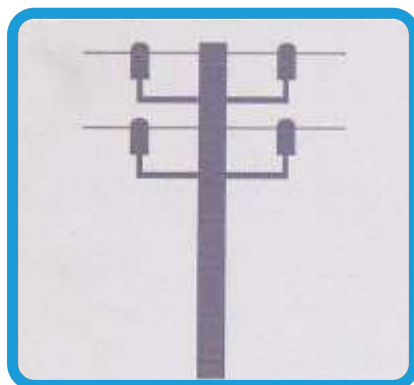
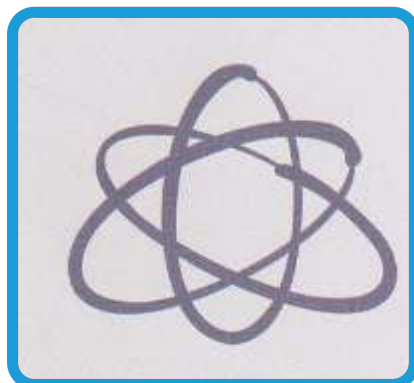
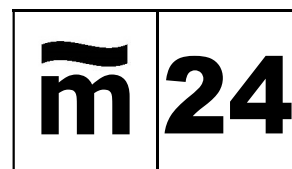


Metrología



PROCEDIMIENTO DI-008
CALIBRACIÓN DE CALIBRES
PIE DE REY



PROCEDIMIENTO DI-008

CALIBRACIÓN DE CALIBRES; PIE DE REY

Rev. 2, 2024

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

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

Contenido

1. OBJETO	3
2. ALCANCE	3
3. DEFINICIONES	4
4. GENERALIDADES	6
5. DESCRIPCIÓN	7
5.1. EQUIPOS Y MATERIALES	7
5.2. OPERACIONES PREVIAS	8
5.3. PROCESO DE CALIBRACIÓN	9
5.4. TOMA Y TRATAMIENTO DE DATOS	11
6. RESULTADOS	12
6.1. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES	12
6.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	13
7. REFERENCIAS	15
8. ANEXOS	16
8.1. ANEXO 1: DESARROLLO DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES	16
8.2. ANEXO 2: EJEMPLO NUMÉRICO DE APLICACIÓN	20

1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto presentar un método para la calibración de calibres pie de rey, codificados como D.02.02 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [4]).

2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a pies de rey, tanto analógicos como digitales, ya que la diferencia entre ellos estriba únicamente en la forma de efectuar la lectura y en la división de escala, pero el procedimiento se puede considerar válido para unos y otros.

Este procedimiento puede utilizarse para pies de rey con división de escala mayor o igual de 0,01 mm y capacidad máxima de medida de 1000 mm.

Entre los diferentes pies de rey indicados quedan incluidos los de lectura analógica mediante nonio (véase fig. 1), los de reloj comparador (véase fig. 2), los que llevan adaptado un sistema mediante tornillo de ajuste fino para aproximación (véase fig. 4) y aquellos en los que, como se ha señalado, la lectura se puede visualizar en una pantalla digital (véase fig. 3 y fig. 4).

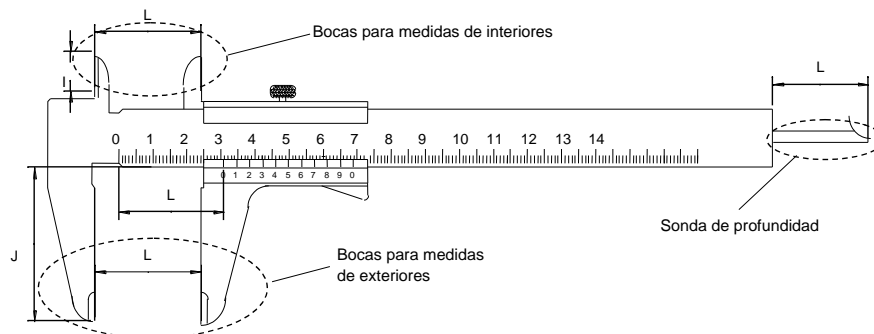


Figura 1 Ejemplo de diseño de un calibre analógico para mediciones de interiores, exteriores y profundidad con dispositivo indicador analógico con escala vernier.

