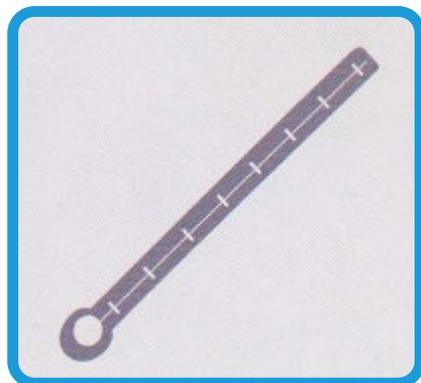
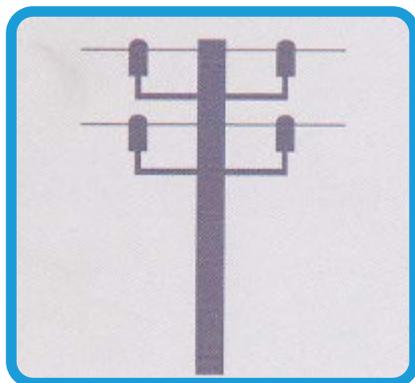
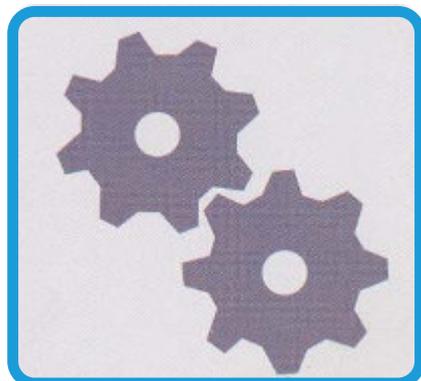
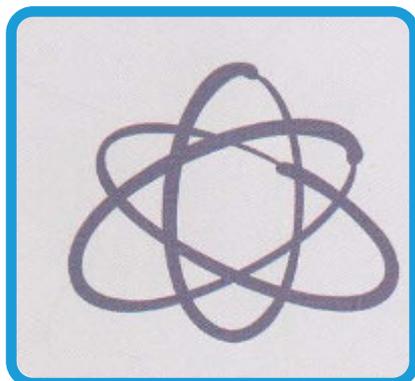
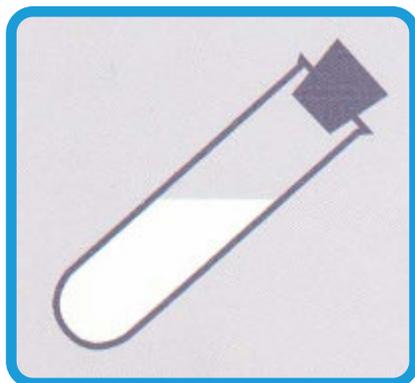
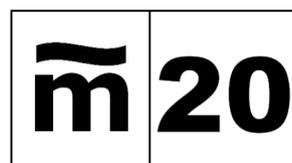


Metrología



PROCEDIMIENTO ME-016 PARA LA
CALIBRACIÓN DE BALANZAS DE
PRESIÓN



PROCEDIMIENTO ME016

CALIBRACIÓN DE BALANZAS DE PRESIÓN

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web (www.cem.es).

El procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, respecto a la edición digital anterior.

Los procedimientos editados por el CEM presentan modelos de calibración, en línea con documentos clave universales como son el Sistema Internacional de unidades (SI), el Vocabulario internacional de metrología (VIM) o la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Como modelos que son, los usuarios de los mismos pueden, bajo su responsabilidad, modificarlos para adecuarlos a sus necesidades específicas (instrumentación, condiciones ambientales, etc.). En tal caso, siempre deberá primar el sentido crítico y la ética profesional.

El CEM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la interpretación y/o uso de este procedimiento.

El CEM no mantiene correspondencia sobre el contenido de los procedimientos.

ÍNDICE

	Página
	2
1. OBJETO	3
2. ALCANCE	3
3. DEFINICIONES	3
4. GENERALIDADES	4
4.1. Descripción	4
4.2. Abreviaturas y símbolos	4
5. DESCRIPCIÓN	6
5.1. Equipos y materiales	6
5.2. Operaciones previas	7
5.3. Proceso de calibración	8
5.4. Toma y tratamiento de datos	10
6. RESULTADOS	10
6.1. Cálculo de incertidumbres	10
6.2. Interpretación de resultados	20
7. REFERENCIAS	21
8. ANEXOS	22

1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto mostrar un método para la calibración de balanzas de presión.

2. ALCANCE

Este procedimiento sirve para la calibración de balanzas de presión mediante el método de flotación simultánea, determinando el área efectiva del elemento en flotación y su coeficiente de deformación con la presión y la incertidumbre sobre estos.

Este procedimiento es aplicable a aquellas balanzas de presión relativa que funcionan usando como fluido transmisor de la presión un gas o un líquido y en las que el elemento en flotación es un conjunto pistón cilindro una bola, o un tronco de cono. No es aplicable a la calibración de balanzas de presión absoluta. Tampoco es aplicable a la calibración de balanzas dinamométricas de presión.

Las balanzas de presión tratadas cubren los rangos:

- Balanzas de presión relativa en las que el fluido transmisor es un gas de 3,5 kPa a 70 MPa.
- Balanzas de presión relativa en las que el fluido transmisor es un líquido de 0,1 MPa a 500 MPa.

La calibración de una balanza de presión incluye, además de la determinación del área efectiva y el coeficiente de deformación con la presión del elemento en flotación, la determinación de la masa de todas las pesas incluida la masa del elemento en flotación. El método de determinación de la masa de las pesas y del elemento en flotación no es objeto de este procedimiento.

3. DEFINICIONES

Balanza de presión [6] (3.1.1):

Es un instrumento diseñado para medir la presión de un medio, basado en el principio de equilibrio de la fuerza producida por la presión medida sobre un área conocida con la fuerza gravitacional de unas pesas de masa conocida, realizado sobre un conjunto pistón cilindro.

Conjunto pistón cilindro [6] (3.2.1):

Está formado por un pistón de forma cilíndrica insertado en un cilindro. Puede llevar fijado un portamasas en su superficie superior.

Ecuación de conversión [6] (2.1.1.3):

Es una ecuación que relaciona la presión generada y las masas de las pesas usadas, teniendo en cuenta otras magnitudes de entrada.

Sensibilidad de la flotación [6] (2.4.8):

Para una balanza de presión calibrada con respecto a otra balanza de presión, el mínimo cambio de masa que produce un cambio detectable en el equilibrio de ambas, la balanza a calibrar y la balanza patrón.

4. GENERALIDADES

4.1. Descripción

Una balanza de presión consiste, generalmente, en un pistón vertical que gira libremente en el interior de un cilindro. Los dos elementos de buena calidad mecánica, definen una superficie llamada “área efectiva”. La presión a medir se aplica a la base del pistón, creando una fuerza vertical hacia arriba. Esta fuerza se equilibra por la fuerza de la gravedad, de sentido inverso, debida a las masas sometidas a la gravedad local y situadas en la parte superior del pistón. El pistón forma parte de la carga.

Algunas veces y especialmente a bajas presiones, por razones prácticas, el cilindro gira en lugar del pistón. En este caso, el principio y los métodos de calibración son los mismos.

La presión se transmite al elemento móvil por un fluido, que puede ser un gas, usualmente nitrógeno o aire, o líquido, usualmente aceite o agua.

En algunos casos el elemento en flotación no es un conjunto pistón cilindro, tal es el caso de la balanza de flujo constante que combina, generalmente, una bola que recibe la carga y una base hemisférica que soporta la bola. En este tipo de balanza, un regulador de flujo controla el flujo de gas a través de la holgura del sistema manteniendo la bola en flotación. Este tipo de balanzas se utiliza solamente para presiones relativas en las que el fluido transmisor de la presión es un gas.

Cuando la balanza está en equilibrio, se considera que la parte inferior del pistón es el nivel de referencia de la balanza. En algunos casos la balanza está ajustada por el fabricante para que el nivel de referencia sea la conexión de salida de la balanza.

Para la calibración de una balanza de presión se utiliza otra balanza de presión. Esto hace que en algunas ocasiones las exactitudes del patrón y del instrumento a calibrar sean las mismas.

