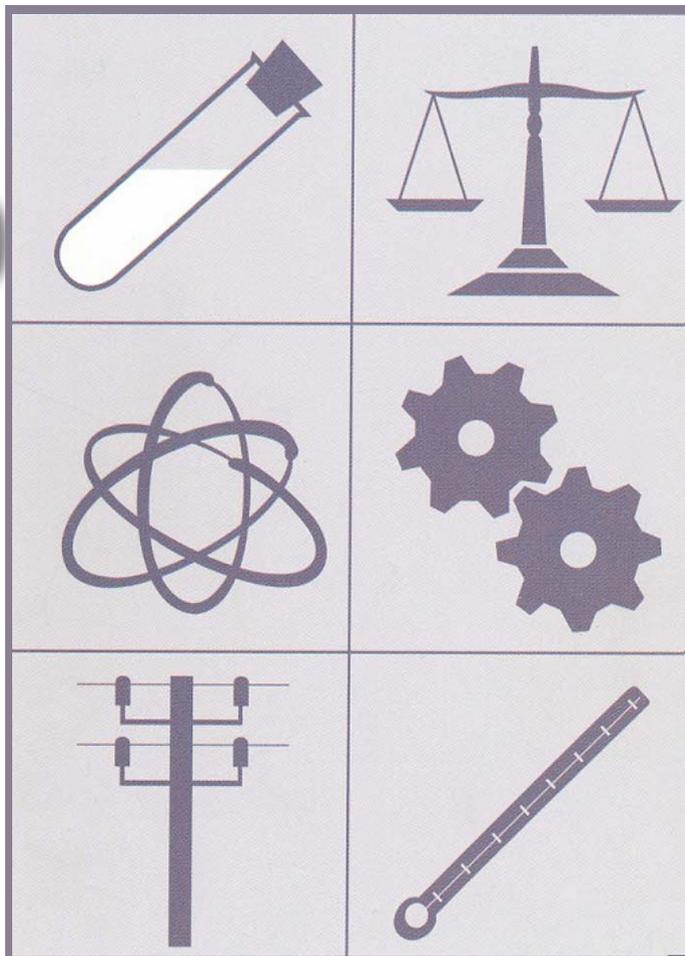


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO DI-008 PARA LA CALIBRACIÓN
DE PIES DE REY

ñ 13



MINISTERIO
DE INDUSTRIA, ENERGÍA
Y TURISMO

CEM
CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

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 anterior en papel.

Este procedimiento de calibración es susceptible de modificación permanente a instancia de cualquier persona o entidad. Las propuestas de modificación se dirigirán por escrito, justificando su necesidad, a cualquiera de las siguientes direcciones:

Correo postal:

Centro Español de Metrología
C/ del Alfar, 2,
28760 Tres Cantos, Madrid

Correo electrónico:

cem@cem.es



ÍNDICE

Página

1. OBJETO.....	4
2. ALCANCE.....	4
3. DEFINICIONES.....	5
4. GENERALIDADES.....	8
5. DESCRIPCIÓN.....	11
5.1. Equipos y materiales.....	11
5.2. Operaciones previas.....	13
5.3. Proceso de calibración.....	19
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	22
6. RESULTADOS.....	24
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	24
6.2. Interpretación de resultados.....	40
7. REFERENCIAS.....	42
8. ANEXOS.....	43

1. OBJETO

El objeto de este procedimiento es proporcionar un método adecuado para la calibración de calibres pie de rey, codificados como D.02.02 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [6]).

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 de 0,1 mm (1/10 mm) y 0,05 mm (1/20 mm), y capacidad máxima de medida de 1000 mm, así como para los de división de escala de 0,02 mm (1/50 mm) y 0,01 mm (1/100 mm), con capacidad máxima de medida de 500 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).

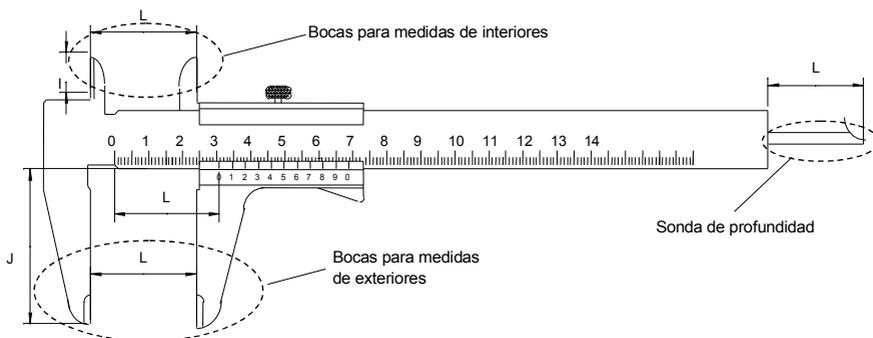


fig. 1



Capacidad de medida [8]

Distancia máxima entre las dos caras de medida exteriores, sin sobrepasar el soporte de corredera de la boca móvil del extremo de la regla.

Escala (de un instrumento de medida) [2] (3.5)

Parte de un instrumento visualizador, que consiste en un conjunto ordenado de marcas, eventualmente acompañadas de números o valores de la magnitud.

Intervalo de indicaciones [2] (4.3)

Conjunto de valores comprendido entre las dos indicaciones extremas.