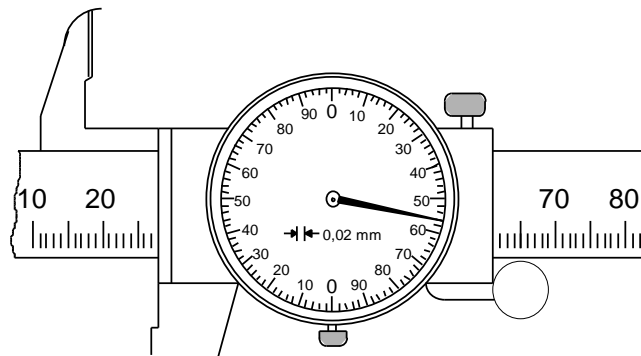


Figura 2 Ejemplo de dispositivo indicador analógico con escala circular

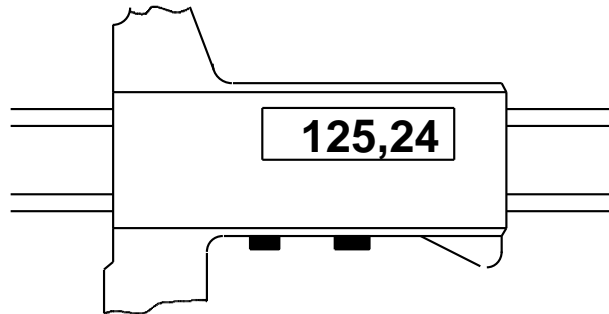


Figura 3 Ejemplo de dispositivo indicador digital con visualizador digital

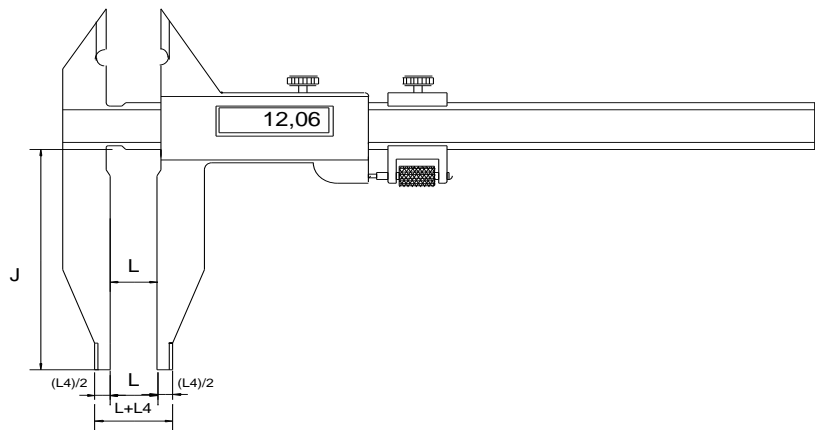


Figura 4 Ejemplo de diseño de calibre con dispositivo de ajuste fino

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones del Vocabulario Internacional de Metrología [1]. Algunas de ellas se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

Calibre o pie de rey [6]

Instrumento de medida que proporciona un valor dimensional de un elemento geométrico interno o externo a partir del contacto en oposición del movimiento de una deslizadera con una boca de medición, moviéndose respecto a una escala de medición sobre un soporte rígido y una boca fija.

Contacto en la cara de medición [6]

Contacto entre la cara de medición y un elemento geométrico de la pieza.

Contacto completo en la cara de medición [6]

Contacto entre el área completa de la cara de medición y un elemento geométrico de una pieza.

Contacto parcial en la cara de medición [6]

Contacto entre un área parcial de la cara de medición y un elemento geométrico de una pieza.

Contacto lineal en la cara de medición [6]

Contacto entre una línea, perpendicular a la longitud de las bocas, sobre la cara de medición y un elemento geométrico de una pieza.

Intervalo de medida, [1] (5.4)

Conjunto de los valores de magnitudes de una misma naturaleza que un instrumento o sistema de medida dado puede medir con una incertidumbre instrumental especificada, en unas condiciones determinadas

NOTA 1 En ciertas magnitudes, se utilizan los términos “rango de medida” o “campo de medida”.

NOTA 2 No debe confundirse el límite inferior de un intervalo de medida con el límite de detección.

Incertidumbre (de medida) [1] (2.26)

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurado, a partir de la información que se utiliza

NOTA 1 La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiamplitud de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada.

NOTA 3 En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

NOTA 4 En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurado. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada

Error de contacto de la superficie parcial, E [6]

Es el error de indicación cuando se emplea el contacto parcial de la cara de medición para medir un patrón de medida usando las caras de medición externas. El error se calcula como la diferencia con su signo entre la indicación del calibre y el valor de referencia del patrón de medición.

Error de desplazamiento de la escala, S [6]

Es el error de indicación cuando se emplea el contacto completo o parcial de la cara de medición para medir un patrón de medida usando otras caras de medición distintas de las externas.

4. GENERALIDADES

Los pies de rey que se consideran en el presente procedimiento son todos aquellos en los que la lectura de los milímetros se efectúa en una regla graduada y que usa un nonio para aumentar la amplificación (véase Figura 5) y llegar a la resolución del mismo, o mediante un indicador analógico con escala circular (véase Figura 6), y también aquellos cuya lectura se puede observar en un visualizador digital (véase Figura 7 y Figura 8).

Además de los pies de rey indicados, también podría aplicarse el fundamento de este procedimiento a aquellos instrumentos que por la forma de efectuar la lectura y diseño podrían asemejarse a pies de rey, siempre y cuando no se disponga de procedimientos específicos para estos instrumentos de medida.

Tipos especiales de pies de rey son aquellos que disponen de mecanismos de ajuste fino, o con doble juego de bocas, unas de ellas para exteriores y otras para interiores (de los denominados de cuchillo) (véase Figura 9), o en el caso más general los conocidos con el nombre de pies de rey universales que, además de los juegos de bocas para exteriores e interiores disponen de una sonda de profundidad (véase Figura 10).

Los pies de rey no tienen límites teóricos del campo de medida (hay pies de rey que pueden medir longitudes de hasta 2000 mm), pero en este procedimiento solo se contemplan pies de rey de campo de medida máximo de 1000 mm. Para aquellos que tengan capacidades superiores, podría aplicarse el presente procedimiento si no se dispone de otro específico con ligeras modificaciones que tengan en cuenta la ampliación del campo de medida.