La presión generada por la balanza de presión patrón al nivel de referencia de la balanza a calibrar, se obtiene de:

$$P' = \frac{(M + \delta M + \delta sen) g_1 \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_M}\right) - v g_1 (\rho_f - \rho_a) + \sigma C}{(A_{(0, t_0)} + \delta A_{(0, t_0)})(1 + \lambda P_N) (1 + \alpha(t - t_0))} + (\rho_f - \rho_a) g_1 \Delta h \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la presión medida por las dos balanzas tiene que ser la misma y que la generada por la balanza a calibrar se obtiene de una fórmula similar, se puede obtener el área efectiva de la balanza a calibrar a presión P' y temperatura de referencia.

$$A_{(P', t_0)}' = A_{(0, t_0)}'(1 + \lambda' P_N) = \frac{(M' + \delta M') g_1 \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{M'}}\right) - v' g_1 (\rho_f - \rho_a) + \sigma C'}{P'(1 + \alpha'(t' - t_0))} \quad (2)$$

3.2. Abreviaturas y símbolos

$A_{(0, t_0)}$ Área efectiva a presión nula y temperatura de referencia del pistón cilindro



patrón.

$A_{(P',t_0)'}'$	Área efectiva a presión P' y temperatura de referencia del pistón cilindro a calibrar.
$A_{(0,t_0)'}'$	Área efectiva a presión nula y temperatura de referencia del pistón cilindro a calibrar.
$A_{(P',t_0)_i}'$	Área efectiva a presión P' y temperatura de referencia del pistón cilindro a calibrar obtenida experimentalmente para un punto de calibración i .
A_N	Valor nominal del área efectiva del pistón patrón.
A_N'	Valor nominal del área efectiva del pistón a calibrar.
C	Longitud de la circunferencia del pistón utilizado como patrón.
C'	Longitud de la circunferencia del pistón a calibrar.
c_i	Coefficientes de sensibilidad.
D	Diámetro del pistón (Es D_1 de la Figura 1).
F'	Fuerza aplicadas sobre el conjunto pistón a calibrar.
g_1	Valor de la aceleración de la gravedad local.
H	Altitud sobre el nivel del mar, en m.
H_i	Altura parcial del pistón (véase Figura 1).
$h. r.$	Humedad relativa.
k	Factor de cobertura.
M	Valor certificado de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón utilizado en la balanza patrón. Esta masa incluye la del propio pistón.
M'	Valor certificado de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón utilizado en la balanza a calibrar. Esta masa incluye la del propio pistón.
n	Número de medidas.
P'	Presión al nivel de referencia del conjunto pistón cilindro a calibrar.
P_i'	Presión al nivel de referencia del conjunto pistón cilindro a calibrar medida experimentalmente para un punto de calibración i .
P_N	Valor nominal de la presión.
s^2	Varianza experimental.
t	Temperatura del conjunto pistón cilindro patrón.
t'	Temperatura del conjunto pistón cilindro a calibrar.
t_{amb}	Temperatura ambiente.
t_0	Temperatura de referencia.
U	Incertidumbre expandida.
$u(x_i)$	Incertidumbre típica de la estimación de la magnitud de entrada X .
$u(y)$	Incertidumbre típica combinada de la estimación de la magnitud de salida y .
$u_i(y)$	Contribuciones a la incertidumbre típica combinada.
v	Volumen del pistón utilizado como patrón sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión.
v'	Volumen del pistón a calibrar sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión.
X_i	Magnitud de entrada.

x_i	Estimación.
α	Coeficiente de dilatación térmica del conjunto pistón cilindro utilizado como patrón.
α'	Coeficiente de dilatación térmica del conjunto pistón cilindro a calibrar.
Δh	Diferencia de altura entre los niveles de referencia de los conjuntos pistón cilindro patrón y a calibrar.
$\delta A_{(0,t_0)}$	Deriva área efectiva a presión nula y temperatura de referencia del pistón cilindro patrón.
δLSL	Contribución a la incertidumbre debida a la regresión lineal.
δM	Deriva de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón utilizado como el patrón.
$\delta M'$	Deriva de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón a calibrar.
δ_{sen}	Sensibilidad de la flotación o calibración.
ϕ	Latitud del lugar de utilización.
λ	Coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro utilizado como patrón.
λ'	Coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro a calibrar.
ρ_a	Densidad del aire
ρ_f	Densidad del fluido de transmisión de la presión.
ρ_M	Densidad de las pesas utilizadas con el pistón cilindro patrón.
$\rho_{M'}$	Densidad de las pesas utilizadas con el pistón cilindro a calibrar.
σ	Tensión superficial del fluido de transmisión de la presión.
ν_{eff}	Grados de libertad efectivos.
ν_i	Grados de libertad efectivos para cada contribución <i>i</i> .

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

5.1.1. Instrumentos de medida

Como instrumento de medida patrón se utilizara una balanza de presión, de intervalo de medida e incertidumbre adecuada para poder realizar una correcta calibración del calibrador de presión. El intervalo de medida de la balanza patrón debe cubrir el intervalo de medida de la balanza a calibrar y su incertidumbre de medida, una vez calculada, debe ser al menos dos veces menor de la exactitud de la balanza a calibrar, siempre que técnicamente sea posible.

Además se utilizarán una serie de instrumentos de medida auxiliar:

- Un barómetro; Rango: (850 a 1150) hPa; $U = \pm 1$ hPa, para $k = 2$.
- Un higrómetro; $U = \pm 5\% h.r$, para $k = 2$.

- Sondas de temperatura para la medida de la temperatura ambiente y de la temperatura de los conjuntos pistón cilindro; Rango: (15 a 30) °C; $U = \pm 0,2$ °C para $k = 2$.
- Una regla; $U = \pm 0,5$ mm, para $k = 2$.
- Nivel de burbuja; $U = \pm 1^\circ$, para $k = 2$.

5.1.2. Equipos auxiliares

- Válvulas, racores y tuberías adecuados para la conexión de los instrumentos. Estas deben de ser compatibles con el fluido utilizado y deben ser capaces de soportar las presiones del sistema.
- Generadores y controladores de presión (automáticos o manuales).
- Amplificadores de la posición de flotación.
- Herramienta común (Llaves fijas, destornilladores, llaves allen, etc.).

5.1.3. Material

- Fluido de transmisión de la presión compatible con el patrón y con el instrumento a calibrar.
- Productos de limpieza compatibles con el patrón y con el instrumento a calibrar y que no desprendan impurezas.
- Guantes.
- Pinzas.

5.2. Operaciones previas

Para proceder a la calibración de una balanza de presión, ésta debe encontrarse perfectamente identificada en lo que se refiere a MARCA, MODELO y NÚMERO DE SERIE o a través de un código de identificación del usuario. En caso de que no exista alguno de estos datos, se procederá a la identificación del instrumento asignándole un código (p. ej. , mediante etiqueta fuertemente adherida al instrumento) de forma que no surja duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el equipo calibrado y el Certificado emitido.

La calibración se realizará en un recinto acondicionado, con una temperatura y humedad relativa que estén dentro de los márgenes de utilización de las balanzas, especificados por los fabricantes. Se recomienda que la temperatura este lo más próxima posible a la temperatura de referencia de la balanza. (p. ej. entre 18 °C y 25 °C estabilizada en ± 1 °C).

El laboratorio donde se realicen las medidas no debe ser un lugar de tránsito frecuente con el fin de evitar corrientes de aire.

Se estudiara el manual de operación de la balanza de presión a calibrar, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizada con su manejo.

Se comprobará el estado de limpieza de la balanza a calibrar. En el caso de que estuviera sucio se procederá a su limpieza siguiendo las indicaciones de su manual o se comunicará al cliente con el fin

de tomar una decisión sobre el procedimiento a seguir.

Los equipos deben estar localizados en el laboratorio de calibración el tiempo necesario para alcanzar la estabilidad térmica, antes de empezar la calibración. Así mismo los equipos electrónicos se conectaran a la tensión de alimentación al menos durante un tiempo igual al indicado por los fabricantes de los mismos con el fin de alcanzar la estabilidad térmica de sus componentes electrónicos.

Los equipos se instalarán fuera de las zonas de turbulencia como son la ventilación, el aire acondicionado y las fuentes de calor.

Los conjuntos pistón cilindro de las balanzas de presión se manipularán con cuidado, utilizando guantes y tratando de no golpearlos con ningún objeto, sobre todo en las superficies actuantes. Estas superficies se limpiarán periódicamente utilizando freón o un líquido similar y aplicándolo con papel que no deje impurezas.

La mesa donde se sitúen las balanzas debe soportar el peso de las mismas sin flexar.

El nivel de referencia de las balanzas debe estar fijo a una altura determinada donde pueda hallarse el valor de la gravedad para calcular la fuerza que ejercen las masas sobre los pistones.

