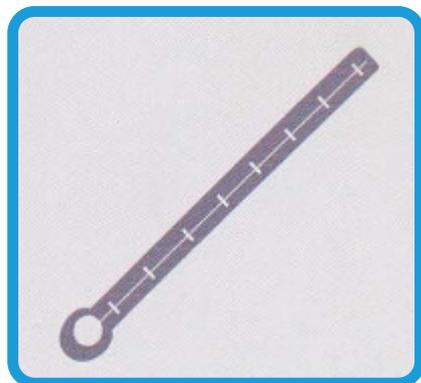
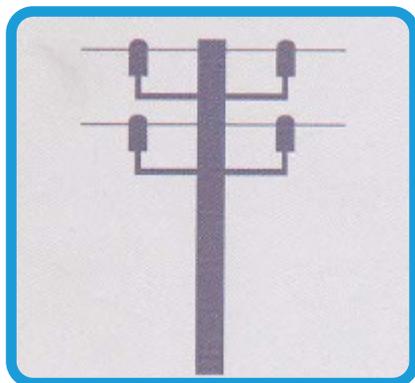
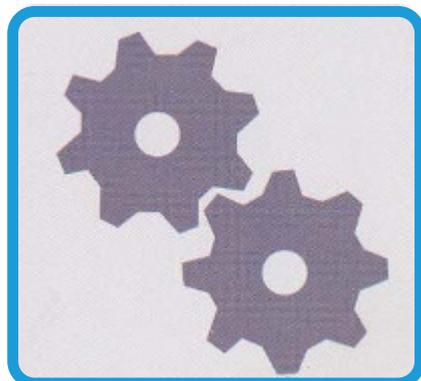
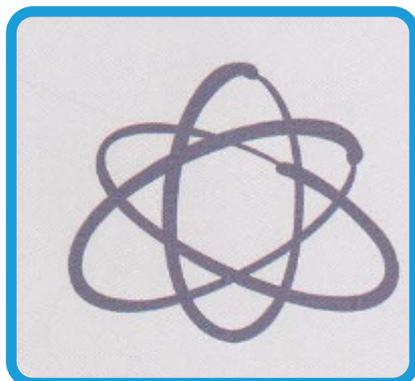
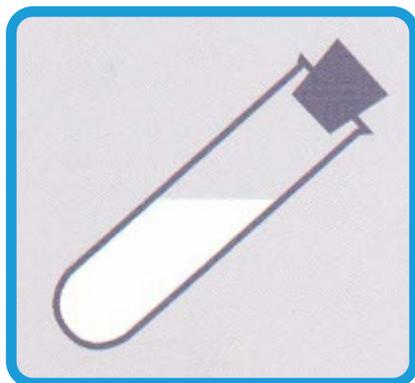


Metrología



PROCEDIMIENTO DI-006 PARA LA
CALIBRACIÓN DE MICROSCOPIOS
DE MEDIDA

m 19

PROCEDIMIENTO DI-006

CALIBRACIÓN DE MICROSCOPIOS DE MEDIDA

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
3.1 Microscopio de medida	3
3.2 Iluminación por proyección (episcópica)	3
3.3 Iluminación por reflexión (diascópica)	4
3.4 Mesa soporte y ejes de medición	4
3.5 Enrasar	4
3.6 Alinear	4
4. GENERALIDADES	4
5. DESCRIPCIÓN	5
5.1 Equipos y materiales	5
5.2 Operaciones previas	5
5.3 Proceso de calibración	7
5.4 Toma y tratamiento de datos	8
6. RESULTADOS	9
6.1 Cálculo de incertidumbres	10
6.2 Interpretación de resultados	13
7. REFERENCIAS	14
8. ANEXOS	15
8.1 Ejemplo numérico	15

1. OBJETO

El presente PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN tiene por objeto exponer un método de calibración para los MICROSCOPIOS DE MEDIDA, codificados como D-10.02 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [5]).

Este procedimiento se redacta de acuerdo con los criterios generales establecidos por el PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN de la ref. [1], emplea en todo lo posible la terminología del VOCABULARIO de la ref. [2] y sigue, para el cálculo de incertidumbres, las recomendaciones de las refs. [3] y [4].

2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a microscopios de medida tanto con escalas longitudinales como con escala angular, con cualquier valor de amplificación óptica (aunque suelen trabajar con valores no excesivamente grandes, entre 5X y 50X generalmente), con cualquier valor de campo de medida longitudinal (aunque no suelen exceder de valores de 0,5 m generalmente) y tanto con sistema de iluminación por proyección (episcópica) como por reflexión (diascópica).

No se establece ningún límite para sus campos de medida, lineal y angular, pero sí para los valores de división de escala, siendo de aplicación el presente procedimiento DI-006, únicamente para los valores siguientes:

Escalas lineales: $E \geq 0,001 \text{ mm}$

Escala angular: $E \geq 1'$

Quedan sin embargo fuera del alcance del presente procedimiento de calibración DI-006, otros instrumentos de medición muy similares en cuanto a su funcionamiento, como son los PROYECTORES DE PERFILES (D-10.03 y D-10.08 según ref. [5]) y las máquinas MEDIDORAS DE DOS COORDENADAS (D-02.06 según ref. [5]) o de TRES COORDENADAS (D-02.07 según ref. [5]) con cualquier tipo de dispositivo óptico de captación de imágenes.

Respecto de los PROYECTORES DE PERFILES se dispone del PROCEDIMIENTO DI-001.

3. DEFINICIONES

3.1. Microscopio de medida:

Instrumento de metrología dimensional que permite efectuar mediciones en un sistema de dos dimensiones, por una combinación de amplificación mecánico-óptica.