NOTAS

- 1 El intervalo de indicaciones se expresa generalmente citando el valor inferior y el superior, por ejemplo, 99 V a 201 V.
- 2 Para ciertas magnitudes se utiliza la expresión proveniente del inglés “rango de indicaciones”, mientras que para otras se utiliza “campo de indicaciones”.

Resolución de un dispositivo visualizador [2] (4.15)

Mínima diferencia entre indicaciones visualizadas, que puede percibirse de forma significativa.

NOTA

En instrumentos analógicos se habla de ‘división de escala’, siendo ésta la parte de la escala comprendida entre dos trazos consecutivos cualesquiera. Como resolución suele tomarse la propia división de escala, media división, o incluso 1/3, según sea la distancia entre trazos.

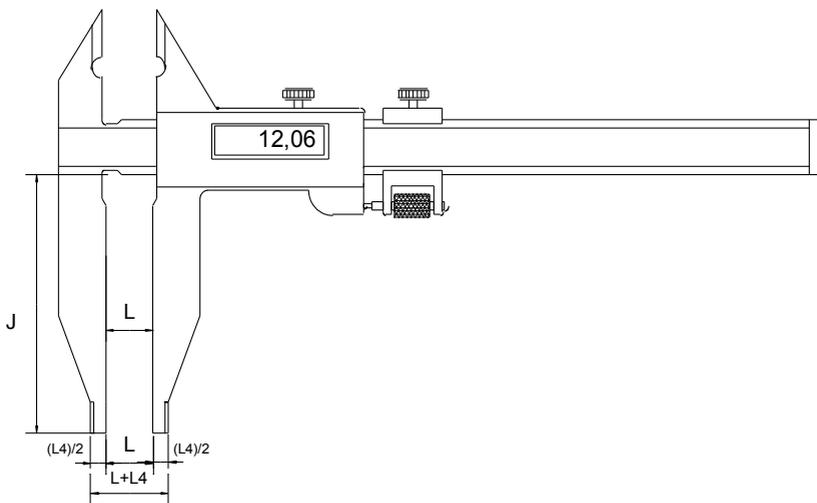


fig. 4

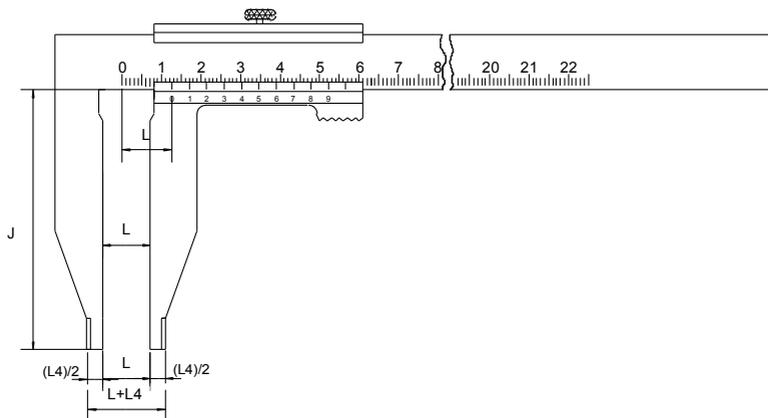


fig. 5



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 fig. 1) y llegar a la resolución del mismo, o mediante un indicador de tipo reloj comparador (véase fig. 2), y también aquellos cuya lectura se puede observar en un visualizador digital (véase fig. 3 y fig. 4).

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 fig. 4), 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 fig. 1).

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.

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. [5]).

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 fig. 6), 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.

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

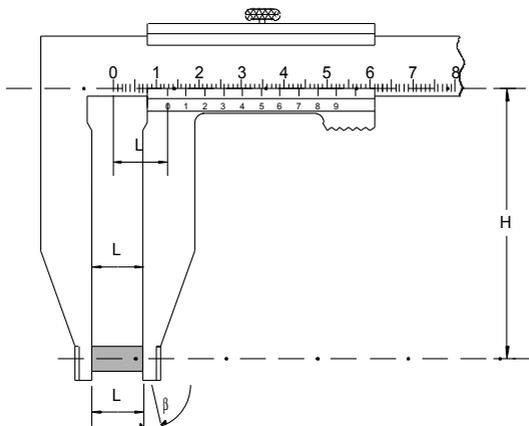




fig. 6

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. [5]) y patrones cilíndricos de diámetro (D.01.06 ref. [5]). 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 [9]). También pueden utilizarse barras patrón de extremos (D.01.05 ref. [5]). 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. [5]) o bien BPL de grado 2 o mejor y accesorios para bloques patrón longitudinales (D.01.03 ref.[5]) 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. [5]).

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. [5])

5.1.4.- Para comprobar el posible desgaste de las bocas de medida se podrá utilizar un proyector de perfiles (D.10.03 ref. [5]) o bien examinando el pie de rey con las bocas cerradas a contraluz.

5.1.5.- La comprobación de la planitud de las superficies de contacto se hará mediante vidrios ópticos plano-paralelos de planitud igual o mejor de 0,5 μm , o con reglas de aristas biseladas (o de filo).

5.1.6.- La comprobación del paralelismo de las superficies de contacto en medidas de exteriores, se podrá hacer mediante bloques patrón situados entre las bocas, en diferentes puntos de su longitud y variando la longitud de los bloques patrón. Asimismo para el paralelismo puede usarse un proyector de perfiles.