Se utilizarán accesorios para la interconexión de los equipos capaces de soportar las presiones generadas por la balanza. Además deben ser compatibles con el fluido utilizado.

Se conectarán las balanzas de presión procurando que el circuito sea lo más corto y con el menor número de conexiones posibles, para que las medidas se puedan hacer de la manera más estable y reproducible. En el caso de que el fluido transmisor de la presión sea un líquido, debe existir un sistema de purga en la parte superior del circuito para extraer el aire. Los niveles de referencia de las balanzas de presión deben estar lo más cercanos posible, en altura, con el fin de minimizar la corrección por nivel de referencia. La diferencia de altura entre los mismos se medirá con la regla.

Se nivelarán las balanzas con un nivel de burbuja para garantizar la verticalidad de los conjuntos pistón-cilindro. En el caso de que alguna de las balanzas no lleve acoplado uno, se usará uno externo situándolo para la nivelación sobre el pistón.

Se desperezarán los equipos antes de proceder a la calibración, sometiéndoles al menos dos veces a la presión máxima de calibración. Durante este proceso se comprobará: el correcto funcionamiento de los equipos y la ausencia de fugas en el circuito.

Se comprobará el tiempo de caída del pistón desde su posición más alta hasta la posición inferior. El tiempo de caída debe ser suficiente para permitir la realización de la calibración por flotación.

También se comprobará el tiempo de rotación libre del pistón, para aquellos pistones que no son arrastrados por un motor; este debe permitir la realización de la calibración por flotación.

5.3. Proceso de calibración

5.3.1. Secuencias de calibración

La calibración se realiza por el método de flotación simultánea que consiste en llevar a los dos conjuntos pistón cilindro, el de la balanza a calibrar y el de la balanza patrón, a su posición de flotación consiguiendo mediante la variación de la cantidad de masa colocada sobre el patrón que ambas balanzas permanezcan equilibradas por la presión del circuito.

Existen variaciones del método de flotación, como la utilización de un detector de nulo o un medidor de presión diferencial entre las balanzas, o la utilización de un manómetro de

resolución adecuada como elemento de transferencia. En ambos casos el método de cálculo es el mismo que en el de flotación cruzada.

5.3.2. Definición de los puntos de medida.

Para la calibración se realizarán al menos tres series de medida de cinco puntos de calibración cada una.

Los puntos de calibración se distribuirán cubriendo el rango de medida en el que la balanza se vaya a utilizar, incluirán los límites inferior y superior de dicho intervalo. El resto de los puntos se distribuirá aproximadamente de forma uniforme y teniendo en cuenta, en su caso, puntos singulares, en función de la utilización que hace el usuario.

Una serie de medidas consiste en la comparación de las indicaciones del patrón y del instrumento a calibrar, en todos los puntos de calibración, alcanzando estos de forma consecutiva, empezando por el límite inferior de medida e incrementando la presión del sistema punto a punto hasta llegar al límite superior. Una vez alcanzado el límite superior se alcanzan otra vez todos los puntos, incluido el límite superior, de manera consecutiva decrementando la presión del sistema hasta volver a presión cero.

5.3.3. Calibración

Para generar las distintas presiones nominales de una serie se colocan masas sobre los pistones, hasta obtener el valor de presión buscado, y mediante aporte del fluido de transmisión o compresión del mismo se sitúan los pistones, con las masas, en posición de flotación. En ese momento se añaden o quitan masas sobre el patrón hasta conseguir que las balanzas se encuentren equilibradas.

Cuando se utiliza el método de flotación simultánea se considera alcanzado el equilibrio en cualquiera de los siguientes casos:

- Los dos pistones cilindro, el patrón y el mensurando, se encuentren en su posición media de flotación de forma estable.
- Los dos pistones cilindro, el patrón y el mensurando, caen a sus respectivas velocidades de caída.
- Al realizar el ajuste de la masa colocada sobre el patrón se llega a la masa más pequeña que produce un cambio en el sentido del equilibrio de manera sensible.

Si se utiliza un detector de nulo o un manómetro diferencial el equilibrio se alcanza cuando su indicación es cero.

En caso de utilizar un manómetro como elemento de transferencia el equilibrio se alcanza cuando el manómetro indica lo mismo cuando se le conecta de forma aislada la balanza patrón que cuando se le conecta la balanza a calibrar.

En el método de flotación, la masa más pequeña que produce un cambio en el equilibrio se denomina masa de sensibilidad.

En los otros métodos la sensibilidad es la masa más pequeña que produce un cambio en la indicación del detector de nulo, medidor de presión diferencial o manómetro.

Antes de tomar cada medida habrá que comprobar que la balanza se encuentra nivelada, que se ha alcanzado el equilibrio en la flotación y que no hay problemas de fugas.

Después de la realización de cada serie de medidas se dejará sin presión al sistema.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Los datos a tomar son los siguientes:

- Datos a tomar para cada punto de calibración:
 - Masa total del patrón, incluye la masa del pistón y las masas colocadas sobre él.
 - Temperatura del conjunto pistón cilindro patrón.
 - Masa total del mesurando, incluye la masa del pistón y las masas colocadas sobre él.
 - Temperatura del pistón cilindro a calibrar, si aplica.
 - Sensibilidad de la flotación.
- Datos a tomar al inicio y al final de la calibración.
 - Temperatura ambiente.
 - Humedad relativa.
 - Presión ambiente.
- Datos a tomar una sola vez para toda la calibración.
 - Diferencia de alturas entre los niveles de referencia.

Se calcularán los siguientes parámetros, para cada punto de calibración:

- El área efectiva del conjunto pistón cilindro.
- El coeficiente de deformación de la presión del conjunto pistón cilindro.
- La incertidumbre expandida para un intervalo de confianza de aproximadamente el 95,45 %.

El cálculo del área efectiva, del coeficiente de deformación con la presión, mediante el método de regresión lineal, y de la contribución a la incertidumbre de la regresión, se desarrolla en el Anexo 1.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

Para la estimación y cálculo de las incertidumbres se seguirá lo establecido en las referencias [3] y [4].

El área efectiva a presión P' y temperatura de referencia se obtiene de:

$$A_{(P',t_0)'} = A_{(0,t_0)'}(1 + \lambda'P') + \delta LSL \quad (3)$$

donde:

$$A_{(P',t_0)}' = A_{(0,t_0)}'(1 + \lambda'P') = \frac{(M' + \delta M')g_1(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{M'}}) - v'g_1(\rho_f - \rho_a) + \sigma C'}{P'(1 + \alpha'(t' - t_0))} \quad (4)$$

de manera simplificada:

$$A_{(0,t_0)}'(1 + \lambda'P') = \frac{F'}{P'(1 + \alpha'(t' - t_0))} \quad (5)$$

siendo:

$$F' = (M' + \delta M')g_1(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{M'}}) - v'g_1(\rho_f - \rho_a) + \sigma C' \quad (6)$$

y

$$P' = \frac{F' = (M' + \delta M')g_1(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{M'}}) - v'g_1(\rho_f - \rho_a) + \sigma C'}{(A_{(0,t_0)} + \delta A_{(0,t_0)})(1 + \lambda P_N)(1 + \alpha(t - t_0))} + (\rho_f - \rho_a)g_1\Delta \quad (7)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (6). Se obtienen la incertidumbre típica de la fuerza aplicada sobre el conjunto pistón a calibrar.

Tabla 1: Contribución a la incertidumbre de la fuerza aplicada sobre el conjunto pistón cilindro a calibrar

Magnitud de entrada X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Masa sobre el P/C a calibrar	M'	$u(M')$	Normal	$c_1 \approx \frac{F'}{M'}$	$c_1 u(M')$
Deriva de la masa	M'	$u(\delta M')$	Rectangular	$c_2 \approx \frac{F'}{M'}$	$c_2 u(\delta M')$
Gravedad local	g_1	$u(g_1)$	Rectangular	$c_3 \approx \frac{F'}{g_1}$	$c_3 u(g_1)$
Densidad del aire	ρ_a	$u(\rho_a)$	Rectangular	$c_4 \approx -\frac{M'g_1}{\rho_{M'}} + v'\rho_1$	$c_4 u(\rho_a)$
Densidad de las masas	$\rho_{M'}$	$u(\rho_{M'})$	Rectangular	$c_5 \approx -\frac{M'g_1\rho_a}{\rho_{M'}^2} + v'\rho_1$	$c_5 u(\rho_{M'})$
Volumen del P/C sometido a empuje	v'	$u(v')$	Rectangular	$c_6 \approx -g_1(\rho_f - \rho_a)$	$c_6 u(v')$
Densidad del fluido	ρ_f	$u(\rho_f)$	Rectangular	$c_7 \approx -v'g_1$	$c_7 u(\rho_f)$
Tensión superficial	σ	$u(\sigma)$	Rectangular	$c_8 \approx C'$	$c_8 u(\sigma)$
Circunferencia del pistón	C'	$u(C')$	Rectangular	$c_9 \approx \sigma$	$c_9 u(C')$

La incertidumbre típica combinada, considerando a efectos prácticos de cálculos independientes todas sus magnitudes de entrada, asociada a la fuerza se obtiene combinando sus distintas contribuciones:

$$u(F') = \sqrt{\sum u_i^2(y)} \quad (8)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (7) se obtiene la incertidumbre típica de la presión al nivel de referencia del conjunto pistón cilindro a calibrar.

