

## *Revista Electrónica Nova Scientia*

Medición del volumen de pesas de referencia de  
balanzas de presión mediante comparador óptico  
Volume measurement of reference weights of  
pressure balances through optical comparator

**Omar Jair Purata-Sifuentes<sup>1</sup>, Carlos A. Arámburo-Botello<sup>2</sup>,  
Israel Salvador Ramírez<sup>2</sup>, José Luis De la O-Martínez<sup>2</sup> y  
Elvia Funes-Rodríguez<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup>Departamento de Estudios Organizacionales, Universidad de Guanajuato.

<sup>2</sup>Coordinación de Metrología, CIATEC, A.C., León, Gto.

---

**México**

*Omar-Jair Purata-Sifuentes.* E-mail: [opurata@ugto.mx](mailto:opurata@ugto.mx)

## Resumen

En el método de la determinación del área efectiva para la calibración de una balanza de presión, se requiere que las pesas de referencia de la balanza estén calibradas en la magnitud de masa, para poder determinar la presión que generan. Para la calibración de las pesas de referencia, se requiere la determinación de la densidad o el volumen de las mismas. Si bien el método de pesada hidrostática es el más empleado para este fin, nuevos métodos han surgido recientemente como, por ejemplo, el que implica el uso de un picnómetro de gas. En este trabajo se propone una alternativa para la determinación del volumen de las pesas de referencia utilizadas en las balanzas de presión. El método utiliza la evaluación dimensional de las pesas de referencia mediante un comparador óptico, con lo que se evita el contacto superficial de la pesa y se calcula su volumen, basado en un modelo matemático obtenido aplicando el desarrollo de sólidos de revolución. La calidad de los resultados experimentales se evalúa contra los resultados obtenidos mediante pesada hidrostática, obteniéndose un desempeño favorable para el método propuesto, dada la suposición de que la forma real de las pesas se corresponde con el modelo matemático desarrollado.