El procedimiento de calibración que se desarrolla a continuación para la calibración de los pies de rey, se lleva a cabo mediante el uso de patrones materializados de longitud, es decir de bloques patrón longitudinales, codificados como D-01.02 (ref. [4]) o patrones cilíndricos de diámetro (D.01.06 ref. [4]) o columnas de bloques patrón escalonados (D.01.11 ref. [4]).

Los posibles errores que se pueden cometer cuando se mide con un pie de rey son:

- Error de Abbe
- Error de alineamiento
- Error de cero

A) Error de Abbe

Según establece el principio de Abbe “la máxima exactitud puede obtenerse únicamente cuando el patrón está en línea con el eje de la pieza que se está midiendo”.

En el caso del pie de rey, el patrón es el propio instrumento, por lo que el eje de la escala del instrumento y el eje de la pieza que se mide no son coincidentes (ver Figura 11), y si existe cierta holgura de la boca móvil respecto de la regla podríamos tener un error de Abbe (la regla y la boca móvil deberían mantenerse siempre a 90°). Este error podrá comprobarse si en las medidas repetidas que efectuaremos sobre bloques patrón en la calibración vamos modificando la posición del mismo a lo largo de la longitud de las bocas, siempre y cuando la resolución del instrumento lo permita.

Algunos fabricantes incorporan un tornillo de bloqueo a la boca móvil del instrumento (véase fig. 4), con lo que intentan minimizar este error.

$$e_{\text{Abbe}} = H \cdot \text{sen } \beta = H \cdot \beta \text{ (para } \beta \text{ muy pequeño)} \quad (1)$$

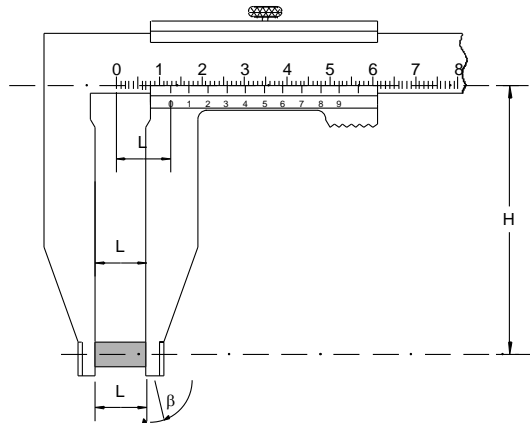


Figura 12 Error de Abbe en un calibre

B) Error de alineamiento

Se puede presentar cuando se mida con el pie de rey y no tengamos la precaución de alinear correctamente la pieza a medir respecto del eje de la escala del instrumento. Este error es difícil de comprobar; se podrá reducir poniendo cuidado a la hora de efectuar las medidas.

C) Error de cero

Este error se puede presentar cuando intentamos hacer cero con el instrumento, es decir, cuando cerramos las bocas de medida. Se podrá comprobar en la calibración del instrumento efectuando medidas repetidas consecutivas sobre el cero. Los pies de rey digitales suelen disponer de un botón de puesta a cero.

Abreviaturas

Las abreviaturas que pueden utilizarse en este procedimiento son:

BPL Bloque Patrón Longitudinal

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de pies de rey se emplearán preferentemente bloques patrón longitudinales (BPL, D.01.02 ref. [4]) y patrones cilíndricos de diámetro (D.01.06 ref. [4]). La utilización de cada uno de ellos y las calidades a emplear estarán en función de las mediciones que debamos realizar posteriormente con el instrumento y de la división de escala del mismo. Los patrones de diámetro interior se pueden sustituir por bloques patrón y accesorios adecuados con los que se puedan materializar medidas de interior.

5.1.1. Calibración de bocas para mediciones de exteriores.

La calibración de las bocas para mediciones exteriores se podrá realizar con BPL de grado 2 o mejor (norma UNE EN-ISO 3650 [5]). También pueden utilizarse barras patrón de extremos (D.01.05 ref. [4]). Para pies de rey de resolución 0,01 mm se usarán bloques patrón de grado 1 o mejor.

5.1.2. Calibración de bocas para mediciones de interiores.

La calibración de las bocas para medición de interiores se podrá realizar con patrones cilíndricos de diámetro interior (D.01.06 ref. [4]) o bien BPL de grado 2 o mejor y accesorios para bloques patrón longitudinales (D.01.03 ref.[4]) que puedan materializar mediciones de interior.

5.1.3. Calibración de sonda de profundidad.

La calibración de la sonda de profundidad se podrá realizar con BPL de grado 2 o mejor y accesorios para bloques patrón longitudinales (D.01.03 ref. [4]).

Nota: Para cualquiera de las calibraciones anteriores 5.1.1, 5.1.2 y 5.1.3, también pueden emplearse columnas de bloques patrón escalonados (D.01.11 ref. [4]).

5.1.4. La calibración también se podría realizar mediante máquina de medida de una coordenada y accesorios adecuados y mediante máquinas de medida de tres coordenadas.

5.1.6 Para el conocimiento de la temperatura ambiente, es recomendable contar con un sensor de temperatura, de resolución igual o inferior a 0,5 °C, situado próximo a la zona de medida. Es aconsejable que la incertidumbre de medida sea igual o mejor de 0,5 °C para $k = 2$.

5.1.7. Se dispondrá de una mesa de planitud (D.06.05 ref. [4]) para situar los bloques patrón a emplear en la calibración del calibre o pie de rey.