Tabla 2: Contribuciones a la incertidumbre de la presión generada al nivel de referencia del conjunto pistón cilindro a calibrar

Magnitud de entrada X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Masa del patrón	M'	$u(M)$	Normal	$c_1 \approx \frac{P'}{M}$	$c_1 u(M)$
Deriva de la masa	$\delta M'$	$u(\delta M)$	Rectangular	$c_2 \approx \frac{P'}{M}$	$c_2 u(\delta M)$
Masa de sensibilidad	δsen	$u(\delta sen)$	Rectangular	$c_3 \approx \frac{P'}{M}$	$c_3 u(\delta sen)$
Gravedad local	g_1	$u(g_1)$	Normal	$c_4 \approx \frac{P'}{g_1}$	$c_4 u(g_1)$
Densidad del aire	ρ_a	$u(\rho_a)$	Rectangular	$c_5 \approx -\frac{\frac{M}{\rho_M} + v}{A_{(0,t_0)}} + \Delta h$	$c_5 u(\rho_a)$
Densidad de las masas	ρ_M	$u(\rho_M)$	Rectangular	$c_6 \approx \frac{M g_1 \rho_a}{A_{(0,t_0)} \rho_M^2}$	$c_6 u(\rho_M)$
Volumen del P/C patrón sometido al empuje	v	$u(v)$	Rectangular	$c_7 \approx -\frac{g_1(\rho_f - \rho_a)}{A_{(0,t_0)}}$	$c_7 u(v)$
Densidad del fluido de transmisión	ρ_f	$u(\rho_f)$	Rectangular	$c_8 \approx \frac{g_1 v}{A_{(0,t_0)}} + g_1 \Delta h$	$c_8 u(\rho_f)$

La incertidumbre típica combinada, considerando a efectos prácticos de cálculos independientes todas sus magnitudes de entrada, asociada a la presión se obtiene combinando sus distintas contribuciones:

$$u(P') = \sqrt{\sum u_i^2(y)} \quad (9)$$

y aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (3), sustituyendo en ella la expresión (5) obtenemos los datos de la Tabla 3.

La incertidumbre típica combinada asociada a la calibración del conjunto pistón cilindro se obtiene combinando sus distintas contribuciones:

$$u(A'_{(P',t_0)}) = \sqrt{\sum u_i^2(y)} \quad (10)$$

Una vez obtenida la incertidumbre combinada se calculan los grados de libertad efectivos, v_{eff} , a partir de la incertidumbre combinada y sus contribuciones mediante la aplicación de la fórmula de Welch-Satterwaite:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (11)$$

Tabla 3: Contribuciones a la incertidumbre de $A'_{(P',t_0)}$

Magnitud de entrada X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Fuerza	F'	$u(F')$	Normal	$c_1 \approx \frac{A'_{(P',t_0)'}}{F'}$	$c_1 u(F')$
Presión	P'	$u(P')$	Normal	$c_2 \approx -\frac{A'_{(P',t_0)'}}{P'}$	$c_2 u(P')$
Coefficiente de dilatación térmica lineal del P/C	α	$u(\alpha)$	Rectangular	$c_3 \approx -A'_{(P',t_0)'}(t' - t_0)$	$c_3 u(\alpha)$
Temperatura del P/C	t'	$u(t')$	Rectangular	$c_4 \approx -A'_{(P',t_0)'}\alpha'$	$c_4 u(t')$
Recta de mínimos cuadrados	δLSL	$u(\delta LSL)$	Normal	$c_5 \approx 1$	$c_5 u(\delta LSL)$

A partir de los grados de libertad efectivos y de la Tabla 4 se obtiene el factor k . La tabla 4 está basada en una distribución t evaluada para una distribución de probabilidad del 95,45%.

Tabla 4: Factores de cobertura k para diferentes grados de libertad v_{eff}

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

La incertidumbre expandida, para un intervalo de confianza del 95,45%, se obtiene multiplicando a la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura:

$$U = ku(A'_{(P',t_0)}) \quad (12)$$

- 6.1.1. Valor certificado de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón utilizado en la balanza a calibrar. Esta masa incluye la del propio pistón (M'):

El valor certificado de masa y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k , normalmente $k = 2$, se obtienen de su certificado de calibración.

$$u(M') = \frac{U}{k} \quad (13)$$

- 6.1.2. Deriva de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón a calibrar ($\delta M'$):

El valor de la masa puede variar entre calibraciones, esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se considera que su valor es cero y se incluye como una contribución a la incertidumbre. Si el semintervalo de deriva es $\delta m'$, la varianza es $u^2 = (\delta m')^2/3$, y la incertidumbre típica debida a la deriva es:

$$u(\delta M') = \frac{\delta m'}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

$\delta m'$ es igual a la diferencia máxima, en valor absoluto, entre los valores de masa obtenidos para una misma pesa en dos certificados de calibración consecutivos. Cuando sólo se tiene una calibración se pueden utilizar las especificaciones del fabricante del equipo o la experiencia.

- 6.1.3. Gravedad local (g_1):

El valor de la gravedad local y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k , normalmente $k = 2$, se obtienen del certificado de calibración de la gravedad en el lugar de utilización de la balanza.

$$u(g_1) = \frac{U}{k} \quad (15)$$

En el caso de no disponer de un certificado de calibración de la gravedad local, ésta se puede obtener en función de la altitud y la latitud.

$$g_1 = 9,780\,318\,4(1 + 5,3024 \times 10^{-3} \text{sen}^2 \varphi - 5,9 \times 10^{-6} \text{sen}^2(2\varphi)) - 3,086 \times 10^{-6} H \quad (16)$$

La incertidumbre del uso de esta fórmula es de $U = 1 \times 10^{-4} \times g_1$, para $k = 2$.

El uso de esta fórmula en lugar de la determinación experimental implica un notable incremento de la incertidumbre final convirtiendo a esta contribución en una de las de mayor peso en la calibración. Esto hace que en la mayoría de los casos no sea adecuada.

- 6.1.4. Densidad del aire (ρ_a):

El valor de la densidad del aire y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura $k = 2$, se obtienen a partir de la temperatura ambiente, de la presión atmosférica y de la humedad relativa. En el anexo A de la referencia [2] tiene información de cómo determinarla, así como su incertidumbre.

6.1.5. Densidad de las pesas utilizadas con el pistón cilindro a calibrar (ρ_M'):

El valor de la densidad de las masas y su incertidumbre se obtienen, normalmente, de las especificaciones del fabricante:

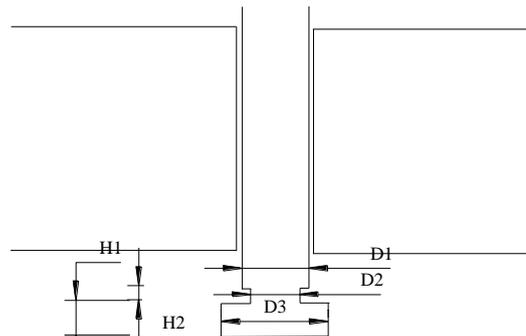
$$u(\rho_M') = \frac{\delta\rho_M'}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

$\delta\rho_M'$ es el límite máximo de la densidad de las masas declarada por el fabricante.

6.1.6. Volumen del pistón a calibrar sometido al empuje del fluido (v'):

Su valor y su incertidumbre se pueden obtener o bien de las especificaciones del fabricante, o bien mediante una sencilla determinación dimensional mediante el uso de un calibre.

Figura 1



$$v' = \pi(D_3^2 H_1 - D_1^2 (H_1 + H_2) + D_2^2 H_2) / 4 \quad (18)$$

En el caso más normal de utilizar las especificaciones del fabricante su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(v) = \frac{\delta v}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

δv es la incertidumbre obtenida del volumen sometido a empuje declarada por el fabricante o la obtenida en la determinación dimensional.

