
S. 50 kg imán 3(·) Z_0^1 21.9 mm	0.004 19	0.000 46	0.09	-0.041	0.008

Tabla 5. Resultados de la pesas de 2 kg, 5 kg y 10 kg LPM-09 con el Susceptómetro de 50 kg.

Muestra	Susceptibilidad magnética			Polarización magnética	
	$U(\cdot)$ $k=2$	E_n	$\mu_0 M$ μT	$U(\mu_0 M)$ $k=2, \mu T$	
2 kg LPM-09 imán 1(·) Z_0^1 21.8 mm	0.004 32	0.000 44	0.00	-0.029	0.006
2 kg LPM-09 imán 3(·) Z_0^1 20.8 mm	0.004 32	0.000 44		-0.047	0.009
5 kg LPM-09 imán 1(·) Z_0^1 21.8 mm	0.004 46	0.000 42	0.03	-0.032	0.006
5 kg LPM-09 imán 3(·) Z_0^1 20.8 mm	0.004 45	0.000 41		-0.054	0.011
10 kg LPM-09 imán 1(·) Z_0^1 21.8 mm	0.003 83	0.000 35	0.01	-0.018	0.004
10 kg LPM-09 imán 3(·) Z_0^1 20.8 mm	0.003 83	0.000 34		-0.042	0.008

4.3 Resultados de los patrones viajeros K6-01 y K6-02 de 50 kg.

Las propiedades magnéticas de los patrones viajeros para la comparación CCM.M-K6 se muestran en la tabla 6 y en las figuras 12 y 13. Los errores normalizados se calcularon de la misma forma que en la sección 3.2.

Tabla 6. Resultados de la pesas de 50 kg K6-01 y K6-02 con el Susceptómetro de 50 kg.

Muestra	Susceptibilidad Magnética			Polarización Magnética	
	$U(\cdot)$ $k=2$	E_n	$\mu_0 M$ μT	$U(\mu_0 M)$ $k=2, \mu T$	
50 kg K6-01 imán 1(·) Z_0^1 24.3 mm	0.003 33	0.000 28	0.00	0.067	0.006
50 kg K6-01 imán 3(·) Z_0^1 24.1 mm	0.003 26	0.000 27		0.086	0.009
50 kg K6-02 imán 1(·) Z_0^1 24.2 mm	0.006 44	0.000 54	0.03	0.64	0.12
50 kg K6-02 imán 3(·) Z_0^1 24.1 mm	0.006 30	0.000 53		0.61	0.12

5. DISCUSIÓN

Para validar las mediciones con el susceptómetro de 50 kg, fue necesario determinar las propiedades magnéticas de varias muestras (pesas de diferente valor nominal). Dado el alcance del susceptómetro del BIPM (1 kg), no se pudieron realizar mediciones de todas las muestras con este dispositivo, sin embargo, las pesas de 2 kg, 5 kg, 10 kg y 50 kg se midieron dos veces en dos momentos diferentes y empleando dos imanes permanentes distintos con el susceptómetro de 50 kg. Los resultados de la susceptibilidad magnética para cada pesa, son consistentes entre sí de acuerdo a la prueba del error normalizado.

La pesa de 1 kg se midió dos veces en ambos susceptómetros utilizando también dos imanes permanentes diferentes y en momentos distintos; los cuatro valores de susceptibilidad magnética obtenidos con ambos dispositivos fueron también consistentes entre sí de acuerdo con la prueba del error normalizado.