5.1.8. Se dispondrá de todo lo necesario para la adecuada limpieza de los patrones e instrumentos que puedan intervenir en la calibración, disponiéndose de paños y tejidos suaves que no suelten fibras y un líquido adecuado (p.ej. mezcla de alcohol y éter dietílico al 50 %). Para no tener que tocar los bloques con los dedos se recomienda utilizar guantes y pinzas de madera.

5.2. Operaciones previas

5.2.1.- Para proceder a la calibración de un pie de rey, éste debe encontrarse perfectamente identificado en lo que se refiere a MARCA, MODELO y NÚMERO DE SERIE. En el caso de que no exista alguno de estos datos, se procederá a la identificación del instrumento de la mejor forma posible (p. ej., mediante etiqueta fuertemente adherida al instrumento), de manera que no exista duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el equipo calibrado y el Certificado emitido.

5.2.2.- La calibración se realizará en un recinto acondicionado, con una temperatura que se mantenga en (20 ± 2) °C.

- 5.2.3.- Se verificará antes de efectuar la calibración que se dispone de todos los patrones y accesorios adecuados para poder efectuarla con garantías.
- 5.2.4.- Se procederá a preparar el conjunto de patrones que van a ser utilizados, limpiándolos cuidadosamente mediante paños y tejidos suaves, que no suelten fibras, y utilizando un producto adecuado.
- 5.2.5.- Una vez limpios, los patrones a emplear y el pie de rey se situarán en la zona de medida, preferiblemente sobre una base metálica, dejándolos estabilizar al menos durante 1 hora. Estos bloques patrón se deberán manipular con pinzas (preferiblemente de madera) o guantes, para evitar en lo posible la transmisión de calor al bloque.
- 5.2.6.- Se comprobará si existen golpes o arañazos en las partes esenciales del pie de rey, así como la legibilidad del nonio o visualizador digital, dependiendo del modelo.
- 5.2.7.- Antes de proceder a la calibración del pie de rey se examinará el correcto funcionamiento de este, así como el estado de las bocas de medición; en particular el desgaste sufrido por las bocas de medida y el perfecto deslizamiento entre las partes móviles. Si se presentara algún problema se deberá examinar ésta con más detalle y reparar antes de la calibración si se considera necesario.

5.3. Proceso de calibración

El proceso de calibración se deberá realizar para cada uno de los palpadores (bocas o sonda) de medida de que disponga el pie de rey.

5.3.1 Calibración de las bocas para medición de exteriores

Para la realización de la calibración de las bocas de medición de exteriores se podrán utilizar BPL, o bien barras patrón de extremos.

Deberá contarse con los patrones adecuados, de tal manera que se puedan materializar entre 5 y 10 longitudes con las que pueda cubrirse el campo de medida del instrumento, repartidas de forma aproximadamente equidistante entre sí (dependiendo de la división de escala, para divisiones de 0,01 mm y 0,02 mm se recomienda elegir 10 puntos de calibración; para los de división de escala 0,05 mm y 0,1 mm pueden elegirse entre 5 y 10 puntos). Deberá incluirse al menos el máximo del rango de medida o mayor o igual al 90 % de este y el mínimo del rango de medida.

Las longitudes materializadas podrán conseguirse mediante adherencia de bloques, pero evitando que estos sean más de cuatro. Se tendrá en cuenta que la suma de sus longitudes será el punto de calibración de la escala requerido.

En cada punto de calibración elegido se deberán realizar 2 medidas repetidas, y posteriormente elegir dos puntos al azar y realizar en ellos 10 medidas repetidas para determinar la repetibilidad.

En cada una de las medidas repetidas se cambiará la posición del bloque a lo largo de la superficie de contacto, para apreciar si hay holgura entre la boca móvil y la regla.

Los errores evaluados en la calibración de las bocas para la medición de exteriores se corresponden con el error de contacto de la superficie parcial, E [6]

5.3.2 Calibración de bocas para medición de interiores

Para la calibración de los bocas para medición de interiores se podrán utilizar BPL y accesorios adecuados (topes, bloques patrón, etc.) para materializar longitudes patrón (véase Figura 13) o bien, según se recoge en 5.1.2, patrones lisos de diámetro interior. En estas medidas se tendrá especial cuidado de alinear correctamente el patrón sobre el que se realiza la medida y el pie de rey.

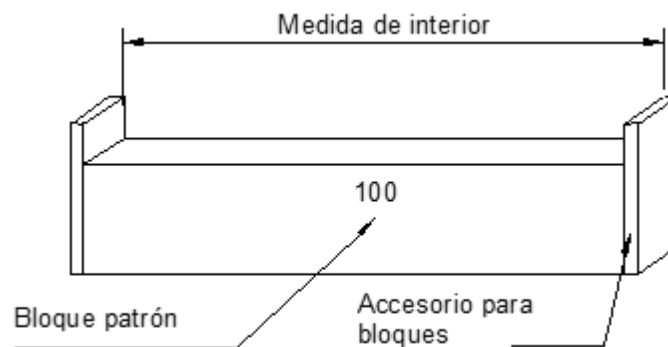


Figura 14 Disposición para la calibración de las bocas para la medida de interiores

Se realizarán 2 ó 3 medidas repetidas sobre dos puntos de calibración dentro del campo de medida del pie de rey para medidas de interiores (si únicamente se desea hacer la calibración para medidas de interiores se procederá como en el punto 5.3.1).

En las medidas de interior empleando un patrón de diámetro interior se tendrá especial cuidado en situarse en el diámetro de éste, observándose entonces la mayor lectura entre las bocas de medida de interiores.

