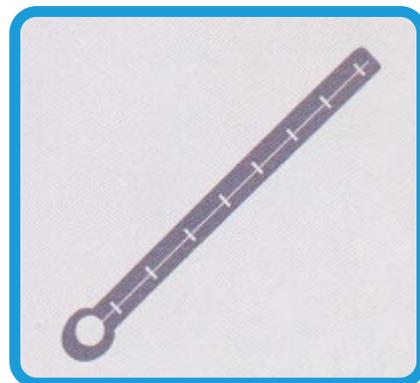
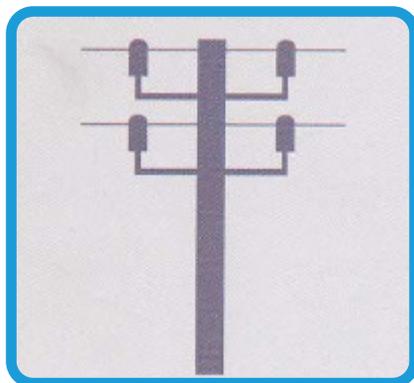
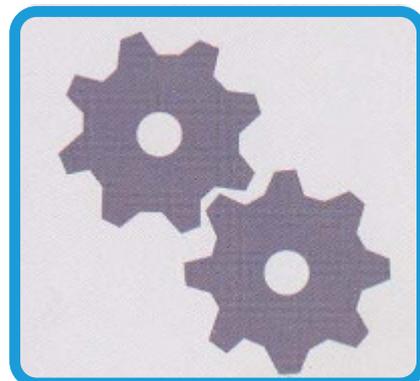
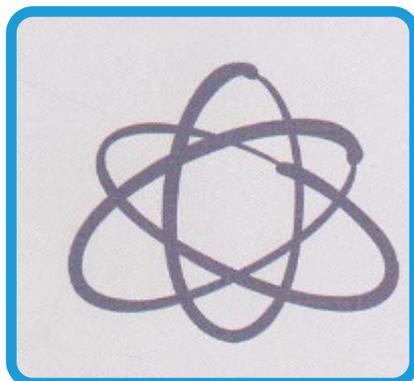
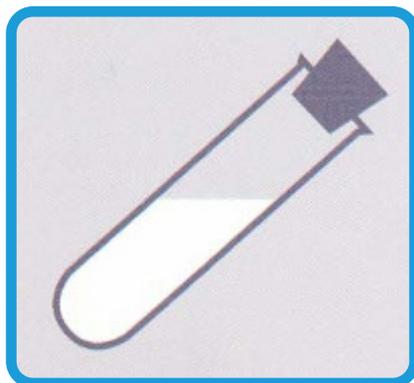
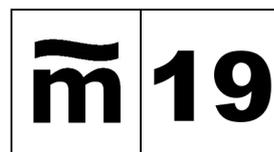


Metrología



PROCEDIMIENTO DI-014 PARA LA
CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN
LONGITUDINALES POR COMPARACIÓN



PROCEDIMIENTO DI-014

CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN LONGITUDINALES POR COMPARACIÓN

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
1. OBJETO	3
2. ALCANCE	3
3. DEFINICIONES	3
4. GENERALIDADES.....	5
5. DESCRIPCIÓN	6
5.1. Equipos y materiales	6
5.2. Operaciones previas.....	8
5.3. Proceso de calibración.....	11
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	13
6. RESULTADOS.....	15
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	15
6.2. Interpretación de resultados	22
7. REFERENCIAS.....	23
8. ANEXO	24
8.1. Ejemplo numérico de calibración de bloques patrón por comparación mecánica	24

1. OBJETO

El objeto de este procedimiento es proporcionar un método adecuado para la calibración de bloques patrón longitudinales codificados como D.01.02 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [5]).

2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a los bloques patrón longitudinales de sección rectangular y grados de calidad 0, 1 y 2, de longitudes nominales l_n inferiores o iguales a 100 mm, por comparación mecánica con otros de calidad superior.

Este procedimiento es válido para la calibración de bloques patrón longitudinales de cualquier material (los más ampliamente comercializados son de acero, metal duro y cerámica).

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones de la referencia [2]. Algunas de ellas se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

Adherencia [7]

Propiedad de las caras de medida de los bloques patrón, que les permite unirse a otras caras de medidas de otros bloques o a superficies de similar acabado superficial, como resultado de fuerzas moleculares.

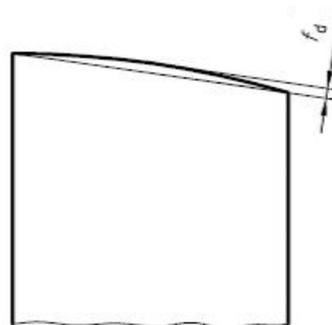
Bloque patrón [7]

Medida materializada de sección rectangular, fabricada en material resistente al desgaste, con dos caras de medidas planas y paralelas entre sí, las cuales pueden adherirse a las caras de medida de otros bloques patrón para formar composiciones de bloques, o a superficies de bases auxiliares, de similar acabado superficial para la medición de longitudes.

Desviación de planitud f_d [7]

Mínima distancia entre dos planos paralelos entre los cuales se encuentran todos los puntos de la cara de medida. Véase Figura 1.

Figura 1: Desviación f_d de planitud



Desviación de la longitud de cualquier punto respecto de la longitud nominal e [7]

Diferencia algebraica $l - l_n$

Longitud central de un bloque patrón l_c [7]

Longitud de un bloque patrón considerando el punto central de la cara de medida libre. Véase Figura 2.

NOTA: La longitud l_c es un caso especial de la longitud l .

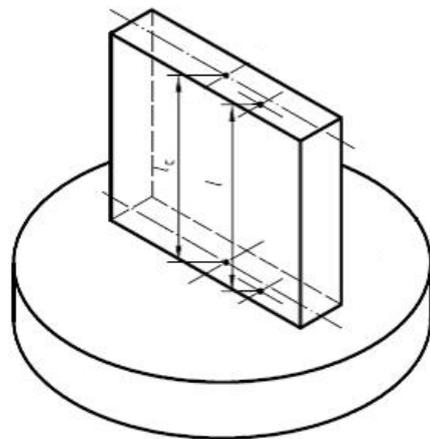
Longitud de un bloque patrón l [7]

Distancia perpendicular entre cualquier punto de una cara de medida y la superficie de una base auxiliar del mismo material y acabado superficial, a la cual la otra cara de medida ha sido adherida. Véase Figura 2.

NOTAS:

1. La longitud del bloque patrón, l , incluye el efecto de adherencia de una de las caras.
2. La longitud, l , es una magnitud física que está formada por un valor numérico y una unidad de longitud (p.ej. metro, milímetro o micrómetro). Si únicamente se considera el valor numérico (p.ej. en tablas), las unidades deberán indicarse explícitamente.

Figura 2: Longitud central l_c y longitud l en cualquier punto de un bloque patrón adherido sobre la superficie plana de una base auxiliar



Medida materializada [2] (3.6)

Instrumento de medida que reproduce o proporciona de manera permanente durante su utilización, magnitudes de una o varias naturalezas, cada una de ellas con un valor asignado.

EJEMPLOS:

- a) pesa patrón;
- b) medida de volumen (proporcionando uno o más valores, con o sin escala de valores);
- c) resistencia eléctrica patrón;
- d) regla graduada;
- e) bloque patrón;

- f) generador de señales patrón;
- g) material de referencia certificado.

Resolución (de un dispositivo visualizador) [2] (4.15)

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

Valor nominal [2] (4.6)

Valor redondeado o aproximado de una magnitud característica de un instrumento o sistema de medida, que sirve de guía para su utilización apropiada.

