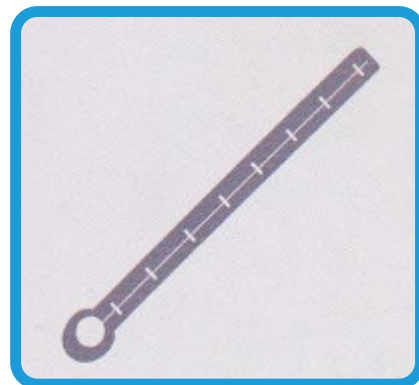
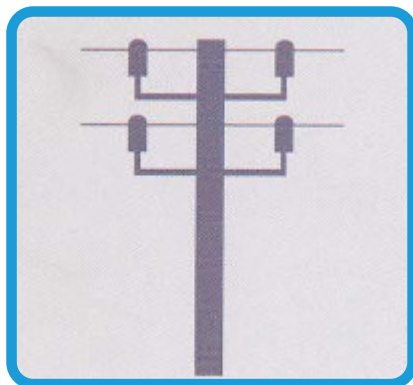
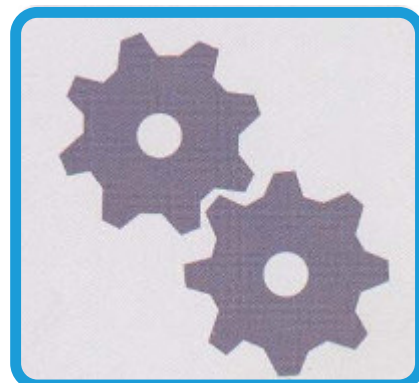
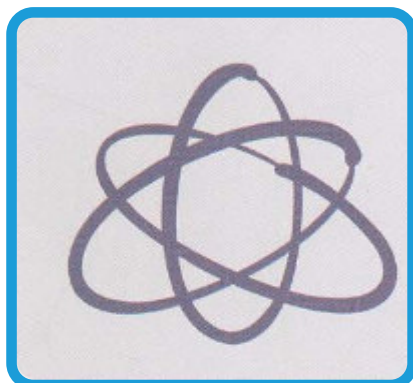
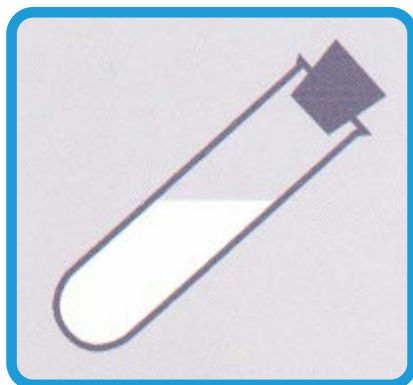
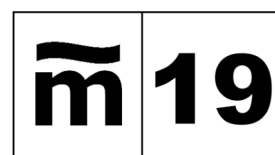


Metrología



PROCEDIMIENTO DI-030 PARA LA
CALIBRACIÓN DE CABEZAS
MICROMÉTRICAS



PROCEDIMIENTO DI-030 CALIBRACIÓN DE CABEZAS MICROMÉTRICAS

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.- GENERALES.....	3
3.2.- DE LA CABEZA MICROMÉTRICA.....	5
4.- GENERALIDADES.....	5
4.1.- NOTACIÓN.....	6
5.- DESCRIPCIÓN.....	7
5.1.- EQUIPOS Y MATERIALES.....	7
5.2.- OPERACIONES PREVIAS.....	8
5.3.- PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	9
5.4.- TOMA Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	12
6.- RESULTADOS.....	13
6.1.- CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES.....	13
6.2.- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	14
7.- REFERENCIAS.....	15
8.- ANEXOS.....	15

1.- OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer un método de calibración para CABEZAS MICROMÉTRICAS (CM), codificadas como D.02.08 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [5]).

2.- ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a los instrumentos de metrología dimensional denominados CABEZAS MICROMÉTRICAS. El rango de indicación (C) de estos instrumentos, generalmente, no excede de 75 mm, con divisiones de escala (E) de 0,01 mm; 0,005 mm o 0,001 mm.

No se consideran divisiones de escala inferiores porque se supera la capacidad mecánica de medida de estos instrumentos. El dispositivo indicador de su medida puede ser de tipo analógico o de tipo digital.

3.- DEFINICIONES

3.1.- Generales

La terminología que se utiliza en este Manual es la del VIM [1]. No obstante, se recogen a continuación algunas definiciones específicas útiles para la comprensión del mismo.

Calibración [1] (2.39):

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas, obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

NOTAS:

- 1 Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.
- 2 Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente "autocalibración", ni con una verificación de la calibración.
- 3 Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Intervalo de indicaciones [1] (4.3):

Conjunto de valores comprendido entre las dos indicaciones extremas.

NOTAS:

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

Escala de un instrumento de medida [1] (3.5):

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

N. del A.: La separación entre las marcas, expresada en unidades de la magnitud medida, es la denominada “división de escala”.

Incertidumbre (de medida) [1] (2.26):

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información utilizada.

NOTAS:

- 1 La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.
- 2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiapertura de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada.
- 3 En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.
- 4 En general, para una información dada, se sobreentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Mensurando [1] (2.3):

Magnitud que se desea medir.

NOTAS:

1. La especificación de un mensurando requiere el conocimiento de la naturaleza de la magnitud y la descripción del estado del fenómeno, cuerpo o sustancia cuya magnitud es una propiedad, incluyendo las componentes pertinentes y las entidades químicas involucradas.
2. La medición, incluyendo el sistema de medida y las condiciones bajo las cuales se realiza ésta, podría alterar el fenómeno, cuerpo o sustancia, de tal forma que la magnitud bajo medición difiriera del mensurando. En este caso sería necesario efectuar la corrección apropiada.

EJEMPLO: La longitud de una varilla cilíndrica de acero en equilibrio térmico a una temperatura ambiente de 23 °C será diferente de su longitud a la temperatura de 20 °C, para la cual se define el mensurando. En este caso, es necesaria una corrección.

Repetibilidad (de los resultados de las mediciones [1] (2.21):

Precisión de medida; es decir, proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares [[1] (2.15)] bajo condiciones de repetibilidad.

NOTAS:

- 1 Las condiciones de repetibilidad comprenden:
 - El mismo procedimiento de medida.
 - El mismo observador.
 - El mismo instrumento o sistema de medida
 - Las mismas condiciones de utilización.
 - El mismo lugar
 - Repetición durante un corto periodo de tiempo.
- 2 Es habitual que la repetibilidad se exprese numéricamente mediante medidas de dispersión tales como la desviación típica, la varianza o el coeficiente de variación bajo las condiciones especificadas.

3.2.- De la Cabeza Micrométrica

Cara de medida de la cabeza micrométrica:

Es la superficie del extremo del elemento móvil de la CM, generalmente plana y de forma circular, o superficie esférica. La cara de medida es perpendicular a la dirección del desplazamiento en la CM; y su contacto con la superficie del mecanismo que produce el desplazamiento a medir, se realiza para obtener la indicación de la medida.

Elemento móvil de la cabeza micrométrica:

Sistema de tornillo micrométrico que produce el movimiento unidireccional de su eje y que proporciona la amplificación de la medida.

Tambor:

Carcasa de la CM, con una zona giratoria para el desplazamiento del elemento móvil y otra fija de unión al cuerpo. Entre ambas zonas se dispone la escala de lectura.