Los componentes principales de un microscopio de medida son la fuente de iluminación, un sistema óptico de observación y amplificación, una mesa soporte de los mensurandos con dos ejes de movimiento o escalas de medida perpendiculares y, opcionalmente, una mesa circular con eje de movimiento vertical y su escala angular de medida; las dos o tres escalas de medida disponen de sistemas de amplificación mecánica propios.

3.2. Iluminación por proyección (episcópica):

El haz luminoso, adecuadamente colimado, pasa a través del mensurando y, siempre que éste tenga un perfil adecuado (elementos de revolución, de pequeño espesor, etc.), proyecta dicho perfil como "sombra" o contorno sobre el dispositivo de observación.

3.3. Iluminación por reflexión (diascópica):

El haz luminoso incide ahora sobre la superficie del mensurando y se refleja sobre ella para proporcionar su imagen en el dispositivo de observación. Siempre que la superficie observada sea suficientemente reflectante, se podrán observar las marcas de todo tipo que en ella existan.

3.4. Mesa soporte y ejes de medición:

Mesa sobre la que se deposita el mensurando; para medidas por proyección es de cristal a fin de permitir el paso del haz luminoso a través del contorno del mensurando.

Dispone de dos movimientos longitudinales, el eje X que es el eje horizontal transversal al operador y el eje Y que es el eje horizontal hacia el operador; como en todo instrumento de observación óptica el eje correspondiente a la dirección del haz luminoso de proyección, en este caso el eje Z, no es eje de medición sino sólo de enfoque del perfil del mensurando sobre el plano focal del dispositivo óptico.

Los dos ejes de medida X e Y disponen de algún sistema de amplificación propio como por ejemplo cabezas micrométricas, captadores inductivos, etc. y lectura analógica o digital.

Sobre la mesa para desplazamientos longitudinales puede acoplarse otra mesa de tipo circular para permitir giros del mensurado sobre el eje vertical Z; su accionamiento suele ser manual y su escala una regla graduada circular con nonius, de tipo analógico generalmente.

3.5. Enrasar:

Acción cuyo efecto es lograr la mejor coincidencia posible entre una zona del perfil proyectado o una marca del perfil reflejado con alguna de las líneas del retículo de observación.

3.6. Alinear:

Proceso mediante el cual se mueve el mensurando sobre o con la mesa soporte, para que las zonas del perfil proyectado o las marcas del perfil reflejado queden paralelas, de la mejor forma posible, a los movimientos de los ejes de medida, haciendo así despreciable el error de coseno en la medición.

4. GENERALIDADES

Los microscopios de medida son instrumentos de metrología dimensional de precisiones medias, adecuados a la medición de elementos no muy grandes ni pesados, con carácter general; se trata a cambio de instrumentos no costosos de manejo muy sencillo.

Suelen situarse sobre una mesa y el operador trabaja generalmente sentado frente a ella, efectuando las observaciones sobre un sistema óptico de tipo microscopio, en cuyo ocular van grabados diferentes tipos de retículos intercambiables, siendo básico el correspondiente a dos finos trazos normales entre sí.

Disponen usualmente de varias amplificaciones, aunque no suelen llegar a valores tan elevados como las de los proyectores de perfiles, siendo corrientes los valores entre 5X y 50X.

Para efectuar una medición, se sitúa el mensurando sobre la mesa del microscopio y se comienza efectuando las operaciones de alineación y enrase sobre el retículo, para las amplificaciones y sistema de iluminación seleccionados. A estos efectos es de gran utilidad que el microscopio disponga de mesa circular que facilita los pequeños movimientos de giro del mensurando, con

gran sensibilidad, los cuales unidos a los de traslación de los ejes longitudinales permiten el correcto posicionamiento del mismo.

Una vez efectuado el enrase sobre un perfil o marca, basta desplazar el mensurando a lo largo de uno de los ejes de medida hasta lograr el enrase sobre otro perfil o marca; el resultado de medida se obtiene como diferencia de lecturas (lineales o angulares) entre ambos posicionamientos, cosa que se facilita si las escalas del microscopio son digitales con puesta a cero opcional.

Es recomendable, al igual que con cualquier instrumento de tipo óptico, situar el microscopio en una zona de bajo nivel de iluminación, para facilitar el contraste de la imagen.

En el presente procedimiento de calibración se han empleado las abreviaturas siguientes:

- BPA: Bloque patrón angular.
- BPL: Bloque patrón longitudinal.
- PAT: Patrón angular de trazos.
- PP: Patrón de planitud.
- RPT: Regla patrón de trazos.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de las dos escalas longitudinales de un microscopio de medida se utilizarán bloques patrón longitudinales (BPL; D.01.02 según ref. [5]) para el sistema de iluminación por proyección y reglas patrón de trazos (RPT; D.01.08 según ref. [5]) para el sistema de iluminación por reflexión.

Para la calibración de la escala angular, en aquellos microscopios de medida que dispongan de ella, se utilizarán bloques patrón angulares (BPA; D.04.02 según ref. [5]) junto con polígonos patrón (PP; D.04.01 según ref. [5]) para el sistema de iluminación por proyección y patrones angulares de trazos (PAT; sin clasificación) para el sistema de iluminación por reflexión.

Respecto de los BPL, pueden emplearse de cualquiera de las calidades normalizadas (ref. [6]), incluso la menor de ellas, calidad 2.

Respecto de los otros patrones, RPT, BPA, PP y PAT, de tener incertidumbres adecuadas a los valores de las divisiones de escala del instrumento concreto para el que se apliquen.

Es deseable disponer también de sensores de condiciones ambientales, fundamentalmente de temperatura, debidamente calibrados para asegurar su correcta trazabilidad, a fin de poder registrar los valores de las mismas durante la calibración; a título meramente orientativo, sería aconsejable poder apreciar valores de temperatura con $E = 0,1$ °C, en un campo C de 15 °C a 25 °C como mínimo.