EJEMPLOS:

- a) el valor 100 Ω marcado sobre una resistencia patrón;
- b) el valor 1000 ml marcado con un trazo sobre un recipiente graduado;
- c) el valor 0,1 mol/L de concentración de cantidad de sustancia en una solución de ácido clorhídrico, HCl;
- d) el valor -20 °C de temperatura Celsius máxima de almacenamiento.

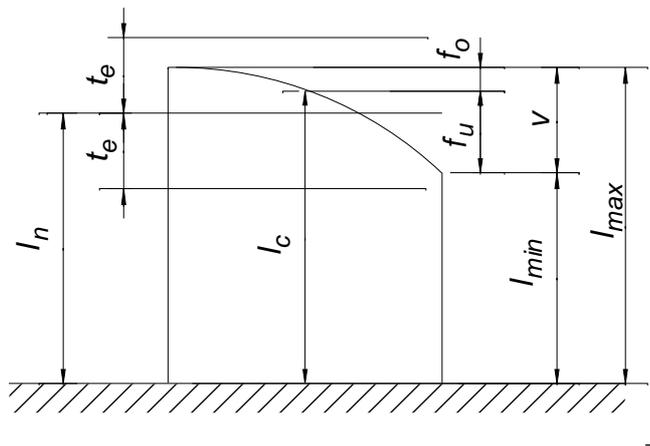
Variación de longitud v [7]

Diferencia entre la máxima longitud l_{\max} y la mínima longitud l_{\min} . Véase Figura 3. $f_o = l_{\max} - l_c$; $f_u = l_c - l_{\min}$

NOTA:

La variación de longitud es igual a la suma de las desviaciones f_o y f_u respecto a la longitud central.

Figura 3: Longitud nominal l_n , longitud central l_c , variación v con f_o y f_u y desviaciones límite t_e para la longitud en cualquier punto, referida a la longitud nominal



4. GENERALIDADES

Los bloques patrón longitudinales que se consideran en el presente procedimiento, son los de longitudes nominales inferiores o iguales a 100 mm. Estos bloques patrón se fabrican en diferentes materiales, tales como acero, metal duro, cerámica y de una aleación especial denominada comercialmente croblox (aleación especial de carburo de cromo).

Los bloques de calidad 0, 1 y 2 de longitud nominal igual o inferior a 100 mm se deberán calibrar en posición vertical.

El procedimiento de calibración que se desarrolla a continuación para la calibración de los bloques patrón, se lleva a cabo mediante el uso de un comparador electro-mecánico para bloques patrón, en el que se mide la diferencia de su longitud central respecto a la de un bloque patrón de referencia y se suma algebraicamente a esta última. En el palpado, las caras de medida de cada bloque patrón se tocan desde direcciones opuestas, tal como se ve en la Figura 4, midiéndose la diferencia de longitud mediante un indicador de alta resolución, normalmente de tipo inductivo.

Los bloques que se utilicen de referencia serán, en lo posible, del mismo material que los que se desean medir; si no fuera así se deberán efectuar las correcciones correspondientes por deformación y por temperatura. Hay que tener en cuenta que la comparación de materiales diferentes conlleva una nueva influencia en la incertidumbre que aumentará esta última, así como un cuidado más estricto en las condiciones ambientales, por presentar coeficientes de dilatación diferentes. En este caso se requiere un conocimiento de las temperaturas de uno y otro bloque y una corrección por la misma que afectará al resultado de la medida.

Abreviaturas

Las abreviaturas que se utilizan en este procedimiento son:

BPL	Bloque Patrón Longitudinal.
l_n	Longitud nominal.
l_c	Longitud central del bloque patrón.
$f_o = l_{max} - l_c$	diferencia entre la longitud máxima y la longitud central.
$f_u = l_c - l_{min}$	diferencia entre la longitud central y la longitud mínima.
$v = l_{max} - l_{min}$	Variación en longitud, diferencia entre la longitud máxima y la longitud mínima.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de BPL se emplearán preferentemente bancos comparador de bloques patrón, de doble palpador inductivo (Banco Comparador de bloques patrón) para bloques de $l_n \leq 100$ mm.

NOTA:

La calibración de BPL de grado de calidad 2 pueden realizarse por comparación mediante un palpador de tipo inductivo y una mesa de medición equipada con columna suficientemente rígida (D.03.03, ref. [5]).

Los bloques utilizados como referencia serán de grado de calidad igual a mejor que los que se pretenden calibrar y de igual material (si se utilizaran materiales diferentes habrá que tener en cuenta las correcciones por diferente deformación y por coeficientes de dilatación distintos).

5.1.1. Calibración mediante banco comparador de bloques patrón

Los bloques se calibran utilizando un comparador electro-mecánico de doble palpador inductivo. Un comparador electro-mecánico de bloques patrón consta de una columna, una mesa de medida, el dispositivo posicionador del bloque, dos palpadores inductivos conectados a un indicador electrónico de alta resolución (ver Figura 4). Este banco

deberá estar calibrado de acuerdo con la guía EURAMET cg-2, Calibración de Comparadores de Bloques Patrón (ref. [8]) y con certificado en vigor.

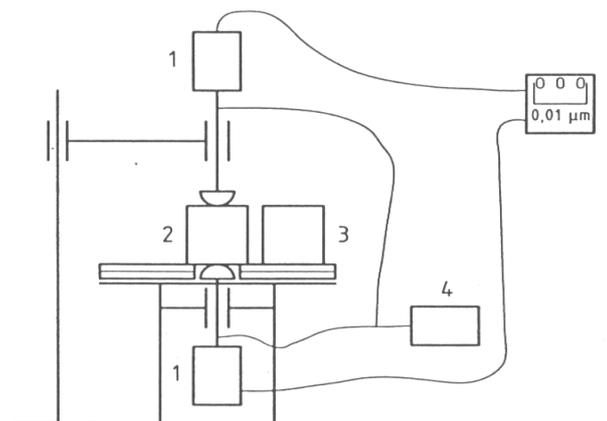
5.1.2. Bloques patrón longitudinales

Para la calibración de los bloques se utilizarán como referencia bloques patrón de calidad igual o mejor (por ejemplo los bloques de grado de calidad 0 se calibrarán con bloques de grado K, y los de grado 1 con bloques de grado 0 o K), de los que se dispondrá de su certificado de calibración.

5.1.2. Planitud de las caras de medida

Para la comprobación de la planitud de las caras de medida de los bloques se utilizarán vidrios de planitud plano-paralelos de planitud igual o mejor de $0,1 \mu\text{m}$, y una lámpara de luz monocromática. La lámpara de luz monocromática emite una luz de longitud de onda conocida y que se utiliza para poder apreciar las franjas de interferencia. Cuando la superficie plana es vista bajo la luz monocromática un plano inclinado un ángulo pequeño de la superficie que se analiza respecto de la superficie del cristal, se aprecian bandas coloreadas de interferencia. Cada banda indica una diferencia de altura de la superficie del cristal y la de la superficie que se analiza. Cualquier curvatura de estas bandas indica que la superficie es ligeramente cóncava o convexa (ver Figura 4).

Figura 4: Ejemplo de comparador de bloques patrón de hasta 100 mm



Leyenda:

- 1 Indicador electrónico de alta resolución
- 2 Bloque patrón de referencia
- 3 Bloque patrón a calibrar
- 4 Dispositivo elevador

5.1.3. Condiciones ambientales

Para el conocimiento de la temperatura ambiente, y la temperatura de los bloques (se recomienda si se quiere asegurar incertidumbres bajas) es aconsejable contar con un termómetro de resolución igual o inferior a $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (es aconsejable que la incertidumbre de medida del termómetro sea igual o mejor de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, para $k=2$), situado próximo a la zona de medida y si es posible en los bloques a calibrar.

5.1.4. Examen de los bloques

Para la inspección visual de los bloques se puede utilizar una lupa o un microscopio.