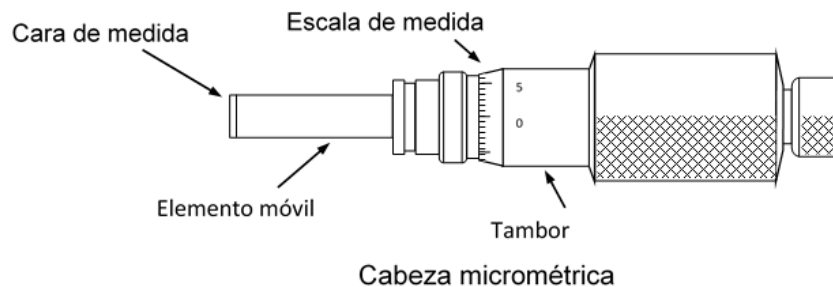


Figura 1: Elementos de la cabeza micrométrica

4.- GENERALIDADES

Las CM consideradas en este procedimiento son instrumentos portátiles de metrología dimensional utilizados para la medida de desplazamientos de elementos móviles en máquinas y mecanismos, por método directo.

La medida se realiza por contacto mecánico entre el elemento móvil del mecanismo que produce el desplazamiento objeto de la medida y la cara de medida de la CM. El resultado de la medida es el desplazamiento del elemento móvil de la CM y su lectura se realiza en la escala de que dispone el tambor, constituida por una regla en el tornillo para los milímetros, y otra en el tambor graduado que gira solidariamente con el tornillo, para las décimas y centésimas de milímetro y, en ocasiones, un nonius para los micrómetros. Puede existir un dispositivo de lectura digital.

La escala de medida de una CM se basa en un sistema de amplificación de tornillo micrométrico, con rosca de alta precisión de paso (p) pequeño, situada dentro del tambor de la CM. Cada desplazamiento p de la cara de medida de la CM, produce un desplazamiento circunferencial $\pi \cdot D$ del tambor, siendo D el diámetro de la parte cilíndrica del tambor donde se ha grabado la escala de medida.

Para la medida del mensurando, la CM suele fijarse en la estructura fija del mecanismo que produce el desplazamiento objeto de la medida, sobre un vástago de sujeción situado entre el tambor de la cabeza y su elemento móvil. El desplazamiento a medir debe quedar perpendicular a la cara de medida de la CM.

El procedimiento de calibración de CM que se describe en el presente documento, consiste en la comparación de los resultados de las medidas de bloques patrón longitudinales (codificados como D-01.02 en la referencia [5]), efectuadas con la CM, con el valor certificado de los mismos.

4.1.- Notación

En el presente procedimiento, se utilizan las abreviaturas y símbolos que a continuación se relacionan.

Las variables aleatorias se representan mediante letras mayúsculas; sus valores estimados mediante las correspondientes letras minúsculas, de acuerdo al criterio utilizado en el documento de la referencia [2].

BPL	Bloque Patrón Longitudinal.
C	Rango de indicación.
C_i	Corrección de calibración de la CM, en el punto i -ésimo de calibración.
C_{Ci}	Corrección local de calibración de la CM, en el punto i -ésimo de calibración.
C_E	Corrección por la división de escala de la CM.
CM	Cabeza Micrométrica.
E	División de escala de la CM.
I	Número de puntos de calibración.
J	Número de medidas de calibración realizadas.
k	Factor de cobertura.
k_{phi}	Factor de cobertura del BPL h -ésimo, en el i -ésimo punto de calibración (siempre que exista adherencia de BPL).
N_i	Número de BPL adheridos entre sí para componer la longitud nominal del punto i -ésimo de calibración.
s_{X_i}	Desviación típica experimental de las lecturas de la CM, en el punto i -ésimo de calibración.
$s_{\bar{X}_i}$	Desviación típica de la media de lecturas de la CM, en el punto i -ésimo de calibración.
T	temperatura de la CM.
T_o	temperatura del BPL.
u_i	Incertidumbre típica de la media de las medidas de la CM en el punto i -ésimo de calibración.

$u(y)$	Desviación típica resultante.
$u_i(y)$	Desviación típica de cada una de las N variables de entrada.
$u_{C_{ci}}$	Incertidumbre típica de la corrección de calibración local de la CM en el punto i -ésimo de calibración.
$U_{C_{ci}}$	Incertidumbre expandida de la corrección local de la CM en el punto i -ésimo de calibración.
u_{C_E}	Incertidumbre típica de la corrección por división de escala de la CM.
u_{C_T}	Incertidumbre típica de la corrección por dilatación diferencial.
u_{phi}	Incertidumbre típica de la longitud del BPL h -ésimo utilizado en el punto i -ésimo de calibración. Se obtiene de su certificado de calibración.
U_{phi}	Incertidumbre expandida de la longitud del BPL h -ésimo utilizado en el punto i -ésimo de calibración. Se obtiene de su certificado de calibración.
x_{ij}	Lectura j -ésima de la medida de la CM, en el punto i -ésimo de calibración.
\bar{x}_i	Media aritmética de las J lecturas de la CM en el punto i -ésimo de calibración.
x_{phi}	Longitud certificada del BPL h -ésimo de la adherencia realizada en el punto i -ésimo de calibración.
ν_{ef}	Grados efectivos de libertad.
ν_i	grados efectivos de libertad de cada una de las N variables de entrada.
α	coeficiente de dilatación de la CM.
α_o	coeficiente de dilatación del BPL.

5.- DESCRIPCIÓN

5.1.- Equipos y materiales

Para la calibración de las CM se emplearán los patrones relacionados a continuación:

- Patrón plano-paralelo de vidrio (D-06.15 según ref. [5]).

Con un defecto de planitud (incluyendo su incertidumbre):

$$\begin{aligned} &\leq 1,0 \mu\text{m} \text{ para CM con } E < 0,01 \text{ mm} \\ &\leq 3,5 \mu\text{m} \text{ para CM con } E \geq 0,01 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Patrón de planitud de vidrio (D-06.04 según ref. [5]).

Se requiere el uso de un patrón de planitud, para comprobar la especificación de planitud de la superficie de medida de la CM, cuando el defecto de planitud (incluyendo su incertidumbre) del patrón plano-paralelo, no sea el adecuado para esta función. Resultan adecuados patrones de planitud de vidrio con un defecto de planitud, incluyendo su incertidumbre, $\leq 0,3 \mu\text{m}$

- Bloques Patrón Longitudinales (D-01.02 según ref. [5]).

La elección de la calidad de los BPL (ref. [8]) dependerá de la división de escala de la CM a calibrar.

En la tabla 1 se indica lo recomendado en el presente procedimiento en cuanto a la elección de la calidad de los BPL a utilizar.

División de escala E (mm)	Calidad de los BPL
$E < 0,01$	1 o superior
$E \geq 0,01$	2 o superior

Tabla 1. Calidad de los BPL utilizados en la calibración.

Los nominales de los BPL necesarios para la calibración dependerán del rango de indicación y división de escala de la CM, de acuerdo a lo que se especifica en el punto 5.3.3 del presente procedimiento.

- Dispositivo para la medida de la temperatura ambiente:
 - Tales como termómetro de mercurio, termómetro electrónico, registrador gráfico, etc., con incertidumbre igual o inferior a 0,5 °C.
- Como elementos auxiliares, se utilizarán:
 - Un soporte de comparadores (D-03.05 según ref. [5]).
 - Mesa de planitud (D-06.05 según ref. [5]).
 - Trapos y un producto desengrasante. Se recomienda utilizar trapos de algodón y una mezcla de alcohol y éter al 50 % como producto desengrasante.
 - Se recomienda la utilización de una pantalla de luz monocromática para la medida, con el patrón de planitud de vidrio, de la planitud de la cara de medida de la CM.

5.2.- Operaciones previas

- 5.2.1. Para que los resultados obtenidos en la calibración queden inequívocamente relacionados con la CM calibrada, ésta debe estar identificada, de forma permanente, con al menos un NÚMERO DE SERIE o DE IDENTIFICACIÓN. Además, es recomendable que esté también identificada la MARCA y el MODELO de la CM.