- 5.1.7.- La comprobación del paralelismo de las superficies de contacto en medidas de interior se podrá hacer con un micrómetro (D.02.10 ref. [5]).
- 5.1.8.- Para el conocimiento de la temperatura ambiente, es recomendable contar con un sensor de temperatura, de resolución igual o inferior a $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, situado próximo a la zona de medida. Es aconsejable que la incertidumbre de medida sea igual o mejor de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $k = 2$.
- 5.1.9.- La calibración también se podría realizar mediante máquina de medida de una coordenada y accesorios adecuados y mediante máquinas de medida de tres coordenadas.
- 5.1.10.-Para la determinación de la constante L_4 de pies de rey tales como los de las fig. 4 y fig. 5, se pueden emplear micrómetros de exteriores (D.02.10 ref. [5]).
- 5.1.11.-Se dispondrá de una mesa de planitud (D.06.05 ref. [5]) para situar los bloques patrón a emplear en la calibración del pie de rey.
- 5.1.12.-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.

5.2.8.-Para los pies de rey que dispongan de juego de bocas único, para medida de interiores y exteriores (véase fig. 5) o con dos juegos de bocas, una para exteriores y otra para interiores, tipo cuchillo (véase fig. 4), se deberá medir la longitud L_4 (ver fig. 7) mediante una medidora de una coordenada o de tres coordenadas, o mediante un micrómetro de mejor resolución (preferiblemente de resolución 0,001 mm). La longitud del ancho combinado L_4 para medida de interiores debe ser igual a 5 mm, 10 mm o 20 mm. Se realizarán diez medidas, tomando como valor la media de esas medidas.

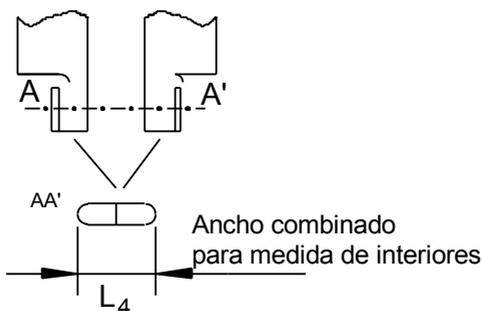


fig. 7

La tolerancia admisible para L_4 , según las normas para pies de rey, UNE 82316 y UNE 82317 (ref. [7] y [8]), es la indicada en la Tabla 1.

Tabla 1. Diferencias máximas admisibles al nominal, de la constante de los palpadores, en pies de rey con bocas comunes para la medida de exteriores e interiores:

División de Escala (mm)	Tolerancia sobre el ancho combinado L_4
-------------------------	---



0,01 y 0,02	+10 μm 0
0,05 y 0,1	+30 μm 0

5.2.9.-Se comprobará la planitud de las bocas de medida, mediante reglas biseladas o vidrios de planitud; los defectos de planitud no deberán superar los valores establecidos en las normas para pies de rey UNE 82316 y UNE 82317 (ref. [7] y [8]); el defecto de planitud para los palpadores, tanto de exteriores como de interiores, debe ser:

a) Pies de rey de división de escala 0,02 mm (consideramos las mismas exigencias para los de división de escala 0,01 mm):

- caras de medida de exteriores $t_{\text{pla}} = 5 \mu\text{m}$ (en toda su longitud).

b) Pies de rey de división de escala 0,05 mm y 0,1 mm :

- caras de medida de exteriores $t_{\text{pla}} = 10 \mu\text{m}$ (por cada 100 mm de su longitud).

5.2.10.-El defecto de paralelismo se examinará efectuando medidas sobre un bloque patrón variando su posición a lo largo de la longitud de las bocas de medida y los valores obtenidos deberán cumplir con lo establecido en las normas para pies de rey UNE 82316 y UNE 82317(refs. [7] y [8]):

a) Pies de rey de división de escala 0,02 mm (se consideran las mismas exigencias para los de división de escala 0,01 mm):

-caras de medida de exteriores $t_{\text{par}} = e/3 \mu\text{m}$ (e: error máximo de indicación admisible) (ver Tabla 2).

-caras de medida de interiores $t_{\text{par}} = 10 \mu\text{m}$ (sobre su longitud).



b) Pies de rey de división de escala 0,05 mm y 0,1 mm:

-caras de medida de exteriores $t_{\text{par}} = 20 \mu\text{m}$ (por cada 100 mm de su longitud, ver Tabla 3).

-caras de medida de interiores $t_{\text{par}} = 10 \mu\text{m}$ (en toda su longitud).



Tabla 2.- Tolerancia máxima de paralelismo para las caras de medida de exteriores t_{par} . Pies de rey de 0,01 mm y 0,02 mm de división de escala:

longitud de medida L (mm)	Tolerancia máx. de paralelismo t_{par} (μm)
0	10
100	10
200	10
300	15
400	15
500	20

Nota: los valores calculados están redondeados a las 5 μm por exceso (refs. [7] y [8])

Tabla 3.- Tolerancia máxima de paralelismo para las caras de medida de exteriores t_{par} . Pies de rey de 0,05 mm y 0,1 mm de división de escala

longitud de medida L (mm)	Mínima longitud de las bocas de medida de exteriores (mm)	Tolerancia máx. de paralelismo t_{par} (μm)
0 a 135	35	10
0 a 160	40	10
0 a 200	50	10
0 a 250	50	10
0 a 300	60	15
0 a 500	80	20
0 a 750	80	20
0 a 1000	100	20