5.1.5. Material de limpieza

Se dispondrá de todo lo necesario para la adecuada limpieza de los patrones, para lo cual se dispondrá 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 deberán coger estos con guantes o pinzas (a ser posible de madera).

5.2. Operaciones previas

Para proceder a la calibración de bloques patrón longitudinales, sería recomendable que estos estén perfectamente identificados, de la siguiente forma:

1. Cada bloque patrón deberá llevar grabada, de forma permanente, su longitud nominal en milímetros y su identificación individual.
2. Si sobre el bloque patrón se indica su grado, deberán llevar las siguientes marcas (según norma UNE EN-ISO 3650) (ref. [7]):

- grado calibración K:	K
- grado 0:	0
- grado 1:	—
- grado 2:	=

La calibración se realizará en un recinto acondicionado, con una temperatura que se mantenga $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$, si es por comparación mecánica para la calibración de bloques de grado de calidad 0 con K y para 1 con grado 0 (para el resto de calidades puede realizarse en salas con $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$).

Se verificará antes de efectuar la calibración que se dispone de todo lo necesario para poder efectuarla con garantías, de acuerdo con lo indicado en el apartado 5.1.

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.

Para los bloques a calibrar, se comprobará si existen golpes o arañazos tanto en las caras de medida de los bloques como en sus laterales. Los defectos e incidencias detectadas se anotarán en hoja de datos. Se deberá prestar especial atención a la existencia de rebabas en las aristas de las caras de medida, pues estas pueden ocasionar daños al intentar adherir estos bloques en su uso posterior.

Mediante un vidrio plano-paralelo se comprobará la planitud de las caras de medida y la calidad de la adherencia de las mismas. Para lo cual se deberán limpiar los bloques y se pondrá apoyada en la cara de medida del bloque el vidrio y se examinará bajo luz monocromática las franjas de interferencia que se producen. Estas franjas han de ser lo más paralelas posibles, la formación de franjas curvas o concéntricas nos indicará el defecto de planitud del bloque. La planitud se comprobará de acuerdo con los siguientes criterios:

Bloques patrón con longitudes nominales superiores a 2,5 mm

La desviación f_a de planitud de cada una de las caras de medida no deberá superar la tolerancia correspondiente, dada en la tabla 1, tanto si el bloque patrón está adherido a una base auxiliar, como si no lo está.

Bloques patrón con longitudes nominales hasta 2,5 mm

La desviación f_d de planitud de cada una de las caras de medida no deberá superar la tolerancia correspondiente, dada en la tabla 1, cuando el bloque patrón esté adherido a una base auxiliar de grosor no inferior a 11 mm.

Longitud nominal, l_n mm	Tolerancia de planitud, t_f μm			
	Grado			
	K	0	1	2
$0 \leq l_n \leq 100$	0,05	0,1	0,15	0,25

Tabla 1: Tolerancia de planitud t_f

NOTAS:

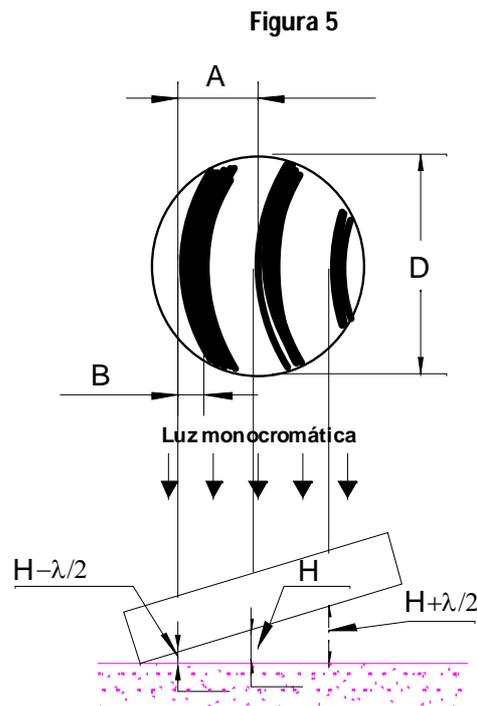
- Según se ve en las Figura 5, el defecto de planitud se puede determinar conociendo la longitud de onda de la luz monocromática (λ) de la lámpara utilizada y la separación entre las bandas de interferencia y su anchura, según la expresión:

$$planitud = \frac{B}{A} \times \frac{\lambda}{2} \quad [1]$$

donde:

- B es el desplazamiento de las bandas
- A es la separación media entre bandas
- λ es la longitud de onda de la luz empleada

Por ejemplo si $\lambda/2 = 0,000\ 28$ mm y $B/A = 1/5$. El defecto de planitud (cóncavo o convexo) es 0,000 055 mm, en el diámetro D del vidrio de planitud.



2. La comprobación de la propiedad de adherencia de las caras de medida de un bloque patrón se debe realizar mediante un vidrio de planitud $0,1 \mu\text{m}$ o mejor.

La cara de medida adherida deberá observarse a través del vidrio de planitud, no debiendo presentar bandas de interferencia, ni manchas o zonas brillantes o coloreadas. Para los bloques patrón de grado 1 y 2 se admiten pequeños puntos brillantes o manchas.

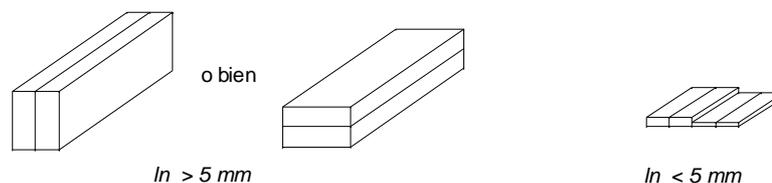
Una vez limpios, los bloques patrón, preferiblemente sobre una base metálica, dejándolos estabilizar al menos durante un tiempo razonable (véase tabla 2, como orientación columna tiempo de estabilización). Estos bloques patrón se deberán manipular con pinzas (preferiblemente de madera) o guantes, aunque es aconsejable que sean colocados en la posición de medida (en el caso de interferometría directa se deben adherir en las bases manualmente) con las manos protegidas con guantes, así se evitarán posibles golpes o arañazos al situarlos en la posición de medida. Posteriormente se dejará un tiempo prudencial de estabilización de temperatura, antes de iniciar la medida de los mismos (véase tabla 2, columna tiempo antes de medir).

Long. del bloque (mm)	Tiempo de estabilización (horas)	Tiempo antes de medir (minutos)
$0,5 \leq l_n < 5$	1	10
$5 \leq l_n < 10$	1,5	15
$10 \leq l_n < 25$	3	15 a 30
$25 \leq l_n < 50$	4	30 a 45
$50 \leq l_n < 100$	6	45 a 60

Tabla 2: Tiempos de estabilización y tiempos antes de iniciar la medida, una vez colocado el bloque en la plantilla de medida del comparador
(tiempos orientativos)

NOTA: Para conseguir una estabilización de temperatura similar en los bloques de igual longitud nominal, se pueden colocar por parejas en contacto entre sí (véase Figura 6).

Figura 6: Colocación de los bloques patrón para obtener una estabilización similar en el bloque de referencia y en el bloque a medir



Antes de la calibración, comprobar que el comparador de bloques funciona correctamente como se describe en las instrucciones del fabricante. Y además, se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- La superficie de la mesa de medida deberá estar limpia, sin muescas y sin desperfectos.
- Antes del inicio de la calibración de los bloques se encenderá el equipo y se dejará aproximadamente media hora estabilizando.

5.3. Proceso de Calibración

El proceso de calibración se determinará la longitud de los bloques mediante medición por comparación mecánica.

Este tipo de calibración consiste en la comparación de la longitud de un bloque que se quiere calibrar y la de un bloque patrón de referencia de igual longitud nominal. El bloque patrón de referencia debe ser de mejor grado de calidad.