6.1.7. Densidad del fluido de transmisión de la presión (ρ_f):

El valor de la densidad del fluido y su incertidumbre se obtienen, normalmente, de las especificaciones del fabricante, teniendo en cuenta que varía con la temperatura y principalmente con la presión. Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(\rho_f) = \frac{\delta\rho_f}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

$\delta\rho_f$ es el límite máximo de variación de la densidad del fluido teniendo en cuenta las variaciones de temperatura y especialmente de presión.

6.1.8. Tensión superficial del fluido transmisor de la presión (σ):

El valor del coeficiente de tensión superficial del fluido y su incertidumbre se obtienen de las especificaciones del fabricante. Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(\sigma) = \frac{\delta\sigma}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

$\delta\sigma$ es el límite máximo de la incertidumbre declarada por el fabricante para el valor de la tensión superficial del fluido.

6.1.9. Longitud de la circunferencia del pistón a calibrar (C'):

El valor de la longitud de la circunferencia del pistón a calibrar, se obtiene a partir del valor nominal de su área efectiva. Su incertidumbre se obtiene de las especificaciones del fabricante para el valor del área efectiva.

$$C' = 2\sqrt{\pi A_N'} \quad (22)$$

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(C') = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{A_N'}} \delta A_N'}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

$\delta A_N'$ son las especificaciones del fabricante para el valor del área efectiva.

6.1.10. Valor certificado de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón utilizado en la balanza patrón. Esta masa incluye la del propio pistón (M):

El valor certificado de masa y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k , normalmente $k = 2$, se obtienen de su certificado de calibración.

$$u(M) = \frac{U}{k} \quad (24)$$

6.1.11 Deriva de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón patrón (δM):

El valor de la masa puede variar entre calibraciones, esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se considera su valor es cero y se incluye como una contribución a la incertidumbre. Si el semintervalo de deriva es δm , la varianza es $u^2 = (\delta m)^2/3$, y la incertidumbre típica debida a la deriva es:

$$u(\delta M) = \frac{\delta m}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

δm es igual a la diferencia máxima, en valor absoluto, entre los valores de masa obtenidos para una misma pesa en dos certificados de calibración consecutivos. Cuando sólo se tiene

una calibración se pueden utilizar las especificaciones del fabricante del equipo o la experiencia.

6.1.12. Corrección debida a la sensibilidad de la flotación (δsen):

Se asume que el valor de la corrección es cero, introduciendo su valor como una contribución a la incertidumbre. Si la masa de sensibilidad es δsen , la varianza es $u^2 = (\delta sen)^2/3$, y la incertidumbre típica debida a la deriva es:

$$u = \frac{\delta sen}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

δsen es la masa de valor más pequeño que produce un cambio en el equilibrio.

6.1.13 Densidad de las pesas utilizadas con el pistón cilindro patrón (ρ_M):

El valor de la densidad de las masas y su incertidumbre se obtienen, normalmente, de las especificaciones del fabricante:

$$u(\rho_M) = \frac{\delta \rho_M}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

$\delta \rho_M$ es el límite máximo de la densidad de las masas declarada por el fabricante.

6.1.14 Volumen del pistón patrón sometido a empuje del fluido (v):

Su valor y su incertidumbre se pueden obtener o bien de las especificaciones del fabricante, o bien mediante una sencilla determinación dimensional mediante el uso de un calibre. (véase 6.1.6).

6.1.15 Longitud de la circunferencia del pistón patrón (C):

El valor de la longitud de la Circunferencia del pistón patrón, se obtiene a partir del valor nominal de su área efectiva. Su incertidumbre se obtiene de las especificaciones del fabricante para el valor del área efectiva.

$$C = 2\sqrt{\pi A_N} \quad (28)$$

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(C) = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{A_N}} \delta A_N}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

δA_N son las especificaciones del fabricante para el valor del área efectiva.

6.1.16 Área efectiva del conjunto pistón cilindro ($A_{(0,t_0)}$):

El valor del área efectiva del conjunto pistón cilindro y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k , normalmente $k = 2$, se obtienen del certificado de calibración

del patrón.

$$u(A_{(0,t_0)}) = \frac{U}{k} \quad (30)$$

6.1.17 Deriva del área efectiva del conjunto pistón cilindro patrón ($\delta A_{(0,t_0)}$):

El valor del área efectiva puede variar entre calibraciones, esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se considera que su valor es cero y se incluye como una contribución a la incertidumbre. Si el semintervalo de deriva es $\delta A_{(0,t_0)}$, la varianza es $u^2 = (\delta A_{(0,t_0)})^2/3$, y la incertidumbre típica debida a la deriva es:

$$u(\delta A_{(0,t_0)}) = \frac{\delta A_{(0,t_0)}}{2\sqrt{3}} \quad (31)$$

$\delta A_{(0,t_0)}$, es igual a la diferencia máxima, en valor absoluto, entre el valor del área efectiva obtenido en dos certificados de calibración consecutivos. Cuando sólo se tiene una calibración se pueden utilizar las especificaciones del fabricante del equipo o la experiencia.

6.1.18 Coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro (λ):

El valor del coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k , normalmente $k = 2$, se obtienen del certificado de calibración del patrón.

$$u(\lambda) = \frac{U}{2} \quad (32)$$

6.1.19 Presión nominal (P_N):

Su incertidumbre se obtiene de las especificaciones del fabricante para la presión generada por la balanza patrón en las condiciones de utilización. Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(P_N) = \frac{\delta P_N}{\sqrt{3}} \quad (33)$$

δP_N son las especificaciones del fabricante para el valor nominal de la presión generada en las condiciones de utilización.

6.1.20 Coeficiente de dilatación térmica del pistón cilindro patrón (α):

Su valor se obtiene de las especificaciones del fabricante o de las características del material con el que está construido y se asume que su valor puede variar en un $\pm 10\%$. Si el intervalo de variación es $\delta\alpha = 20\%$ la varianza es $u^2 = (\delta\alpha)^2/12$, y la incertidumbre típica es:

$$u(\alpha) = \frac{\delta\alpha}{2\sqrt{3}} \quad (34)$$

6.1.21 Temperatura del conjunto pistón cilindro patrón (t):

La temperatura del conjunto pistón cilindro se mide a través de una sonda de temperatura. La incertidumbre expandida, para un factor de cobertura $k = 2$, se obtienen a partir de la del certificado de calibración de la sonda, de la deriva de la sonda, del método de medida de la temperatura del conjunto pistón cilindro, entre otras. Asumiendo que su valor puede experimentar un intervalo de variación máxima de $\pm 0,5$ °C. Si el intervalo de variación es δt , la varianza es $u^2 = (\delta t)^2/12$, y la incertidumbre típica es:

$$u(t) = \frac{\delta t}{2\sqrt{3}} \quad (35)$$

6.1.22 Diferencia de altura entre los niveles de referencia de las balanzas (Δh):

La diferencia de altura se mide a través de una regla. La incertidumbre expandida, para un factor de cobertura $k = 2$, se obtienen a partir de la del certificado de calibración de la regla, de la deriva de la regla de su resolución y del método de medida de la diferencia de alturas. Si el intervalo de variación es δh , la varianza es $u^2 = (\delta h)^2/12$, y la incertidumbre típica es:

$$u(\Delta h) = \frac{\delta h}{2\sqrt{3}} \quad (36)$$

6.1.23 Coefficiente de dilatación térmica del pistón cilindro a calibrar (α'):

Su valor se obtiene de las especificaciones del fabricante o de las características del material con el que está construido y se asume que su valor puede variar en un $\pm 10\%$. Si el intervalo de variación es $\delta\alpha' = 20\%$, la varianza es $u^2 = (\delta\alpha')^2/12$, y la incertidumbre típica es:

$$u(\delta\alpha') = \frac{\delta\alpha'}{2\sqrt{3}} \quad (37)$$

6.1.24 Temperatura del conjunto pistón cilindro a calibrar (t'):

La temperatura del conjunto pistón cilindro se mide a través de una sonda de temperatura. La incertidumbre expandida, para un factor de cobertura $k = 2$, se obtienen a partir de la del certificado de calibración de la sonda, de la deriva de la sonda y del método de medida de la temperatura del conjunto pistón cilindro, entre otras. Asumiendo que su valor puede experimentar un intervalo de variación máxima de $\pm 0,5$ °C. Si el intervalo de variación es $\delta t'$, la varianza es $u^2 = (\delta t')^2/12$, y la incertidumbre típica es:

$$u(t') = \frac{\delta t'}{2\sqrt{3}} \quad (38)$$

6.1.25 Corrección debida al método de ajuste de regresión lineal (δLSL):

Se asume que su valor es cero. El cálculo de su incertidumbre se desarrolla en el Anexo 1.