En el caso de que no exista alguno de los datos antes citados, se puede proceder a la identificación de la CM de la mejor forma posible (por ejemplo, mediante etiqueta fuertemente adherida a la misma, con un código de identificación único), de forma que no haya duda alguna entre el equipo calibrado y los correspondientes resultados obtenidos de su calibración.

- 5.2.2. Todos los patrones e instrumentos utilizados para esta calibración deberán tener trazabilidad a patrones nacionales o internacionales. Los certificados de calibración de los patrones deberán contener, al menos, la siguiente información:
- Laboratorio emisor.
 - Identificación del equipo calibrado.
 - Fecha de emisión del certificado.
 - Condiciones ambientales.
 - Procedimiento de calibración.
 - Resultados obtenidos en la calibración.
 - Incertidumbre *expandida* (*indicando el valor de k*).
 - Declaración de trazabilidad.

- 5.2.3. Es conveniente que la calibración se realice en una sala donde la temperatura ambiente se mantenga, durante todo el proceso, en el intervalo:

$$20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}.$$

- 5.2.4. Se realizará una inspección visual previa, de la CM a calibrar, donde se debe comprobar el buen estado general del instrumento, la existencia de oxidaciones, arañazos o golpes, principalmente, en la cara de medida, que imposibiliten su uso; el movimiento suave de giro del tambor y la correcta legibilidad de su escala.
- 5.2.5. Se procederá a la limpieza, con trapos y producto desengrasante, de los BPL seleccionados para la calibración (calidad y nominales de acuerdo a lo especificado en los puntos 5.1 y 5.3.3. del presente procedimiento). Se realizarán las adherencias requeridas entre BPL.

Se prepararán y limpiarán, para su uso, el resto de patrones o elementos que intervienen en la calibración; se limpiará la cara de medida de la CM.

- 5.2.6. Se fijará el patrón plano-paralelo a la mesa de planitud. Para ello, se puede utilizar plastilina o algún otro elemento que realice la misma función.

La CM se sujetará al brazo del soporte de comparadores, asegurando el alineamiento del eje del elemento móvil de la CM con el eje de referencia de la medida, con el objeto de minimizar los posibles errores de coseno.

Se ajustará la posición de la CM de forma que indique el valor cero cuando la cara de medida de la CM esté en contacto con el patrón plano-paralelo de vidrio.

- 5.2.7. Se dejarán estabilizar térmicamente en la sala de trabajo, al menos durante media hora antes de efectuar las medidas, la CM y los patrones que intervienen en la calibración (la mesa de planitud necesita más tiempo de estabilización térmica, pero se da por hecho en este procedimiento que ésta se encuentra instalada en la sala con anterioridad). Es recomendable que los BPL descansen sobre una base metálica.
- 5.2.8. Antes de proceder a la realización de las medidas, se comprobará su planitud con el patrón de planitud de vidrio o el patrón plano-paralelo de vidrio (según lo indicado en el punto 5.1 del presente procedimiento), no admitiéndose valores del defecto de planitud superiores a 0,001 mm.

Para ello, se apoyará firmemente el patrón de planitud sobre la superficie de la cara de medida de la CM, asegurando una correcta adherencia entre el patrón y la superficie. Se contarán el número de franjas de interferencia, debidas al defecto de planitud de la superficie, comprobando que no superan el número de cuatro franjas, que son las que corresponden a un defecto de planitud $\leq 0,001$ mm.

5.3.- Proceso de calibración

- 5.3.1. El objeto de la calibración de la CM es conocer la discrepancia entre las medidas obtenidas con ella y los valores convencionalmente verdaderos del mensurando. Esta discrepancia de las medidas queda acotada, para cada uno de los l puntos de calibración, con el conocimiento del valor de la corrección local y su incertidumbre.

Para el cálculo de estos parámetros, se realizarán medidas sobre patrones certificados y se deberán evaluar, mediante correcciones y sus respectivas incertidumbres, los

efectos que tengan en la medida todas aquellas magnitudes, cuya existencia o variación, influyan de forma significativa en el resultado de la calibración.

Una de estas magnitudes es la temperatura. La calibración de la CM se va a realizar en unas condiciones de medida donde la temperatura ha sido controlada dentro del intervalo $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$. Se aplicará una corrección (C_T) debida a la dilatación diferencial de los BPL y la CM, por encontrarse a temperaturas diferentes entre sí y distintas de la temperatura de referencia de 20 °C .

Se considera despreciable el error producido por el desalineamiento entre el eje del elemento móvil de la CM y el eje de referencia de la medida.

No se considerará corrección por deriva de los bloques patrón longitudinales utilizados, pues su valor es insignificante frente al valor de las medidas de la CM. Por tanto, los valores estimados y sus incertidumbres de las longitudes de los BPL serán los indicados en sus certificados de calibración.

La diferencia existente entre los valores certificados de los BPL y las lecturas de las medidas realizadas con la CM a estos patrones queda determinada por la corrección local de calibración (C_{ci}), según la ecuación siguiente:

$$C_{ci} = x_{pi} - \bar{x}_i = \sum_{h=1}^{N_i} x_{phi} - \bar{x}_i$$

En la lectura de la medida realizada con la CM, se produce un error debido al redondeo del resultado a un múltiplo de su división de escala, puesto que la CM no es capaz de apreciar medidas inferiores a la división de escala E . Este error, que sí es significativo en el resultado de la medida, queda considerado en la corrección por la división de escala (C_E).

Por tanto, la corrección de calibración, en cada uno de los l puntos de calibración, en las condiciones a las que se han realizado las medidas, responde al siguiente modelo:

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

- 5.3.2. La calibración propiamente dicha consistirá en la reiteración de medidas con la CM sobre los BPL que materialicen los nominales de los puntos de calibración elegidos. El número de puntos de calibración, así como el número de repeticiones de las medidas con la CM en cada punto de calibración, dependerá de la división de escala de la CM. La calidad de los BPL será la correspondiente a lo especificado en el punto 5.1 del presente procedimiento de calibración.

La elección de los puntos de calibración se hará de acuerdo a lo siguiente:

- Se elegirán, al menos, l puntos de calibración que dependerán de la división de escala (E) de la CM, de acuerdo a lo indicado en la tabla 2.

E (mm)	l	J
< 0,01	11	10
≥ 0,01	6	1 en ($l - 1$) puntos 10 en 1 punto

Tabla 2: Número de puntos de calibración (l) y repeticiones (J) de la medida.

- Se distribuirán de forma aproximadamente uniforme, de manera que se abarque todo el rango de indicación de la CM.
- Se elegirán los puntos de calibración para los que se disponga de los BPL que materialicen estos nominales. En los puntos de calibración donde no se disponga de BPL de este valor nominal, se puede materializar la longitud realizando la unión de los BPL necesarios mediante adherencia. En estos casos, la incertidumbre de la longitud resultante quedará penalizada. En el apartado 6.1 del presente procedimiento, se expone el cálculo de su incertidumbre. Se recomienda no elegir puntos de calibración donde sea necesario realizar adherencias de más de tres BPL y, en todo caso, elegir los puntos de calibración minimizando la necesidad de adherencias de BPL.
- Es preferible, cuando sea posible, elegir puntos de calibración diferentes a los elegidos en calibraciones anteriores de la misma CM, si se dispone de estos datos.

5.3.3. Efectuada la estabilización térmica de los equipos y patrones que intervienen en la calibración, se procederá a la realización de las medidas de la forma siguiente:

- Se anotará el valor de la lectura inicial de la temperatura a la que se encuentra la sala de medida.
- Se desplazará el elemento móvil de la CM mediante el giro del tambor, para poder situar el BPL que corresponda sobre el patrón plano-paralelo de vidrio. De la misma forma, pero en sentido inverso, se desplazará suavemente el elemento móvil de la CM, procediendo así a la medida del BPL, hasta que la cara de medida esté en contacto con el BPL.
- Se anotará la lectura de la medida así realizada (x_{ij}).