NOTA:

En la calibración de aquellos bloques para los que no se disponga de bloques de referencia de igual longitud nominal, se podrán adherir varios bloques para lograr dicha longitud, teniendo en cuenta que todos ellos deberán ser del mismo material y de igual grado de calidad. Esto repercutirá en la incertidumbre de medida, por lo que se intentará que el número de bloques adheridos sea el menor posible.

Los bloques que se utilicen de referencia serán, en lo posible, del mismo material que los que se desean medir; si no es así habrá que tener en cuenta las correcciones adecuadas (diferente coeficiente de temperatura, deformación, etc.).

La longitud final del bloque será la suma algebraica de la longitud del bloque de referencia (teniendo en cuenta su desviación), la desviación obtenida entre el bloque que se mide y el de referencia, y la suma de las correcciones que en cada caso deban aplicarse.

En el palpado, las caras de medida de cada bloque patrón se tocan desde sentidos opuestos.

5.3.1. Determinación de la longitud central

La diferencia relativamente pequeña entre la longitud central conocida de un bloque patrón de referencia y la de otro bloque de longitud central desconocida, se mide mediante un comparador de bloques con indicador de longitud de alta resolución (véase Figura 7).

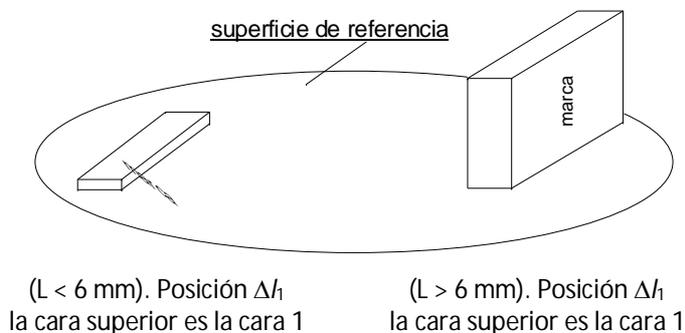
Para la determinación de la longitud central se deberá hacer cero en el centro de la cara de medida del bloque de referencia y posteriormente medir el bloque de longitud desconocida en su centro.

$$l_{cx} = l_{cp} + \Delta l \quad [2]$$

siendo:

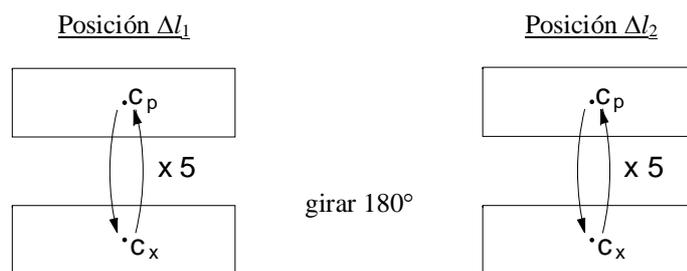
- l_{cx} longitud central del bloque que se mide.
- l_{cp} longitud central del bloque de referencia.
- Δl lectura del comparador.

Figura 7: Posición de los bloques para la medida. Posición 1 (Δ_1) (indicada en el dibujo) y Posición 2 (Δ_2) obtenida tras girar el bloque y apoyarlo sobre la cara de medida opuesta



Para la determinación de la longitud central se realizarán 5 medidas por cada una de las dos posiciones Δ_1 y Δ_2 (véase Figura 8), según la secuencia $C_p C_x C_p$. Cada vez que se manipulen los bloques en cada una de sus posiciones de medida se respetarán los tiempos de estabilización indicados en la tabla 2.

Figura 8: Medida en el centro de la cara, para determinar la desviación al nominal



NOTA:

1. La posición Δ_2 se obtiene después de girar el bloque 180°, con la cara 2 en la parte superior.
2. Para el caso de calibración de bloques de grado 2 puede optarse por realizar un número de medidas menor (entre 3 y 5 observaciones repetidas).

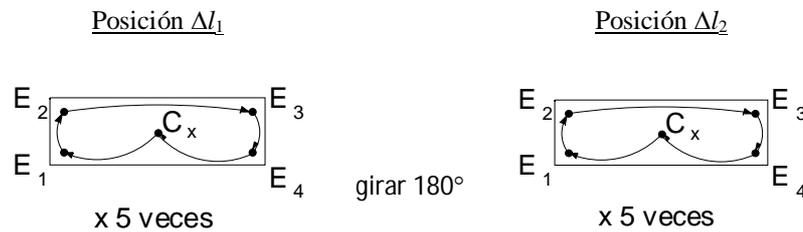
Determinación de la variación de longitud

La medición de longitud en el centro de la cara de medida del bloque y en las cuatro esquinas, aproximadamente a 1,5 mm de las caras laterales, puede considerarse representativa para la determinación de la variación de longitud. Si se consideran otros puntos representativos, distintos a los situados cerca de las esquinas, para la determinación de la variación de longitud, se deberá especificar su posición.

Para determinar la variación de longitud podrá utilizarse únicamente el bloque que se quiere calibrar, haciendo cero en el centro del mismo y midiendo de forma sucesiva las cuatro esquinas; esta medida se hará 5 veces en cada una de sus posiciones de medida Δ_1 y Δ_2 (puede efectuarse un número de medidas entre 3 y 5), la secuencia será $C_x E_1 E_2 E_3 E_4 C_x$ (véase Figura 9). La variación en longitud será:

$$V = I_{max} - I_{min} \quad [3]$$

Figura 9: Medida de la variación en longitud del bloque



NOTAS:

1. La posición Δl_2 se obtiene después de girar el bloque 180°, con la cara 2 en la parte superior
2. Para el caso de calibración de bloques de grado 2 puede optarse por realizar un número de medidas menor (entre 3 y 5 observaciones repetidas).
3. Otra posibilidad podría ser efectuar un ciclo completo midiendo la longitud central y la variación en longitud según la secuencia: $C_p C_x E_1 E_2 E_3 E_4 C_x C_p$, en cada una de sus dos posiciones Δl_1 y Δl_2 . Este segundo caso puede ser más rápido pero los bloques de referencia pueden sufrir un mayor desgaste por el excesivo uso.

5.4. Toma y tratamiento de datos

5.4.1. Desviación de la longitud en el centro $\Delta \bar{l}$

En la toma y tratamiento de los datos denominaremos:

Δl_{1i} a la medida *i-ésima* en la posición Δl_1 de la desviación de longitud.

Δl_{2i} a la medida *i-ésima* en la posición Δl_2 de la desviación de longitud.

n al número de repeticiones en cada posición.