**Palabras Clave:** Balanza de presión; pesas de referencia; comparador óptico

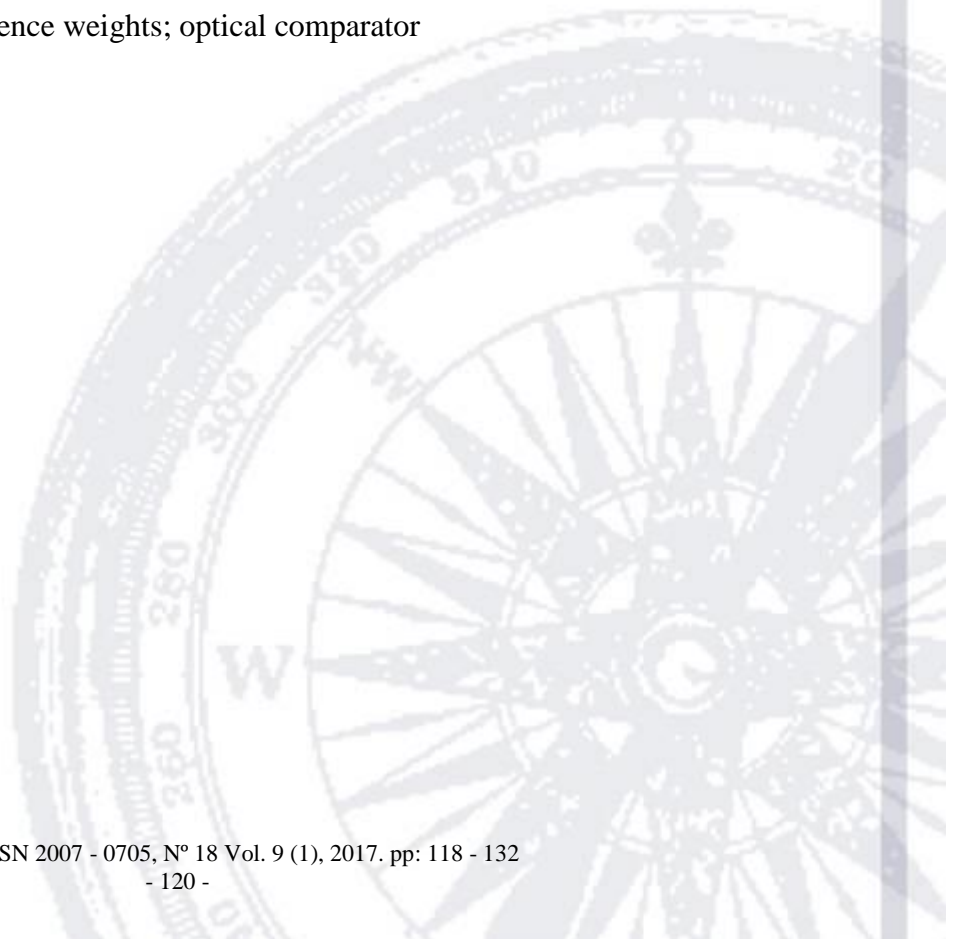
*Recepción:* 02-11-2016

*Aceptación:* 31-01-2017

## Abstract

In the method for the determination of the effective area for the calibration of a pressure balance, it is required that the reference weights of the balance be calibrated in the mass quantity, in order to determine the pressure they generate. For the calibration of reference weights, determination of the density or volume of the same is required. Although the hydrostatic weighing method is the one most used for this purpose, new methods have recently emerged, such as that involving the use of a gas pycnometer. In this paper, we propose an alternative for the determination of the volume of the reference weights used in pressure balances. The method uses the dimensional evaluation of the reference weights by means of an optical comparator, which avoids the superficial contact of the weight and its volume is calculated, based on a mathematical model obtained applying the development of solids of revolution. The quality of the experimental results is evaluated against the results obtained by hydrostatic weighing, obtaining a favorable performance for the proposed method, given the assumption that the real form of the weights corresponds to the mathematical model developed.

**Keywords:** Pressure balance; reference weights; optical comparator



## Introducción

Una balanza de presión es un instrumento utilizado para medir la presión de un fluido mediante el principio del equilibrio de fuerzas: la fuerza que ejerce la presión medida sobre un área conocida contra la fuerza gravitacional de pesas conocidas colocadas en un arreglo cilindro-pistón (OIML 1994, 6; EURAMET 2011, 3). La determinación del valor de la masa de cada una de las pesas aplicadas sobre una balanza de presión, es un contribuyente importante en la estimación de la incertidumbre de medida de la balanza misma, cuando ésta se utiliza para la calibración de otra balanza de presión (Soriano y Segura 2007, 1). Si una balanza de presión se calibra siguiendo el método de la determinación del área efectiva, es necesario que las pesas de referencia estén calibradas en la magnitud de masa, para poder calcular la presión que generan debido a la fuerza de gravedad (OIML 1994, 20; EURAMET 2011, 18 y 23; Kojima y Kobata 2012, 2481). Uno de los requisitos para la calibración de las pesas de referencia en el aire, es la determinación de su densidad o su volumen, puesto que con dicho valor se puede determinar la corrección por empuje del aire durante su calibración en masa (Jones y Schoonover 2002, 113; Malengo y Bich 2012, 289).

En la recomendación OIML R 111-1 (OIML 2004, 42) se describen seis métodos para la determinación de la densidad de pesas normalizadas, empleadas en las operaciones de calibración en masa (Jian *et al.* 2013, 1360008-2). Aun cuando la OIML R 111-1 (OIML 2004, 4) está orientada a pesas estandarizadas, utilizadas para la verificación y calibración de pesas e instrumentos para pesar, los métodos descritos sirven también para las pesas de referencia usadas en la calibración de balanzas de presión. Entre los métodos citados se incluyen cuatro que implican la inmersión de las pesas en algún líquido (Métodos A, B, C y D), un método geométrico (Método E) y uno “teórico” (Método F). Aunque de los tres tipos de métodos el método de pesada hidrostática (inmersión, Método A) es el más exacto (OIML 2004, 42; Jian *et al.* 2013, 1360008-2) y uno de los más usados, incluso en comparaciones de volúmenes de pesas normalizadas de alta exactitud (Becerra *et al.* 2015, 2), no es sencillo de implementar y además consume una cantidad considerable de tiempo cuando se van a medir los volúmenes de varias pesas (Kobata *et al.* 2004, S75; Malengo y Bich 2012, 289).