5.2. Operaciones previas

5.2.1 Para poder emitir un certificado de calibración de un microscopio de medida, éste debe encontrarse identificado, de forma permanente, con los siguientes datos como mínimo:

MARCA
NÚMERO DE SERIE o DE IDENTIFICACIÓN

Es recomendable que además pueda identificarse el MODELO.

Los anteriores datos de identificación pueden encontrarse grabados sobre la propia carcasa del microscopio o bien en una chapa metálica unida a la misma, pero ha de ponerse especial atención en no confundirlos con los de otros componentes y accesorios del instrumento como la mesa soporte, lectores de escala, ocular, etc. que pueden llevar también sus propios datos de identificación como tales elementos.

En el certificado de calibración deberá reseñarse la identificación del microscopio propiamente dicho y la de aquellos otros elementos que contribuyan a la precisión de la cadena de medida, fundamentalmente los relacionados con las escalas de medida, pero no es necesario incluir la identificación de los elementos auxiliares que no contribuyen a la precisión de la citada cadena de medida.

En caso de identificación insuficiente es admisible proceder a establecer la misma de la mejor forma posible, por ejemplo mediante una etiqueta fuertemente adherida al instrumento, de forma que no exista duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el equipo calibrado y el certificado emitido.

- 5.2.2 Es deseable que la temperatura ambiente del local en el que se realice la calibración del microscopio de medida, se mantenga durante toda la operación dentro del intervalo:

$$T = (20 \pm 2) \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura habrá de anotarse, como mínimo, al comienzo y al final de la calibración aunque es recomendable anotarla también aproximadamente cada hora.

Si se van a efectuar correcciones por temperatura, será importante disponer de sondas tanto para el mensurando como para el microscopio, así como de información suficiente (generalmente del propio fabricante del microscopio, en su manual técnico), sobre el modelo de dilatación/contracción aplicable al equipo y el intervalo térmico de validez del mismo.

- 5.2.3 Se verificará que todos los elementos del microscopio de medida necesarios para su calibración, se encuentran disponibles.
- 5.2.4 Se prepararán adecuadamente los patrones a emplear en la calibración del microscopio de medida, desengrasándolos y limpiándolos con papel y paños suaves, así como con algún desengrasante adecuado, como por ejemplo una mezcla de alcohol y éter al 50%.

Se localizarán los datos de dichos patrones necesarios para la calibración (valores e incertidumbres de uso fundamentalmente).

- 5.2.5 Los patrones a emplear se situarán próximos al microscopio de medida a calibrar, preferiblemente sobre una base metálica, dejándolos estabilizar térmicamente al menos durante una hora.

El apoyo de los patrones sobre la base metálica se hará siempre por las caras laterales, no de medida, de los mismos.

- 5.2.6 Antes de proceder a la calibración propiamente dicha y con ayuda de un PP de $(4 \times 90)^\circ$, de un patrón angular de 90° (formado por adherencia de BPA) o de una pequeña escuadra de perpendicularidad (D.06.02 según ref. [5]), se comprobará la adecuada perpendicularidad de las líneas del retículo de observación.

5.2.7 Asimismo, se efectuará el ajuste de paralelismo entre el retículo del ocular y el movimiento de los ejes longitudinales, si el microscopio lo permite (pequeños giros de la mesa de apoyo sobre el eje vertical Z).

Para ello se procederá a enrasar sobre una de las líneas del retículo alguna pequeña marca de la superficie de la mesa de apoyo del microscopio, desplazándola a lo largo de dicha línea mediante el eje de movimiento longitudinal correspondiente y efectuando el ajuste de giro hasta que en todo el recorrido la marca permanezca tangente a la línea del retículo, sin separarse de ella, ni atravesarla.

Se reitera la anterior operación con el otro eje de desplazamiento y línea de retículo y también se efectúa su ajuste, si el microscopio lo permite.

5.3. Proceso de Calibración

Por tratarse de instrumentos de precisión media, se admite trabajar con los valores nominales de los patrones y deducir sus incertidumbres de las tolerancias de desviación de los mismos (clases de precisión o calidades).

En el caso de tener que componer patrones por adherencia con bloques patrón de un mismo juego, se aconseja obtener la incertidumbre mediante suma lineal de las incertidumbres de los bloques adheridos, habida cuenta de la fuerte correlación que presumiblemente existe entre los valores certificados de un mismo juego de patrones.

5.3.1. Iluminación por proyección (episcópica)

5.3.1.1. *Calibración de los ejes de medida longitudinales:*

El proceso que se desarrolla deberá reiterarse para cada uno de los dos ejes de medida X e Y.

La calibración se realizará mediante BPL, de valores nominales tales que cubran, de forma aproximadamente equidistante, el campo total de medida de cada uno de los ejes.

Puesto que las medidas en un microscopio se obtienen mediante diferencia de lecturas, se situarán siempre los BPL de forma que su primera indicación quede siempre cerca del cero de la escala de medida (dentro de 0,5 mm es suficiente).

Los BPL se irán situando sucesivamente sobre la mesa soporte procediéndose a su alineamiento (que se facilitará mediante mesa giratoria) y enrase; se efectuarán 10 medidas de cada BPL en un total de 5 a 10 puntos de calibración.

Se realizará al menos un punto de calibración para cada una de las ampliaciones disponibles, concentrándose el resto de los puntos en la ampliación más habitual.

5.3.1.2. *Calibración de la escala de medida angular:*

La calibración se realizará mediante BPA y PP, pudiendo materializarse aquellos valores nominales para los que no se disponga del patrón adecuado mediante unión por adherencia de bloques y polígonos de los valores apropiados.

Dado que las escalas angulares de los microscopios de medida poseen divisiones de escala elevadas (usualmente $E \geq 1'$), bastará con estudiar la

repetibilidad en un punto de calibración en el que se efectuarán 10 medidas, tomando una sola medida en los restantes puntos.