5.3.3. Calibración de la sonda de profundidad

Para la calibración de la sonda de profundidad se podrán utilizar BPL y accesorios para bloques patrón longitudinales (D.01.03 ref. [4]) que permitan materializar profundidades patrón, o bien bloques patrón situados sobre mesas de planitud. La medida de profundidad estará materializada entre la cara de medida del bloque patrón que queda libre y la superficie de la mesa de planitud sobre la que se ha apoyado el bloque (véase fig. 9).

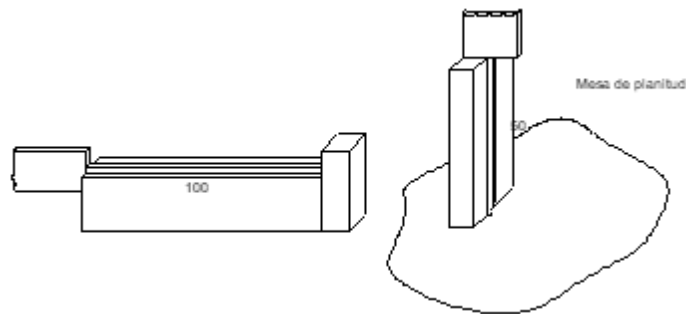


Figura 15 Disposición para la calibración de la sonda de profundidad

Se podrán realizar 2 o 3 medidas repetidas sobre dos puntos de calibración dentro del campo de medida del pie de rey para medidas de profundidad.

En la medida de profundidad se tendrá cuidado de que el instrumento permanezca lo más perpendicular posible a la mesa de planitud y que el contacto con la cara del bloque sea completa entre el bloque y la superficie de apoyo del pie de rey para medidas de profundidad.

Los errores evaluados en la calibración de las bocas para la medición de interiores y la sonda de profundidad se corresponden con el error de desplazamiento de la escala, S [6]

En casos especiales, si el calibre está equipado con más de una escala, por ejemplo dos escalas vernier, la calibración se realizará en el rango de medida del calibre usando cada escala.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Al comienzo y al final de la calibración deben anotarse la temperatura de calibración

5.4.1. Calibración de las bocas para la medición de exteriores

En la toma y tratamiento de los datos se denominará:

l_i a la medida i -ésima en el punto de calibración j -ésimo

n al número de repeticiones en cada punto de calibración

\bar{l}_j valor medio de calibración en el punto j

l_p valor del patrón de medida.

e_e error de indicación para las bocas de medida para exteriores (diferencia entre la lectura del pie de rey y el valor del patrón utilizado en cada punto j)

Se calcularán los siguientes parámetros, utilizando las expresiones que se indican:

1. El valor medio de calibración en el punto j

$$\bar{l}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_{ji} \quad (2)$$

2. El error de indicación para las bocas de medida para exteriores en cada punto j

$$e_e = \bar{l}_j - l_p \quad (3)$$

3. Varianza de repetibilidad

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_{ji} - \bar{l}_j)^2 \quad (4)$$

5.4.2. Calibración de las bocas para la medición de interiores

Se considerarán las mismas denominaciones y criterios planteados en el apartado 5.4.1, excepto el error de indicación, que en este caso será:

$$e_i = \bar{l}_j - l_p \quad (5)$$

5.4.3. Calibración de la sonda de profundidad

Se considerarán las mismas denominaciones y criterios planteados en el apartado 5.4.1, excepto el error de indicación, que en este caso será:

$$e_s = \bar{l}_j - l_p \quad (6)$$

Criterio de aceptación y rechazo

Se puede establecer un criterio de aceptación y rechazo basado en las normas de aplicación [6] y/o [7] fijando unos errores máximos permitidos E_{EMP} y S_{EMP} , bien basado en la recomendación de dichas normas o según las necesidades del laboratorio.

Si se obtienen valores de $e_e > E_{EMP}$ o $e_i > S_{EMP}$ o $e_s > S_{EMP}$ se deberá repetir la calibración y si estos valores persisten se puede sustituir o reparar el calibre o pie de rey o valorar incrementar la incertidumbre de uso del instrumento.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

El cálculo de incertidumbres se realizará aplicando los criterios establecidos en la “Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medida” editada por el Centro Español de Metrología [2] y la guía EA-4/02 “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration” [3].

En el Anexo 1 se incluye el desarrollo del cálculo de incertidumbres y la explicación de cómo se calcula cada contribución a la incertidumbre. A continuación se facilita la tabla resumen a partir de la cual se puede realizar el cálculo de la incertidumbre asociada a la calibración de calibres o pies de rey de acuerdo con este procedimiento.

Se evaluará un balance de incertidumbres por cada una de las bocas que se calibren en un pie de rey.