Por otra parte, se han desarrollado métodos alternativos para la determinación del volumen de pesas normalizadas, no reportados en la OIML R 111-1 (OIML 2004), entre los que destaca el basado en la pesada en aire a diferentes densidades (Malengo y Bich 2012, 289-293; Clarkson *et al.* 2001, 17-

23), donde se requiere el uso de balanzas comparadoras instaladas dentro de cámaras selladas, sin duda, un método prácticamente exclusivo para laboratorios primarios de metrología y para pesas patrón clase E<sub>1</sub>. Otro método, muy estudiado recientemente, utiliza una doble cámara acústica con la que se mide indirectamente el volumen de las pesas (Kobata *et al.* 2004, S75-S83; Ueki *et al.* 2007, 1-9; Jian *et al.* 2012, 816-820), el desempeño del método es lo suficientemente bueno para ser usado en pesas normalizadas clase E<sub>1</sub>, pero para poder aplicarlo se debe contar al menos con una pesa de referencia de volumen conocido y forma similar a la pesa bajo calibración. Finalmente, Purata *et al.* (2015, 1-4) muestran la aplicación de un comparador óptico como herramienta para la implementación del Método E (geométrico) de la OIML R111-1. Con el uso del comparador se logra mejorar la incertidumbre en la medición del volumen de las pesas bajo calibración, con respecto a una medición con un calibrador vernier, al mismo tiempo que las pesas se mantienen sin riesgo de sufrir daños en su superficie, por ser un método de medición libre de contacto superficial.

En lo que respecta a los métodos específicos para determinar el volumen de pesas de referencia de una balanza de presión, está el propuesto por Almer (1971, 5), en el que se estima el volumen de las pesas de forma similar al Método F de la OIML R 111-1 (2004, 42). Este método implica el conocimiento del valor de la densidad del material de las pesas, dato que generalmente no está disponible al momento de la calibración de las mismas. Por otra parte, Lee *et al.* (2013, 231-237), proponen un método que implica el uso de un picnómetro de gas. El método se basa en la ley de Boyle y requiere de instalaciones más bien complejas: cámaras a presión de muestra y de expansión, manómetros y termómetros de alta exactitud, bombas de vacío, etcétera.

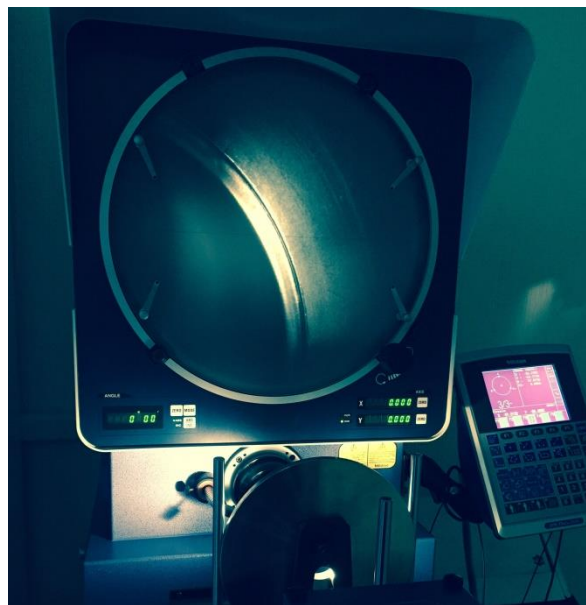
En este trabajo se propone una alternativa práctica, pero con un nivel aceptable de incertidumbre, para la determinación del volumen de las pesas de referencia utilizadas en las balanzas de presión, cuando se calibra mediante la determinación del área efectiva. En el método propuesto se evalúan dimensionalmente las pesas de referencia con un comparador óptico, lo que evita el contacto superficial de aquellas y se mejora notablemente la incertidumbre de medida, con respecto a las mediciones que podrían hacerse utilizando un calibrador vernier. El cálculo final del volumen de las pesas se basa en un modelo matemático obtenido con fórmulas geométricas, y se realiza la correspondiente estimación de la incertidumbre de medida. Finalmente, se analizan los porcentajes con que contribuye cada característica dimensional medida de las pesas a la incertidumbre total de

la medición del volumen de las mismas, lo que permite saber en cuáles características dimensionales se debe poner especial atención durante la medición.