Nota: los valores calculados están redondeados a las 5 μm por exceso (refs. [7] y [8])



5.2.11.- Se comprobará el error de Abbe del pie de rey. Si se tiene la posibilidad de medir el ángulo que puede formar la boca móvil respecto a la regla podrá determinarse este error en función de H , siendo esta la longitud máxima de las bocas de medida. De acuerdo con las normas para pies de rey UNE 82316 y UNE 82317 (refs. [7] y [8]), las longitudes serán las indicadas en la Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4.- Longitudes mínimas de las bocas de medida de exteriores e interiores, para pies de rey de resolución 0,01 mm y 0,02 mm

Capacidad de medida (para exteriores) (mm)	Longitud mínima de las bocas H (mm)	Longitud mínima de las caras de medida para interiores h (mm)
150	30	4
200	40	6
250	50	6
300	50	6
400	55	8
500	55	8

Tabla 5.- Longitudes mínimas de las bocas de medida de exteriores e interiores, para pies de rey de resolución 0,1 mm y 0,05 mm

Capacidad de medida (para exteriores) (mm)	Longitud mínima de las bocas H (mm)	Longitud mínima de las caras de medida para interiores h (mm)
0 a 135	35	6
0 a 160	40	6
0 a 200	50	8
0 a 250	50	10
0 a 300	60	10
0 a 500	80	15
0 a 750	80	15
0 a 1000	100	20



- El error de Abbe para bocas de exteriores será:

$$e_{\text{Abbe}} = H \cdot \sin \beta = H \cdot \beta \text{ (para } \beta \text{ muy pequeño, en radianes)} \quad [1]$$

- El error de Abbe para bocas de interiores:

$$e_{\text{Abbe}} = h \cdot \sin \beta = h \cdot \beta \text{ (para } \beta \text{ muy pequeño, en radianes)} \quad [2]$$

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 palpadores de exteriores

Para la realización de la calibración de los palpadores 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 el máximo (o próximo a él) y el mínimo de la escala.

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.

5.3.2 Calibración de palpadores de interiores

Para la calibración de los palpadores de interiores (o bocas para medidas de interior) se podrán utilizar BPL y accesorios adecuados (topes, bloques patrón, etc.) para materializar longitudes patrón (véase fig. 8) 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.

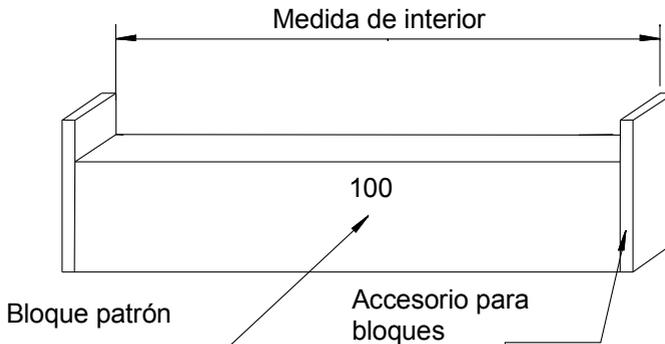


Fig. 8

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 los palpadores de interior del instrumento.

Si en las medidas repetidas se obtuviera un error de indicación superior al indicado en la Tabla 6, se procederá a una calibración como la indicada en el apartado 5.3.1.

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. [5]) 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).

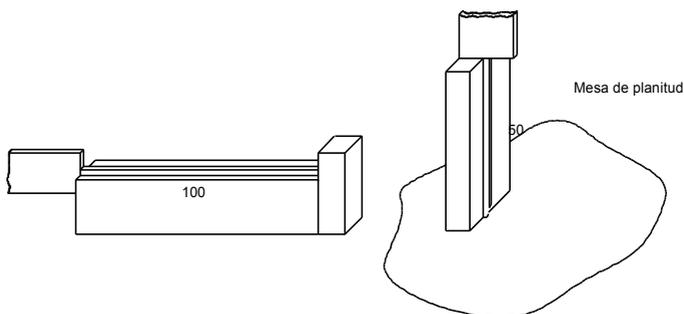


fig. 9



Se podrán realizar 2 ó 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.

Si en las medidas repetidas se obtuviera un error de indicación superior al indicado en la Tabla 6, se procederá a una calibración como la indicada en el apartado 5.3.1.

5.4. Toma y tratamiento de datos

5.4.1.-Calibración de los palpadores de exterior (bocas para exteriores)

En la toma y tratamiento de los datos se denominará:

I_{ji} a la medida *i-ésima* en el punto de calibración *j-ésimo*

n al número de repeticiones en cada punto de calibración

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

1) \bar{I}_j = valor medio de calibración en el punto *j*

$$\bar{I}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ji} \quad [3]$$



- 2) 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)

$$e_e = \bar{l}_j - l_p \quad [4]$$

- 3) Varianza de repetibilidad

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_{ji} - \bar{l}_j)^2 \quad [5]$$

5.4.2.-Calibración de los palpadores de interior (bocas para 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:

$$e_i = \bar{l}_j - l_p \quad [4']$$

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:

$$e_s = \bar{l}_j - l_p \quad [4'']$$

5.4.4.-Tratamiento de los datos

Los errores de indicación obtenidos en la calibración deberán estar dentro de los límites establecidos en la Tabla 6, según se establece en las normas para pies de rey, UNE 82316 y UNE 82317 (refs. [7] y [8]).