Este proceso se repetirá J veces, de acuerdo a lo indicado en la tabla 2, para cada uno de los I puntos de calibración. Es conveniente variar la posición del BPL, de modo que cuando se realicen varias medidas en un punto de calibración, se alternen las 2 posiciones del BPL en cada medida.

La manipulación de los BPL se realizará utilizando guantes o pinzas.

Finalmente, se anotará la lectura de la temperatura medida a la que se encuentra la sala.

5.3.4. El control a efectuar entre calibraciones consistirá, siempre antes de proceder al uso de la CM, en la comprobación del buen estado de la misma, inspeccionando la existencia de golpes, arañazos u otros daños que puedan afectar al correcto funcionamiento del instrumento.

Se prestará especial atención a la correcta legibilidad de la escala de la CM y al movimiento suave y constante de giro de la misma.

Posicionada la CM para su uso, es recomendable comprobar, al menos una vez, la correcta repetibilidad de sus medidas, tanto de la medida utilizada de referencia (reiterando la medida sobre el patrón o superficie de referencia) como del resultado de la medida (reiterando la medida sobre el mensurando).

Cuando se detecte un mal funcionamiento de la CM, se debe proceder a efectuar una reparación de la misma, bien por el propio usuario o por personal experto. Antes de poner en uso el instrumento tras una reparación, se debe efectuar su calibración.

5.4.- Toma y tratamiento de datos

Se aplicará algún criterio de aceptación o rechazo de las medidas realizadas, bien sea de tipo estadístico (disponibles en bibliografía común de estadística) o basado en la experiencia del jefe del laboratorio.

Para cada uno de los I puntos de calibración, se calcularán los siguientes parámetros:

5.4.1. Puntos de calibración de J medidas.

- La media aritmética de las lecturas de calibración (\bar{x}_i), según la ecuación siguiente:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^J x_{ij}}{J}$$

- La desviación típica experimental (s_{x_i}) de las medidas de calibración realizadas, según la ecuación siguiente:

$$s_{x_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{J - 1}}$$

- La desviación típica de la media de las medidas de calibración realizadas ($s_{\bar{x}_i}$), mediante la ecuación siguiente:

$$s_{\bar{x}_i} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{J}}$$

- La corrección local de calibración (c_{ci}), mediante la ecuación siguiente:

$$c_{ci} = x_{pi} - \bar{x}_i$$

En el caso de materializarse el patrón adhiriendo N_i bloques patrón longitudinales, el valor de x_{pi} se calcularía de la forma siguiente:

$$c_{ci} = x_{pi} - \bar{x}_i = \sum_{h=1}^{N_i} x_{phi} - \bar{x}_i$$

5.4.2. Puntos de calibración de 1 medida.

- La media aritmética de las lecturas de calibración (\bar{x}_i) es el valor de la única medida realizada (x_i):

$$\bar{x}_i = x_i$$

- La desviación típica de la media de las medidas de calibración en ese punto ($s_{\bar{x}_i}$), se estima mediante la ecuación siguiente:

$$s_{\bar{x}_i} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{J}} = s_{x_i}$$

- La corrección local de calibración (c_{ci}), mediante la ecuación siguiente:

$$c_{ci} = x_{pi} - x_i$$

En el caso de realizarse el patrón con adherencias de N_i bloques patrón longitudinales, el valor de x_{pi} se calcularía de la forma siguiente:

$$c_{ci} = x_{pi} - x_i = \sum_{h=1}^{N_i} x_{phi} - x_i$$

6.- RESULTADOS

6.1.- Cálculo de incertidumbres

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

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

Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
x_{pi}	$x_{pi} = \sum_{h=1}^{N_i} x_{phi}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{N_i} \left(\frac{U_{phi}}{k_{phi}} \right)^2}$	Normal	1	$\sqrt{\sum_{h=1}^{N_i} \left(\frac{U_{phi}}{k_{phi}} \right)^2}$
\bar{x}_i	$\bar{x}_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J x_{ij}$ x_i	$s_{x_i} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{J}}$ (1) $\frac{s_{x_i}}{\sqrt{1}}$	Normal	-1	$-\frac{s_{x_i}}{\sqrt{J}}$ $-\frac{s_{x_i}}{\sqrt{1}}$
c_T	0	$\alpha \cdot \frac{2 \cdot \Delta T_{\max}}{\sqrt{6}} \cdot \bar{x}_i$	Triangular	1	$\alpha \cdot \frac{2 \cdot \Delta T_{\max}}{\sqrt{6}} \cdot \bar{x}_i$
c_E	0	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	Rectangular	1	$\frac{E}{\sqrt{12}}$

C_i	$c_i = \sum_{h=1}^{N_i} x_{phi} - \bar{x}_i$	Incertidumbre combinada	$u_{C_i} = \sqrt{\sum_{h=1}^{N_i} \left(\frac{U_{phi}}{k_{phi}} \right)^2 + \frac{s_{X_i}^2}{J} + \frac{(\alpha \cdot 2 \cdot \Delta T_{max} \cdot \bar{x}_i)^2}{6} + \frac{E^2}{12}}$
Incertidumbre expandida			$U_{C_i} = k \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{N_i} \left(\frac{U_{phi}}{k_{phi}} \right)^2 + \frac{s_{X_i}^2}{J} + \frac{(\alpha \cdot 2 \cdot \Delta T_{max} \cdot \bar{x}_i)^2}{6} + \frac{E^2}{12}}$

⁽¹⁾ El valor de J en los puntos de una medida vale 1, siendo en este caso s_{X_i} la desviación típica de las J medidas realizadas en el punto de repetibilidad.

Para determinar el valor de k , se deben calcular los grados efectivos de libertad de la distribución estadística resultante (la de la variable C_i), según lo indicado en el punto 1.5 del anexo 1.

En el Anexo 2 se incluye un ejemplo numérico de aplicación del cálculo de incertidumbres.

Habitualmente se realizan los cálculos con una cifra decimal más de la división de escala del instrumento utilizado, redondeando al final según se establece en el párrafo 6.3 de la ref. [3] (al valor superior, salvo que el redondeo sea inferior al 5 %, en cuyo caso se podría redondear al valor inferior), el valor de la corrección de calibración y su incertidumbre a un múltiplo entero de la división de escala del instrumento.

6.2.- Interpretación de resultados

En los certificados de calibración de laboratorios de calibración acreditados, como mínimo debe figurar, de acuerdo con lo establecido en la ref. [6], el valor de la corrección en cada punto de calibración y la incertidumbre expandida de la misma, con su correspondiente factor de cobertura k .

La corrección c_i obtenida para el i -ésimo punto de calibración es el valor que debería adicionarse a las lecturas brutas de la CM, cuando se esté trabajando en el entorno del nominal del punto de calibración i . De esta forma se obtendría la lectura corregida.

Cada corrección c_i lleva asociada una incertidumbre de calibración, $U(c_i)$. Estas incertidumbres tienen que ser tenidas en cuenta para asegurar la conformidad de los resultados de la calibración (las características metrológicas del instrumento) con ciertas tolerancias, las cuales han sido especificadas para asegurar la aptitud del instrumento para determinadas labores metrológicas.

6.2.1- Períodos de recalibración

A título orientativo, se considera adecuado recalibrar las CM cada 12 meses.

No obstante, el responsable final de asignar el período de recalibración, y revisarlo cuando sea preciso, es siempre el usuario del equipo.