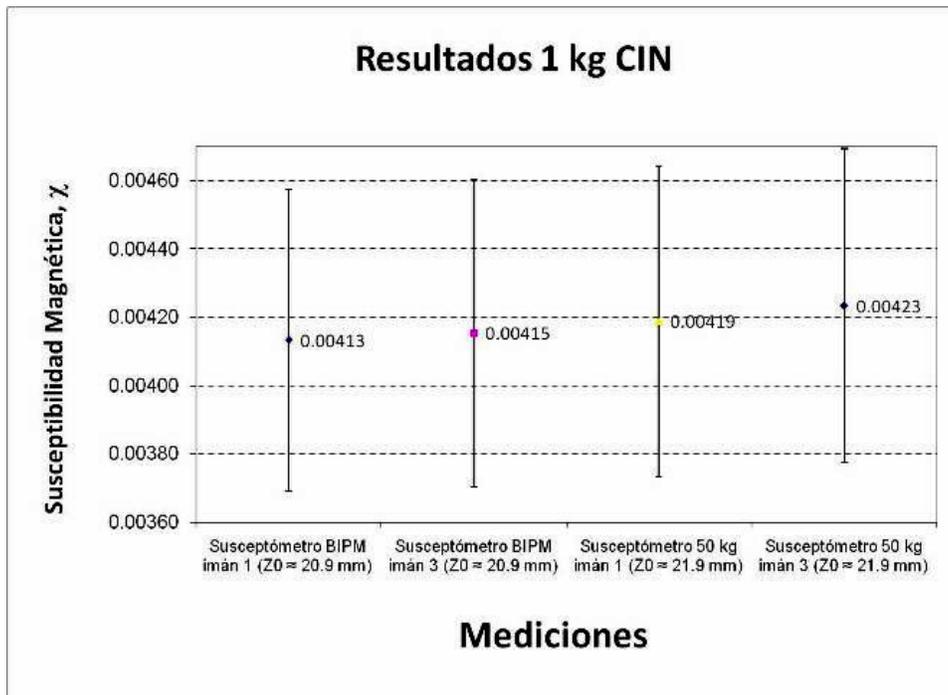


Fig. 8 Resultados de χ - pesa de 1 kg CIN.

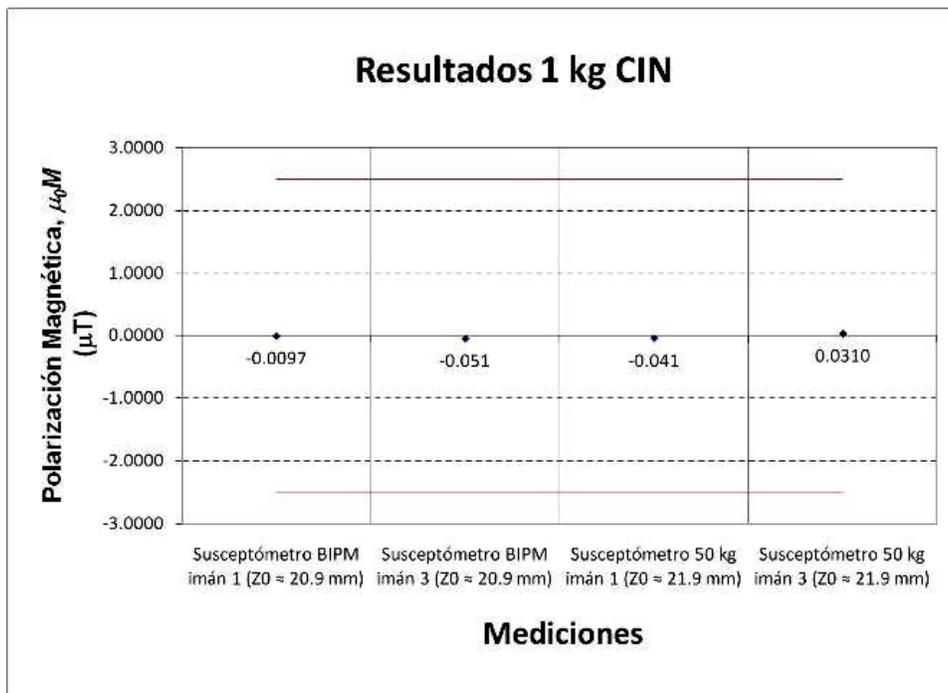


Fig. 9 Resultados de $\mu_p M$ de la pesa de 1 kg CIN.