Tabla 6.- Error de indicación admisible para pies de rey

longitud de medida L (mm)	Error de indicación admisible, e (μm)	
	0,1 mm y 0,05 mm	0,02 mm y 0,01 mm
0	± 50	± 20
100	± 50	± 30
200	± 70	± 30
300	± 80	± 40
400	± 90	± 40
500	± 100	± 50
600	± 110	-
700	± 120	-
800	± 130	-
900	± 140	-
1000	± 150	-

Este error de indicación es el máximo admisible; si el pie de rey lo supera, se deberá sustituir o reparar. En el certificado de calibración se deberá indicar el error de indicación obtenido y si cumple o no con las exigencias establecidas en las normas indicadas.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

Para la estimación y cálculo de las incertidumbres se seguirá lo establecido en la Guía ISO, o en la Guía EA-4/02 (referencias [3] y [4]).

En el cálculo de incertidumbres que se realice puede asociarse una incertidumbre máxima para todo el campo de medida.



6.1.1 Calibración de las bocas para medida de exteriores

La expresión matemática de la que se parte para la evaluación de la incertidumbre, teniendo en cuenta que se trata de determinar el error de indicación del instrumento en función de las variables de entrada, es:

$$e_e = \bar{l}_j - l_p + \delta l_{pla} + \delta l_{par} + \delta l_{Abbe} + \delta l_d + L\bar{\alpha} \Delta t \quad [5]$$

donde:

\bar{l}_j lectura del pie de rey en cada punto de calibración;

l_p longitud del BPL utilizado como patrón de referencia (según certificado). La longitud real del bloque patrón se usa sin corrección;

δl_{pla} corrección debida al defecto de planitud de las bocas del pie de rey (según norma);

δl_{par} corrección debida al defecto de paralelismo de las bocas del pie de rey (según norma);

δl_{Abbe} corrección debida al posible error de Abbe del pie de rey;

δl_d contribución debida a la división de escala del instrumento;

L longitud nominal del punto de calibración;

$\bar{\alpha}$ 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. [9]). Para el acero se considera $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

Δt posible diferencia de temperatura entre el bloque patrón y el pie de rey.

Según la ley de propagación de incertidumbres, la expresión para la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ (se supone que no existe correlación entre las variables) es:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad [6]$$

Aplicando lo anterior a la calibración del pie de rey, en concreto a la variable de salida e_e :

$$e_e = f(\bar{l}_j, l_p, \delta l_{pla}, \delta l_{par}, \delta l_{Abbe}, \delta l_{dr}, \bar{\alpha}, \Delta t) \quad [7]$$

se tendrá:

$$\begin{aligned} u_c^2(e_e) = & \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{l}_j} \right)^2 u^2(\bar{l}_j) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l_p} \right)^2 u^2(l_p) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l_{pla}} \right)^2 u^2(\delta l_{pla}) + \\ & + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l_{par}} \right)^2 u^2(\delta l_{par}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l_{Abbe}} \right)^2 u^2(\delta l_{Abbe}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l_d} \right)^2 u^2(\delta l_d) + \\ & + \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\alpha}} \right)^2 u^2(\bar{\alpha}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta t} \right)^2 u^2(\Delta t) \end{aligned} \quad [8]$$

operando,

$$\begin{aligned} u_c^2(e_e) = & u^2(\bar{l}_j) + u^2(l_p) + u^2(\delta l_{pla}) + u^2(\delta l_{par}) + u^2(\delta l_{Abbe}) \\ & + u^2(\delta l_d) + (L \Delta t)^2 u^2(\bar{\alpha}) + (L \bar{\alpha})^2 u^2(\Delta t) \end{aligned} \quad [9]$$



En esta fórmula se ha considerado la longitud nominal del bloque 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 especifica cómo se estiman las contribuciones a la incertidumbre final:

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

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

$$u(\bar{I}_j) = \frac{s_j}{\sqrt{n}} \quad [10]$$

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]).

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 será $k = 2$); luego 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. [9]) para la variación dimensional permitida (ver Tabla 7).

Tabla 7.- 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:

$$l_p = l_{p_1} + l_{p_2} + l_{p_3} + l_{p_4} \quad [14]$$

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

$$u^2(l_p) = u^2(l_{p_1}) + u^2(l_{p_2}) + u^2(l_{p_3}) + u^2(l_{p_4}) \quad [15]$$

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

Debida al defecto de planitud, $u(\delta_{pla})$

Según se establece en las normas sobre pies de rey UNE 82316 y UNE 82317 (ref. [7] y [8]), el defecto de planitud para los palpadores, tanto de exteriores como de interiores, debe ser el indicado en 5.2.9:

a) Pies de rey de división de escala 0,02 mm (consideramos las mismas exigencias para los de división de escala 0,01 mm):

- caras de medida de exteriores $t_{pla} = 5 \mu\text{m}$ (en toda su longitud)

b) Pies de rey de división de escala 0,05 mm y 0,1 mm :

- caras de medida de exteriores $t_{pla} = 10 \mu\text{m}$ (por cada 100 mm de su longitud)