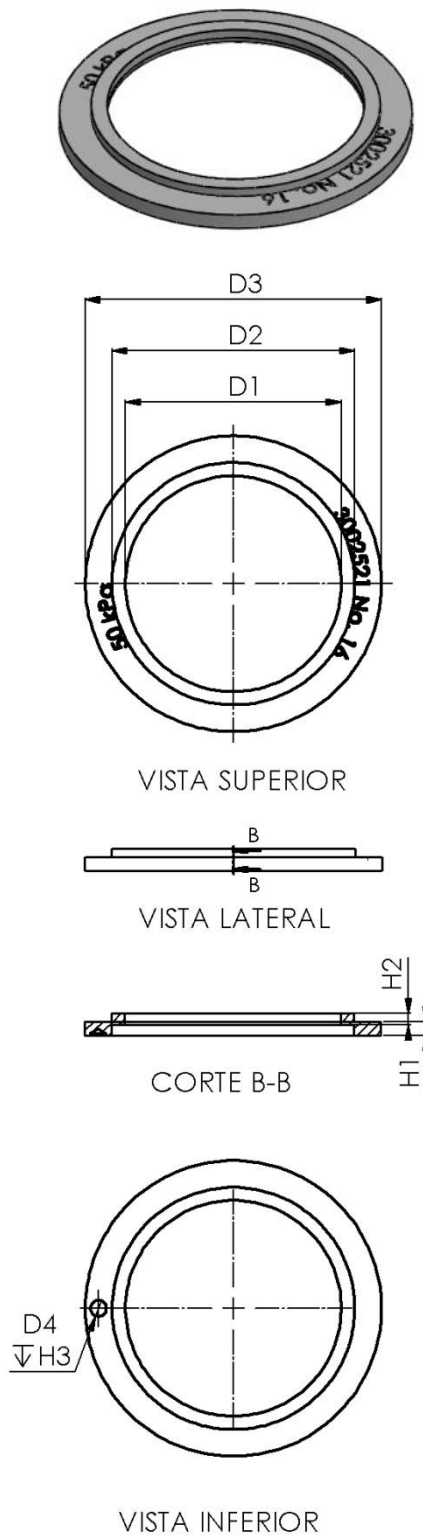
### Método

El instrumento de medición utilizado en la determinación geométrica del volumen de las pesas de referencia consiste en un comparador óptico con resolución de 0,001 mm e intervalos de medición de (0 a 250) mm en el eje X y de (0 a 150) mm en el eje Y. Se utilizó un lente 20X para la visualización y un procesador de datos del fabricante del comparador para la detección de las formas geométricas. Todas las mediciones geométricas fueron realizadas siguiendo un procedimiento de laboratorio acreditado bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 (IMNC 2006).

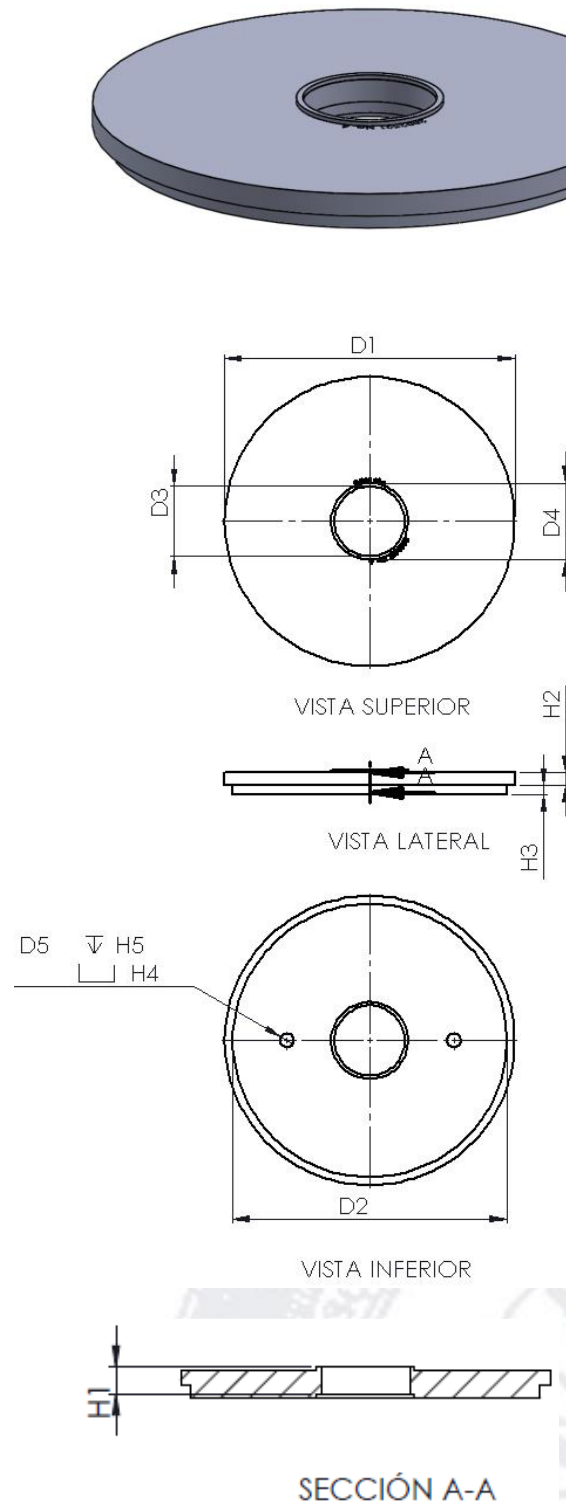
La Figura 1 muestra cómo con el uso del comparador óptico es posible la determinación de las características geométricas de las pesas de referencia. El procedimiento de medición implica realizar al menos tres mediciones de cada característica dimensional (altura o diámetro) necesaria, de acuerdo con los esquemas planteados en las Figuras 2 y 3, para las pesas que representan valores de presión de 50 kPa (Forma 1) y 5 000 kPa (Forma 2), respectivamente.