Los patrones angulares se irán situando sucesivamente sobre la mesa soporte, procediéndose a su enrase de forma que su primera indicación quede siempre cerca del cero de la escala de medida (dentro de 10' es suficiente); se efectuarán medidas, al menos, en 11 puntos de calibración, aproximadamente equidistantes dentro de la escala.

5.3.2 Iluminación por reflexión (diascópica)

5.3.2.1 *Calibración de los ejes de medida longitudinales:*

Al igual que en el caso de iluminación por proyección, el proceso se repetirá para los dos ejes X e Y.

Como patrones se emplearán en este caso RPT, de incertidumbre adecuada; la calibración se realizará en un total de 5 a 10 puntos de calibración, reiterando 10 medidas en cada punto.

5.3.2.2 *Calibración de la escala de medida angular:*

Se utilizarán PAT de precisión suficiente y se seguirá un proceso análogo al descrito en 5.3.1.2.

5.4. Toma y tratamiento de datos

A fin de identificar sistemáticamente los datos y los resultados, se empleará la terminología que se indica en los apartados siguientes.

5.4.1 Calibración de los ejes de medida longitudinales:

Se denominarán:

ℓ_{ij} = medida de orden j en el punto i de calibración ($i = 1$ a I ; $j = 1$ a J).

NOTA: ℓ_{ij} es la diferencia entre dos lecturas, salvo que la escala del microscopio disponga de dispositivo de puesta a cero.

ℓ_{pi} = valor del patrón empleado para calibración en el punto i .

Se calcularán los parámetros siguientes:

1) $\bar{\ell}_i$ = Valor medio de calibración en el punto i :

$$\bar{\ell}_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \ell_{ij}$$

2) c_{ci} = Corrección de calibración en el punto i :

$$c_{ci} = \ell_{pi} - \bar{\ell}_i$$

3) s_i = Desviación típica de calibración en el punto i :

$$s_i^2 = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\ell_{ij} - \bar{\ell}_i)^2$$

5.4.2 Calibración del eje de medida angular

Se denominarán:

α_i = medida en el punto i de calibración ($i = 1$ a I)

α_{ij} = medida de orden j en el punto i de calibración elegido para estimar la repetibilidad ($j = 1$ a J)

NOTA: α_{ij} es la diferencia entre dos lecturas, salvo que la escala del microscopio disponga de dispositivo de puesta a cero.

α_{pi} = valor del patrón empleado para calibrar en el punto i

Se calcularán los parámetros siguientes:

1) $\bar{\alpha}_i$ = Valor medio de calibración en el punto elegido para estimar la repetibilidad:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \alpha_{ij}$$

2) c_{ci} = Corrección de calibración en el punto i :

$$c_{ci} = \alpha_{pi} - \alpha_i \text{ (puntos de una medida)}$$

$$c_{ci} = \alpha_{pi} - \bar{\alpha}_i \text{ (punto de J medidas)}$$

3) s_i = Desviación típica de calibración en el punto i :

$$s_i^2 = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\alpha_{ij} - \bar{\alpha}_i)^2 \text{ (en el punto de J medidas)}$$

6. RESULTADOS

Los resultados de la calibración se refieren a 20 °C, y a la misma temperatura se encuentran referidos los certificados de los patrones utilizados. Dichos resultados se concretan en la corrección y su incertidumbre en cada uno de los puntos de calibración. Estas correcciones suelen denominarse locales para distinguirlas de una corrección global que sería aplicable a las medidas del instrumento en cualquier punto de su escala.

La forma de establecer la corrección global y su incertidumbre no es objeto de consideración en el presente procedimiento de calibración.

Las correcciones de calibración expresan fundamentalmente la discrepancia entre los valores de los patrones y las indicaciones del instrumento al medir dichos patrones, apartado 5.4, aunque es frecuente incorporar otras contribuciones como más adelante se indica. En particular, se considera la corrección por redondeo a la división de escala. Cada corrección ha de acompañarse de su correspondiente incertidumbre.

Una eventual corrección por temperatura debería tener en cuenta la dilatación diferencial entre los diferentes elementos que intervienen en la calibración. Esta contribución no se considera al asegurar una buena estabilidad térmica (5.2.5).

Los valores asignados a los patrones deben corresponder a las condiciones de uso en la calibración por lo que deberá justificarse si se aplican, o no, correcciones por deriva. En el presente modelo no se han tenido en cuenta por considerar que las variaciones correspondientes ya están incorporadas en la incertidumbre que se utiliza para cada patrón.

No se consideran otras correcciones distintas de las indicadas, lo que no exime al responsable de la calibración del microscopio de medida de tener en cuenta correcciones adicionales si sus condiciones de trabajo así lo aconsejasen.

6.1. Cálculo de incertidumbres

6.1.1 Escalas longitudinales

Utilizando letras mayúsculas para las variables aleatorias que representan el mensurando, de acuerdo con las refs. [3] y [4], cada una de las correcciones locales responde al siguiente modelo:

$$C_i = C_{ci} + C_E$$

donde $C_{ci} = L_{pi} - \bar{L}_i$ representa las correcciones de calibración c_{ci} determinadas en el apartado 5.4.1.

Por consiguiente, el modelo resultante es:

$$C_i = L_{pi} - \bar{L}_i + C_E$$

La incertidumbre típica del patrón en el punto i de calibración ($i=1$ a l) es u_{pi} . La varianza de la media de las indicaciones al medir el patrón anterior es, según el apartado 3) de 5.4.1, s_i^2/J .