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

- 1) $\Delta \bar{l}_1 =$ valor medio de la indicación del comparador calibración en la posición Δl_1

$$\Delta \bar{l}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta l_{1i} \quad [4]$$

- 2) $\Delta \bar{l}_2 =$ valor medio de la indicación del comparador en la posición Δl_2

$$\Delta \bar{l}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta l_{2i} \quad [5]$$

La media final será:

$$\Delta \bar{l} = \frac{\Delta \bar{l}_1 + \Delta \bar{l}_2}{2} \quad [6]$$

3) Varianza

$$(s_j^2)_{\Delta l_1} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta l_i - \Delta \bar{l})^2 \quad [7]$$

posición Δl_2

$$(s_j^2)_{\Delta l_2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta l_i - \Delta \bar{l})^2 \quad [7']$$

5.4.2. Determinación de la variación de longitud v

Determinaremos Δl en las cuatro esquinas de cada bloque haciendo cero en el centro de bloque, en cada una de sus posiciones Δl_1 y Δl_2 , y determinando la media de acuerdo con el párrafo anterior, con lo cual determinaremos

- 1) En posición Δl_1 : $(\Delta \bar{l}_1)_{E1}$, $(\Delta \bar{l}_1)_{E2}$, $(\Delta \bar{l}_1)_{E3}$, $(\Delta \bar{l}_1)_{E4}$

$$v_1 = \max(\Delta \bar{l}_1)_{Ei} - \min(\Delta \bar{l}_1)_{Ei} \quad [8]$$

- 2) En posición Δl_2 : $(\Delta \bar{l}_2)_{E1}$, $(\Delta \bar{l}_2)_{E2}$, $(\Delta \bar{l}_2)_{E3}$, $(\Delta \bar{l}_2)_{E4}$

$$v_2 = \max(\Delta \bar{l}_2)_{Ei} - \min(\Delta \bar{l}_2)_{Ei} \quad [9]$$

La variación de longitud final será:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad [10]$$

5.4.3. Corrección por temperatura

La longitud de un bloque a la temperatura t viene dada por la expresión:

$$l_t = l [1 + \alpha_b t]$$

donde $t = t_b - t_0$ (t_b es la temperatura del bloque patrón y t_0 es la temperatura de referencia de 20 °C)

NOTA:

Si se calibraran bloques de diferente material que los bloques de referencia habrá que efectuar una corrección por la diferente deformación de los materiales. Así la deformación elástica de una superficie plana por contacto con una esfera (la punta del palpador es esférica) tiene por expresión:

$$A = \frac{1}{3} \left(\frac{(3\pi)^2 P^2}{D} \left(\frac{1 - \sigma_1^2}{\pi \cdot E_1} + \frac{1 - \sigma_2^2}{\pi \cdot E_2} \right)^2 \right)^{1/3}$$

siendo:

- P* fuerza del palpador [N].
D diámetro de la punta del palpador [m].
 σ Coeficiente de Poisson del material (tabla 3).
E Módulo de Young [N/m²] (tabla 3).

materiales	Módulo de Young E [N/m ²]	Coeficiente de Poisson, σ
Cerámica (ZrO ₂)	2,06	0,3
Acero	2,10	0,3
Carburo de tungsteno	6,20	0,2

Tabla 3 - Propiedades mecánicas de algunos materiales

5.4.3. Tratamiento de los datos

Si en la calibración del bloque patrón se obtienen unas diferencias de desviación de la longitud nominal y/o variación de longitud entre la posición 1 y la 2 mayor que 0,04 μm se repetirá la medida.

$$\text{Si } \left. \begin{array}{l} |\Delta \bar{l}_1 - \Delta \bar{l}_2| \\ y/o \\ |v_1 - v_2| \end{array} \right\} \geq 0,04 \mu\text{m} \Rightarrow \text{Repetir} \quad [11]$$

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

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

En el cálculo de incertidumbres que se realice puede asociarse una incertidumbre en función de la longitud (obtendremos en este caso una expresión general), o bien determinar la incertidumbre para cada bloque.

6.1.1. Calibración de bloques patrón por comparación mecánica

La expresión matemática de la que se parte para la evaluación de la incertidumbre, teniendo en cuenta que se trata de determinar la longitud del bloque de valor desconocido:

$$l_x = l_p + \Delta l$$

Siendo Δl la diferencia de longitud medida y l_x y l_p la longitud del bloque a calibrar y la longitud del bloque utilizado como referencia. La longitud l_x de un bloque patrón desconocido a la temperatura de referencia se obtiene de la expresión:

$$l_x = l_p + \delta l_D + \Delta l + \delta l_C - L(\bar{\alpha} \times \delta t + \delta \alpha \times \Delta \bar{t}) - \delta l_V \quad [12]$$

donde:

- l_k longitud del bloque que se calibra a la temperatura de referencia de 20 °C;
- l_p longitud del BPL utilizado como patrón de referencia (según certificado), a la temperatura de referencia de 20 °C;
- δl_D corrección debida a la posible de variación de la longitud del bloque de referencia entre calibraciones;
- Δl lectura del comparador de bloques, correspondiente a la diferencia entre la longitud del bloque de longitud desconocida y el utilizado como referencia;
- δl_C debida al comparador de bloques patrón, por la no linealidad y desajustes del comparador;
- L longitud nominal del bloque patrón que se calibra;
- $\bar{\alpha} = (\alpha_x + \alpha_p)/2$ valor promedio de los coeficientes de dilatación térmica de ambos bloques (según la norma UNE EN-ISO 3650, se considera para el acero $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, ref. [9]);
- $\delta t = (t_x - t_p)$ diferencia de temperatura entre el bloque de referencia y el de longitud desconocida;
- $\delta \alpha = (\alpha_x - \alpha_p)$ diferencia entre los coeficientes de dilatación de ambos bloques;
- $\Delta \bar{t} = ((t_x + t_p)/2) - t_0$ desviación de la temperatura promedio, respecto de la temperatura de referencia de 20 °C;
- δl_V corrección debida al posible desvío del punto de contacto del centro de la cara de medida del bloque de longitud desconocida;

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

$$u^2_c(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad [13]$$

Aplicando lo anterior para el caso de la de evaluación de la incertidumbre de bloques patrón, y en concreto de la variable de salida l_k . Se tiene en cuenta que tanto el bloque patrón de referencia como el de longitud desconocida son del mismo material, por lo que suponemos que $\delta \alpha = 0$, y suponemos que $\Delta \bar{t} = 0$, por lo tanto, queda que

$$l_x = f[l_p, \delta l_D, \delta l, \delta l_C, \delta t, \delta \alpha, (\delta \alpha \times \Delta \bar{t}), \delta l_V] \quad [14]$$

de donde:

$$\begin{aligned}
 u_c^2(l_x) = & \left(\frac{\partial f}{\partial l_p}\right)^2 u^2(l_p) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l_D}\right)^2 u^2(\delta l_D) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l}\right)^2 u^2(\delta l) + \\
 & + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l_C}\right)^2 u^2(\delta l_C) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta t}\right)^2 u^2(\delta t) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta \alpha}\right)^2 u^2(\delta \alpha) + \\
 & + \left(\frac{\partial f}{\partial (\delta \alpha \times \Delta \bar{t})}\right)^2 u^2(\delta \alpha \times \Delta \bar{t}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta l_V}\right)^2 u^2(\delta l_V)
 \end{aligned} \quad [15]$$

Operando tendremos:

$$\begin{aligned}
 u_c^2(l_x) = & u^2(l_p) + u^2(\delta l_D) + u^2(\delta l) + u^2(\delta l_C) + \\
 & + (-L \times \bar{\alpha})^2 u^2(\delta t) + (-L \times \Delta \bar{t})^2 u^2(\delta \alpha) + \\
 & + (-L)^2 u^2(\delta \alpha \times \Delta \bar{t}) + (-1)^2 u^2(\delta l_V)
 \end{aligned} \quad [16]$$

En esta fórmula se ha considerado la longitud nominal del bloque L y no la longitud real del mismo puesto que el valor obtenido de corrección por temperatura es prácticamente igual en un caso y en otro.

A continuación se especifica cómo se estiman las contribuciones a la incertidumbre final:

Debida a los bloques utilizados como patrones de referencia, $u(l_p)$

Según el certificado de los bloques utilizados como patrones de referencia, la incertidumbre expandida de los mismos es U_p para un factor de cobertura k (por regla general se da $k = 2$), luego la incertidumbre típica será:

$$u(l_p) = \frac{U_p}{k} \quad [17]$$

Debida a la deriva temporal de los bloques de referencia desde su última calibración, $u(\delta l_D)$

La deriva temporal de la longitud de los bloques de referencia se puede estimar de los datos del histórico de estos bloques.