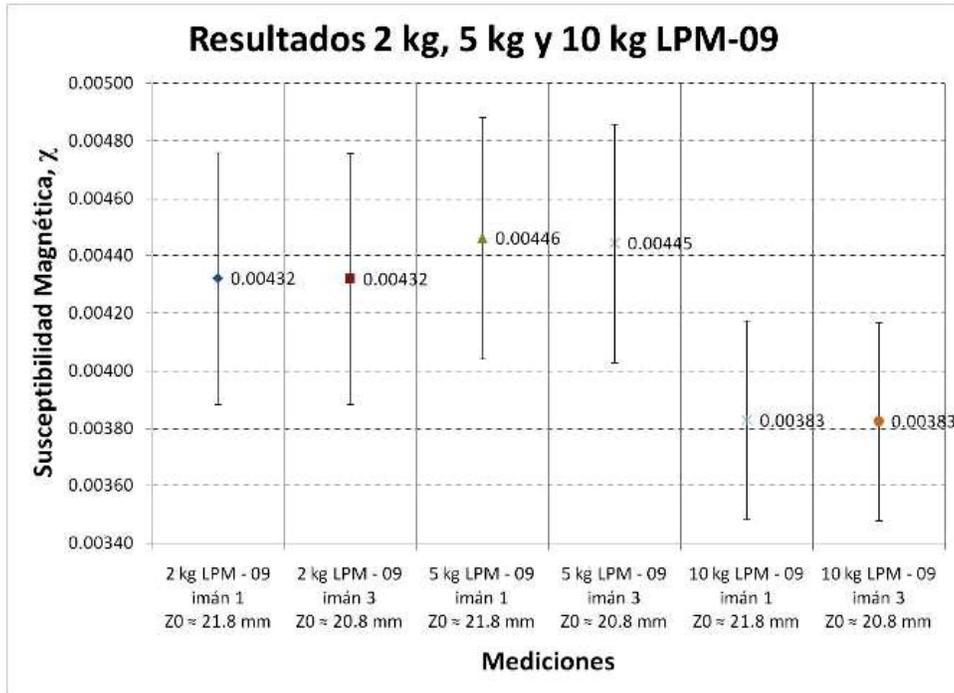


Fig. 10 Resultados de χ - pesas de 2 kg, 5 kg y 10 kg LPM-09 con susceptómetro de 50 kg.

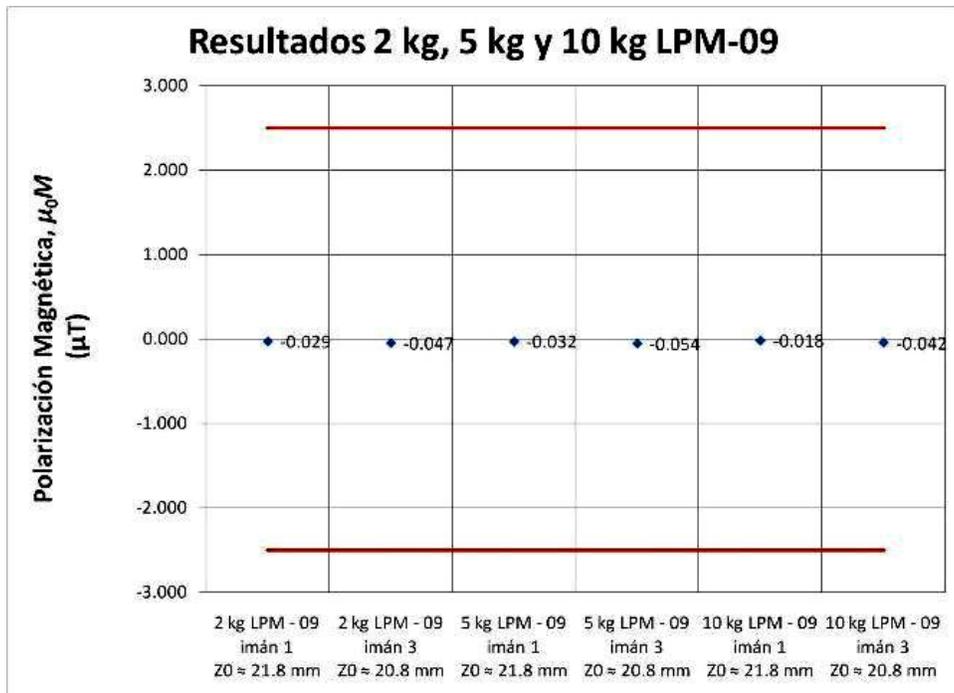


Fig. 11 Resultados de $\mu_0 M$ - pesas de 2 kg, 5 kg y 10 kg LPM-09 con susceptómetro de 50 kg.



Fig. 12 Resultados de pesas de 50 kg K6-01 y K6-02 con susceptómetro de 50 kg.