Tabla 1. Balance de incertidumbres

magnitud de entrada x_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
\bar{l}_j	$\frac{S_j}{\sqrt{n}}$	normal	1	$\frac{S_j}{\sqrt{n}}$
l_p	$\sqrt{\left(\frac{U_{cal}}{k}\right)^2 + \left(\frac{der_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2}$	rectangular	1	$\sqrt{\left(\frac{U_{cal}}{k}\right)^2 + \left(\frac{der_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2}$
δl_d	$\frac{d}{2\sqrt{3}}$	rectangular	1	$\frac{d}{2\sqrt{3}}$
$\bar{\alpha}$	$0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	rectangular	$l\Delta t$	$l\Delta t (0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
Δt	$\sqrt{(1,15 \text{ } ^\circ\text{C})^2 + \left(\frac{U_{calt}}{k}\right)^2 + \left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{der_t}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	rectangular	$l\bar{\alpha}$	$l\bar{\alpha} \sqrt{(1,15 \text{ } ^\circ\text{C})^2 + \left(\frac{U_{calt}}{k}\right)^2 + \left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{der_t}{2\sqrt{3}}\right)^2}$
incertidumbre combinada (u)				$u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida (U)				$U = k \cdot u$

Para determinar la incertidumbre expandida sería conveniente estimar los grados de libertad efectivos, de acuerdo con el anexo de EA-4/02 [3]. Para este tipo de calibraciones es habitual obtener un valor de ν_{eff} alto, lo que nos llevará a un factor de cobertura $k = 2$, para aproximadamente un 95 % de probabilidad.

6.2. Interpretación de resultados

Para el pie de rey se obtiene una **tabla de desviaciones** a los valores convencionalmente verdaderos, proporcionados por los patrones utilizados.

Cada desviación llevará asociada una incertidumbre de calibración, obtenida como se indica en el apartado 6.1., para cada una de las bocas: de exteriores, de interiores y sonda de profundidad, o una incertidumbre única de calibración para el pie de rey, tomando como incertidumbre la máxima de las obtenidas en la calibración de cada boca o sonda de medida.

En el Certificado de Calibración, además de declarar la incertidumbre expandida, se especificará el valor del factor de cobertura k utilizado, calculable a partir de la determinación del número de grados de libertad efectivos.

En las normas para este tipo de instrumentos no se establece clase de calidad, por lo que no se incluirá en clase de precisión alguna, a la vista de las desviaciones obtenidas.

El incumplimiento de los límites de error admisibles para las escalas de alguna de las bocas o la sonda de medida, y el posible deterioro o defecto de las mismas, puede inutilizar el instrumento para su uso, por lo que habrá que volver a calibrarlo o repararlo, según la desviación detectada. Si a pesar de las anomalías detectadas se decidiera seguir utilizando el instrumento, se debería aumentar la incertidumbre de acuerdo con las desviaciones detectadas en la calibración. Si en la calibración posterior se siguen obteniendo resultados similares, o si el defecto que presenta no es solucionable, se deberá sustituir el instrumento, o considerar un uso limitado del mismo.

Un período de tiempo razonable para la recalibración de estos instrumentos puede oscilar entre 1 y 2 años, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente de los resultados de las calibraciones (por ejemplo su estabilidad) y de la frecuencia de uso. El usuario del equipo será siempre el responsable de asignar el período de recalibración, y de revisarlo cuando sea preciso. En este sentido, los plazos debieran disminuirse si se aprecia una discrepancia importante entre calibraciones o si ha ocurrido algún problema grave en el uso del pie de rey (reparación, uso inadecuado, etc.)

7. REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados. 3ª edición 2012 (Ed. VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones), Centro Español de Metrología, 2012.
- [2] Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida., 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO: 706-09-002-6.
- [3] Guide EA-4/02 M: 2013, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Sept. 2013, rev. 01.
- [4] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional. 1ª ed. Centro Español de Metrología, 2005, NIPO: 165-02-003-4.
- [5] Norma UNE-EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón.
- [6] Norma ISO/FDIS 13385-1:2019, Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional measuring equipment — Part 1: Design and metrological characteristics of callipers.
- [7] Norma ISO/FDIS 13385-2:2019, Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional measuring equipment — Part 2: Design and metrological characteristics of calliper depth gauges

8. ANEXOS

8.1. ANEXO 1: Desarrollo del cálculo de incertidumbres

El modelo matemático que representa la calibración de las bocas de medición exteriores, interiores y sonda de profundidad puede representarse de según la siguiente ecuación:

$$e_x = \bar{l}_j - l_p + \delta l_d + l \bar{\alpha} \Delta t \quad (7)$$

siendo:

\bar{l}_j es la lectura del pie de rey en el punto de calibración j-ésimo;

l_p es la longitud real del patrón de referencia;

δl_d es la contribución debida a la división de escala del instrumento;

l es la longitud nominal del punto de calibración;

$\bar{\alpha}$ es promedio de los coeficientes de dilatación térmica de los bloques patrón y del pie de rey, según se especifica en las respectivas normas (para BPL, UNE EN-ISO 3650, ref. [5]). Para el acero se considera $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

Δt es la posible diferencia entre el patrón utilizado y el pie de rey

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres:

$$u^2_c(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (8)$$

Aplicando la ecuación (7) al modelo matemático que representa la calibración, ecuación (8), se obtiene:

$$u^2_c(e_x) = u^2(\bar{l}_j) + u^2(l_p) + u^2(\delta l_d) + (l \Delta t)^2 u^2(\bar{\alpha}) + (l \bar{\alpha})^2 u^2(\Delta t) \quad (9)$$

En esta fórmula se ha considerado la longitud nominal del patrón l y no la longitud real medida, puesto que el valor obtenido de corrección por temperatura es prácticamente igual en un caso y en otro. La contribución por corrección de temperatura del bloque utilizado para el ajuste inicial se considera prácticamente despreciable.