Hay que tener en cuenta que las exigencias de planitud son para cada una de las bocas de medidas de exteriores, la fija y la móvil. Según esto y considerando una distribución rectangular de semi-amplitud $t_{\text{pla}}/2$, la desviación típica será:

$$u(\delta l_{\text{pla}}) = \sqrt{\frac{(t_{\text{pla}})_{\text{b.fija}}^2}{12} + \frac{(t_{\text{pla}})_{\text{b.móvil}}^2}{12}} \quad [17]$$

como $(t_{\text{pla}})_{\text{b.fija}} = (t_{\text{pla}})_{\text{b.móvil}}$, se tendrá que:

$$u(\delta l_{\text{pla}}) = \frac{t_{\text{pla}}}{\sqrt{6}} \quad [18]$$

Nota1: Para el caso de la calibración de las caras de medida para interiores y la sonda de profundidad, esta contribución no se tendrá en cuenta pues las normas señaladas no indican exigencias de planitud.

Nota2: Si en la inspección de la planitud se apreciara un valor mayor del defecto, ésta se tendrá en cuenta en la evaluación de esta contribución.

Debida al defecto de paralelismo, $u(\delta l_{\text{par}})$

Según se establece en las normas sobre pies de rey UNE 82316 y UNE 82317 (ref. [7] y [8]), el defecto de paralelismo para los palpadores, tanto de exteriores como de interiores, debe ser el indicado en las Tablas 2 y 3:

Según esto y considerando una distribución rectangular de semi-amplitud $t_{\text{par}}/2$, la desviación típica será:

$$u(\delta l_{\text{par}}) = \frac{t_{\text{par}}}{2\sqrt{3}} \quad [19]$$



Nota: Para el caso de la calibración de la sonda de profundidad esta contribución no se tendrá en cuenta. No se indica esta exigencia en las normas de pies de rey (ref.[7] y [8]).

Debida al posible error de Abbe, $u(\delta_{\text{Abbe}})$

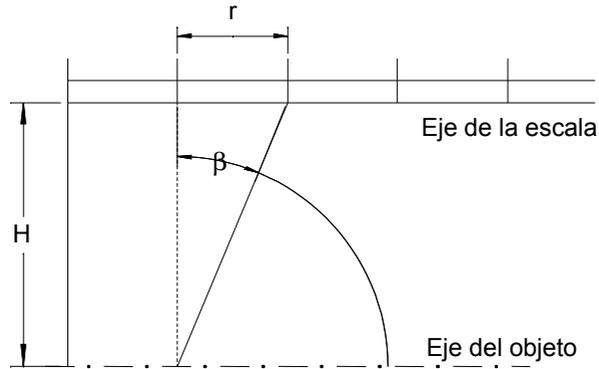
El error de Abbe puede surgir a partir de un posible defecto de perpendicularidad entre la boca móvil de medida de exteriores y la regla. Para la sonda de profundidad este tipo de error teóricamente no se presenta, debido a que el eje de la pieza a medir y el eje de la regla coinciden; para esta última se puede tener un posible error de alineamiento.

Como se indicó en 5.2.11, se deberá, si es posible, determinar el ángulo formado por la boca móvil de medida y la regla del pie de rey, de acuerdo con la fig. 6 (pág. 10). Si no tenemos posibilidad de medir este juego de la boca móvil, podremos suponer que el error de Abbe que se pueda cometer, puede ser aproximadamente igual a:

$$\beta = \arctg \frac{r}{H} \quad e_{\text{Abbe}} = H \cdot \beta \quad [20]$$

siendo:

- r la resolución del pie de rey (división de escala).
- H la longitud de las bocas de medida de exteriores.
- β el ángulo formado por la boca de medida móvil respecto de la regla (en radianes).



Los valores mínimos de H aparecen en las Tablas 4 y 5. Suponiendo una distribución rectangular de semi-amplitud $e_{\text{Abbe}}/2$, la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_{\text{Abbe}}) = \frac{e_{\text{Abbe}}}{2\sqrt{3}} \quad [21]$$

Notas:

- 1 Para el caso de la calibración de las caras de medida de interiores (únicamente si son del tipo cuchillo) los valores de h se indican en las tablas 4 y 5. Para la sonda de profundidad esta contribución no se tendrá en cuenta, pues es despreciable.
- 2 Para la sonda de profundidad se tendrá en cuenta un posible error de alineamiento que podría evaluarse como:

$$u(\delta l_{\text{al}}) = \frac{e_{\text{al}}}{\sqrt{3}} \quad [22]$$

Debida a la división de escala (resolución), $u(\delta l_0)$



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

$$u(\delta l_d) = \frac{d}{2\sqrt{3}} \quad [23]$$

Debida a la temperatura

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, ref. [8] y UNE 82316 y UNE 82317, ref. [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:

$$\begin{aligned} u(\bar{\alpha}) &= \sqrt{\left(\frac{1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}\right)^2} \\ &= \sqrt{2} \frac{1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}} = 0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned} \quad [24]$$

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 ± 2 °C, la incertidumbre típica, considerando una distribución rectangular de semiamplitud 2 °C, será:

$$u(\Delta t) = \frac{2\text{ °C}}{\sqrt{3}} = 1,15\text{ °C} \quad [25]$$

- 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:

$$u_{\text{calt}} = \frac{U_{\text{calt}}}{k} \quad [26]$$

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:

$$u(\Delta t) = \sqrt{(1,15\text{ °C})^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{res_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{der_t}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad [27]$$