El período de recalibración antes indicado, se debería reducir en el caso que se presente alguna de las circunstancias siguientes:

- Elevada frecuencia de utilización.
- Condiciones de empleo desfavorables (personal poco cualificado, ambientes sucios, uso al aire libre etc.).
- Cuando se necesiten requisitos especiales de seguridad (Defensa, Sanidad, Justicia, etc.).

Siempre debe procederse a una recalibración de las CM, cuando los resultados que se estén obteniendo con ella hagan dudar al usuario del correcto estado de las mismas, y cuando haya sido necesario proceder a una reparación.

7.- REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados. 3ª edición 2012 (Ed. VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones), Centro Español de Metrología, 2012.
- [2] Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida., 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO: 706-09-002-6.
- [3] Guía EA-4/02 M: 2013, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Sept. 2013, rev. 01.
- [4] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. CEM. Edición 4. 2003.
- [5] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional. 1ª ed. Centro Español de Metrología, 2005, NIPO: 165-02-003-4.
- [6] Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones. CEA-ENAC-LC/02, Rev. 1, Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), Enero 1998.
- [7] Criterios específicos de acreditación. Elaboración de certificados de calibración. CEA-ENAC-LC/01, Rev. 3, Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), Febrero 1998.
- [8] Norma UNE-EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998).
- [9] Norma UNE 82309-1:1999, Mesas de planitud. Parte 1: Acero fundido.
- [10] Norma UNE 82309-2:1997, Mesas de planitud. Parte 2: Granito

8.- ANEXOS

ANEXO 1.- DESARROLLO DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

Siguiendo el criterio utilizado en la ref. [4], las variables aleatorias van a ser denominadas mediante letras mayúsculas. Las letras minúsculas corresponden a los valores estimados de la correspondiente variable aleatoria.

1.1. Relación magnitud de salida – magnitudes de entrada

De acuerdo con el apartado 6 del presente procedimiento, donde se han evaluado, mediante correcciones, aquellas magnitudes que influyen de forma significativa en el resultado de la calibración del instrumento, la corrección en cada punto de calibración (magnitud de salida) queda definida con la siguiente función modelo:

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

siendo:

- C_i Corrección de calibración en el punto i-ésimo.
- C_{ci} Corrección local de calibración en el punto i-ésimo.
- C_T Corrección por la dilatación diferencial.
- C_E Corrección por la división de escala de la CM.

Sustituyendo la expresión de la corrección local de calibración, resulta:

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

siendo:

X_{pi} Valor del patrón en el punto i -ésimo.

\bar{X}_i Valor medio de las indicaciones de la CM en el punto i -ésimo.

En la expresión de la corrección de calibración (C_i), se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- Se considera despreciable el error producido por el desalineamiento entre el eje del elemento móvil de la cabeza micrométrica y el eje de referencia de la medida.
- La corrección por deriva de los BPL utilizados en la calibración es insignificante frente al valor de las medidas de la CM.

1.2. Ley de propagación de incertidumbres

Aplicando al modelo la ley de propagación de incertidumbres, considerando que todas las variables aleatorias son independientes, es decir, sus covarianzas son nulas, se obtiene la siguiente ecuación que relaciona las incertidumbres típicas de todas las variables:

$$u_{C_i}^2 = u_{X_p}^2 + u_{\bar{X}_i}^2 + u_{C_T}^2 + u_{C_E}^2$$

1.3. Estimaciones de las variables e incertidumbres típicas

1.3.1.- Longitud del patrón (X_{pi}) en el i -ésimo punto de calibración.

La longitud del patrón en el i -ésimo punto de calibración se estimará a partir de las longitudes certificadas de los BPL que forman la adherencia. Cuando el patrón esté formado solamente por un BPL, la longitud será la longitud certificada del BPL (este es el caso de $N_i = 1$).

$$x_{pi} = \sum_{h=1}^{N_i} x_{phi}$$

siendo:

x_{pi} longitud estimada del patrón en el i -ésimo punto de calibración.

x_{phi} longitud certificada del BPL h -ésimo de la adherencia del punto de calibración i .

N_i número de BPL que forman la adherencia en el punto de calibración i .

La incertidumbre típica de la longitud del patrón se obtiene aplicando la ley de propagación de incertidumbres típicas a la ecuación que define la longitud del patrón, suponiendo que las longitudes de los BPL que forman la adherencia son independientes, resultando:

$$u_{pi}^2 = \sum_{h=1}^{N_i} u_{phi}^2$$

siendo:

u_{phi} incertidumbre típica certificada del BPL h -ésimo de la adherencia del punto de calibración i .

Cuando los BPL utilizados para realizar la adherencia pertenezcan al mismo juego de bloques, el valor de sus covarianzas es probable que sea elevado y la hipótesis de independencia falsa (porque habrán sido calibrados utilizando el mismo instrumento comparador). No obstante, mantener la hipótesis de independencia de los BPL será válida para la mayoría de las calibraciones, siempre que la elección de la calidad de los bloques sea la adecuada. Sin embargo indicar que, en algunos casos, puede ser prudente estimar la incertidumbre típica de la longitud patrón como adición lineal de las incertidumbres típicas de las longitudes de los BPL que forman la adherencia.

$$u_{pi} = \sum_{h=1}^{N_i} u_{phi}$$

La incertidumbre típica u_{phi} de cada BPL de la adherencia se calcula a partir de la incertidumbre expandida U_{phi} certificada, para un factor de cobertura k_{phi} , en el certificado de calibración.

$$u_{phi} = \frac{U_{phi}}{k_{phi}}$$

La estimación de la incertidumbre u_{pi} es suficientemente "fiable", por lo que el número de grados de libertad, $v(u_{pi})$, correspondientes serán infinitos, salvo que se mencione lo contrario en el certificado de calibración de los BPL.

1.3.2.- Media de las medidas de calibración en el punto i -ésimo (\bar{X}_i).

En los puntos de calibración donde se han repetido las medidas, su valor estimado es la media de las J medidas de calibración, según se ha calculado en el punto 5.4.

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^J x_{ij}}{J}$$

y su incertidumbre típica es la incertidumbre típica de la media, según se ha calculado en el punto 5.4.

$$s_{-x_i} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{J}}$$

En los puntos de calibración de una medida, el valor estimado de la media de las medidas es la medida ($\bar{x}_i = x_i$).

Para el cálculo de la incertidumbre típica en el punto de una medida, se parte de la hipótesis razonable de que la repetibilidad de la CM no sufre variaciones apreciables a lo largo de su rango de indicación. Por lo tanto, se estima que la desviación típica de la variable X_i es la misma que la de las medidas en el punto de J medidas (s_{X_i}). Y por consiguiente, la desviación típica de la media, teniendo en cuenta que sólo se ha realizado una medida, será:

$$s_{x_i} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{1}} = s_{x_i}$$

La estimación *tipo A* que se ha expuesto se realiza con un número suficiente de repeticiones (≥ 10). Por lo tanto, de acuerdo a las condiciones incluidas en la referencia [2], la estimación es suficientemente fiable. El número de grados de libertad será igual o superior a 9.

1.3.3.- Corrección por la dilatación diferencial. (C_T).

Se considera esta corrección debido al error que se produce en la medida por la dilatación diferencial entre el BPL y la CM, al encontrarse ambos a temperaturas diferentes y distintas a la temperatura de referencia de 20 °C.

Esta corrección será despreciable para CM con divisiones de escala $E < 0,01$ mm Su valor se estima mediante la siguiente ecuación:

$$c_T = [\alpha_o (T_o - 20) - \alpha (T - 20)] \bar{x}_i$$

siendo:

- α coeficiente de dilatación de la CM.
- α_o coeficiente de dilatación del BPL.
- T temperatura de la CM.
- T_o temperatura del BPL.
- \bar{x}_i media aritmética de las J lecturas de la CM en el i -ésimo punto de calibración.