**Figura 1.** Una pesa de referencia (Forma 2) siendo caracterizada geoméricamente con el comparador óptico.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 2.** Dibujo isométrico y vistas del dibujo de ingeniería definidas para una pesa de referencia de la Forma 1.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** Dibujo isométrico y vistas del dibujo de ingeniería definidas para una pesa de referencia de la Forma 2.  
Fuente: elaboración propia.



*Modelo Matemático.*

Para el cálculo del volumen de las pesas, se emplean las siguientes ecuaciones, obtenidas mediante la aplicación de fórmulas geométricas. Las variables utilizadas corresponden a las características dimensionales ilustradas en las Figuras 2 y 3.

*Pesas de la Forma 1 (Figura 2):*

$$V = (\pi / 4) * [(D2^2 - D1^2) * H2 + (D3^2 - D2^2) * H1 - (1 / 3) * D4^2 * H3] \quad (1)$$

*Pesas de la Forma 2 (Figura 3):*

$$V = (\pi / 4) * [(D4^2 - D3^2) * H1 + (D2^2 - D4^2) * (H2 + H3) + (D1^2 - D2^2) * H2 - (2 / 3) * D5^2 * (2 * H4 + H5)] \quad (2)$$

*Evaluación de la incertidumbre de medida*

En el cálculo de la incertidumbre de medida del volumen de las pesas de referencia, se ven involucrados los siguientes coeficientes de sensibilidad:

*Pesas de la Forma 1:*

$$\partial V / \partial H1 = (\pi / 4) * (D3^2 - D2^2) \quad (3)$$

$$\partial V / \partial H2 = (\pi / 4) * (D2^2 - D1^2) \quad (4)$$

$$\partial V / \partial H3 = - (\pi / 12) * D4^2 \quad (5)$$

$$\partial V / \partial D1 = - (\pi / 2) * D1 * H2 \quad (6)$$

$$\partial V / \partial D2 = (\pi / 2) * D2 * (H2 - H1) \quad (7)$$

$$\partial V / \partial D3 = (\pi / 2) * D3 * H1 \quad (8)$$

$$\partial V / \partial D4 = - (\pi / 6) * D4 * H3 \quad (9)$$

*Pesas de la Forma 2:*

$$\partial V / \partial H1 = (\pi / 4) * (D4^2 - D3^2) \quad (10)$$

$$\partial V / \partial H2 = (\pi / 4) * (D1^2 - D4^2) \quad (11)$$

$$\partial V / \partial H3 = (\pi / 4) * (D2^2 - D4^2) \quad (12)$$

$$\partial V / \partial H4 = - (\pi / 3) * D5^2 \quad (13)$$

$$\partial V / \partial H5 = - (\pi / 6) * D5^2 \quad (14)$$

$$\partial V / \partial D1 = (\pi / 2) * D1 * H2 \quad (15)$$

$$\partial V / \partial D2 = (\pi / 2) * D2 * H3 \quad (16)$$

$$\partial V / \partial D3 = - (\pi / 2) * D3 * H1 \quad (17)$$

$$\partial V / \partial D4 = - (\pi / 2) * D4 * (H1 - H2 - H3) \quad (18)$$

$$\partial V / \partial D5 = - (\pi / 3) * D5 * (2 * H4 + H5) \quad (19)$$

Finalmente, el presupuesto de incertidumbre de las mediciones de las características dimensionales que aparecen en las Ecuaciones (1) a (19) involucra las siguientes contribuciones:

- La incertidumbre del comparador óptico (informe de calibración).
- La resolución del dispositivo visualizador del comparador óptico.
- La diferencia de temperaturas entre el comparador óptico y la pesa de referencia.
- La diferencia del coeficiente de expansión térmica entre el comparador óptico y la pesa de referencia.
- La diferencia de temperatura entre la pesa de referencia y el medio ambiente.
- La repetibilidad de las mediciones geométricas.