A partir de las contribuciones consideradas, puede construirse la Tabla 8 (ref. [4]):

Tabla 8.- Contribuciones a la incertidumbre combinada, para medidas de exteriores

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	s_j / \sqrt{n}	normal	1	s_j / \sqrt{n}
l_p	$\sqrt{\left(\frac{U_{\text{cal}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2}$	rectangular	1	$\sqrt{\left(\frac{U_{\text{cal}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2}$
δl_{pla}	$t_{\text{pla}} / \sqrt{6}$	rectangular	1	$t_{\text{pla}} / \sqrt{6}$
δl_{par}	$t_{\text{par}} / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$t_{\text{par}} / 2\sqrt{3}$
δl_{Abbe}	$e_{\text{Abbe}} / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$e_{\text{Abbe}} / 2\sqrt{3}$
δl_d	$d / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$d / 2\sqrt{3}$
\bar{a}	$0,82 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	rectangular	$L \Delta t$	$L \cdot \Delta t \left(0,82 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}\right)$
Δt	$\sqrt{\left(1,15 \text{ °C}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	rectangular	$L\bar{a}$	$L\bar{a} \sqrt{\left(1,15 \text{ °C}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2}$
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 (ref. [4]). 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.

La expresión de $U_j^2 = k^2 \sum u_i^2(y)$ queda pues como sigue:

$$U_j^2 = k^2 \left(\left(\frac{s_j}{\sqrt{n}} \right)^2 + \left(\frac{U_{\text{cal}}}{k} \right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{t_{\text{pla}}}{\sqrt{6}} \right)^2 + \left(\frac{t_{\text{par}}}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{e_{\text{Abbe}}}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{d}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right) + \left(L \cdot \Delta t \cdot 0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \right)^2 + (L\bar{a})^2 \left((1,15 \text{ } ^\circ\text{C})^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k} \right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right) \quad [28]$$

Nota: Si el pie de rey dispone de juego de bocas único, para medida de interiores y exteriores (véase fig. 5) o de dos juegos de bocas, una para exteriores e interiores y otra para exteriores, tipo cuchillo (véase fig. 4), se deberá medir la longitud L_4 (ver fig. 7). Habría que incluir la contribución a la incertidumbre de la medida de esta longitud, con dos contribuciones:

- Debida a la repetibilidad de las diez medidas que se deben realizar:

$$u(L_4) = \frac{s_j}{\sqrt{n}} \quad [29]$$

- Debida al certificado de calibración del instrumento utilizado para la medida de L_4

Estas contribuciones se sumaran cuadráticamente al resto de las incertidumbres.

6.1.2.- Calibración de las bocas de medida para interiores

Las contribuciones serán las mismas que para el caso de las bocas de medida para exteriores, pero considerando que la debida a la planitud no se tendrá en cuenta.

Para la determinación de la incertidumbre típica de repetibilidad se tomará la desviación típica máxima obtenida en la calibración de las bocas para exteriores (salvo que se decida calcular la repetibilidad para estas bocas realizando 10 observaciones repetidas en algún punto).

A partir de las contribuciones consideradas, puede construirse la Tabla 9 (ref. [4]):

Tabla 9.- Contribuciones a la incertidumbre combinada, para medidas de interiores

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	s_j / \sqrt{n}	normal	1	s_j / \sqrt{n}
l_p	$\sqrt{\left(\frac{U_{\text{cal}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2}$	rectangular	1	$\sqrt{\left(\frac{U_{\text{cal}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2}$
δl_{par}	$t_{\text{par}} / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$t_{\text{par}} / 2\sqrt{3}$
δl_{Abbe}	$e_{\text{Abbe}} / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$e_{\text{Abbe}} / 2\sqrt{3}$
δl_d	$d / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$d / 2\sqrt{3}$
$\bar{\alpha}$	$0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	rectangular	$L \Delta t$	$L \cdot \Delta t \left(0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\right)$
Δt	$\sqrt{\left(1,15 \text{ } ^\circ\text{C}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	rectangular	$L \bar{\alpha}$	$L \bar{\alpha} \sqrt{\left(1,15 \text{ } ^\circ\text{C}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2}$
incertidumbre combinada (u)				$u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida (U)				$U = k \cdot u$

La expresión de U^2 queda pues como sigue:

$$U_j^2 = k^2 \sum u_i^2(y)$$

$$= k^2 \left(\left(\frac{s_j}{\sqrt{n}} \right)^2 + \left(\frac{U_{\text{cal}}}{k} \right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{t_{\text{par}}}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{e_{\text{Abbe}}}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{d}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(L \cdot \Delta t \cdot 0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \right)^2 + (L \bar{\alpha})^2 \left(\left(1,15 \text{ } ^\circ\text{C} \right)^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k} \right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right) \right) \quad [30]$$



6.1.3.- Calibración de la sonda de profundidad

Las contribuciones serán las mismas que para el caso de las bocas de medida para exteriores pero teniendo en cuenta que las debidas a la planitud y el paralelismo no se tendrán en cuenta, al igual que el posible error de Abbe; en su lugar se evaluará un posible error de alineamiento e_a .

Para la determinación de la incertidumbre típica de repetibilidad se tomará la desviación típica máxima obtenida en la calibración de las bocas para exteriores (salvo que se decida calcular la repetibilidad para estas bocas realizando 10 observaciones repetidas en algún punto).