6.2. Interpretación de resultados

Los resultados serán presentados en un certificado de calibración en el que aparecerá

- El rango de medida de presiones en que ha sido calibrado el conjunto pistón cilindro.
- El área efectiva del conjunto pistón cilindro a presión nula y temperatura de referencia.
- El coeficiente de deformación de la presión del conjunto pistón cilindro.
- La incertidumbre expandida para un intervalo de confianza de aproximadamente el 95,45 % del área efectiva a presión P' y temperatura de referencia cuando se obtiene a partir del área efectiva a presión nula y del coeficiente de deformación con la presión (véase Anexo 1).

Además en el certificado de calibración se debe hacer constar:

- El valor de la masa del pistón utilizado y su incertidumbre.
- El coeficiente de dilatación lineal del conjunto pistón cilindro calibrado.
- El volumen del conjunto pistón cilindro sometido a empuje y su incertidumbre, cuando proceda.
- Las condiciones ambientales durante la calibración.
- El número de medidas realizadas por punto de calibración.
- El nivel de referencia elegido.
- El fluido transmisor de la presión utilizado.
- La densidad del fluido de transmisión y su incertidumbre.
- La tensión superficial del fluido y su incertidumbre.
- El valor del factor de cobertura k utilizado, así como los grados de libertad efectivos cuando proceda.
- La relación entre las unidades utilizadas y la unidad del Sistema Internacional, cuando proceda.

Aunque las clases de precisión para este tipo de instrumentos se encuentran definidas en la recomendación internacional de la Organización internacional de Metrología Legal nº 110 (OIML R 110), no es habitual seguir esta clasificación. Normalmente, y ante la imposibilidad de ajustar este tipo de instrumentos, se utiliza como tolerancia la exactitud indicada en el manual técnico del instrumento. En este caso, el cumplimiento o no con dicha tolerancia deberá comprobarse teniendo en cuenta las desviaciones obtenidas, con sus incertidumbres asociadas.

7. REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). CEM. 3ª edición en español. 2012.
- [2] EURAMET cg-18. Versión 4.0. Guía para la Calibración de Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático.
- [3] JCGM 100: 2008. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. EDICIÓN DIGITAL 1 en español (traducción 1ª Ed. Sept. 2008).
- [4] EA-4/02 M 2013. Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones.
- [5] EURAMET cg-3 (Version 1.0), Calibration of pressure balances.
- [6] OIML R 110 Pressure Balances (OIML). Edition 1994.

8. ANEXOS

Anexo 1 Cálculo del área efectiva a presión nula y temperatura de referencia y del coeficiente de deformación con la presión.

Anexo 2 Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito.

ANEXO 1 CÁLCULO DEL ÁREA EFECTIVA A PRESIÓN NULA Y TEMPERATURA DE REFERENCIA Y DEL COEFICIENTE DE DEFORMACIÓN CON LA PRESIÓN

Se trata de calcular, mediante el método de análisis de regresión lineal, el área efectiva a presión nula y temperatura de referencia y el coeficiente de deformación con la presión partiendo de los diferentes valores obtenidos en la calibración.

Para cada punto de calibración se puede determinar una pareja de valores $(A_{(P_i, t_0)}', P_i')$ obtenida de la aplicación de las ecuaciones (1) y (2) del punto (4) a los datos experimentales obtenidos durante la realización de la calibración. De esta manera y teniendo en cuenta que la calibración consta de un mínimo de tres series de medida con un mínimo de cinco puntos alcanzados de manera creciente y decreciente en cada una de ellas, podemos determinar al menos 30 parejas de valores.

Una recta de calibración es ajustada por el método de los mínimos cuadrados a las parejas de valores anteriores.

$$A_{(P_i, t_0)}'(P') = A_{(0, t_0)}' + (A_{(0, t_0)}'\lambda')P' \quad (39)$$

Los parámetros $A_{(0, t_0)}'$ y $(A_{(0, t_0)}'\lambda')$ que representan respectivamente la ordenada en el origen y la pendiente de la recta de calibración, son los dos mesurandos o magnitudes de salida a determinar. Una vez que se determinan $A_{(0, t_0)}'$ y $(A_{(0, t_0)}'\lambda')$, así como sus varianzas y covarianzas estimadas, la ecuación (41) puede utilizarse para predecir el valor del área efectiva del conjunto pistón cilindro cuando se aplica cualquier presión sobre su base.

Aplicando el método de mínimos cuadrados las magnitudes de salida se obtienen minimizando la suma:

$$S = \sum_{i=1}^n (A_{(P_i, t_0)}' - A_{(0, t_0)}' + (A_{(0, t_0)}'\lambda')P_i')^2 \quad (40)$$

lo que conduce a las siguientes ecuaciones para $A_{(0, t_0)}'$ y $(A_{(0, t_0)}'\lambda')$ para sus varianzas experimentales $s^2(A_{(0, t_0)}')$ y $s^2(A_{(0, t_0)}'\lambda')$ y para su coeficiente de correlación estimado $r(A_{(0, t_0)}', (A_{(0, t_0)}'\lambda')) = s(A_{(0, t_0)}', (A_{(0, t_0)}'\lambda')) / (s(A_{(0, t_0)}')s(A_{(0, t_0)}'\lambda'))$, donde $s(A_{(0, t_0)}', (A_{(0, t_0)}'\lambda'))$ es su covarianza estimada:

$$A_{(0, t_0)}' = \frac{(\sum A_{(P_i, t_0)}')(\sum P_i'^2) - (\sum A_{(P_i, t_0)}'P_i')(\sum P_i')}{n \sum P_i'^2 - (\sum P_i')^2} \quad (41)$$

$$A_{(0, t_0)}'\lambda' = \frac{n(\sum A_{(P_i, t_0)}'P_i') - (\sum A_{(P_i, t_0)}')(\sum P_i')}{n \sum P_i'^2 - (\sum P_i')^2} \quad (42)$$

$$s^2(A_{(0, t_0)}') = \frac{s^2 \sum P_i'^2}{n \sum P_i'^2 - (\sum P_i')^2} \quad (43)$$

$$s^2(A_{(0, t_0)}'\lambda') = \frac{ns^2}{n \sum P_i'^2 - (\sum P_i')^2} \quad (44)$$

$$r(A_{(0, t_0)}', (A_{(0, t_0)}'\lambda')) = - \frac{\sum P_i'}{\sqrt{n \sum P_i'^2}} \quad (45)$$

$$s^2 = \frac{\sum ((A_{(P_i, t_0)}') - (\sum A_{(P_i, t_0)}' / n))^2}{n - 2} \quad (46)$$

donde todos los sumatorios van desde $i = 1$ hasta n ; $((A_{(P_i, t_0)}') - (\sum A_{(P_i, t_0)}' / n))$ es la diferencia entre el valor del área medido $A_{(P_i, t_0)}'$ y el valor del área $(\sum A_{(P_i, t_0)}' / n)$ predicho por la recta ajustada, de

ecuación $A_{(P',t_0)}'(P') = A_{(P',t_0)}' + (A_{(P',t_0)}'\lambda')P'$, para P'_i . La varianza s^2 es una medida de la incertidumbre global del ajuste, y el factor $n - 2$ refleja el hecho de que los dos parámetros $A_{(0,t_0)}'$ y $(A_{(0,t_0)}'\lambda')$ se determinan a partir de n observaciones y que, en consecuencia, el número de grados de libertad de s^2 es $\nu = n - 2$.

De (43) y (44) se puede obtener $A_{(0,t_0)}'$ y $(A_{(0,t_0)}'\lambda')$ y expresando (41) de la forma común que se expresa la ecuación del área efectiva de un conjunto pistón cilindro:

$$A_{(P',t_0)}'(P') = A_{(0,t_0)}'(1 + \lambda'P') \quad (47)$$

El coeficiente de deformación λ' se obtiene de dividir (44) entre (43):

$$\lambda' = \frac{(A_{(0,t_0)}'\lambda')}{A_{(0,t_0)}'} \quad (48)$$

y la contribución a la incertidumbre debida a la regresión lineal es:

$$\delta_{LSL} = s = \sqrt{\frac{\sum((A_{(P',t_0)}'i) - (A_{(P',t_0)}'(P'_i)))^2}{n - 2}} \quad (49)$$

ANEXO 2: EJEMPLO NUMÉRICO DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DESCRITO

a) Datos de la balanza a calibrar.