Si suponemos que esta deriva puede ser $\pm D_t$, tendremos entonces que la incertidumbre típica de esta contribución puede ser, considerando distribución rectangular:

$$u(\delta l_D) = \frac{D_t}{\sqrt{3}} \quad [18]$$

NOTA:

1. La posible variación dimensional entre calibraciones la podremos obtener del histórico de los bloques (a partir de los datos de máxima diferencia de corrección entre calibraciones), y si no disponemos de este dato podremos considerar que la variación será la indicada en la norma UNE EN-ISO 3650 (ref. [7]) para la variación

dimensional permitida (ver Tabla 4), tomada como semi-amplitud de una distribución rectangular. Así, se tendrá que la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_D) = \frac{D_t}{\sqrt{3}} \quad [19]$$

Grado	Cambios máximos de longitud permitidos por año
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 expresada en milímetros	

Tabla 4: Estabilidad dimensional

- Si los bloques de referencia utilizados son de grado de calidad K, calibrados por interferometría directa, los datos experimentales demuestran que la posible variación dimensional entre calibraciones es cero dentro de los límites de ± 30 nm. El valor más probable cero, dentro de los límites indicados, distribuido de forma triangular; se tendrá entonces que la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_D) = \frac{30}{\sqrt{6}} \quad [20]$$

Debida a la lectura del comparador de bloques, $u(l)$

Esta contribución la obtendremos determinando la desviación típica $s_p(\delta l)$ que puede haber sido obtenida de una evaluación anterior, por ejemplo en la calibración del comparador de bloques. La incertidumbre típica será para una serie de n observaciones repetidas (que pueden ser las realizadas en la calibración de los bloques, que según se dijo anteriormente es $n = 10$):

$$u(\delta l) = s(\delta l) = \frac{\overline{s_p(\delta l)}}{\sqrt{n}} = \frac{s_p(\delta l)}{\sqrt{10}} \quad [21]$$

Debida al comparador de bloques patrón, $u(\delta l_C)$

Para la calibración del comparador de bloques se debe seguir lo establecido en la guía EURAMET cg-2, Calibración de Comparadores de Bloques Patrón (ref. [8]). Según establece esta guía si se cumplen los requisitos indicados en la misma, se puede asignar al comparador de bloques una incertidumbre para una diferencia de longitud D hasta $\pm 10 \mu\text{m}$, se le puede asignar una incertidumbre expandida de calibración $U = \pm(30 \text{ nm} + 0,02 \cdot |D|)$ para un factor de cobertura $k = 2$. Teniendo en cuenta que la diferencia entre las tolerancias de los bloques utilizados como referencia y los bloques que se quieren medir la máxima diferencia está dentro de $\pm 1 \mu\text{m}$ (como es el caso de la diferencia entre los bloques de grado K y 0 o entre los de grado 0 y 1; sin embargo la diferencia entre los bloques de grado K y 2 o entre los de grado 0 y 2 puede ser estar dentro de los límites $\pm 2 \mu\text{m}$). Luego la incertidumbre típica puede ser:

$$u(\delta l_C) = \frac{32 \text{ nm}}{2} = 16 \text{ nm} \quad [22]$$

NOTA:

1. Para el caso de comparar bloques de grados K y 2 o 0 y 2, la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_c) = \frac{34 \text{ nm}}{2} = 17 \text{ nm} \quad [23]$$

Debida a las correcciones por la temperatura, $(\bar{\alpha}, \delta t, \delta \alpha, \Delta \bar{t})$

Antes de proceder a la calibración de los bloques se debe asegurar la correcta estabilización de la temperatura ambiente de acuerdo a con la temperatura de la sala, esta debe estar dentro de los límites siguientes $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Considerando que tanto el bloque patrón de referencia como el bloque que se quiere medir son del mismo material (por ejemplo para el caso del acero y si no se dispone de una información más concreta sobre el coeficiente de dilatación de los bloques se puede suponer que $\alpha = (11,5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, según la norma UNE EN-ISO 3650, ref. [7]).

Debida a la diferencia de temperatura entre el bloques patrón de referencia y el bloque que se calibra, $u(\delta t)$

Una vez asegurada la estabilidad térmica de los bloques manteniéndose los bloques como se indica en 5.2, se considera que puede existir una pequeña diferencia entre el patrón de referencia y el bloque que se calibra, estimándose que ésta se halla dentro del límite de $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ (en caso de calibración de bloques de grado 1 o 2 este límite puede ser de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$). Suponiendo una distribución rectangular, su incertidumbre típica será:

$$u(\delta t) = \frac{0,05 \text{ }^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ }^\circ\text{C} \quad [24]$$

NOTA:

Para bloques de grado 1 o 2 sería, teniendo en cuenta el límite de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$u(\delta t) = \frac{0,1 \text{ }^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,059 \text{ }^\circ\text{C} \quad [24']$$

Debida a la diferencia entre coeficientes de dilatación del bloque de referencia y el que se calibra, $u(\delta \alpha)$

La incertidumbre típica del promedio de coeficientes de dilatación, combinando las dos distribuciones rectangulares de la diferencia entre los coeficientes de dilatación lineal será, suponiendo una distribución rectangular con límites $\pm(1 \times \sqrt{2}) \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$:

$$\begin{aligned} u(\delta \alpha) &= \sqrt{\left(\frac{1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}}\right)^2} \\ &= \sqrt{2} \frac{1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}} = 0,82 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned} \quad [25]$$

NOTA:

Se supone que la desviación de temperatura media, del bloque de referencia y el que se calibra, respecto a la de referencia, está dentro de $\pm 0,5$ °C. Suponemos el caso más desfavorable, que es que $\Delta \bar{t} = 0,5$ °C; en el caso de que se conozcan las temperaturas t_p y t_x el valor de $\Delta \bar{t}$ puede ser menor.

Debida al término de segundo orden resultante del producto de las incertidumbres típicas asociadas con $\delta\alpha \times \Delta \bar{t}$, $u(\delta\alpha \times \Delta \bar{t})$.

Variación de la temperatura ambiente $u(\Delta \bar{t})$

La desviación de la temperatura media respecto de la de referencia $t_0 = 20$ °C, se estima que está dentro de $\pm 0,5$ °C (según se indica en 5.2.2). Suponiendo distribución rectangular, la incertidumbre típica será:

$$u(\Delta \bar{t})_d = \frac{0,5 \text{ °C}}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ °C} \quad [26]$$

La resolución del termómetro utilizado para determinar esta temperatura es r , suponiendo distribución rectangular, la incertidumbre típica asociada a la lectura del termómetro es:

$$u(\Delta \bar{t})_r = \frac{r}{\sqrt{12}} \quad [27]$$

La calibración del termómetro determina que su incertidumbre expandida es U_t para un factor de cobertura k_t , la incertidumbre típica será:

$$u(\Delta \bar{t})_t = \frac{U_t}{k_t} \quad [28]$$

La incertidumbre de la variación de la temperatura ambiente será:

$$u(\Delta \bar{t}) = \sqrt{(0,29 \text{ °C})^2 + \left(\frac{r}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{U_t}{k_t}\right)^2} \quad [29]$$

El mejor estimador para la diferencia entre coeficientes de dilatación térmica lineal y para las desviaciones de la temperatura media respecto a la temperatura de referencia ($t_0 = 20$ °C) es cero.

Teniendo en cuenta la nota matemática S4.13, ec. S4.5, del suplemento 1 de la guía EA-4/02 Expresión de la Incertidumbre de Medida en Calibración, ref.[4], se tiene que:

$$u^2(x_1 \times x_2) \cong u^2(x_1) \times u^2(x_2) \quad [30]$$

Aplicando esta expresión a nuestro caso tenemos:

$$\begin{aligned}
 u(\delta\alpha \times \Delta\bar{t}) &= \sqrt{u^2(\delta\alpha) \times u^2(\Delta\bar{t})} \\
 &= \sqrt{(0,82 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})^2 \times u^2(\Delta\bar{t})}
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

NOTA:

Si los bloques patrón de referencia y los bloques que se calibran son de diferente material, tanto la desviación de la temperatura media respecto de la temperatura de referencia como la diferencia de coeficientes de dilatación será mayor, y en consecuencia la incertidumbre obtenida también será mayor. Por ello se recomienda que los bloques sean del mismo material, para reducir en lo posible esta fuente de incertidumbre.