## Resultados

La Tabla 1 contiene algunas características particulares de dos pesas de referencia a las que se le determinó el volumen mediante la evaluación dimensional con el comparador óptico.

**Tabla 1.** Pesas de referencia específicas utilizadas como ejemplo en la medición del volumen.  
Fuente: elaboración propia.

Forma de la pesa de referencia	Dibujo	Valor nominal / kPa	Número de serie	Identificación (ID)
Forma 1	Figura 2	50	3002521	16
Forma 2	Figura 3	5 000	3002521	6

Las Tablas 2 y 3 muestran los resultados de las mediciones de las características dimensionales indicadas en las Figuras 2 y 3, respectivamente, para las pesas de referencia ID-16 e ID-6, junto con las incertidumbres de medida correspondientes. Se reporta también el impacto proporcional que cada característica dimensional tiene sobre la incertidumbre expandida del volumen de la pesa de referencia.

**Tabla 2.** Mediciones de las características dimensionales de la pesa de referencia ID-16, ilustrada en la Figura 2. Fuente: elaboración propia.

Característica dimensional	Valor promedio / mm	Incertidumbre expandida (k=2) / mm	% de impacto en la incertidumbre del volumen de la pesa
H1	3,214	0,018	72,619 %
H2	2,658	0,023	22,386 %
H3	0,992	0,005 0	0,000 %
D1	50,857	0,011	0,753 %
D2	56,979	0,033	0,407 %
D3	69,557	0,014	3,834 %
D4	3,939	0,029	0,001 %

**Tabla 3.** Mediciones de las características dimensionales de la pesa ID-6, ilustradas en la Figura 3. Fuente: elaboración propia.

Característica dimensional	Valor promedio / mm	Incertidumbre expandida (k=2) / mm	% de impacto en la incertidumbre del volumen de la pesa
H1	16,560	0,53	8,920 %
H2	9,064	0,016	47,528 %
H3	7,166	0,017	42,539 %
H4	8,325	0,077	0,009 %
H5	10,100	0,37	0,051 %
D1	214,931	0,014	0,310 %
D2	202,928	0,011	0,108 %
D3	52,008	0,042	0,535 %
D4	57,049	0,023	0,000 %
D5	9,428	0,012	0,002 %

Todas las mediciones geométricas reportadas en este trabajo fueron obtenidas bajo condiciones de temperatura,  $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ , y humedad relativa,  $(50 \pm 10) \%$ , controladas, según lo establece el procedimiento de laboratorio citado en la sección Método. También es importante destacar que

previo a las mediciones con el comparador óptico, las pesas de referencia ID-16 e ID-6 tuvieron un tiempo de ambientación de al menos 12 h previo a las mediciones geométricas. Tanto el periodo de ambientación previo, como el adecuado control de la temperatura durante las mediciones, son condiciones críticas al realizar mediciones dimensionales, puesto que de no controlarse se podrían presentar desviaciones importantes por dilatación térmica, ya que las pesas son piezas metálicas. Dichas desviaciones tendrían efectos considerables tanto en los errores como en la incertidumbre de medida.

Por otra parte, es notorio el dominio que poseen ciertas características dimensionales como contribuyentes a la incertidumbre del volumen. Para la pesa de referencia ID-16 (Forma 1, Figura 2, Tabla 2), la incertidumbre de la medición geométrica del volumen es aportada prácticamente en su totalidad por las alturas H1 y H2. Mientras que, para la pesa ID-6 (Forma 2, Figura 3, Tabla 3), de las diez características dimensionales, tres contribuyen con el 99 % de la incertidumbre del volumen: H2, H3 y H1. El hecho de que en ambos casos sean alturas y no diámetros los principales contribuyentes de la incertidumbre de medida del volumen, obedece a que los coeficientes de sensibilidad de las alturas dominantes incluyen a las características dimensionales con los mayores valores promedio (Tablas 2 y 3) elevados al cuadrado [Ecuaciones (3) y (4) para la pesa ID-16 y Ecuaciones (10) a (12) para la pesa ID-6].