Marca:	XXXXX
Modelo:	YYYYY
Nº serie:	ZZZZZ
Intervalo nominal de medida:	(0 a 6) MPa
Exactitud:	0,04 % lect
Tipo:	Hidráulica (aceite)

Magnitud	Valor	U $k = 2$	Datos obtenidos de:
A_N'	$8,064\ 5 \times 10^{-5}\ \text{m}^2$	$3,2 \times 10^{-8}\ \text{m}^2$	Especificaciones del fabricante
C'	$3,184\ 2 \times 10^{-2}\ \text{m}$	$1,3 \times 10^{-5}\ \text{m}$	A partir del valor nominal del área
t'	(véase ensayos)	$0,5\ ^\circ\text{C}$	
v'	$1,34 \times 10^{-6}\ \text{m}^3$	$1,3 \times 10^{-7}\ \text{m}^3$	Especificaciones del fabricante
α'	$2,30 \times 10^{-5}\ ^\circ\text{C}^{-1}$	$2,3 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$	Especificaciones del fabricante
$\delta M'$	0	$4 \times 10^{-6} \times M'$	Deriva de las masas entre dos calibraciones sucesivas o especificaciones del fabricante.
$\delta M'$	$8000\ \text{kg}/\text{m}^3$	$100\ \text{kg}/\text{m}^3$	Especificaciones del fabricante

P'_N MPa	M' (kg)	U $k = 2$ (kg)	Datos obtenidos de:
1,002	8,242 367	0,000 082	Certificado de calibración de las masas
2,502	20,579 60	0,000 21	
4,002	32,916 73	0,000 33	
5,002	41,141 51	0,000 41	
6,002	49,366 31	0,000 49	

b) Datos de la balanza patrón.

Marca:	NNNNN
Modelo:	MMMMM
Nº serie:	ÑÑÑÑÑ
Intervalo nominal de medida:	(0 a 6) MPa
Exactitud:	0,01 % lect
Tipo:	Hidráulica (aceite)

Magnitud	Valor	U $k = 2$	Datos obtenidos de:
$A_{(0,t_0)}$	$4,902\ 77 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$	Certificado de calibración.
A_N	$4,902\ 77 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$	Certificado de calibración.
C	$2,48213 \times 10^{-2} \text{ m}$	$2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$	A partir del valor del área
t	(véase ensayos)	$0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	
v	0		Este pistón no tiene corrección por empuje de fluido.
α	$9,00 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$9,0 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Especificaciones del fabricante.
$\delta A_{(0,t_0)}$	0	$4,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2$	Deriva del área entre dos calibraciones sucesivas o especificaciones del fabricante.
δM	$4 \times 10^{-6} \times M$		Deriva de las masas entre dos calibraciones sucesivas o especificaciones del fabricante.
λ	$1,49 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$	$3,0 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$	Certificado de calibración.
ρ_M	7920 kg/m^3	100 kg/m^3	Especificaciones del fabricante.

P_N MPa	M (kg)	U $k = 2$ (kg)	Datos obtenidos de:
1,002	$5,000\ 001 + \Delta M$	0,000 050	Certificado de calibración de las masas.
2,502	$12,499\ 99 + \Delta M$	0,000 13	
4,002	$19,999\ 98 + \Delta M$	0,000 20	
5,002	$24,999\ 96 + \Delta M$	0,000 25	
6,002	$29,999\ 94 + \Delta M$	0,000 30	

Nota: Para facilitar los cálculos se ha considerado que la masa colocada sobre el pistón cilindro patrón está formada de un valor fijo M más un valor variable en cada ensayo ΔM .

c) Datos generales.

Magnitud	Valor	U $k = 2$	Datos obtenidos de:
g_l	$9,806\ 650 \text{ m/s}^2$	$1,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$	Certificado de la gravedad
$h. r.$	40 %	2 %	Certificado; deriva; resolución, etc...
Δh	$7,20 \times 10^{-2} \text{ m}$	$1,0 \times 10^{-3} \text{ m}$	Certificado; deriva; resolución, etc...
ρ_a	$1,202 \text{ kg/m}^3$	$0,012 \text{ kg/m}^3$	Fórmula
ρ_f	900 kg/m^3	100 kg/m^3	Especificaciones del fabricante
σ	$31,2 \times 10^{-3} \text{ N}$	$3,1 \times 10^{-4} \text{ N}$	Especificaciones del fabricante

El fluido de trabajo es aceite.

d) Procedimiento.

Se ha utilizado el procedimiento ME-016.

Para la calibración de la balanza hidráulica se han realizado tres series de cinco puntos de medida los cuales se han alcanzado incrementando y decrementando la presión. Los puntos elegidos han sido los siguientes:

(1,002; 2,502; 4,002; 5,002 y 6,002) MPa

e) Toma de datos.

1ª Serie de medida.

Magnitud	Valor	U $k = 2$
t_{amb}	20,5 °C	0,5 °C
P_{amb}	101 325 Pa	200 Pa
<i>h. r.</i>	40 %	4 %

P_N MPa	t °C	t' °C	ΔM mg	δsen mg
1,002	19,91	20,00	7 100	100
2,502	19,99	20,42	7 500	200
4,002	19,86	19,80	7 900	200
5,002	20,00	19,89	8 200	200
6,002	20,12	19,93	8 400	200
6,002	20,17	19,91	8 200	200
5,002	20,35	19,88	8 200	200
4,002	20,50	19,92	7 900	200
2,502	20,58	19,92	7 700	200
1,002	20,66	19,91	7 200	100

2ª Serie de medida.

Magnitud	Valor	U $k = 2$
t_{amb}	20,5 °C	0,5 °C
P_{amb}	101 325 Pa	200 Pa
$h. r.$	40 %	4 %

P_N MPa	t °C	t' °C	ΔM mg	δsen mg
1,002	19,85	19,78	7 000	100
2,502	19,94	19,82	7 500	200
4,002	20,12	19,88	8 000	200
5,002	20,20	19,91	8 200	200
6,002	20,27	19,89	8 500	200
6,002	20,30	19,90	8 500	200
5,002	20,35	19,89	8 300	200
4,002	20,43	19,92	8 300	200
2,502	20,50	19,90	7 700	200
1,002	20,53	19,91	7 100	100

3ª Serie de medida.

Magnitud	Valor	U $k = 2$
t_{amb}	20,5 °C	0,5 °C
P_{amb}	101 325 Pa	200 Pa
$h. r.$	40 %	4 %

P_N MPa	t °C	t' °C	ΔM mg	δsen mg
1,002	19,74	19,75	7 100	100
2,502	19,85	19,76	7 500	200
4,002	19,96	19,83	7 900	200
5,002	20,00	19,84	8 200	200
6,002	20,11	19,86	8 500	200
6,002	20,15	19,86	8 500	200
5,002	20,22	19,86	8 300	200
4,002	20,27	19,87	8 000	200
2,502	20,29	19,90	7 600	200
1,002	20,35	19,90	7 000	100

f) Tratamiento de datos.

- * La presión de referencia para los diferentes puntos se calcula aplicando la ecuación (1).
- * El área efectiva a presión P' y temperatura de referencia (20 °C) para los diferentes puntos de medida se obtiene aplicando la ecuación (2).

De esta manera se obtiene 30 parejas de valores $(P', A(P', 20))_i$, 10 para cada serie de medidas.