Debida a la variación en longitud, $u(\delta l_V)$

Esta contribución dependerá de los bloques que se calibran, ya que en función del grado que sean, esta contribución será diferente. Si los bloques cumplen con los requisitos de su grado de calidad en tolerancia de variación en longitud, siendo esta t_V (véase tabla 6).

Suponiendo que la variación ocurre en las caras de medida a lo largo el lado menor de longitud 9 mm y que la longitud central es medida dentro de un círculo de radio 0,5 mm, la corrección debida al desalineamiento del punto de contacto se estima que está dentro de $\pm 0,056 t_V$:

$$t_V \frac{0,5 \text{ mm}}{9 \text{ mm}} = \frac{0,5}{9} t_V \tag{32}$$

Luego, suponiendo distribución rectangular de semi-amplitud $0,056 t_V$, tendremos:

$$u(\delta l_V) = \frac{0,5 t_V}{9\sqrt{3}} \tag{33}$$

NOTA:

1. El valor de t_V lo elegimos para el caso más desfavorable, es decir para la longitud nominal de 100 mm, así según esto tenemos:

- Grado 0	$t_V = 0,12 \text{ } \mu\text{m}$	$u(\delta l_V) = 3,85 \text{ nm}$
- Grado 1	$t_V = 0,20 \text{ } \mu\text{m}$	$u(\delta l_V) = 6,42 \text{ nm}$
- Grado 2	$t_V = 0,35 \text{ } \mu\text{m}$	$u(\delta l_V) = 11,23 \text{ nm}$

A partir de las contribuciones consideradas, puede construirse la Tabla 5 (ref. [4]):

magnitud de entrada X_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
l_p	U_p/k_{cal}	normal	1	U_p/k_{cal}
δl_D	$D_t/\sqrt{3}$	rectangular	1	$D_t/\sqrt{3}$
δl	$s_p(\delta l)/\sqrt{10}$	normal	1	$s_p(\delta l)/\sqrt{10}$
δl_C	16 nm	normal	1	16 nm
δt	0,029 °C	rectangular	$(-L \times \bar{\alpha})$	$(-L \times \bar{\alpha}) \cdot 0,029$ °C
$\delta \alpha$	$0,82 \times 10^{-6}$ °C ⁻¹	-	$(-L \times \Delta \bar{t})$	$(-L) \cdot 0,41 \times 10^{-6}$
$\delta \alpha \times \Delta \bar{t}$	(1)	rectangular	$(-L)$	$(-L) \cdot (1)$
δl_V	$0,5 \cdot t_V/9\sqrt{3}$	rectangular	-1	$-0,5 \cdot t_V/9\sqrt{3}$
incertidumbre combinada (u)				$u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida (U)				$U = k \cdot u$

Tabla 5: Contribuciones a la incertidumbre combinada para medidas de exteriores

Para determinar la incertidumbre expandida es conveniente estimar los grados de libertad efectivos, de acuerdo con el anexo de EA-4/02. Para este tipo de calibraciones, la normalidad de las contribuciones a la incertidumbre procede de altos valores de v_{eff} , lo que lleva a un factor de cobertura próximo a $k=2$, para un 95% de probabilidad aproximadamente.

La expresión de U^2 para bloques de $h < 100$ mm, utilizando un banco comparador de bloques de doble palpador inductivo, queda pues como sigue:

$$\begin{aligned}
 U_j^2 &= k^2 \sum u_i^2(y) = \\
 &= k^2 \left[\left(\frac{U_p}{k_{cal}} \right)^2 + \left(\frac{D_t}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{s_p(\delta l)}{\sqrt{10}} \right)^2 + (16 \text{ nm})^2 + (-L \times \bar{\alpha})^2 (0,029 \text{ °C})^2 \right. \\
 &\quad \left. + (-L)^2 (0,41 \cdot 10^{-6})^2 + (-L)^2 \left(\sqrt{(0,82 \cdot 10^{-6} \text{ °C})^2 \times u^2(\Delta \bar{t})} \right)^2 \right] \quad [34]
 \end{aligned}$$

$$\text{donde} \quad u(\Delta \bar{t}) = \sqrt{(0,29 \text{ °C})^2 + \left(\frac{r}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{U_t}{k_t} \right)^2} \quad (35)$$

6.2. Interpretación de resultados

Para los bloques patrón se establecen unos grados de calidad en función del cumplimiento o no con los requisitos establecidos por la norma UNE EN-ISO 3650 (ref. [7]), el cumplimiento o no de esos requisitos nos dará la pertenencia o no a una determinada clase (en este sentido se deberá tener en cuenta lo establecido en la norma UNE-EN-ISO 14253-1:2019, ref. [9]). Si como resultado de la calibración algunos de los bloques fueran de inferior calidad de la declarada en un principio se debería o bien sustituir esos bloques por unos nuevos o si el número de bloques que no cumplen con la calidad del juego fuera elevado se deberá degradar al juego completo.

Los datos obtenidos en la calibración referidos a la desviación de la longitud en el centro de la cara de medida y la variación en longitud deberán estar dentro de los límites establecidos en la tabla 6, según se establece en las normas UNE EN-ISO 3650 para bloques patrón, ref. [7]):

Longitud nominal, l_n mm	Grado de Calibración K		Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	$\pm t_e$ μm	t_v μm						
$0,5 \leq l_n \leq 10$	0,2	0,05	0,12	0,1	0,2	0,16	0,45	0,3
$10 < l_n \leq 25$	0,3	0,05	0,14	0,1	0,3	0,16	0,6	0,3
$25 < l_n \leq 50$	0,4	0,06	0,2	0,1	0,4	0,18	0,8	0,3
$50 < l_n \leq 75$	0,5	0,06	0,25	0,12	0,5	0,18	1	0,35
$75 < l_n \leq 100$	0,6	0,07	0,3	0,12	0,6	0,2	1,2	0,35

Tabla 6: Máxima desviación de longitud t_e permitida en cualquier punto de la cara de medida respecto a la longitud nominal, y tolerancia t_v de la variación de longitud

Cada bloque llevará asociada una incertidumbre de calibración, obtenida como se indica en el apartado 6.1., esta incertidumbre puede venir dada como una expresión generalizada para el juego, en función de la longitud nominal de cada bloque o como una incertidumbre individual para cada bloque.

En el Certificado de Calibración, además de declarar la incertidumbre expandida, se especificará el valor del factor de cobertura k utilizado. Se puede determinar el número de grados de libertad efectivos para determinar el factor de cobertura a utilizar.

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 que se realice de los bloques patrón (si la frecuencia de uso fuera alta se deberá reducir el periodo de recalibración hasta 6 meses). 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 de los bloques patrón (reparación de aristas, 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 edición 2012 (Ed. VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones), Centro Español de Metrología, 2012.
- [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] Guide EA-4/02 M: 2013, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Sept. 2013, rev. 01.
- [5] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional. 1ª ed. Centro Español de Metrología, 2005, NIPO: 165-02-003-4.