Expresando c_T en función de $\Delta\alpha = \alpha_o - \alpha$, y $\Delta T = T_o - T$, resulta:

$$c_T = [(\alpha + \Delta\alpha)(T + \Delta T - 20) - \alpha (T - 20)] \bar{x}_i$$

A continuación se estiman las diferentes variables:

- α y $\Delta\alpha$:

Se supone que la CM y el BPL están contruidos de acero y tienen, aproximadamente, el mismo coeficiente de dilatación. Por lo tanto, la mejor estimación de $\Delta\alpha$ es el valor nulo y su valor real oscila en el intervalo $\pm \Delta\alpha_{\text{máx}}$. Suponemos que en este intervalo, $\Delta\alpha$ se comporta de acuerdo a una función de probabilidad rectangular, por lo que su incertidumbre típica será:

$$u_{\Delta\alpha} = \frac{\Delta\alpha_{\text{máx}}}{\sqrt{3}}$$

Se considera que los coeficientes de dilatación de los aceros están comprendidos entre $10,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ y $12,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, por lo tanto, la mejor estimación de α será tomar el valor medio $11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Su desviación típica, aplicando la ecuación anterior, resulta ser:

$$u_{\Delta\alpha} = \frac{10^{-6}}{\sqrt{3}}$$

- T y ΔT :

La temperatura de la sala de trabajo puede garantizarse que se encuentra en el intervalo $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ (se puede generalizar, para un intervalo cualquiera en el entorno de 20 °C , como $20\text{ °C} \pm \Delta T_{\text{máx}}$) y que la CM se encuentra, aproximadamente, en equilibrio térmico con el ambiente. De acuerdo a estas consideraciones, la mejor estimación para T es 20 °C y, suponiendo T se adapta a una distribución rectangular en el intervalo $20\text{ °C} \pm \Delta T_{\text{máx}}$, su incertidumbre típica resulta:

$$u_T = \frac{\Delta T_{\text{máx}}}{\sqrt{3}}$$

La diferencia de temperaturas ΔT entre la CM y el BPL se estima de valor nulo ($\Delta T = 0$), pues se supone que ambos se encuentran en equilibrio térmico con el ambiente.

Para evaluar la incertidumbre típica de ΔT , se supone que ΔT se comporta de acuerdo a una función de probabilidad triangular, con su máximo en $\Delta T = 0$ y sus extremos en $\Delta T = \pm 2 \cdot \Delta T_{\text{máx}}$. Esta suposición se basa en lo siguiente:

- La diferencia máxima posible entre la temperatura del BPL y la CM es $2 \cdot \Delta T_{\text{máx}}$.
- Se acepta que es más probable que $\Delta T = 0$ que $\Delta T = \pm 2 \cdot \Delta T_{\text{máx}}$, puesto que el BPL y la CM se encuentran en equilibrio térmico con el ambiente.

Por lo tanto, la incertidumbre típica de ΔT resulta:

$$u_{\Delta T} = \frac{2 \cdot \Delta T_{\text{máx}}}{\sqrt{6}}$$

Sustituyendo para el cálculo de la mejor estimación de c_T :

$$c_T = [(\alpha + 0)(20 + 0 - 20) - \alpha(20 - 20)] \bar{x}_i = 0$$

Para calcular la incertidumbre típica de c_T se calculan los coeficientes de sensibilidad de α , $\Delta\alpha$, T y ΔT , resultando:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_T}{\partial \alpha} &= \Delta T \cdot \bar{x}_i & \frac{\partial c_T}{\partial \Delta\alpha} &= (T + \Delta T - 20) \cdot \bar{x}_i \\ \frac{\partial c_T}{\partial T} &= \Delta\alpha \cdot \bar{x}_i & \frac{\partial c_T}{\partial \Delta T} &= (\alpha + \Delta\alpha) \cdot \bar{x}_i \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores estimados de α , $\Delta\alpha$, T y ΔT :

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_T}{\partial \alpha} &= 0 & \frac{\partial c_T}{\partial \Delta \alpha} &= 0 \\ \frac{\partial c_T}{\partial T} &= 0 & \frac{\partial c_T}{\partial \Delta T} &= \alpha \cdot \bar{x}_i \end{aligned}$$

Y por lo tanto, la incertidumbre típica de c_T finalmente resulta:

$$u_{c_T} = \alpha \cdot \frac{2 \cdot \Delta T_{\text{máx}}}{\sqrt{6}} \cdot \bar{x}_i$$

Sustituyendo el valor de α :

$$u_{c_T} = 9,4 \times 10^{-6} \cdot \Delta T_{\text{máx}} \cdot \bar{x}_i$$

Particularizando para el intervalo de temperatura especificado de $20 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$, resulta:

$$u_{c_T} = 4,7 \times 10^{-5} \cdot \bar{x}_i$$

La estimación de la incertidumbre u_{c_T} es suficientemente "fiable", por lo que el número de grados de libertad, $v(u_{c_T})$, correspondiente será infinito.

1.3.4.- Corrección por redondeo a un múltiplo de la división de escala de la CM (C_E).

Para estimar la corrección debida a la limitación de la CM de apreciar medidas inferiores a su división de escala (E), se supone implícitamente que en la medida se toma como lectura la correspondiente a la división de escala más próxima a la posición indicadora. El máximo error, en valor absoluto, que se puede cometer es $E/2$ y se supone que C_E es una variable aleatoria de distribución de probabilidad rectangular en el intervalo $\pm E/2$. Por lo tanto, su media es nula:

$$C_E = 0$$

y su incertidumbre típica:

$$u_{C_E} = \sqrt{\frac{(E/2)^2}{3}} = \frac{E}{\sqrt{12}}$$

La estimación de la incertidumbre u_{C_E} es suficientemente "fiable", por lo que el número de grados de libertad, $v(u_{C_E})$ correspondiente será infinito.

1.4. Corrección local e incertidumbre típica resultante

El valor estimado de la corrección de calibración en cada punto, sustituyendo en la función modelo los valores estimados de las variables, resulta:

$$c_i = \sum_{h=1}^{N_i} x_{phi} - \frac{\sum_{j=1}^J x_{ij}}{J} + 0$$

y su incertidumbre típica resultante:

- En los puntos de J medidas:

$$u_{C_i}^2 = \sum_{h=1}^{N_i} \left(\frac{U_{phi}}{k_{phi}} \right)^2 + \frac{s_{X_i}^2}{J} + \frac{(\alpha \cdot 2 \cdot \Delta T_{\max} \cdot \bar{x}_i)^2}{6} + \frac{E^2}{12}$$

- En los puntos de 1 medida:

$$u_{C_i}^2 = \sum_{h=1}^{N_i} \left(\frac{U_{phi}}{k_{phi}} \right)^2 + s_{X_i}^2 + \frac{(\alpha \cdot 2 \cdot \Delta T_{\max} \cdot \bar{x}_i)^2}{6} + \frac{E^2}{12}$$

1.5. Incertidumbre expandida resultante

La incertidumbre expandida queda, por tanto:

$$U_{C_i} = k \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{N_i} \left(\frac{U_{phi}}{k_{phi}} \right)^2 + \frac{s_{X_i}^2}{J} + \frac{(\alpha \cdot 2 \cdot \Delta T_{\max} \cdot \bar{x}_i)^2}{6} + \frac{E^2}{12}}$$

Generalmente, la distribución estadística resultante puede estimarse como una distribución normal, debido a que las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que tienen más peso y las otras, tipo B, son suficientemente fiables (grados de libertad infinitos). Por lo tanto, la incertidumbre expandida resultante se calcula para un factor de cobertura $k = 2$, correspondiendo a una probabilidad de cobertura del 95 %.