La Tabla 4 muestra los resultados finales de medida del volumen: el valor y sus incertidumbres asociada y relativa, para las pesas de referencia ID-16 e ID-6. Se muestran también los resultados obtenidos aplicando el método de pesada hidrostática, Método A1 (OIML 2004, 46), junto con sus incertidumbres expandida y relativa. El método de pesada hidrostática se realizó bajo condiciones controladas de temperatura ( $20 \pm 1$ ) °C, y humedad relativa, ( $50 \pm 5$ ) %. Se utilizaron una balanza con alcance de 3,2 kg y resolución de 1 mg en la pesada hidrostática de la pesa ID-16, y una balanza con alcance de 8,2 kg y resolución de 100 mg en la pesada hidrostática de la pesa ID-6. Como se mencionó en la sección Introducción, la pesada hidrostática es el método más exacto, lo cual se refleja en incertidumbres relativas de un orden de magnitud menor en la Tabla 4. Sin embargo, presenta el fuerte inconveniente de dar oportunidad a que las pesas sufran contaminación o ataque químico al ser sumergirlas en diversos solventes (Becerra et al. 2015, 3).

**Tabla 4.** Mediciones del volumen de pesas de referencia usando el comparador óptico. Fuente: elaboración propia.

Pesa de referencia	Comparador óptico			Pesada hidrostática		
	Volumen, $V / \text{cm}^3$	Incertidumbre expandida $(k=2) / \text{cm}^3$	Incertidumbre relativa / %	Volumen, $V / \text{cm}^3$	Incertidumbre expandida $(k=2) / \text{cm}^3$	Incertidumbre relativa / %
ID-16	5,39	0,26	4,82	5,248 6	0,006 4	0,12
ID-6	525,05	0,78	0,15	522,58	0,24	0,05

A manera de comparación con resultados reportados en la literatura, se puede citar que los valores de la incertidumbre relativa obtenidos por Lee *et al.* (2013, 234) utilizando el picnómetro de gas, para pesas con la Forma 2 (como la ID-6) y volúmenes de entre (126,80 a 632,70)  $\text{cm}^3$ , están ubicados entre (0,20 a 0,21) %, respectivamente. Lee *et al.* (2013), no reportan resultados para pesas con la Forma 1 (como la ID-16).

Finalmente, al igual que lo que sucede con las pesas normalizadas para la calibración en masa, en lo que respecta a cualquier método geométrico para la determinación del volumen de cuerpos sólidos (e.g., Método E de OIML 2004), la contribución más grande a la incertidumbre de medida la tiene la diferencia que existe entre la forma real del sólido y la forma supuesta por el modelo matemático (OIML 2004, 57). Esto significa que las incertidumbres de medida por comparador óptico reportadas en la Tabla 4, están supeditadas a que ambas pesas de referencia tengan formas perfectamente cilíndricas circulares rectas, lo cual se puede ver afectado por la fabricación misma de las pesas, por un mal manejo, o por el desgaste natural del material, especialmente en las aristas. En este sentido, se contempla una extensión de este trabajo orientada a la estimación del valor de la incertidumbre debida a la diferencia de formas, entre la supuesta por el modelo matemático y la real que posee la pesa de referencia.

## Conclusión

Se ha mostrado un método alternativo para la obtención del volumen de las pesas de referencia usadas en las balanzas de presión. La determinación del volumen, y por consiguiente de la densidad de las pesas de referencia, es un requisito ineludible cuando se emplea el método de la

determinación del área efectiva, para la calibración de las balanzas de presión. Los resultados experimentales muestran la factibilidad y conveniencia de usar un comparador óptico para la medición del volumen de las pesas de referencia, con lo que se evita el contacto superficial, sin sacrificar la calidad de la medición, comparada contra la obtenida con el uso de un picnómetro de gas, y validada mediante los resultados obtenidos con pesada hidrostática. No obstante, se debe tener en consideración que la contribución mayor de la incertidumbre en la medición del volumen, está dada por la falta de ajuste del modelo matemático propuesto a la geometría real de la pesa de referencia.

## Referencias

Almer, H. E. (1971). Method of Calibrating Weights for Piston Gages. NBS Technical Note 577. Washington, USA: U.S. Government Printing Office.