- [6] Proceso de Calibración D-004 para Proyectores de Perfiles de eje vertical D-02.02 y Proyectores de Perfiles de eje horizontal D-10.08. Sistema de Calibración Industrial (SCI). Ed. Diciembre 1988.
- [7] Norma UNE-EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998).
- [8] Calibration Guide EURAMET cg-2, Version 2.0 (03/2011), Calibration of gauge block comparators <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/>
- [9] UNE-EN ISO 14253-1:2019, Especificación geométrica de productos (GPS). Inspección mediante medición de piezas y equipos de medida. Parte 1: Reglas de decisión para verificar la conformidad o no conformidad con las especificaciones. (ISO 14253-1:2017).

8. ANEXO

8.1. Ejemplo numérico para la calibración de bloques patrón por comparación mecánica

Calibración de un bloque patrón de grado de calidad 0 de acero de longitud nominal 100 mm. La calibración se realiza mediante un comparador de bloques patrón de doble palpador inductivo en oposición de resolución 0,01 μm , la temperatura de la sala donde se realizan las medidas se mantiene dentro de los límites $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se utiliza un bloque patrón longitudinal de grado K. El material del bloque es acero, y la incertidumbre expandida de calibración del juego al que pertenece, para $k = 2,01$ es $U = 35\text{ nm}$ para $\nu_{\text{eff}} = 291$ (para una probabilidad del 95,45 %).

La temperatura se mide mediante un termómetro de ambiente, de resolución 0,1 $^{\circ}\text{C}$, e incertidumbre de medida $U_t = 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, para $k=2$.

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

nº observaciones	valores medidos en posición Δl_1 (μm)	valores medidos en posición Δl_2 (μm)
1	-0,40	-0,41
2	-0,39	-0,40
3	-0,40	-0,41
4	-0,39	-0,41
5	-0,39	-0,40
medias	-0,394	-0,406

Tabla 7: Toma y tratamiento de datos para la calibración. Medida de la longitud central

nº obs.	Medida de v_1 en posición Δl_1 (μm)					
	C_x	E_1	E_2	E_3	E_4	C_x
1	0,00	-0,03	0,15	0,10	0,09	0,00
2	0,00	-0,03	0,14	0,08	0,08	0,01
3	0,01	-0,04	0,14	0,09	0,08	0,00
4	0,00	-0,03	0,13	0,10	0,08	0,01
5	0,01	-0,04	0,15	0,10	0,09	0,01
medias:	0,004	-0,034	0,142	0,094	0,084	0,006

nº obs.	Medida de v_2 en posición Δl_2 (μm)					
	C_x	E_1	E_2	E_3	E_4	C_x
1	0,00	0,08	0,10	0,14	-0,02	0,00
2	0,00	0,08	0,10	0,14	-0,02	0,01
3	0,01	0,09	0,10	0,14	-0,03	0,00
4	0,01	0,08	0,11	0,14	-0,02	0,02
5	0,01	0,09	0,11	0,14	-0,02	0,01
medias:	0,006	0,084	0,110	0,140	-0,020	0,008

Tabla 8: Toma y tratamiento de datos para la calibración. Medida de la longitud central

Determinación de la desviación respecto al valor nominal:

$$\Delta l_1 = -0,394 \mu\text{m}.$$

$$\Delta l_2 = -0,406 \mu\text{m}.$$

$$\text{Valor medio de } \Delta l \quad \Delta l = \frac{-0,394 + (-0,406)}{2} = -0,40 \mu\text{m}$$

Determinación de v :

$$\begin{aligned} v_1 &= \max(\overline{\Delta l_1})_{Ei} - \min(\overline{\Delta l_1})_{Ei} \\ &= 0,142 \mu\text{m} - (-0,034 \mu\text{m}) = 0,176 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_2 &= \max(\overline{\Delta l_2})_{Ei} - \min(\overline{\Delta l_2})_{Ei} \\ &= 0,140 \mu\text{m} - (-0,020 \mu\text{m}) = 0,160 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{0,176 \mu\text{m} + 0,160 \mu\text{m}}{2} = 0,168 \mu\text{m}$$

Como se cumple que:

$$|\overline{\Delta l_1} - \overline{\Delta l_2}| = |-0,394 - (-0,406)| = 0,012 \mu\text{m} < 0,04 \mu\text{m}, \text{ y}$$

$$|v_1 - v_2| = |(0,176 \mu\text{m}) - (0,168 \mu\text{m})| = 0,016 \mu\text{m} < 0,04 \mu\text{m}$$

se acepta la medida:

8.2. Incertidumbre

La incertidumbre asociada a la medida del bloque de 100 mm se obtiene aplicando la expresión (34), para un factor de cobertura $k=2$:

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

$$= k^2 \left(\left(\frac{U_p}{k_{cal}} \right)^2 + \left(\frac{D_t}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{s_p(\delta l)}{\sqrt{10}} \right)^2 + (16 \text{ nm})^2 + (-L \times \bar{\alpha})^2 (0,029 \text{ °C})^2 + (-L)^2 (0,41 \cdot 10^{-6})^2 + (-L)^2 \left(\sqrt{(0,82 \cdot 10^{-6} \text{ °C})^2 \times u^2(\Delta \bar{t})} \right)^2 \right) \quad [34]$$

donde:

$s_p(\delta l)$ ha sido obtenida previamente obteniéndose el valor 15 nm en base a 25 observaciones repetidas (es más fiable que las realizadas en base a 10 medidas):

$U_p = 35 \text{ nm}$ ($k=2,01$; $v_{\text{eff}} = 291$), para un bloque de 100 mm, de grado K.

$D_t = \pm 30 \text{ nm}$, dato experimental, suponiendo distribución triangular:

$$u(\delta l_D) = \frac{30}{\sqrt{6}} = 12,25 \text{ nm}$$

NOTA

En este caso sustituimos en la expresión [34] el sumando $\frac{D_t}{\sqrt{3}}$, por el valor:

$$\bar{\alpha} = 11,5 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1} \text{ (los dos bloques son de acero)}$$

Para la determinación de:

$$u(\Delta \bar{t}) = \sqrt{(0,29 \text{ °C})^2 + \left(\frac{r}{\sqrt{12}} \right)^2 + \left(\frac{U_t}{k_t} \right)^2} \quad (35)$$

tenemos:

$r = 0,1 \text{ °C}$.

$U_t = 0,5 \text{ °C}$ para $k = 2$.

Luego, sustituyendo en la ecuación (35):

$$U = 67 \text{ nm, con } v_{\text{eff}} = 396$$

Para $v_{\text{eff}} = 396$ y una probabilidad de aproximadamente el 95,45% se tiene un factor de cobertura $k = 2,01$; luego la incertidumbre expandida será.

$$\mathbf{U = 2,01 \times 67 \text{ nm} = 135 \text{ nm}}$$

Las incertidumbres expandidas de calibración indicadas corresponden a incertidumbres típicas multiplicadas por un factor de cobertura $k=2,01$ que, para una distribución t -Student corresponde a un nivel de confianza del 95,45% aproximadamente y $v_{\text{eff}} = 396$ grados de libertad.

magnitud de entrada X_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$	grados de libertad
l_p	17,41 nm	normal	1	17,41 nm	291
δl_D	12,25 nm	rectangular	1	12,25 nm	100
δl	4,74 nm	normal	1	4,74 nm	24
δl_C	16 nm	normal	1	16 nm	100
δt	0,029 °C	rectangular	-1150 nm × °C ⁻¹	-33,35 nm	100
$\delta \alpha$	0,41 · 10 ⁻⁶	-	-100 · 10 ⁶ nm	-41 nm	100
$\delta \alpha \times \Delta \bar{t}$	0,31 · 10 ⁻⁶	rectangular	-100 · 10 ⁶ nm	-31 nm	100
δl_V	3,85 nm	rectangular	-1	-3,85 nm	100
incertidumbre combinada (u)				67 nm	396
Incertidumbre expandida (U)				135 nm	

Tabla 9: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración del bloque patrón por comparación mecánica

Metrología

NIPO: 113-19-006-0