1ª Serie de medidas

P' Pa	$A_{(P',20)}$ m^2
1 002 031	$8,064\ 33 \times 10^{-5}$
2 502 043	$8,064\ 36 \times 10^{-5}$
4 002 053	$8,064\ 49 \times 10^{-5}$
5 002 052	$8,064\ 49 \times 10^{-5}$
6 002 027	$8,064\ 53 \times 10^{-5}$
6 001 984	$8,064\ 59 \times 10^{-5}$
5 002 036	$8,064\ 52 \times 10^{-5}$
4 002 030	$8,064\ 51 \times 10^{-5}$
2 502 070	$8,064\ 37 \times 10^{-5}$
1 002 045	$8,064\ 23 \times 10^{-5}$

2ª Serie de medidas

P' Pa	$A_{(P',20)}$ m^2
1 002 012	$8,064\ 52 \times 10^{-5}$
2 502 044	$8,064\ 47 \times 10^{-5}$
4 002 064	$8,064\ 45 \times 10^{-5}$
5 002 043	$8,064\ 45 \times 10^{-5}$
6 002 039	$8,064\ 52 \times 10^{-5}$
6 002 037	$8,064\ 52 \times 10^{-5}$
5 002 056	$8,064\ 48 \times 10^{-5}$
4 002 113	$8,064\ 34 \times 10^{-5}$
2 502 071	$8,064\ 37 \times 10^{-5}$
1 002 026	$8,064\ 38 \times 10^{-5}$

3ª Serie de medidas

P' Pa	$A_{(P',20)}$ m^2
1 002 033	$8,064\ 36 \times 10^{-5}$
2 502 046	$8,064\ 48 \times 10^{-5}$
4 002 050	$8,064\ 49 \times 10^{-5}$
5 002 052	$8,064\ 50 \times 10^{-5}$
6 002 047	$8,064\ 52 \times 10^{-5}$
6 002 045	$8,064\ 52 \times 10^{-5}$
5 002 062	$8,064\ 48 \times 10^{-5}$
4 002 058	$8,064\ 46 \times 10^{-5}$
2 502 056	$8,064\ 42 \times 10^{-5}$
1 002 007	$8,064\ 54 \times 10^{-5}$

Aplicando (43), (44) y (50), obtenemos que:

$$A_{(0,t_0)'} = 8,064\ 35 \times 10^{-5} \text{m}^2 \quad (50)$$

$$A_{(0,t_0)'} \lambda' = 2,9 \times 10^{-16} \frac{\text{m}}{\text{Pa}} \quad (51)$$

$$\lambda' = 3,57 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1} = 3,57 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1} \quad (52)$$

g) Incertidumbres.

A continuación se desarrolla el cálculo de la incertidumbre. La contribución a la incertidumbre de la fuerza aplicada sobre el conjunto pistón cilindro a calibrar y de la presión generada al nivel de referencia del conjunto pistón cilindro a calibrar se desarrolla para el punto de 1,002 MPa, que es el punto más desfavorable; para el resto de puntos se procedería de la misma manera, aunque al final se elegiría como incertidumbre sobre el uso de la ecuación de conversión las de este punto, por ser el más desfavorable.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (6):

Combinando sus distintas contribuciones, según (8):

$$u(F') = \sqrt{\sum u_i^2(y)} = 0,001\ 1\text{N} \quad (53)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (7) se obtienen las contribuciones a la incertidumbre de la presión al nivel de referencia del conjunto pistón cilindro a calibrar:

Tabla 5: Contribuciones a la incertidumbre de la fuerza aplicada sobre el conjunto pistón cilindro a calibrar

Magnitud de entrada X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
C_{MRC}	C_{MRC}	$u(C_{\text{MRC}}) = \frac{U(C_{\text{MRC}})}{k}$	Normal	2	$\frac{2U(C_{\text{MRC}})}{k}$
Repetibilidad	Media de lecturas	$u_{\text{rep}} = \frac{S_{\text{rep}}}{\sqrt{n}}$	Normal	$\frac{1}{m}$	$\frac{S_{\text{rep}}}{m\sqrt{n}}$
Reproductibilidad	Media de medias de los 3 días	$u_R = \frac{S_R}{\sqrt{n}}$	Normal	$\frac{1}{m}$	$\frac{S_R}{m\sqrt{n}}$
Resolución	Escalón del analizador	$u_{\text{res}} = \frac{\text{res}}{\sqrt{n}}$	Rectangular	$\frac{1}{m}$	$\frac{\text{res}}{m\sqrt{n}}$
Linealidad	Ordenada en el origen de la recta	$u_b = \frac{S_b}{\sqrt{n}}$	Normal	$\frac{1}{m}$	$\frac{S_b}{m\sqrt{n}}$
	Pendiente de la recta	$u_m = \frac{S_m}{\sqrt{n}}$	Normal	$\frac{(\bar{y} - b)}{m^2}$	$\frac{(\bar{y} - b)S_m}{m^2\sqrt{n}}$
e_x	-	-	-	-	-

Tabla 6: Contribuciones a la incertidumbre de la presión generada al nivel de referencia del conjunto pistón cilindro a calibrar

Magnitud de entrada X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Masa patón	5,007 101 kg	0,000 025 kg	Normal	200 122	5
Deriva de la masa	0 kg	0,000 012 kg	Rectangular	200 122	2
Masa de sensibilidad	0 kg	0,000 058 kg	Rectangular	200 122	12
Gravedad local	$9,806\ 65\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$5,77 \times 10^{-6}\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Rectangular	$1,02 \times 10^5$	0,59
Densidad del aire	$1,202\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$0,0069\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Rectangular	-127	-0,88
Densidad de las masas	$7920\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$58\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Rectangular	0,019 192	11
Volumen del P/C patrón sometido a empuje	Para este tipo de pistón no aplica				
Densidad de fluido de transmisión	$900\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$58\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Rectangular	0,706	41
Tensión superficial del fluido	$0,032\ 2\ \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$0,0018\ \frac{\text{N}}{\text{m}}$	Rectangular	506	0,91
Longitud de la circunferencia del pistón	0,024 821 3 m	0,000 001 4 m	Rectangular	656,77	0,000 092
Área efectiva del P/C	$4,902\ 77 \times 10^{-5}\ \text{m}^2$	$7,5 \times 10^{-10}\ \text{m}^2$	Normal	-20 438 064 514	-15
Deriva del área efectiva del P/C	0	$2,8 \times 10^{-10}\ \text{m}^2$	Normal	-20 438 064 514	-5,7
Coefficiente de deformación con la presión del P/C	$1,49 \times 10^{-12}\ \text{Pa}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-13}\ \text{Pa}^{-1}$	Rectangular	$1,0 \times 10^{12}$	
Presión nominal	1 002 000 Pa	58 Pa	Rectangular	$-1,5 \times 10^{-6}$	-0,000 087
Coefficiente de dilatación lineal del P/C	$9 \times 10^{-6}\ \text{°C}^{-1}$	$5,2 \times 10^{-7}\ \text{°C}^{-1}$	Rectangular	$9,02 \times 10^{-4}$	0,047
Temperatura	19,91 °C	0,29 °C	Rectangular	-9,02	-2,6
Diferencia de alturas	0,072 m	0,000 058 m	Rectangular	8 814	5,1

Combinando sus distintas contribuciones:

$$u(P') = 46\ \text{Pa} \quad (54)$$

y aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (3) y (5) obtenemos los datos de la tabla 7.

Combinando sus distintas contribuciones se obtiene la incertidumbre típica combinada asociada a la calibración del conjunto pistón cilindro:

$$u(A_{(P',t_0)}) = 3,92 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \quad (55)$$

Una vez obtenida la incertidumbre combinada se calculan los grados de libertad efectivos, ν_{eff} , a partir de la incertidumbre combinada y sus contribuciones mediante la aplicación de la fórmula de Welch-Satterthwaite (11):

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\nu_i}} = 120 \quad (56)$$

A partir de los grados de libertad efectivos y de la Tabla 4 se obtiene el factor k .

$$k = 2,02 \quad (57)$$

Tabla 7: Contribuciones a la incertidumbre de $A'_{(P',t_0)}$

Magnitud de entrada X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Fuerza	80,807 046 N	0,001 1 N	Normal	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-9}$
Presión	1 002 031 Pa	46 Pa	Normal	$8,0 \times 10^{-11}$	$3,7 \times 10^{-9}$
Coficiente de dilatación térmica lineal del P/C	$2,3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$1,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Rectangular	-0,000 4	$-5,3 \times 10^{-10}$
Temperatura del P/C	20 °C	0,29 °C	Rectangular	$-7,3 \times 10^{-10}$	$-2,1 \times 10^{-10}$
Recta de mínimos cuadrados	0	$6,2 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ (*)	Normal	1	$6,2 \times 10^{-10}$

Aplicando (57) obtenemos la incertidumbre expandida, para un intervalo de confianza del 95,45%:

$$U = 7,9 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \quad (58)$$

(*) La incertidumbre típica de la recta de mínimos cuadrados se obtiene aplicando (49):

$$\delta_{LSL} = s = \sqrt{\frac{\sum((A_{(P',t_0)}' i) - (A_{(P',t_0)}'(P' i)))^2}{n - 2}} \quad (59)$$

El instrumento cumple con las especificaciones del fabricante.

h) Resultados.

Los resultados son válidos entre 1 MPa y 6 MPa.

$$A'_{(0,t_0)} = 8,064 3 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (60)$$

$$\lambda' = 3,57 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1} \quad (61)$$

$$A_{(P',t_0)'} = 8,0643 \times 10^{-5} \text{ m}^2 (1 + 3,57 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1} \times P') \pm 7,9 \times 10^{-9} \text{ m}^2, k = 2 \quad (62)$$

Metrología

NIPO: 113-20-002-9