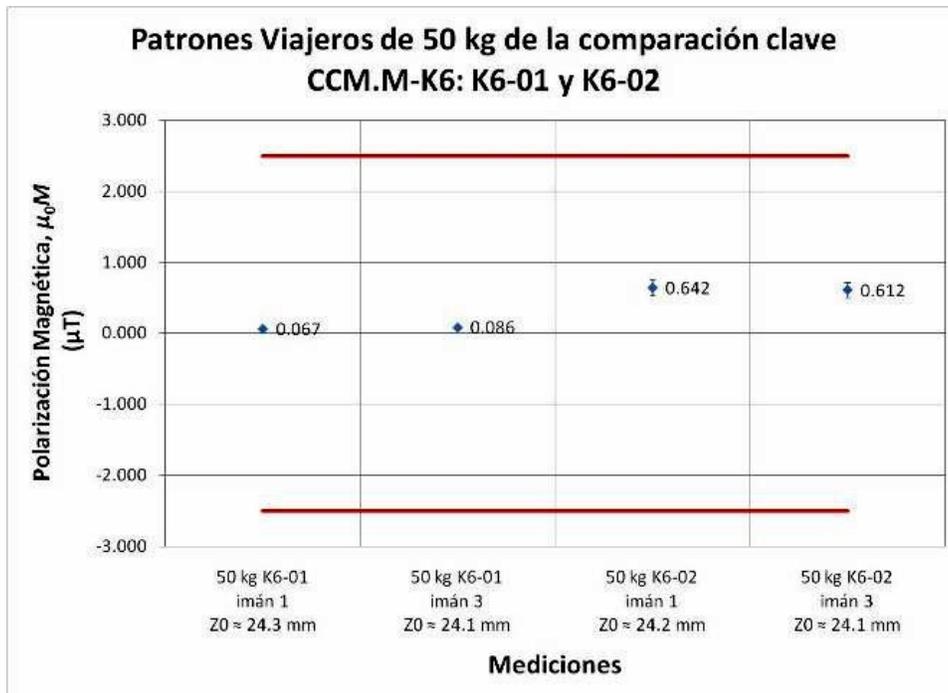


Fig. 13 Resultados de $\mu_0 M$ - pesas de 50 kg K6-01 y K6-02 con susceptómetro de 50 kg.

Tabla 7. Resultados del disco de Titanio (patrón de verificación).

Medición	Susceptibilidad magnética			Polarización magnética	
	$U(\cdot)$ $k=2$	E_n	$\mu_0 M$ μT	$U(\mu_0 M)$ $k=2, \mu T$	
S. BIPM imán 1(·) $Z_0 \uparrow$ 21.9 mm	0.000 182	0.000 019	0.25	0.001 1	0.000 2
S. BIPM imán 3(·:) $Z_0 \uparrow$ 20.4 mm	0.000 186	0.000 018	0.12	-0.000 9	0.000 2
S. 50 kg imán 1(·) $Z_0 \uparrow$ 24.3 mm	0.000 194	0.000 022	0.17	0.009 2	0.001 8
S. 50 kg imán 3(·:) $Z_0 \uparrow$ 24.1 mm	0.000 189	0.000 019	0.01	0.001 4	0.000 3
S. 50 kg imán 1(·) $Z_0 \uparrow$ 21.8 mm	0.000 181	0.000 018	0.31	0.007 8	0.001 6
S. 50 kg imán 3(·:) $Z_0 \uparrow$ 20.9 mm	0.000 182	0.000 017	0.30	-0.005 7	0.001 1
Valor Certificado por el BIPM	0.000 189	0.000 018	0.00	-	-

Así mismo se realizó la medición del disco de titanio calibrado por el BIPM al inicio y al final de cada medición hecha con las pesas, usando ambos susceptómetros (S. BIPM) y (S. 50 kg) y ambos imanes permanentes 1(·) y 3(·:). Todos los resultados de susceptibilidad son consistentes con el valor de calibración del BIPM, de acuerdo con la prueba del error normalizado (ver Tabla 7). Los valores de incertidumbre de la susceptibilidad magnética se calcularon de acuerdo con [4] y [7]. La incertidumbre de la magnetización es de aproximadamente el 20 % de acuerdo con [2] y [4].

6. CONCLUSIONES

Las propiedades magnéticas en las pesas (susceptibilidad magnética y magnetización) forman parte de sus características físicas, las cuales deben mantenerse bajo ciertos límites, para asegurar que no interactúen de manera indeseable con otras pesas o con instrumentos para pesar, que utilizan el principio de compensación electromagnética.