A continuación se describe como pueden estimarse las contribuciones a la incertidumbre suponiendo que se emplean BPL para la calibración del calibre:

a) Debida a la repetibilidad del instrumento, $u(\bar{l}_j)$

De la calibración del instrumento en los diferentes puntos que se han considerado se obtienen unas desviaciones típicas, cuyo valor se tomará para determinar la evaluación de Tipo A de esta incertidumbre

$$u(\bar{l}_j) = \frac{S_j}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Siendo n el número de medidas repetidas que se han realizado en cada punto. Teniendo en cuenta que la desviación típica estimada en base a diez medidas repetidas es más fiable que la obtenida en base únicamente a 2 ó 3 medidas (véase ref. [3]).

b) Debida al patrón utilizado como referencia, $u(l_p)$

En la influencia de los patrones utilizados para la calibración se pueden considerar las siguientes contribuciones:

- Los bloques patrón que se utilicen para la calibración de los pies de rey deberán estar calibrados, por lo que se dispondrá de su certificado de calibración en vigor, en el que figurará la incertidumbre expandida U_{cal} para un determinado factor de cobertura k (por regla general, $k = 2$); por tanto la incertidumbre típica del patrón utilizado para la calibración será:

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k} \quad (11)$$

- Por otro lado, se considerará la posible variación dimensional entre calibraciones, a partir del registro histórico de los bloques (observando las máximas correcciones entre calibraciones), y si no se dispone de este registro histórico, podrá considerarse que la variación es la indicada en la norma UNE EN-ISO 3650 (ref. [5]) para la variación dimensional permitida (ver Tabla 2).

Tabla 2.- Estabilidad dimensional

Grado	Cambios máximos por año permitidos en longitud
K, 0	$\pm (0,02 \mu\text{m} + 0,25 \times 10^{-6} \times L)$
1, 2	$\pm (0,05 \mu\text{m} + 0,5 \times 10^{-6} \times L)$
NOTA - L se expresa en milímetros	

Tomando esta variación máxima como la semi-amplitud de una distribución rectangular, la incertidumbre típica será:

$$u_{der} = \frac{der_{BPL}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

En consecuencia la contribución a la incertidumbre del patrón del patrón de referencia será:

$$u(l_p) = \sqrt{\left(\frac{U_{cal}}{k}\right)^2 + \left(\frac{der_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (13)$$

Nota: Si para la materialización de los diferentes puntos de calibración hubiera que adherir diferentes bloques, como se ha citado, se aconseja no adherir más de 4 bloques, siendo recomendable que estos sean 1 ó 2. La longitud será la suma de sus longitudes. Si utilizamos 4 bloques para materializar cada punto de calibración, la longitud será:

$$l_p = l_{p1} + l_{p2} + l_{p3} + l_{p4} \quad (14)$$

En este caso la incertidumbre típica del patrón será, la suma cuadrática de cada una de las incertidumbres típicas, es decir:

$$u^2(l_p) = u^2(l_{p1}) + u^2(l_{p2}) + u^2(l_{p3}) + u^2(l_{p4}) \quad (15)$$

$$u_c(l_p) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 u^2(l_{p_i})} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{U_{cal_i}}{k}\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \frac{der_i^2}{\sqrt{3}}} \quad (16)$$

c) Debida a la división de escala (resolución), $u(\delta l_d)$

La división de escala del nonio es la resolución del instrumento; en instrumentos digitales es el último dígito significativo. Suponiendo una distribución rectangular de semiamplitud $d/2$, la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_d) = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad (17)$$

d) Debida al coeficiente de dilatación, $u(\bar{\alpha})$

Considerando que tanto el bloque patrón como el pie de rey son del mismo material; es decir, acero, el coeficiente de dilatación que se puede suponer es (según las normas UNE EN-ISO 3650, [5] y ISO/FDIS 13385-1:2019 [6] y ISO/FDIS 13385-2:2019, [7]) $\alpha = 11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. La incertidumbre típica del promedio de los coeficientes de dilatación será, suponiendo una distribución rectangular de semi-amplitud $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para el bloque patrón y el instrumento:

$$\begin{aligned} u(\bar{\alpha}) &= \sqrt{\left(\frac{1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}\right)^2} \\ &= \sqrt{2} \frac{1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}} = 0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned} \quad (18)$$

e) Debida a la diferencia de temperatura entre los bloques patrón y el pie de rey $u(\Delta t)$

En la evaluación de la incertidumbre por la diferencia de temperatura entre los bloques y el pie de rey podremos considerar las siguientes contribuciones:

- Suponiendo que después de una adecuada estabilización, las temperaturas de los bloques patrón utilizados y del pie de rey están dentro de $\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$, la incertidumbre típica, considerando una distribución rectangular de semiamplitud $2 \text{ } ^\circ\text{C}$, será:

$$u(\Delta t) = \frac{2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (19)$$

- Contribución del termómetro utilizado para la lectura de la temperatura. Se considera la incertidumbre proporcionada por la calibración del mismo. Según el certificado del termómetro la incertidumbre expandida de calibración es U_{calt} , para un factor de cobertura k (normalmente $k = 2$). La incertidumbre típica de la calibración será:

$$u_{calt} = \frac{U_{calt}}{k} \quad (20)$$

Además, habrá que considerar la resolución del termómetro (res_t) y la posible deriva del mismo desde que se calibró (der_t), ambos valores tomados como semiamplitudes de distribuciones rectangulares.