De no ser así, se tienen que calcular los grados efectivos de libertad de la distribución resultante a partir de los grados de libertad de las distribuciones que contribuyen a ella, mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (según ref. [2]).

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

Siendo:

- $u(y)$: la incertidumbre típica resultante.
- ν_{ef} : grados efectivos de libertad de la distribución resultante.
- ν_i : grados efectivos de libertad de cada una de las N variables de entrada.
- $u_i(y)$: la incertidumbre típica de cada una de las N variables de entrada.

Sustituyendo:

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\frac{\sum_{h=1}^{N_i} u_{phi}^4}{\infty} + \frac{s_{X_i}^4}{J^2(J-1)} + \frac{E^4/12^2}{\infty} + \frac{u_{C_T}^4}{\infty}} = \frac{u^4(y)}{\frac{s_{X_i}^4}{J^2(J-1)}}$$

Una vez conocidos los grados efectivos de libertad, entrando en la tabla de la citada referencia [2], se obtendría el valor de k .

ANEXO 2.- EJEMPLOS NUMÉRICOS

2.1.- Calibración de una CM de división de escala $E = 0,01$ mm.

Se calibra una CM de las siguientes características:

- Rango de indicación $C = 25$ mm.
- División de escala $E = 0,01$ mm.

2.1.1.- Elección de los puntos de calibración y número de medidas.

De acuerdo a la división de escala y al rango de indicación de la CM (tabla 2), se eligen 7 puntos de calibración, cuyos nominales son los siguientes:

0,5 mm – 5,5 mm – 8,5 mm – 12,5 mm
16,5 mm – 20,5 mm – 24,5 mm

Se decide realizar 10 medidas en el punto de calibración de nominal 12,5 mm y una medida en el resto de puntos de calibración.

2.1.2.- Patrones utilizados.

La calibración de la CM se realiza con BPL de las siguientes características:

- Juego de BPL de calidad 1. El certificado de su última calibración proporciona, para cada BPL, su desviación al nominal y su incertidumbre expandida ($k = 2$), valores indicados en la tabla 4.

Nominal (mm)	Última calibración		
	Desviación (μm)	Longitud x_{pi} (mm)	U_{pi} (μm)
0,500	0,2	0,500 2	0,11
4,500	0,0	4,500 0	0,11
8,500	- 0,1	8,499 9	0,11
12,500	0,1	12,500 1	0,11
16,500	0,0	16,500 0	0,11
20,500	0,2	20,500 2	0,11
24,500	0,0	24,500 0	0,11

Tabla 4: Resultados de la última calibración de los BPL.

Se dispone de los BPL que materializan los puntos de calibración, por lo que no es necesario realizar adherencias.

Con la desviación al nominal de cada BPL se obtiene su longitud certificada, sumando el valor de la desviación a la longitud nominal del BPL. Estos datos se muestran en la tabla 4.

2.1.3.- Calibración.

Se realiza la calibración de la forma descrita en los apartados 5.2 y 5.3 del presente procedimiento, obteniéndose las lecturas y resultados que se indican en la tabla 5.

La temperatura durante la calibración se mantiene en $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

Punto de calibración (i)	1	2	3	4	5	6	7
Nominal del patrón (mm)	0,500	4,500	8,500	12,500	16,500	20,500	24,500
Lecturas (mm)	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,51	----	----	----
	0,50	4,50	8,51	12,50	16,50	20,51	24,50
	----	----	----	12,51	----	----	----
	----	----	----	12,51	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,51	----	----	----

Tabla 5: Toma de datos en la calibración de la CM.

Se realizan los cálculos indicados en el punto 5.4 y 6.1, obteniéndose los resultados que se indican en la tabla 6.

Punto de calibración (i)	1	2	3	4	5	6	7
Nominal del patrón (mm)	0,500	4,500	8,500	12,500	16,500	20,500	24,500
X_{pi} (mm)	0,500 2	4,500 0	8,499 9	12,500 1	16,500 0	20,500 2	24,500 0
$U_{pi}(k=2)$ (μm)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Lecturas (mm)	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,51	----	----	----
	0,50	4,50	8,49	12,50	16,50	20,51	24,50
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,51	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
	----	----	----	12,50	----	----	----
\bar{x}_i (mm)	0,50	4,50	8,49	12,502	16,50	20,51	24,50
s_{X_i} (mm)	0,004 2	0,004 2	0,004 2	0,004 2	0,004 2	0,004 2	0,004 2
$s_{\bar{X}_i}$ (mm)	0,004 2	0,004 2	0,004 2	0,001 3	0,004 2	0,004 2	0,004 2
$c_{ci} = x_{pi} - \bar{x}_i$ (mm)	0,000 2	0,000 0	0,009 9	- 0,001 9	0,000 0	- 0,009 8	0,000 0
c_E	0	0	0	0	0	0	0
c_T	0	0	0	0	0	0	0
$u_{\bar{X}_i}$ (μm)	4,2	4,2	4,2	1,3	4,2	4,2	4,2
u_{C_T} (μm)	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	0,16	0,24	0,31	0,39	0,46
u_{C_E} (μm)	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
u_{C_i} (μm)	5,1	5,1	5,1	3,2	5,1	5,1	5,2
U_{C_i} (μm)	10,2	10,2	10,2	6,4	10,2	10,3	10,3
U_{C_i} (mm)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabla 6: Cálculo de parámetros e incertidumbres.

En los resultados, se pone de manifiesto lo indicado en el anexo 1 sobre la corrección C_T , resultando despreciable frente a la división de escala de la CM.

En la tabla 7 se indican los resultados de las contribuciones de incertidumbre del punto de nominal 12,5 mm, punto de 10 medidas.

Magnitud X_i	Estimación x_i (mm)	Incertidumbre típica $u(x_i)$ (mm)	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ (mm)
X_{pi}	12,500 1	$0,055 \cdot 10^{-3}$	Normal	1	$0,055 \cdot 10^{-3}$
\overline{X}_i	- 12,502	0,001 3	Normal	-1	- 0,001 3
C_T	0	0,000 24	Triangular	1	0,000 24
C_E	0	0,002 9	Rectangular	1	0,002 9
C_i	- 0,001 9	Incertidumbre típica combinada (u_{C_i})			0,003 2
		Incertidumbre expandida (U_{C_i})			0,01

Tabla 7: Contribuciones a la incertidumbre combinada en el punto de repetibilidad (nominal 12,5 mm).

En la tabla 8 se indican los resultados de las contribuciones de incertidumbre del punto de nominal 4,5 mm, elegido como punto representativo de los puntos de calibración de una medida.

Magnitud X_i	Estimación x_i (mm)	Incertidumbre típica $u(x_i)$ (mm)	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ (mm)
X_{pi}	4,500 0	$0,055 \cdot 10^{-3}$	Normal	1	$0,055 \cdot 10^{-3}$
\overline{X}_i	- 4,50	0,004 2	Normal	-1	- 0,004 2
C_T	0	0,000085	Triangular	1	0,000 085
C_E	0	0,002 9	Rectangular	1	0,002 9
C_i	0,000 0	Incertidumbre típica combinada (u_{C_i})			0,005 1
		Incertidumbre expandida (U_{C_i})			0,01

Tabla 8: Contribuciones a la incertidumbre combinada en un punto de una medida (nominal 4,5 mm).

2.2.- Calibración de una CM de división de escala $E = 0,001$ mm.

Se calibra una CM de las siguientes características:

- Rango de indicación $C = 25$ mm.
- División de escala $E = 0,001$ mm.

2.2.1.- Elección de los puntos de calibración y número de medidas.

De acuerdo a la división de escala y al rango de indicación de la CM (tabla 2), se eligen 10 puntos de calibración, cuyos nominales son los siguientes:

0,5 mm – 2,5 mm – 5,0 mm – 7,5 mm – 10,0 mm – 12,5 mm
15,0 mm – 17,5 mm – 20,0 mm – 22,5 mm – 24,5 mm

Se decide realizar 10 medidas en cada punto de calibración.