Se puede introducir la contribución debida a la expresión del resultado según un múltiplo de la división de escala, mediante una corrección de media nula, C_E , cuya varianza se obtiene de la hipótesis de distribución uniforme en un intervalo $\pm E/2$ siendo E la división de escala longitudinal del microscopio de medida. Dado que las medidas en este instrumento se efectúan mediante dos enrasés, la varianza de la contribución por división de escala es:

$$u^2(C_E) = 2 \frac{(E/2)^2}{3} = \frac{E^2}{6}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se pueden recoger en forma de tabla según formato recomendado en la ref. [4] (tabla 1).

Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre combinada de las correcciones locales (escalas longitudinales)

Magnitud X_m	Estimación x_m	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_m	Contribución a la incertidumbre $u_m(c_i)$
L_{pi}	ℓ_{pi}	u_{pi}	Normal	1	u_{pi}
\bar{L}_i	$\bar{\ell}_i$	$\frac{s_i}{\sqrt{J}}$	Normal	-1	$-\frac{s_i}{\sqrt{J}}$
C_E	0	$\frac{E}{\sqrt{6}}$	Triangular (*)	1	$\frac{E}{\sqrt{6}}$

C_i	$c_i = \sum_m x_m$	Incertidumbre combinada (u)	$u = \sqrt{\sum_m u_m^2(c_i)}$
		Incertidumbre expandida (U)	$U = k \cdot u$

(*) La convolución de dos distribuciones rectangulares iguales es una distribución triangular.

La expresión de U^2 para la corrección en cada punto calibrado queda de la forma:

$$U_i^2 = k^2 \sum_{m=1}^3 u_m^2(c_i) = k^2 \left(u_{pi}^2 + \frac{s_i^2}{J} + \frac{E^2}{6} \right) \quad (1)$$

donde el subíndice m representa las filas de la tabla 1.

De acuerdo con el apartado F.2.4.5 de la ref. [3], es posible estimar una corrección única aplicable a cada escala longitudinal del instrumento que suele denominarse corrección global.

6.1.2 Escala angular

Utilizando letras mayúsculas para las variables aleatorias que representan el mensurando, de acuerdo con las refs. [3] y [4], y procediendo de forma similar a la del subapartado anterior, cada una de las correcciones locales responde al siguiente modelo:

$$C_i = C_{ci} + C_E$$

donde:

$$C_{ci} = A_{pi} - \bar{A}_i \text{ (punto de } J \text{ medidas)}$$

$$C_{ci} = A_{pi} - A_i \text{ (puntos de una medida)}$$

representan las correcciones de calibración c_{ci} determinadas en el apartado 5.4.2.

Por consiguiente, el modelo resultante es:

$$C_i = A_{pi} - \bar{A}_i + C_E \text{ (punto de } J \text{ medidas)}$$

$$C_i = A_{pi} - A_i + C_E \text{ (puntos de una medida)}$$

La incertidumbre típica del patrón en el punto i de calibración ($i=1$ a l) es u_{pi} , valor correspondiente al del BPA, o composición de BPA.

La varianza de la media de las indicaciones angulares del microscopio de medida en el punto de repetibilidad se obtiene a partir del apartado 3) de 5.4.2), resultando s_i^2/J . En los restantes puntos el valor estimado es s_i^2 .

De igual forma que en las escalas longitudinales, la contribución debida a las lecturas de la escala angular del microscopio de medida según un múltiplo de la división de escala, se introduce con una corrección de media nula, C_E , cuya varianza se obtiene de la hipótesis de distribución uniforme en un intervalo $\pm E/2$ siendo E la división de la escala angular del microscopio de medida. Dado que las medidas en este instrumento se efectúan mediante dos enrasas, la varianza de la contribución por división de escala es:

$$u^2(c_E) = 2 \frac{(E/2)^2}{3} = \frac{E^2}{6}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se pueden recoger en forma de tabla según formato recomendado en la ref. [4].

En la tabla 2 se presentan los resultados para el punto de repetibilidad en el que la expresión de U^2 para la corrección responde a:

$$U_i^2 = k^2 \sum_{m=1}^3 u_m^2(c_i) = k^2 \left(u_{pi}^2 + \frac{s_i^2}{J} + \frac{E^2}{6} \right) \quad (2)$$

donde el subíndice m representa las filas de la tabla 2.

Tabla 2: Contribuciones a la incertidumbre combinada de las correcciones locales en el punto de repetibilidad (escala angular)

Magnitud X_m	Estimación x_m	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_m	Contribución a la incertidumbre $u_m(c_i)$
A_{pi}	α_{pi}	u_{pi}	Normal	1	u_{pi}
\bar{A}_i	$\bar{\alpha}_i$	$\frac{s_i}{\sqrt{J}}$	Normal	-1	$-\frac{s_i}{\sqrt{J}}$
C_E	0	$\frac{E}{\sqrt{6}}$	Triangular (*)	1	$\frac{E}{\sqrt{6}}$

C_i	$c_i = \sum_m x_m$	Incertidumbre combinada (u)	$u = \sqrt{\sum_m u_m^2(c_i)}$
		Incertidumbre expandida (U)	$U = k \cdot u$

(*) *La convolución de dos distribuciones rectangulares iguales es una distribución triangular.*

La tabla 3 recoge los resultados en los puntos de una medida, en los que la expresión de U^2 para la corrección adopta análogamente la forma:

$$U_i^2 = k^2 \sum_{m=1}^3 u_m^2(c_i) = k^2 \left(u_{pi}^2 + s_i^2 + \frac{E^2}{6} \right) \quad (3)$$

donde el subíndice m representa las filas de la tabla 3 y cada sumando tiene dimensiones de minutos al cuadrado.