A partir de las contribuciones consideradas, puede construirse la Tabla 10 (ref. [4]):

Tabla 10.- Contribuciones a la incertidumbre combinada, para sonda de profundidad

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	s_j / \sqrt{n}	normal	1	s_j / \sqrt{n}
l_p	$\sqrt{\left(\frac{U_{\text{cal}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2}$	rectangular	1	$\sqrt{\left(\frac{U_{\text{cal}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2}$
δl_{al}	$e_{al} / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$e_{al} / 2\sqrt{3}$
δl_d	$d / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$d / 2\sqrt{3}$
$\bar{\alpha}$	$0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	rectangular	$L \Delta t$	$L \cdot \Delta t \left(0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\right)$
Δt	$\sqrt{\left(1,15 \text{ } ^\circ\text{C}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	rectangular	$L\bar{\alpha}$	$L\bar{\alpha} \sqrt{\left(1,15 \text{ } ^\circ\text{C}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2}$
incertidumbre combinada (u)				$u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida (U)				$U = k \cdot u$

La expresión de U^2 queda pues como sigue:

$$\begin{aligned}
 U_j^2 &= k^2 \sum u_i^2(y) = \\
 &= k^2 \left(\left(\frac{s_j}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{cal}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{e_{al}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{d}{2\sqrt{3}}\right)^2 \right. \\
 &\quad \left. + \left(L \cdot \Delta t \cdot 0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\right)^2 + (L\bar{\alpha})^2 \left(\left(1,15 \text{ } ^\circ\text{C}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}}\right)^2 \right) \right)
 \end{aligned}$$

[31]



Como incertidumbre para el pie de rey calibrado puede decidirse tomar la incertidumbre máxima de las calculadas para los tres casos.

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] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 2, Tres Cantos, Madrid. Año 2000.
- [2] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados. 3ª ed. en español (traducción de 3ª ed. en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO 706-09-001-0.
- [3] 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.
- [4] EA-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European Cooperation for Accreditation (EA), Diciembre 1999.
- [5] EA-4/02-S1, Supplement 1 to EA-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Examples, European Cooperation for Accreditation (EA), Ed. 1, 28 pgs., 1997.
- [6] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional. 1ª ed. Centro Español de Metrología, 2005, NIPO: 165-02-003-4.
- [7] Norma UNE 82316 para pies de rey con división de escala de 0,1 mm y 0,05 mm. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [8] Norma UNE 82317 para pies de rey con división de escala de 0,02 mm. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- [9] Norma UNE-EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. Asociación Española de Normalización (AENOR)



8. ANEXOS

8.1. Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito.

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 $U = 0,1\text{ }\mu\text{m} + 0,001 L$, donde L representa la longitud en mm.

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

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



Tabla 11.- 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 (mm)	0,005	9,985	29,980	50,001	70,010	89,975	109,995	129,980	149,985	
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 12.- 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 13.- 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				



INCERTIDUMBRES:

Para las bocas de exteriores

La incertidumbre asociada a las bocas para medidas de exteriores se obtiene aplicando la expresión (28), para un factor de cobertura $k = 2$:

$$U_j^2 = k^2 \left(\left(\frac{s_j}{\sqrt{n}} \right)^2 + \left(\frac{U_{\text{cal}}}{k} \right)^2 + \left(\frac{\text{der}_{BPL}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{t_{\text{pla}}}{\sqrt{6}} \right)^2 + \left(\frac{t_{\text{par}}}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{e_{\text{Abbe}}}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{d}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right) + \left(L \cdot \Delta t \cdot 0,82 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \right)^2 + (L\bar{\alpha})^2 \left((1,15 \text{ } ^\circ\text{C})^2 + \left(\frac{U_{\text{calt}}}{k} \right)^2 + \left(\frac{\text{res}_t}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{\text{der}_t}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right) \quad [28]$$

donde:

s_j (en μm) ha sido obtenida a partir de 10 repeticiones en dos puntos de calibración, siendo la peor de ellas 23 μm (es mas 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 $U_{\text{Certif}} = 0,25 \mu\text{m}$ ($k = 2$).

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

$$t_{\text{pla}} = 5 \mu\text{m}$$

$$t_{\text{par}} = 10 \mu\text{m}$$

β (ángulo que forma la boca móvil respecto a la regla) = 0,0015 rad

H (Tabla 4) = 30 mm

$$e_{\text{Abbe}} = 30 \text{ mm} \times 0,0003 \text{ rad} = 0,010 \text{ mm} = 10 \mu\text{m}$$

$$d = 10 \mu\text{m}$$



$$\alpha_p = 11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{y} \quad \delta\alpha_p = 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Luego, sustituyendo en la ecuación (28):

$$U = 18,12 \text{ } \mu\text{m (para } k = 2)$$

que podremos 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.

Tabla 14.- Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de las bocas de medida para exteriores del pie de rey.

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	7,273	normal	1	7,273
l_p	0,142	-	-1	- 0,142
δl_{pia}	2,041	rectangular	1	2,041
δl_{par}	2,887	rectangular	1	2,887
δl_{Abbe}	2,887	rectangular	1	2,887
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)				9,06
Incetidumbre expandida (U)				18,12



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 de acuerdo a las expresiones (30) ó (31).