2.2.2.- Patrones utilizados.

La calibración de la CM se realiza con BPL de las siguientes características:

- Juego de BPL de calidad 1. El certificado de su última calibración proporciona, para cada BPL, su desviación al nominal y su incertidumbre expandida ($k = 2$), valores indicados en la tabla 9.

Nominal (mm)	Última calibración (mm)		
	Desviación (μm)	Longitud x_{pi} (mm)	U_{pi} (μm)
0,500	0,2	0,500 2	0,11
2,500	- 0,2	2,499 8	0,11
5,000	0,1	5,000 1	0,11
7,500	- 0,1	7,499 9	0,11
10,000	0,0	10,000 0	0,11
12,500	0,0	12,500 0	0,11
15,000	0,1	15,000 1	0,11
20,000	0,2	20,000 2	0,11
22,500	0,0	22,500 0	0,11
24,500	0,0	24,500 0	0,11

Tabla 9: Resultados de la última calibración de los BPL.

No se dispone del BPL que materializa el punto de calibración de nominal 17,5 mm, por lo que se realizará la adherencia con los bloques de nominales 2,5 mm y 15,0 mm.

Con la desviación al nominal de cada BPL se obtiene su longitud certificada, sumando el valor de la desviación a la longitud nominal del BPL. Estos datos se muestran en la tabla 9.

La longitud patrón e incertidumbre típica en el punto de calibración de nominal 17,5 mm donde se materializa la longitud con la adherencia de $N_i = 2$ bloques, de nominales 2,5 mm y 15,0 mm son las que se indican en la tabla 10.

Nominal del patrón (mm)	17,500
Longitud patrón (mm)	17,499 9
Incertidumbre típica de la longitud patrón (μm)	0,078

Tabla 10: Resultados de la adherencia. Nominal 17,5 mm

2.2.3.- Calibración.

Se realiza la calibración de la forma descrita en los apartados 5.2 y 5.3 del presente procedimiento, obteniéndose las lecturas y resultados que se indican en la tabla 11.

La temperatura durante la calibración se mantiene en $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$.

Punto de calibración (i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nominal del patrón (mm)	0,500	2,500	5,000	7,500	10,000	12,500	15,000	17,500	20,000	22,500	24,500
Lecturas (mm)	0,500	2,501	5,001	7,499	9,998	12,497	15,004	17,497	19,999	22,501	24,498
	0,500	2,501	5,002	7,499	9,999	12,497	15,004	17,497	19,999	22,502	24,498
	0,501	2,501	5,001	7,500	9,998	12,499	15,002	17,499	19,998	22,502	24,499
	0,501	2,500	5,001	7,501	9,998	12,499	15,001	17,499	19,997	22,500	24,500
	0,500	2,501	5,002	7,500	9,999	12,498	15,000	17,498	19,996	22,498	24,500
	0,501	2,500	5,001	7,499	9,998	12,501	15,001	17,501	19,998	22,499	24,499
	0,500	2,500	5,000	7,499	9,998	12,500	15,002	17,500	19,997	22,498	24,499
	0,500	2,501	5,001	7,500	9,999	12,500	15,004	17,500	19,998	22,497	24,498
	0,501	2,501	5,001	7,499	10,000	12,498	15,002	17,498	19,998	22,497	24,499
	0,501	2,501	5,002	7,499	10,001	12,498	15,001	17,498	19,998	22,497	24,499

Tabla 11: Toma de datos en la calibración de la CM.

Se realizan los cálculos indicados en el punto 5.4 y 6.1 obteniéndose los resultados que se indican en la tabla 12.

Punto de calibración (i)	1	2	3	4	5	6	7	6	8	9	10
Nominal del patrón (mm)	0,500	2,500	5,000	7,500	10,000	12,500	15,000	17,500	20,000	22,500	24,500
x_{pi} (mm)	0,500 2	2,499 8	5,000 1	7,499 9	10,000 0	12,500 0	15,000 1	17,499 9	20,000 2	22,500 0	24,500 0
u_{pi} (μm)	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,078	0,055	0,055	0,055
Lecturas (mm)	0,500	2,501	5,001	7,499	9,998	12,497	15,004	17,497	19,999	22,501	24,498
	0,500	2,501	5,002	7,499	9,999	12,497	15,004	17,497	19,999	22,502	24,498
	0,501	2,501	5,001	7,500	9,998	12,499	15,002	17,499	19,998	22,502	24,499
	0,501	2,500	5,001	7,501	9,998	12,499	15,001	17,499	19,997	22,500	24,500
	0,500	2,501	5,002	7,500	9,999	12,498	15,000	17,498	19,996	22,498	24,500
	0,501	2,500	5,001	7,499	9,998	12,501	15,001	17,501	19,998	22,499	24,499
	0,500	2,500	5,000	7,499	9,998	12,500	15,002	17,500	19,997	22,498	24,499
	0,500	2,501	5,001	7,500	9,999	12,500	15,004	17,500	19,998	22,497	24,498
	0,501	2,501	5,001	7,499	10,000	12,498	15,002	17,498	19,998	22,497	24,499
	0,501	2,501	5,002	7,499	10,001	12,498	15,001	17,498	19,998	22,497	24,499
\bar{x}_i (mm)	0,500 5	2,500 7	5,001 2	7,499 5	9,998 8	12,498 7	15,002 1	17,498 7	19,997 8	22,499 1	24,498 9
s_{X_i} (mm)	0,000 53	0,000 48	0,000 63	0,000 71	0,001 03	0,001 34	0,001 45	0,001 34	0,000 92	0,002 02	0,000 74
$s_{\bar{X}_i}$ (mm)	0,000 17	0,000 15	0,000 20	0,000 22	0,000 33	0,000 42	0,000 46	0,00042	0,000 29	0,000 64	0,000 23
$C_{ci} = x_{pi} - \bar{x}_i$ (mm)	-0,000 3	-0,000 9	-0,001 1	0,000 4	0,001 2	0,001 3	-0,002 0	0,001 2	0,002 4	0,000 9	0,001 1
C_T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$u_{\bar{X}_i}$ (μm)	0,17	0,15	0,20	0,22	0,33	0,42	0,46	0,42	0,29	0,64	0,23
u_{C_T} (μm)	0,014	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42	0,49	0,56	0,63	0,69
u_{C_E} (μm)	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
u_{C_i} (μm)	0,34	0,34	0,39	0,43	0,53	0,63	0,69	0,72	0,70	0,95	0,79
U_{C_i} (μm)	0,68	0,68	0,77	0,85	1,05	1,25	1,38	1,43	1,40	1,90	1,58
U_{C_i} (mm)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 12: Cálculo de parámetros e incertidumbres.

En la tabla 13 se indican los resultados de las contribuciones de incertidumbre de uno de los puntos de calibración, punto de nominal 17,500 mm.

Magnitud X_i	Estimación x_i (mm)	Incertidumbre típica $u(x_i)$ (mm)	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ (mm)
X_{pi}	17,499 9	$0,078 \cdot 10^{-3}$	Normal	1	$0,078 \cdot 10^{-3}$
\bar{X}_i	17,4987	0,000 42	Normal	-1	- 0,000 42
C_T	0	0,000 49	Triangular	1	0,000 49
C_E	0	0,0002 9	Rectangular	1	0,000 29
C_i	0,001 2	Incertidumbre típica combinada (u_{C_i})			0,000 72
		Incertidumbre expandida (U_{C_i})			0,002

Tabla 13: Contribuciones a la incertidumbre combinada en el punto de calibración de nominal 17,5 mm.

Metrología

NIPO: 113-19-006-0