Tabla 3: Contribuciones a la incertidumbre combinada de las correcciones locales en los puntos de una medida (escala angular)

Magnitud X_m	Estimación x_m	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_m	Contribución a la incertidumbre $u_m(c_i)$
A_{pi}	α_{pi}	u_{pi}	Normal	1	u_{pi}
A_i	α_i	s_i	Normal	-1	$-s_i$
C_E	0	$\frac{E}{\sqrt{6}}$	Triangular (*)	1	$\frac{E}{\sqrt{6}}$

C_i	$c_i = \sum_m x_m$	Incertidumbre combinada (u)	$u = \sqrt{\sum_m u_m^2(c_i)}$
		Incertidumbre expandida (U)	$U = k \cdot u$

(*) *La convolución de dos distribuciones rectangulares iguales es una distribución triangular.*

Asimismo, y de acuerdo con el apartado F.2.4.5 de la ref. [3], es posible estimar una corrección única aplicable a toda la escala angular del instrumento que suele denominarse corrección global.

6.2. Interpretación de resultados

La información mínima que debe figurar en el Certificado de Calibración es la correspondiente a las correcciones e incertidumbres locales del apartado 6.1.

De acuerdo con la ref. [3], las contribuciones tipo A son suficientemente fiables cuando proceden de diez o más medidas repetidas, lo que se satisface en el modelo propuesto. EA recomienda el uso de una incertidumbre expandida que se corresponda con una probabilidad de recubrimiento del 95 %, lo que puede conseguirse con un factor de cobertura $k = 2$ en la mayor parte de los

casos. Para ello es suficiente combinar tres o más distribuciones que contribuyan a la incertidumbre típica compuesta en cuantías similares y que las varianzas de las mismas se estimen de forma suficientemente fiable.

En la calibración considerada, la determinación de cada corrección local utiliza un mínimo de tres contribuciones (tablas 1, 2 y 3), pudiendo ocurrir que las contribuciones más importantes no resulten sensiblemente similares por lo que la adopción de una función de densidad normal para el resultado es poco fiable. No obstante, si una contribución es claramente dominante sobre las demás y su distribución es normal, la hipótesis de normalidad es aceptable. En otros casos habría que obtener la función de distribución a la que realmente responde el resultado y determinar el factor de cobertura para una probabilidad del 95 % con dicha distribución.

La ref. [3] no permite redondeos que disminuyan el valor de la incertidumbre más de un 5 %. En todo caso, es conveniente aplicar el redondeo de la incertidumbre por exceso cuando se aprecie un desequilibrio importante en el valor de sus contribuciones.

Como el valor resultante de las medidas con microscopio de medida debe expresarse en múltiplos de la división de escala del instrumento, así como la incertidumbre de aquél valor, es conveniente que las correcciones locales y sus incertidumbres se ofrezcan con una cifra decimal respecto al valor de la división de escala, de forma que el redondeo a la división de escala se produzca al final del proceso de elaboración del resultado.

Con carácter orientativo, puede establecerse un intervalo de recalibración de 36 meses para microscopios de medida que se usen en laboratorios y puede aconsejarse un intervalo de 24 meses para microscopios que se utilicen en peores condiciones.

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] Norma UNE-EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998).

8. ANEXOS

8.1. Ejemplo numérico

Ejes longitudinales (X e Y) :

Campo de medida $C = (0 \div 25)$ mm y división de escala analógica de valor $E = 0,01$ mm.

Eje angular (α):

Campo de medida $C = (0 \div 360)^\circ$ y división de escala analógica de valor $E = 5'$.

Para la calibración de los ejes longitudinales X e Y se utilizan bloques patrón longitudinales (BPL) de calidad 2, ref. [6], con los que se materializan diez puntos de calibración ($l=10$) de los siguientes valores nominales, en mm:

$$2,5 - 5 - 7,5 - 10 - 12,5 - 15 - 17,5 - 20 - 22,5 - 25$$

Las incertidumbres típicas de los patrones se deducen de la máxima desviación al nominal permitida por la clase indicada, es decir:

$$u_p = \frac{D_{\text{máx}}}{\sqrt{3}}$$

adoptándose:

$$u_{\text{BPL}} = \frac{0,40}{\sqrt{3}} \approx 0,23 \text{ } \mu\text{m para los nominales menores o iguales a 10 mm}$$

$$u_{\text{BPL}} = \frac{0,60}{\sqrt{3}} \approx 0,35 \text{ } \mu\text{m para los nominales de 10 mm a 25 mm}$$

En cada punto de calibración se realizan diez medidas del patrón ($J=10$) y se aprecian los resultados hasta la media división de escala ($E/2 = 0,005$ mm). Por este motivo, la contribución correspondiente es:

$$u^2(c_E) = 2 \frac{(E/4)^2}{3} = \frac{E^2}{24}$$

Para la calibración del eje angular α se emplea un patrón angular de trazos (PAT) certificado en una calidad que asegura que el valor absoluto de las desviaciones al nominal es siempre igual o inferior a $30''$. La incertidumbre estimada es:

$$u_{\text{PAT}} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} \approx 0,3'$$

La escala angular se calibra en los once puntos siguientes ($l=11$):

$$30^\circ - 60^\circ - 90^\circ - 120^\circ - 150^\circ - 180^\circ - 210^\circ - 240^\circ - 270^\circ - 300^\circ - 330^\circ$$

realizándose una única medida en cada punto excepto en el punto 150° en el que se realizan diez medidas.

La temperatura de la sala se ha mantenido durante la calibración entre 19,1 °C y 20,6 °C.