De los resultados obtenidos, se puede observar que los valores de susceptibilidad y magnetización de la pesa de 1 kg y del disco de titanio calibrado por el BIPM (patrón de verificación), midiéndolos con ambos susceptómetros, son consistentes, aún variando las condiciones de medición (momento magnético del imán, valor de Z_0 , y diferentes tiempos de medición). Así mismo, los valores de susceptibilidad y magnetización para las pesas de 2 kg, 5 kg, 10 kg y 50 kg que se realizaron con el nuevo susceptómetro, fueron consistentes variando el momento magnético del imán y el valor de Z_0 en aproximadamente 1 mm. Los valores de las propiedades magnéticas de todas las pesas medidas, incluyendo los patrones viajeros de 50 kg, para la comparación clave CCM.M-K6, están por debajo de los límites establecidos en [2] para la clase de exactitud E_1 , ($m0.02$; $\mu_0 M m2.5 T$).

Con base al estudio realizado en este trabajo, el susceptómetro de 50 kg desarrollado por el CENAM puede ser empleado para determinar las propiedades magnéticas de pesas desde 2 kg hasta 50 kg con resultados confiables (Fig. 14).

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su profundo agradecimiento al Dr. Richard Davis por su apoyo y sugerencias al diseño de este susceptómetro. Así mismo nuestro reconocimiento a Juan Delgadillo y a Isaías Martínez, del Laboratorio de Tecnología y Fabricación del CENAM y a Gregorio Álvarez Clara de la división de Masa y Densidad por el apoyo incondicional brindado en el desarrollo, mejoras, fabricación y en las mediciones hechas con el nuevo susceptómetro.

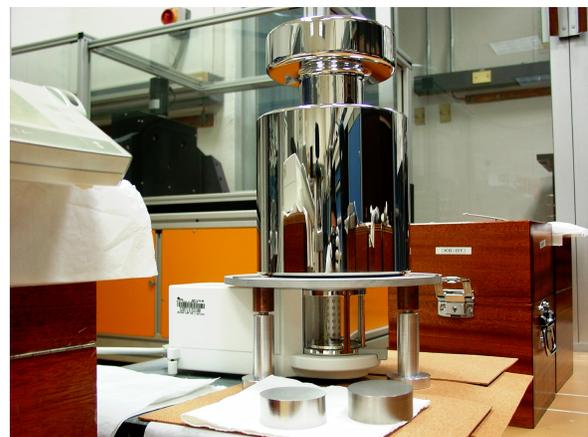


Fig. 14 Medición de la pesa K6-01 en el susceptómetro de 50 kg.

REFERENCIAS

[1] Key Comparison Data Base (KCDB) of the CIPM . MRA, sitio web, comparación clave CCM.M.K-6: http://kcdb.bipm.org/AppendixB/KCDB_ApB_info.asp?cmp_idy=906&cmp_cod=CCM.M-K6&page=12&search=1&cmp_cod_search=&met_idy=6&bra_idy=0&epo_idy=1&cmt_idy=0&ett_idy=16&ab_idy=&cou_cod=, Abril 2010.

[2] International recommendation OIML R111 edition 2004, Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃. Part 1: Metrological and technical requirements+

[3] Davis, R. S., Determining the magnetic properties of 1 kg mass standards+J. Res. National Institute of Standards and Technology (USA), 100, 209-25, May-June 1995; Errata, 109, 303, March-April 2004.

[4] Chung, J.W., Ryu, K.S., Davis, R.S. Uncertainty analysis of the BIPM susceptometer+, Metrologia 38 (2001), pp. 535-541.

[5] A. Luján, L. M. Pena, L. Becerra Determinación de la susceptibilidad magnética y magnetización permanente utilizando el BIPM-susceptómetro y el momento magnético de imanes permanentes+ Procedimiento CENAM 730-AC-P.161. 2008.

[6] Wolfgang Wöger Remarks on the E_n . Criterion Used in Measurement Comparison+, PTBMitteilungen 109 1/99, Internationale Zusammenarbeit.

[7] Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, ISO.

[8] National Geophysical Data Center (NGDC, Boulder CO, USA) and British Geological Survey (BGS, Edinburgh, Scotland), World Magnetic Model Calculator 2010 (WMM2010), published on 12/2009, <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml>, Abril 2010.