En definitiva la contribución a la incertidumbre de la diferencia de temperatura entre los bloques y el pie de rey será:

$$u(\Delta t) = \sqrt{(1,15 \text{ °C})^2 + \left(\frac{U_{calt}}{k}\right)^2 + \left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{der_t}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (21)$$

8.2. ANEXO 2: Ejemplo numérico de aplicación

Calibración de un pie de rey digital de campo de medida 150 mm y resolución 0,01 mm. La calibración se realiza en una sala en la que las condiciones de temperatura se mantienen dentro de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

Se utilizan bloques patrón longitudinales de grado 1. Se eligen 10 bloques para la calibración. El material de los bloques es acero, y la incertidumbre expandida de calibración de los mismos, para $k = 2$, responde a la expresión $U = 0,1\text{ }\mu\text{m} + 1 \times 10^{-6} L$.

La temperatura se mide mediante un sensor de contacto, de resolución 0,5 °C e incertidumbre de calibración $U_t = 1\text{ °C}$, para $k=2$. La deriva observada del sensor es de 0,25 °C.

En las siguientes tablas se incluyen los datos de medición, el tratamiento de los mismos y los resultados.

Tabla 3.- Toma y tratamiento de datos para la calibración de las bocas de exteriores.

Longitud nominal (mm)	0	10	30	50	70	90	110	130	150
Longitud patrón (mm)	0,00	10,00	30,00	50,00	70,00	90,00	110,00	130,00	150,00
Resultados l_{j_i}	0,00	9,99	29,97	50,02	70,00	89,98	109,99	129,99	149,99
	0,01	9,98	29,99	49,99	70,02	89,97	110,00	129,99	149,98
				49,98				129,95	
				49,96				129,99	
				50,01				129,98	
				50,01				129,98	
				50,01				129,96	
				50,04				129,97	
				50,02				129,99	
				50,01				130,00	
Media \bar{l}_j	0,005	9,985	29,980	50,001	70,010	89,975	109,995	129,980	149,985

(mm)									
desv. al patrón D_j (μm)	5	-15	-20	1	10	-25	-5	-20	-15
desv. típica s_j (μm)	7	7	14	23	14	7	7	16	7

Tabla 4.- Toma y tratamiento de datos para la calibración de bocas de interiores.

Longitud nominal (mm)			30		70				
Longitud patrón (mm)			30,00		70,00				
Resultados l_{j_i}			30,00 30,02 30,00		70,02 70,00 69,99				
Media \bar{l}_j (mm)			30,007		70,003				
desv. al patrón D_j (μm)			7		3				
desv. típica s_j (μm)			7		15				

Tabla 5.- Toma y tratamiento de datos para la calibración de la sonda de profundidad.

Longitud nominal (mm)			30		70				
Longitud patrón (mm)			30,00		70,00				
Resultados $l_{j,i}$			30,01 30,02 30,02		70,00 70,02 70,03				
Media \bar{l}_j (mm)			30,017		70,017				
desv.al patrón D_j (μm)			17		17				
desv. típica s_j (μm)			6		15				

EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRES:

Para las bocas de exteriores

Aplicando la tabla de balance de incertidumbres del punto 6.1

donde:

El valor s_i en μm ha sido obtenida a partir de 10 repeticiones en dos puntos de calibración, siendo la peor de ellas $23 \mu\text{m}$ (es más fiable que las realizadas en base a 2 medidas).

$U_{\text{Certif}} = (0,1 \mu\text{m} + 1 \times 10^{-6} L)$ ($k = 2$). Consideraremos la incertidumbre para la longitud máxima (en este caso no se han adherido bloques). $L_{\text{máx}} = 150 \text{ mm}$, luego $U_{\text{Certif}} = 0,25 \mu\text{m}$ ($k = 2$).

$$der_{BPL} = \pm 0,125 \mu\text{m}$$

Tabla 6.- Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de las bocas de medida para exteriores del pie de rey.

magnitud de entrada	incertidumbre típica	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad	contribución a la incertidumbre
X_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
\bar{l}_j	7,273	normal	1	7,273
l_p	0,142	-	-1	- 0,142
δl_d	2,887	rectangular	1	2,887
$\bar{\alpha}$	$0,82 \cdot 10^{-6}$	rectangular	$150 \times 10^3 \times 2 = 300$	0,247
Δt	1,264	-	1,725	2,179
incertidumbre combinada (u)				8,13
Incertidumbre expandida (U)				16,26

$$U = 16,26 \mu\text{m} \text{ (para } k = 2)$$

Podemos redondear a:

$$U = 0,020 \text{ mm (para } k = 2)$$

Las incertidumbres expandidas de calibración indicadas corresponden a incertidumbres típicas multiplicadas por un factor de cobertura $k = 2$ que, para una distribución normal, corresponde a un nivel de confianza del 95 % aproximadamente.

Para el resto de los palpadores se comprueba que los valores son menores que los obtenidos para la calibración de los palpadores para exteriores, por lo que se puede suponer que la incertidumbre expandida para el pie de rey puede ser la obtenida para los palpadores de exteriores.

Si se obtuvieran valores superiores a los de la calibración de las bocas para exteriores se deberían hacer pruebas de repetibilidad en base a 10 medidas repetidas con estos palpadores en particular en el punto donde se aprecia esa discrepancia (para medidas de interiores y para sonda de profundidad), y recalcular la incertidumbre si fuera necesario.

Metrología

NIPO: 218-24-002-3