Por consiguiente, en los ejes longitudinales, el modelo resultante para las correcciones locales que se utiliza es:

$$C_i = C_{ci} + C_E = X_{pi} - \bar{X}_i + C_E$$

La incertidumbre expandida ($k = 2$) para la corrección de cada punto calibrado que figura en la última fila de las tablas 4 y 6, responde a una expresión similar a la (1) de 6.1, pero teniendo en cuenta que las lecturas se redondean a $E/2$, es decir:

$$U_i = 2\sqrt{\left(u_{pi}^2 + \frac{s_i^2}{J} + \frac{E^2}{24}\right)}$$

En la tabla 4 se recogen los valores de los patrones y de las mediciones efectuadas en el eje X. Las tres últimas filas de la tabla 4 contienen, respectivamente y para cada punto de calibración, el valor estimado para la corrección local, el de su incertidumbre típica y la estimación de su incertidumbre expandida.

Tabla 4: Toma y tratamiento de datos (eje longitudinal X)

Campo de medida C=0 a 25 mm	División de escala E=0,01mm									
	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Valor del patrón (mm)	0,23	0,23	0,23	0,23	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Incertidumbre típica del patrón: u_{pi} (μm)	2,495	5,000	7,495	10,005	12,500	15,000	17,495	19,995	22,500	24,995
Indicaciones al medir los patrones: ℓ_{ij} (mm)	2,495	5,000	7,495	10,005	12,500	15,005	17,500	20,000	22,500	24,995
	2,495	5,000	7,495	10,005	12,500	15,005	17,495	19,995	22,500	25,000
	2,500	5,000	7,495	10,005	12,500	15,000	17,495	20,000	22,500	24,995
	2,500	5,000	7,495	10,000	12,500	15,000	17,500	19,995	22,500	24,995
	2,495	5,000	7,495	10,005	12,495	15,000	17,495	19,995	22,500	25,000
Valor medio $\bar{\ell}_i$ (mm)	2,4970	5,0000	7,4955	10,0025	12,4990	15,0015	17,4975	19,9970	22,5000	24,9965
Desviación típica: s_i (μm)	2,6	0,0	1,6	2,6	2,1	2,4	2,6	2,6	0,0	2,4
Corrección local: c_i (μm)	+3,0	0,0	+4,5	-2,5	+1,0	-1,5	+2,5	+3,0	0,0	+3,5
Inc. típica de la corr. local: $u(c_i)$ (μm)	2,21	2,05	2,11	2,22	2,18	2,21	2,23	2,23	2,07	2,21
Inc. expand. de la corr. local ($k = 2$): U_i (μm)	4,4	4,1	4,2	4,4	4,4	4,4	4,5	4,5	4,1	4,4

Para cada uno de los puntos de calibración cabe elaborar una tabla similar a la tabla 1. La tabla 5 es la tabla correspondiente al punto de calibración de nominal 10 mm del eje X.

Tabla 5: Contribuciones a la incertidumbre combinada de la corrección local en el punto de calibración de nominal 10 mm (eje longitudinal X)

Magnitud X_m	Estimación x_m	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_m	Contribución a la incertidumbre $u_m(c_i)$
L_{pi}	10 000,0	0,23	Normal	1	0,23
\bar{L}_i	10 002,5	0,83	Normal	-1	-0,83
C_E	0	2,04	Triangular	1	2,04

G_i	-2,5	Incertidumbre combinada (u)	2,21
		Incertidumbre expandida (U) con $k = 1,91$	4,22

(Todos los valores en μm)

En este caso sólo hay dos contribuciones importantes, una triangular y otra normal, por lo que conviene comprobar el resultado de su combinación. Si se calcula la convolución resultante de las dos mediante análisis numérico se obtiene una incertidumbre típica $u=2,20 \mu\text{m}$ y un factor de cobertura $k=1,91$. Si se tiene en cuenta la tercera contribución, la incertidumbre típica es prácticamente la misma, $u=2,21 \mu\text{m}$, por lo que estos son los valores recogidos en las tablas 4 y 5.

La incertidumbre expandida de la corrección local, para el punto de nominal 10 mm, redondeada a las décimas de micrómetro, es:

$$U_i(k = 1,9) = 4,3 \mu\text{m}$$

para una probabilidad de cobertura del 95 %, aproximadamente. Asimismo, también podría decidirse utilizar $4,4 \mu\text{m}$ con $k=2$, dada la escasa diferencia existente entre ambos valores. De acuerdo con este criterio se han obtenido los valores de la última fila de la tabla 4.

En las tabla 6 y 7 figuran las medidas y resultados correspondientes al eje longitudinal Y. Los cálculos correspondientes son análogos a los efectuados para el eje X.

Tabla 6: Toma y tratamiento de datos (eje longitudinal Y)

Campo de medida C=0 a 25 mm	División de escala E=0,01mm									
	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Valor del patrón (mm)	0,23	0,23	0,23	0,23	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Incertidumbre típica del patrón: u_{pi} (μm)	2,500	5,000	7,500	10,000	12,500	15,000	17,500	20,000	22,500	25,000
Indicaciones al medir los patrones: ℓ_{ij} (mm)	2,500	5,000	7,500	10,000	12,500	15,000	17,500	20,000	22,500	25,000
	2,500	5,000	7,505	10,000	12,500	15,005	17,505	20,005	22,500	25,000
	2,505	5,005	7,505	10,000	12,505	15,000	17,505	20,000	22,500	25,000
	2,505	5,005	7,505	10,000	12,500	15,000	17,500	20,005	22,500	25,000
	2,500	5,005	7,505	10,000	12,500	15,000	17,505	20,000	22,500	25,005
Valor medio $\bar{\ell}_i$ (mm)	2,5010	5,0020	7,5035	10,0000	12,5010	15,0005	17,5025	20,0025	22,5005	25,0015
Desviación típica: s_i (μm)	2,1	2,6	2,4	0,0	2,1	1,6	2,6	2,6	1,6	2,4
Corrección local: c_i (μm)	-1,0	-2,0	-3,5	0,0	-1,0	-0,5	-2,5	-2,5	-0,5	-1,5
Inc. típica de la corr. local: $u(c_i)$ (μm)	2,16	2,21	2,19	2,05	2,18	2,13	2,23	2,23	2,13	2,21
Inc. expand. de la corr. local ($k = 2$) : U_i (μm)	4,3	4,4	4,4	4,1	4,4	4,3	4,5	4,5	4,3	4,4

La tabla 7 es la tabla correspondiente al punto de calibración de nominal 22,5 mm del eje Y.