<https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/calibrations/tn577.pdf>

Becerra, L.O., L.M. Peña, L. Luján, J.C. Díaz, L.M. Centeno, V. Loayza, F. Cacais, O. Ramos, S. Rodríguez, F. García, F. García, F. Leyton, C. Santo, J. Caceres, F. Kornblit, J. Leiblich y C. Jaques. (2015). Final report on SIM comparison in volume of weights SIM.M.D-K3. *Metrologia*, 52 07014: 1-7. doi:10.1088/0026-1394/52/1A/07014

Clarkson, M., R. Davis, C. Sutton y J. Coarasa. (2001). Determination of volumes of mass standards by weighings in air. *Metrologia*, 38(1): 17-23. doi:10.1088/0026-1394/38/1/3

EURAMET cg-3 (2011). Calibration of Pressure Balances. Braunschweig, Germany: European Association of National Metrology Institutes. [http://www.euramet.org/Media/docs/Publications/calguides/EURAMET\\_cg3\\_\\_v\\_1.0\\_Pressure\\_Balance.pdf](http://www.euramet.org/Media/docs/Publications/calguides/EURAMET_cg3__v_1.0_Pressure_Balance.pdf)

IMNC (2006). NMX-EC-17025-IMNC-2006, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. México, D.F.: Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C.

Jian, W., R. Xiaoping, Y. Hong, C. Changqing, Z. Yue, Z. Ruilin y D. Jing'an. (2013). Research on volume measurement system of weights with hydrostatic technique. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 24: 1360008-1 – 1360008-7. doi:10.1142/S2010194513600082

Jian, W., C. Changqing, Z. Yue, H. Manhong, W. Xiaolei, Y. Hong, D. Jingan y Z. Ruilin. (2012). Investigation on measurement method of weight volume based on acoustics. *Advanced Materials Research*, 487: 816-820. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.487.816

Jones, F. E. y R. M. Schonover. (2002). Handbook of mass measurement. CRC Press.

Kobata, T., M. Ueki, A. Ooiwa y Y. Ishi. (2004). Measurement of the volumen of weights using an acoustic volumeter and the reliability of such measurement. *Metrologia*, 41(2): S75-S83. doi:10.1088/0026-1394/41/2/S08

Kojima, M. y T. Kobata. (2012). Development of low-pressure calibration system using a pressure balance. *Measurement*, 45: 2479-2481. doi:10.1016/j.measurement.2011.10.041

Lee, Y. J., W. G. Lee, M. A. Mohammed, Y. K. Park y C. Y. Oh. (2013). Method of volume measurement for reference weights of a pressure balance using a gas pycnometer. *Journal of the Korean Vacuum Society*, 22(5): 231-237. [http://ocean.kisti.re.kr/downfile/volume/kvs/KJGHBI/2013/v22n5/KJGHBI\\_2013\\_v22n5\\_231.pdf](http://ocean.kisti.re.kr/downfile/volume/kvs/KJGHBI/2013/v22n5/KJGHBI_2013_v22n5_231.pdf)

Malengo, A. y W. Bich. (2012). Simultaneous determination of mass and volumen of a standard by weighings in air. *Metrologia*, 49(3): 289-293. doi:10.1088/0026-1394/49/3/289

OIML R 110 (1994). Pressure balances. Paris: Bureau International de Métrologie Légale. [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r110-e94.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r110-e94.pdf)

OIML R 111-1 (2004). Weights of clases E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, M<sub>1</sub>, M<sub>1-2</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>2-3</sub> and M<sub>3</sub> Part 1: Metrological and technical requirements. Paris: Bureau International de Métrologie Légale. [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r111-1-e04.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf)

Purata, O. J., J. de la O y E. Funes. (2015). Geometric measurement of the volumen of OIML Classes E and F weights without surface contact. Proceedings of the XXI IMEKO World Congress. Prague, Czech Republic. <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC3-072.pdf>

Soriano Cardona, J. B. y M. Segura Galindo. (2007). Considerations in mass calibration of pressure balance weights. Proceedings of the IMEKO 20<sup>th</sup> TC3, 3<sup>rd</sup> TC16 and 1<sup>st</sup> TC22 International Conference. Mérida, México. <https://www.imeko.org/publications/tc16-2007/IMEKO-TC16-2007-077u.pdf>

Ueki, M., T. Kobata, K. Ueda y A. Ooiwa. (2007). Automated volume measurement for weights using acoustic volumeter. Proceedings of the IMEKO 20<sup>th</sup> TC3, 3<sup>rd</sup> TC16 and 1<sup>st</sup> TC22 International Conference. Mérida, México. <https://www.imeko.org/publications/tc3-2007/IMEKO-TC3-2007-016u.pdf>