Tabla 7: Contribuciones a la incertidumbre combinada de la corrección local en el punto de calibración de nominal 22,5 mm (eje longitudinal Y)

Magnitud X_m	Estimación x_m	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_m	Contribución a la incertidumbre $u_m(c_i)$
L_{pi}	22 500,0	0,35	Normal	1	0,35
\bar{L}_i	22 500,5	0,50	Normal	-1	-0,50
C_E	0	2,04	Triangular	1	2,04

G_i	-0,5	Incertidumbre combinada (u)	2,13
		Incertidumbre expandida (U) con $k = 1,91$	4,07

(Todos los valores en μm)

Las dos contribuciones minoritarias equivalen a una normal con $u=0,61 \mu\text{m}$, lo que la sitúa en el límite de su toma en consideración (30 % de la dominante) y podría trabajarse sólo con la triangular cuyo factor de cobertura es 1,902. Si se decide considerarlas, el resultado de la convolución numérica proporciona un factor de cobertura prácticamente coincidente ($k=1,906$). En la tabla 7 se ha adoptado $k=1,91$.

La incertidumbre expandida de la corrección local, para el punto de nominal 22,5 mm, redondeada a las décimas de micrómetro, es:

$$U_i(k = 1,9) = 4,1 \mu\text{m}$$

para una probabilidad de cobertura del 95 %, aproximadamente. Asimismo, también podría decidirse utilizar $4,3 \mu\text{m}$ con $k=2$ dada la escasa diferencia existente entre ambos valores. De acuerdo con este criterio se han obtenido los valores de la última fila de la tabla 6.

El modelo resultante para las correcciones locales de la escala angular se resume en:

$$C_i = A_{pi} - \bar{A}_i + C_E \quad (i = 5)$$

$$C_i = A_{pi} - A_i + C_E \quad (i \neq 5)$$

En la tabla 8 se recogen los valores de los patrones y de las mediciones efectuadas. Las tres últimas filas de dicha tabla contienen, respectivamente y para cada punto de calibración, el valor estimado para la corrección local, el de su incertidumbre típica y la estimación de su incertidumbre expandida.

La incertidumbre expandida ($k = 2$) para la corrección de cada punto calibrado que figura en la última fila de dicha tabla 8, responde a la expresión (2) de 6.1 para el punto de repetibilidad ($i=5$), y a la expresión (3) en los demás puntos, es decir:

$$U_i^2 = k^2 \sum_{m=1}^3 u_m^2(c_i) = k^2 \left(u_{pi}^2 + \frac{s_i^2}{J} + \frac{E^2}{6} \right) \quad (i = 5)$$

$$U_i^2 = k^2 \sum_{m=1}^3 u_m^2(c_i) = k^2 \left(u_{pi}^2 + s_i^2 + \frac{E^2}{6} \right) \quad (i \neq 5)$$

Tabla 8: Toma y tratamiento de datos (eje angular α)

Campo de medida C=0 a 360°	División de escala E=6'											
	30°00'	60°00'	90°00'	120°00'	150°00'	180°00'	210°00'	240°00'	270°00'	300°00'	330°00'	
Valor del patrón												
Incertidumbre típica del patrón: u_{pi} (')	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Indicaciones al medir los patrones: α_{ij}	30°00'	60°00'	90°00'	120°00'	150°00'	180°00'	210°00'	240°00'	270°00'	300°00'	330°00'	
					150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'
					150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'
					150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'
					150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'	150°00'
Valor medio: $\bar{\alpha}_i$	30°00'	60°00'	90°00'	120°00'	150°00'	180°00'	210°00'	240°00'	270°00'	300°00'	330°00'	
Desviación típica: s_j (')	---	---	---	---	0	---	---	---	---	---	---	---
Corrección local de calibración: c_{ci} (')	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inc. típica de la corr. local de calibr.: $u(c_{ci})$ (')	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06
Inc. de la correcc. de calibr. (k = 2): U_i (')	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1

Los resultados de la tabla 9 son los mismos, en este caso, para todos los puntos calibrados en el eje angular.

Tabla 9: Contribuciones a la incertidumbre combinada de la corrección local en el punto de nominal 120° (eje angular α)

Magnitud X_m	Estimación x_m	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_m	Contribución a la incertidumbre $u_m(c_i)$
A_{pi}	120° 00'	0,30	Normal	1	0,30
A_i	120° 00'	0,00	Normal	-1	-0,00
C_E	0	2,04	Triangular	1	2,04

C_i	0	Incertidumbre combinada (u)	2,06
		Incertidumbre expandida (U) con $k = 1,90$	3,91

NOTA: Todos los valores angulares sin unidad, en minutos sexagesimales.

La incertidumbre está determinada por una única contribución mayoritaria, que es triangular, correspondiéndole un factor de cobertura igual a 1,90. Si se consideran ambas contribuciones, el factor de cobertura no varía apreciablemente, es decir $k=1,90$, y así se han obtenido los datos en la tabla 9.

Redondeando los resultados de la tabla 9 a las décimas de minuto se obtiene como incertidumbre expandida de la corrección local:

$$U_i(k = 1,9) = 3,9'$$

para una probabilidad de cobertura del 95%, aproximadamente. Asimismo, también podría decidirse utilizar 4,1' con $k=2$ dada la pequeña diferencia existente entre ambos valores y con este factor de cobertura se han registrado los valores de la última fila de la tabla 8.

Metrología

NIPO: 113-19-006-0